

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт им. О.Байконурова

Кафедра «Металлургических процессов, теплотехники и технологии специальных  
материалов»

Нұрғабыл Назерке Қаршығақызы

Изучение переработки золотосодержащих продуктивных растворов и автоматизация  
процесса

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7M07201 - «Автоматизация и цифровизация металлургических процессов»

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт им. О.Байконурова

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Нұрғабыл Назерке Қаршығақызы

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Изучение переработки золотосодержащих продуктивных растворов и автоматизация процесса
Направление подготовки	7M07201 - «Автоматизация и цифровизация металлургических процессов»

Научный руководитель  
Доктор Ph.D, ассоц.- проф  
*Мамырбаева К.К.*  
« 17 » 06 2024 г.

Канд. техн. наук.  
ассоц. профессор.  
*Кошимбаев Ш. К.*  
« 17 » 06 2024 г.

Рецензент  
канд. техн. наук  
*Койжанова А.К.*  
« 17 » 06 2024 г.

Норм контроль  
канд. техн. наук  
*Коньратбекова С.С.*  
« 17 » 06 2024 г.

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

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой МПТиТСМ  
доктор PhD, канд. техн.наук.ассоц.  
профессор.

*Чепуштанова Т.А.*  
« 16 » 06 2024 г.

Алматы 2024


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт им. О.Байконурова

Кафедра «Металлургических процессов, теплотехники и технологии специальных  
материалов»

7M07201 - «Автоматизация и цифровизация металлургических процессов»

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
МПТиТСМ, доктор PhD, канд.  
техн. наук., ассоц. профессор.  
Чепуштанова Т.А.  
«23» ноября 2022 г

**ЗАДАНИЕ**  
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Нургабыл Назерке Қаршығақызы

Тема Изучение переработки золотосодержащих продуктивных растворов и автоматизация процесса

Утверждена приказом ректора от «23» ноября 2022 г. № 408 - П

Срок сдачи законченной диссертации «01» июня 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: характеристика сорбентов; методики анализа на золото

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) современное состояние технологии переработки золотосодержащих и материалов;
- б) процесс сорбции золотосодержащих продуктивных растворов;
- в) проведение экспериментальных работ по селективному извлечению золота из продуктивных растворов сорбцией;
- г) автоматизация процесса;
- д) экономика процессов извлечения золота;
- ж) безопасность и охраны труда;
- з) приложения.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): демонстрационный материал с результатами исследований представить на 16 слайдах.

Рекомендуемая основная литература:

1 Лолейт С.И., Меретуков М.А., Стрижко Л. С., Гурин К. К. Современные проблемы металлургии и материаловедения благородных металлов. М.: Изд-во МИСИС, 2012. 196 с.





2 Бочаров З.В., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В. Технология переработки золотосодержащего сырья. – М.: Издат. дом МИСИС, 2011.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации


Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитический обзор по переработке золотосодержащих руд гидromеталлургической технологией	19.01.2024 г	
Экспериментальная часть	25.02.2024 г	
Автоматизация процесса	27.03.2024 г	
Расчет затрат на проведение исследований	20.04.2024 г	
Безопасность и охрана труда	27.05.2024 г	
Заключение	05.06.2024 г	

**Подписи**

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

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Экономика процессов извлечения золота	К.К. Мамырбаева доктор Ph.D, ассоц.-проф	19.06.2024	
Автоматизация процесса	Ш. К. Кошимбаев канд. техн. наук., ассоц. - профессор.	17.06.2024	
Охрана труда	К.К. Мамырбаева доктор Ph.D, ассоц.-проф	11.06.2024	
Нормоконтролер	С. С. Коныратбекова канд. техн. наук	17.06.2024	

Научный руководитель

  
подпись

Мамырбаева К.К.

Научный руководитель

  
подпись

Кошимбаев Ш. К.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись

Нұрғабыл Н.Қ.

Дата

«17» 06 2024 г.

## АННОТАЦИЯ

Диссертация тапсырмадан, кіріспеден, негізгі және эксперименттік бөліктерден, қорытындыдан және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жалпы жұмыс көлемі компьютер терген 74 бетті құрайды, оның ішінде 7 сурет және 8 кесте. Пайдаланылған әдебиеттер тізімі 46 атаудан тұрады.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты белсендірілген көмір мен шунгит негізінде алынған сорбенттердің сорбциялық қасиеттерін зерттеу, сондай-ақ процесті автоматтандыру арқылы алтын алудың тиімділігін арттыру болып табылады.

Оңтайлы сорбентті анықтау бойынша эксперименттер цианид ерітіндісімен жүргізілді. Noritro сорбенттерін, АКВАСОРБты және шунгит негізіндегі сорбентті қолдана отырып, Алтынды сорбциялау кезінде noritro маркалы ионит сыйымдылықтың ең үлкен мәніне ие екендігі анықталды.

Диссертацияның 3 және 4 бөлімдерінде сорбциялық цехта қауіпсіздікті сақтау ережелерінің экономикалық есептеулері мен принциптері көрсетілген.

## АННОТАЦИЯ

Диссертация состоит из задания, введения, основной и экспериментальной частей, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы составляет 74 страниц, набранных компьютером, в том числе 7 рисунков и 8 таблиц. Список использованной литературы состоит из 46 наименований.

Целью диссертационной работы является изучение сорбционных свойств сорбентов, полученных на основе активированного угля и шунгита, а также повышение эффективности получения золота за счет автоматизации процесса.

Эксперименты по определению оптимального сорбента проводились с цианистым раствором. Установлено, что при сорбции золота с использованием сорбентов NoritRO, АКВАСОРБ и сорбента на основе шунгита, наибольшим значением емкости обладает ионит марки NoritRO.

В 3 и 4 разделах диссертационной работе изложены экономические расчеты и принципы правил соблюдения безопасности в сорбционном цеху.

## ANNOTATION

Dissertation consists of a task, an introduction, the main and experimental parts, a conclusion and a list of references. The total amount of work is 74 computer-typed pages, including 7 figures and 8 tables. The list of references consists of 46 titles.

The purpose of the dissertation is to study the sorption properties of sorbents obtained on the basis of activated carbon and shungite, as well as to increase the efficiency of gold extraction using process automation.

Experiments to determine the optimal sorbent were carried out with a cyanide solution of the composition. It was found that when gold is sorbed using NoritRO sorbents, AQUASORB and a sorbent based on shungite, the ionite of the NoritRO brand has the highest capacity value.

Sections 3 and 4 of the dissertation set out economic calculations and principles of safety rules in the sorption shop.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Аналитический обзор по переработке золотосодержащих руд гидрометаллургической технологией	9
1.1 Золото и его свойства	9
1.2 Минералы золота	11
1.2.1 Золото в твердом растворе	12
1.2.2 Коллоидное золото	12
1.2.3 Поверхностное золото	13
1.3 Современное состояние минерально-сырьевой базы золотосодержащих руд в мире и Казахстане	14
1.4 Технологии переработки золотосодержащих руд	16
1.4.1 Процесс обогащение золота методом гравитационной сепарации	16
1.4.2 Процесс флотационного обогащение золота	19
1.5 Методы выщелачивания золота	20
1.5.1 Процесс выщелачивания золота цианированием	21
1.5.2 Кучное выщелачивание золото	23
1.5.3 СІР и СІІ выщелачивания золота	26
1.5.4 Бактериальное выщелачивание золота	27
1.5.5 Тиосульфатное выщелачивание золота	28
1.6 Сорбционное извлечение золота из продуктивных выщелачивания	29
1.7 Автоматизация в процессе обогащения золота	31
2 Экспериментальная часть	34
2.1 Исходные материалы и оборудование	34
2.2 Методика экспериментов	34
2.3 Результаты физико-химических исследований	35
2.4 Исследования по извлечению золота сорбцией	37
2.5 Процесс сорбции на золотоизвлекательной фабрике Акбакай	41
2.6 Автоматизация процесса сорбционного цианирования золота	44
3 Экономика процесса сорбции	48
4 Принципы правил соблюдения безопасности в сорбционном цеху	49
Заключение	52
Список литературы	53
Приложения А	57

## ВВЕДЕНИЕ

Золото благодаря уникальным свойствам находит широкое применение в электронной технике, ювелирном производстве, медицине, нанотехнологии и т.д., кроме этого, его активно применяют как актив во всех странах мира.

В настоящее время с бурным развитием электронной промышленности, нанотехнологии и мировой нестабильностью резко возрос спрос на золото [1].

Казахстан обладает крупными запасами золота, по данным World Gold Council, на 1 июня 2022 года запасы золота в Казахстане составляли 373,4 т. Примерно 60 % золота в стране сосредоточено в первичных месторождениях и 38 % золота – в полиметаллических рудах. Однако, многие казахстанские месторождения относятся к бедным упорным золотосодержащим месторождениям с низкими содержаниями золота. Для поддержания объема производства золота в производство все шире вовлекаются низкосортное золотосодержащее сырье. Извлечение золота из таких руд производится, главным образом, с использованием процесса цианирования с одновременным и/или последующим селективным рафинированием и концентрированием золота процессом ионного обмена (сорбцией) [2, 3]. Альтернативными реагентами выщелачивания являются тиомочевина, тиосульфат, галогенидные растворы и др. [4].

*Актуальность* - Казахстан занимает девятое место в мире по разведанным запасам золота. По добыче республика входит в двадцать ведущих стран. Наблюдается значительный потенциал роста добычи золота, обеспеченность подтвержденными запасами при текущих объемах добычи составляет примерно 19 лет (по другим данным, до 80 лет за счет включения россыпей, минерализованных образований и вторичных кварцитов, имеющих весьма высокое среднее содержание золота в руде). В связи с истощением богатых руд золота Республики Казахстан принципиальное значение имеет разработка оптимальной технологии переработки золотосодержащих бедных руд и внедрение автоматизации процесса. Цианидное выщелачивание руд с низким содержанием ценного компонента позволяет вовлечь в обработку разные типы руд и хвостов. Полученный продуктивный раствор золота можно перерабатывать процессами сорбции или экстракции. Выбор оптимальной технологии переработки продуктивного раствора и внедрение элементов автоматизации является актуальной проблемой.

*Цель* – изучение способа переработки золотосодержащих продуктивных растворов сорбцией и автоматизация процесса.

*Научная новизна* – определены влияния примесей металлов на сорбцию золота, а также повышение эффективности извлечения золота с использованием автоматизации процесса. Установлено, что при сорбции золота с использованием сорбентов NoritRO, АКВАСОРБ и сорбента на основе шунгита, наибольшим

значением емкости обладает ионит марки NoritRO. Оптимальным значением pH среды для извлечения золота с NoritRO и АКВАСОРБ явился 10.

*Методологическая основа исследований* - при выполнении исследований по теме магистерской диссертации были использованы следующие методы физико-химического анализа:

- рентгендифракционный, рентгенофлуоресцентный методы анализа веществ, в результате которого устанавливается точный качественный и количественный состав исходных, промежуточных твердых образцов;
- атомно-адсорбционный спектрометрический метод анализа;
- pH-метрия;
- лабораторная сорбционная колонка;
- электронно-зондовый микроанализатор.

*Практическая база исследования по теме диссертации* проведены на кафедрах «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» и «Автоматизация и управление», а также на золотоизвлекательной фабрике Акбакай.

*Практическая значимость работы:* результаты исследований углубляют и дополняют сведения по переработке золотосодержащих цианистых продуктивных растворов, содержащих различных примесей металлов с применением процесса сорбции и могут быть использованы в аналогичных золотоизвлекательных предприятиях.

*Публикация.* Результаты исследований будет опубликовано в статье «Исследование сорбции золота активированным углем в присутствии металлов примесей» (авторы Н.Қ. Нұрғабыл, К. К. Мамырбаева) в журнале «Горный журнал» Республики Казахстана (выписка №20240503 от 03.05.2024 г.).



# **1 Аналитический обзор по переработке золотосодержащих руд гидрометаллургической технологией**

## **1.1 Золото и его свойства**

Золото – это химический элемент с символом Au (от латинского *aurum*) и атомным номером 79, что делает его одним из элементов с более высоким атомным номером, встречающихся в природе. Золото – плотный, мягкий, ковкий и пластичный металл. Это хороший проводник электричества и тепла, на него не влияет воздушная или водная эрозия. Золото также нетоксично и немагнитно. Эти свойства делают его полезным в широком спектре применений, включая ювелирные изделия, монеты, электронику и медицину. Оно также используется в качестве убежища для инвесторов во времена экономической неопределенности, поскольку широко считается стабильным средством сбережения. Цвет чистого золота ярко-желтый, но его можно сплавлять с другими металлами для получения целого ряда различных цветов.

Помимо использования в ювелирных изделиях и чеканке монет, золото находит множество промышленных применений. Золото является отличным проводником электричества и не подвержено воздушной или водной эрозии, что делает его полезным в производстве электроники и электрооборудования.

Его также используется в области медицины, поскольку оно нетоксично и может использоваться при имплантации и стоматологических работах. Золото также используется в аэрокосмической промышленности в качестве теплозащитного покрытия и в производстве стекла для высококачественной оптики и линз. Золото также можно использовать в качестве инвестиции. Его широко считают средством сбережения, и оно использовалось в качестве валюты на протяжении тысячелетий. Сегодня золото в основном используется в качестве инвестиций в виде слитков, монет или биржевых фондов (ETF) [5].

Золото также широко используется в индустрии моды. Оно считается символом роскоши и богатства и часто используется в высококачественных часах, солнцезащитных очках и других модных аксессуарах. Золото также является металлом, который можно перерабатывать, его можно извлекать из промышленных отходов и электронных обрезков, это устойчивый способ вернуть золото на рынок. В целом, золото является универсальным и ценным элементом, который используется в широком спектре применений и отраслей промышленности.

Также используется в области химии, поскольку оно является мощным катализатором многих химических реакций. Наночастицы золота можно использовать для катализации реакций, которые затруднены или невозможны при использовании других катализаторов. Золото также используется в области медицины, в частности, при лечении рака. Наночастицы золота могут

использоваться для доставки лекарств непосредственно к раковым клеткам, что может значительно повысить эффективность лечения [6].

Кроме того, золото также используется в области энергетики. Золото является эффективным проводником электроэнергии, поэтому его используют в солнечных панелях и других системах возобновляемой энергетики. Золото также используется в производстве водородных топливных элементов, которые являются многообещающей технологией для производства экологически чистой энергии. Его также используется в области очистки воды. Наночастицы золота можно использовать для удаления примесей из воды, делая ее безопасной для питья. Эта технология особенно полезна в развивающихся странах, где доступ к чистой воде ограничен.

Подводя итог, можно сказать, что золото является ценным и универсальным элементом, который используется в широком спектре применений, включая ювелирные изделия, чеканку монет, электронику, медицину, энергетику и очистку воды. Его уникальные свойства делают его полезным в самых разных областях, а его ценность и стабильность делают его популярной инвестицией. Золото также играет важную роль в области искусства и архитектуры. Сусальное золото, получаемое путем измельчения золота в тонкий лист, веками использовалось для позолоты статуй, зданий и рукописей. Сусальное золото часто используется для создания замысловатых дизайнов и украшений снаружи и внутри зданий, добавляя им нотку роскоши и элегантности. Золото также используется в области оптики, особенно в телескопах, камерах и объективах. Золотые покрытия используются для изготовления зеркал и отражателей, которые обладают высокой отражающей способностью и долговечностью. Золото также используется в области стоматологии, в частности, при производстве коронок, мостовидных протезов и других зубных протезов [7].

Другое применение золота – в аэрокосмической сфере, золото используется в качестве покрытия для защиты внешних поверхностей космических аппаратов и другого оборудования от суровых условий космоса. Золото также используется в аэрокосмической отрасли из-за его способности отражать инфракрасное излучение, которое помогает охлаждать космический корабль. Добыча золота является важным источником дохода для многих стран, особенно в Африке, Южной Америке и Австралии. Это трудоемкая отрасль, которая может оказывать значительное воздействие на окружающую среду. Ответственные методы добычи и нормативные акты необходимы для смягчения негативных последствий золотодобычи и сохранения природных ресурсов для будущих поколений [8].

## **1.2 Минералы золота**

Главным преобладающим минералом золота является самородный металл. В золотых сплавах, когда содержание серебра превышает 20 %, сплав называется электрум. Другие сплавы золота встречаются редко и, как правило, встречаются в определенных рудах; например, два медно-золотых сплава: аурикуприд  $[Cu_3Au]$  и тетрааурикуприд  $[AuCu]$  встречаются в медно-порфиновых рудах с более высоким содержанием золота (Кемесс, Британская Колумбия, Канада). Золото, сплавленное с элементами платиновой группы (PGE), встречается в рудных месторождениях PGE, а мальдонит  $[Au_2Bi]$  чаще встречается в высокотемпературных мезотермальных месторождениях золота (Пого, Алабама, США; Навачаб, Намибия). После самородного золота и электрума теллуриды являются наиболее распространенными минералами золота, за которыми следует ауристибит  $[AuSb_2]$ . Калаверит  $[AuTe_2]$  и сильванит  $[(Au,Au)Te_2]$  являются наиболее распространенными теллуридами, составляющими значительную долю пробирного золота в ряде золоторудных месторождений (Фиджи; Австралия; Кумтор, Киргизстан; Кенсингтон, Алабама, США; Ладкуски, Миссури).

Золото является наиболее инертным металлом; следовательно, в природе встречается не так много соединений золота, как указано в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Минералы золото

Самородные элементы, сплавы и металлические соединения	Химическая формула
Самородное золото (<20 мол.% Ag)	Au
Электрум (20-80 мол.% Ag)	(Au,Ag)
Палладиянское золото (порпезит)	(Au,Pd)
Родиевое золото (родит)	(Au,Rh)
Иридное золото	(Au,Ir)
Платиновое золото	(Au,Pt)
Золотая амальгама	(Au,Ag)Hg
Вейшанит	(Au,Ag) <sub>3</sub> Hg <sub>2</sub>
Мальдонит	Au <sub>2</sub> Bi
Тетра-аурикуприд	AuCu
Гунчинит	Au <sub>2</sub> Pb
Богдановит	Au <sub>5</sub> (Cu,Fe) <sub>3</sub> (Te,Pb) <sub>2</sub>
Бессмертный Аукун	(Te,Pb)
Сульфид/селенид	
Уитенбогаардит	Ag <sub>3</sub> AuS <sub>2</sub>

*Продолжение таблицы 1.1*

Самородные элементы, сплавы и металлические соединения	Химическая формула
Теллуриды	
Калаверит	$AuTe_2$
Креннерит	$(Au,Ag)Te_2$
Мутманнит	$(Au,Ag)Te$
Костовит	$CuAuTe_4$
Монтбрайт	$(AuSb)_2Te_3$
Нагягит	$[Pb(Pb,Sb)S_2] [Au,Te]$
Силикаты/Прочие	
В виде хлорита	$(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$
Ауроантимонит	$AuSbO_3$

Несколько уникальные характеристики золотых минералов, отличающие их от других минералов, включают их высокий удельный вес, яркость (высокую отражательную способность) и твердость, измеряемую по шкале Виккерса [9].

### **1.2.1 Золото в твердом растворе**

Золото в твердом растворе – это золото, атомарно распределенное в кристаллической структуре сульфидных минералов, таких как пирит и арсенопирит. Первое косвенное упоминание о золоте из твердых растворов было сделано Бургом, который использовал термин "невидимое золото" для описания субмикроскопического золота в пирите с рудника Брадисор в Румынии. Под этот термин подпадает как твердорастворимое, так и коллоидное золото.

Золото в твердом растворе, как правило, концентрируется преимущественно в арсенопирите, максимальная концентрация которого, по имеющимся данным, составляет 1,7 % (м/м) [10].

### **1.2.2 Коллоидное золото**

Термин "коллоидное золото" был введен для описания дискретных субмикронных включений золота в сульфидных минералах, невидимых с помощью оптической или обычной сканирующей электронной микроскопии (SEM), но обнаруживаемых с помощью углубленного анализа концентраций SIMS, а также визуализируемых и анализируемых с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HR-TEM).

Коллоидное золото ‘соединяет’ золото в твердом растворе и видимые в оптический микроскоп золотые включения, демонстрируя таким образом преемственность между этими двумя формами золота.

Коллоидное золото может быть продуктом растворения золота в твердом растворе или образования зародышей адсорбированного золота на поверхности. Он также образуется вдоль ‘фронта реакции’, где сульфид, не содержащий золота, заменяет сульфид или арсенидсодержащий твердый раствор золота. Размер коллоидного золота колеблется от 5 до 500 нм, что также соответствует размеру стелек в жидких коллоидных растворах. Коллоидное золото в основном имеет сферическую форму и не обязательно сосредоточено в сульфидной матрице, поскольку оно также наблюдалось в окружающих глинистых минералах. Коллоидное золото также образуется в результате коагуляции во время обжига, когда пирит окисляется с образованием магнетита, маггемита и гематита, а также может образовываться при окислении под давлением и биологическом выщелачивании [11].

### **1.2.3 Поверхностное золото**

Поверхностное золото – это золото, обнаруженное на поверхности минеральных частиц, наиболее классическим примером которого является золото, адсорбированное на углеродистых частицах. Поверхностное золото образуется в результате сорбции, восстановительного осаждения (гальванизации), осаждения и, возможно, ионообменного осаждения из золотосодержащих растворов. В скрубберах для сжигания отходящих газов он может быть продуктом конденсации летучих соединений золота ( $\text{AuCl}_2$ ,  $\text{AuCl}(\text{CO})$ ). Лучшими примерами сорбированного золота являются золото, предварительно обработанное углеродсодержащим веществом или нанесенное на активированный уголь. Растворенное золото восстанавливающе осаждается на пирите как в природе, так и в процессе переработки. Поверхностное содержание золота было измерено на углеродсодержащем материале из Кортеза (Невада, США) в концентрациях до 15 частей на миллион в проанализированном поверхностном слое толщиной 12 нм, что соответствует объемной концентрации 1,7 г/т золота. Восстановительная адсорбция золота на медных минералах была продемонстрирована Адамсом и соавторами [12].

## **1.3 Современное состояние минерально-сырьевой базы золотосодержащих руд в мире и Казахстане**

***Современное состояние минерально-сырьевой базы золотосодержащих руд в мире.*** На сегодняшний день золото остается важным и востребованным минеральным ресурсом во всем мире. Минеральная база золотосодержащих руд продолжает оставаться значительной, и в различных странах имеются значительные месторождения золота.

Несколько стран известны своими значительными запасами золота. Такие страны, как Австралия, Россия, Китай, Соединенные Штаты, Канада, Перу и Южная Африка, являются одними из крупнейших производителей золота и обладателей золотых резервов.

Работы по разведке золота ведутся во многих регионах мира, компании инвестируют в геологические изыскания, программы бурения и передовые технологии для обнаружения новых месторождений золота. Горнодобывающие предприятия также активно ведутся как в существующих, так и в развивающихся золотодобывающих регионах.

Усовершенствования в методах разведки, добычи полезных ископаемых и технологиях переработки руды позволили более эффективно извлекать золото из различных типов руд. Эти технологические достижения способствовали разработке новых золотых рудников и оптимизации существующих операций.

Экологическая устойчивость и ответственные методы ведения горных работ приобретают все большее значение в золотодобывающей промышленности. Компании принимают меры по минимизации воздействия горных работ на окружающую среду, содействию рекультивации и реабилитации районов добычи полезных ископаемых и обеспечению благополучия местных сообществ [13].

Золото продолжает играть значительную роль в мировой экономике, спрос на него обусловлен ювелирными изделиями, инвестициями, резервами центральных банков и промышленным применением. На цену золота влияют различные факторы, включая экономические условия, геополитические события, колебания валютных курсов и настроения инвесторов.

Проблемы, с которыми сталкивается золотодобывающая промышленность, включают снижение качества руды, увеличение эксплуатационных расходов, нормативные требования и отношения с общественностью. Однако существуют возможности для инноваций, устойчивой практики и партнерских отношений для решения этих проблем и обеспечения долгосрочной жизнеспособности золотодобывающих предприятий.

Перспективы золотодобывающего сектора остаются позитивными, что обусловлено сохраняющимся спросом на золото, геологоразведочными работами, направленными на открытие новых месторождений, достижениями в области технологий добычи и адаптацией лучших отраслевых практик. Сотрудничество между заинтересованными сторонами отрасли,

правительствами и сообществами будет иметь важное значение для устойчивого развития глобальной базы золотых ресурсов.

В целом, минерально-сырьевая база золотосодержащих руд продолжает оставаться важным активом для стран по всему миру, поддерживая экономическое развитие, занятость и инвестиционные возможности в горнодобывающем секторе. Продолжение геологоразведочных работ, ответственные методы добычи и инновации станут ключевыми факторами в раскрытии всего потенциала мировых запасов золота при одновременном обеспечении экологической и социальной ответственности [14].

***Современное состояние минерально-сырьевой базы золотосодержащих руд в Казахстане.*** В течение последних десятилетий наблюдается снижение качества минерального сырья разрабатываемых месторождений. В связи с чем неуклонно растет значение освоения месторождений с низкосортными рудами: бедные, забалансовые, труднообогатимые, упорные. В последнее время увеличивается доля золота, извлекаемого из упорных руд, эффективная переработка которых требует разработку более сложных и совершенных схем, включающих предварительную обработку перед цианированием, обеспечивающую максимально полное вскрытие золота. Благодаря все большему вовлечению в эксплуатацию данного типа сырьевых ресурсов уже сегодня наблюдается значительная тенденция прироста производства золота. В основном, этому способствует два фактора: во-первых, открытие крупных месторождений упорно го золота с высоким содержанием ценного компонента, а во-вторых, промышленное внедрение современных технологий и научных разработок. Таким образом, научно-технические задачи, стоящие перед современной золотодобывающей отраслью и направленные на решение проблем извлечения золота из упорных руд, могут быть отнесены к числу наиболее важных и актуальных во всем мире.

Казахстан характеризуется наличием богатой минерально-сырьевой базы, имеющей значительный потенциал не только в рамках страны, но и в мировом масштабе. В Казахстане разведано и учитывается более 90 видов полезных ископаемых, позволяющие удовлетворить внутренние потребности в минеральном сырье. Довольно большая доля минерального сырья поставляется на внешний рынок, обеспечивая более чем на 70 % объем внешней торговли. Государственным балансом учитывается более 5 тысяч месторождений по всем видам полезных ископаемых. По разведанным запасам большинства полезных ископаемых Казахстан входит в первую десятку мировых держав [15].

Золоторудная отрасль страны в целом обеспечена балансовыми запасами золотосодержащих руд с учетом достигнутой производительности горнодобывающих предприятий на срок по наиболее крупным предприятиям до 30 лет (из 272 балансовых объектов в недропользовании – 160). В последние 15-18 лет практически на большинстве месторождений легкодоступные близ

поверхностные золотосодержащие руды уже отработаны, а оставшиеся на глубине стали низкорентабельными, в связи с чем для их разработки нужна новая технология добычи.

Согласно последним статистическим данным Gold Fields Mineral Services (GFMS), дочерней компании Thomson Reuters, Китай возглавил мир в 2019 году в области добычи золота, за ним следуют Австралия и Россия. Казахстан также сделал значительные удары в своей производстве золота, увеличив свою добычу с 20 тонн в начале 1980-х до 47,8 тонн в 2014 году, заняв 16-е место по всему миру.

Страна стремится сохранять годовую цель производства 70 тонн золота, что возможно с учетом существенных минеральных ресурсов. По раскрытым данным золотых резервов Казахстан занимает третье место в Сообществе независимых государств (СНГ) и 14-е в мире.

В общей сложности 237 мест были идентифицированы как содержащие золотые депозиты, включая 122 коренных, 81 комплекс и 34 рассеянные места. Большинство этих депозитов расположены в Восточной, Северной и Центральной Казахстане, с заметными концентрациями в Калбинский и Рудно-Алтайский, Кокшетауский и Жетыгаринский областях.

Примечательно, что в то время, как золотодобывающие компании составляют приблизительно одну треть производства золота в стране, остальное происходит из других отраслей, включая мед и цинк, где золото является вторичным продуктом. К ведущим предприятиям по производству золота в Казахстане относятся «Kazinc» и «Kazakhmys Plc», оба крупных игрока в горнодобывающем секторе страны [16].

#### **1.4 Технологии переработки золотосодержащих руд**

Добыча золота относится к процессу отделения золота от золотосодержащей руды. Содержание золота в природе низкое. Для того, чтобы извлечь золото, предварительно руда поступает обогащение [17].

##### **1.4.1 Процесс извлечения золота методом гравитационной сепарации**

Гравитационная сепарация золота относится к процессу извлечения и разделения золота с использованием различной скорости и направления движения минерала с различными размерами частиц, свойствами и пропорциями под совместным действием силы тяжести, центробежной силы, сопротивления среды и механической прочности [18].



Гравитационная сепарация золота является старейшим процессом извлечения золота. Золото обычно встречается в виде мономерного самородного золота на россыпных золотых рудниках, и размер частиц обычно превышает 16 г/т. Таким образом, гравитационная сепарация золота является одним из наиболее эффективных и экономичных методов обработки для извлечения россыпного золота. Однако, как правило, процесс гравитационной сепарации одного золота не подходит для добычи золоторудной руды, и в сочетании с другими процессами извлечения золота эффект разделения золота в жилах будет лучше.

**Процесс отсадки золота.** Отсадочный метод извлечения золота – это своего рода процесс обогащения золотой руды с отсадочной машиной в качестве основной машины для извлечения золота. Отсадочная машина имеет ряд достоинств, включая простую конструкцию, большую производительность на единицу площади, а также удобство эксплуатации и обслуживания. На современных крупнотоннажных золотодобывающих судах отсадочная машина стала основным золотоизвлекающим оборудованием, которое может извлекать мономерное золото непосредственно из россыпного золота. Основными факторами, влияющими на работу отсадки, являются: ход и заваривание, подкормка недоросля, искусственный подстилочный камень и толщина слоя, минеральная вода, количество корма и сита.

**Процесс извлечения золота на встряхивающем столе.** Добыча золота на встряхивающем столе — это процесс обогащения золотой руды с встряхивающим столом в качестве основного оборудования для извлечения золота. Встряхивающий стол представляет собой оборудование для гравитационной сепарации, которое сочетает в себе скошенный поток воды с механическим встряхиванием. Встряхивающий стол состоит из трех частей: поверхности станины, рамы и конвейера. Поверхность станины приводится в движение трансмиссионным механизмом для совершения продольного возвратно-поступательного движения. После того, как суспензия подается на встряхивающий стол, она подвергается боковому потоку воды и продольному возвратно-поступательному встряхиванию на поверхности станины. Частицы руды достигают минерального слоя в зависимости от удельного веса и размера частиц, перемещаются в разных направлениях поверхности пласта и, наконец, разделяются на концентрат, промежуточные продукты и хвосты. Эффективный размер частиц рекуперации встряхивающего стола составляет 2-0,04 мм.

**Процесс извлечения золота спиральным желобом.** Извлечение золота спиральным желобом — это разновидность процесса обогащения со спиральным желобом в качестве основного оборудования для извлечения золота. Как деревянный (или стальной) узкий желоб с наклоном от 3 ° до 4 ° (максимум от 14 ° до 16 °), принцип разделения спирального желоба следующий: после подачи пульпы в желоб из желоба под совместным действием силы потока воды сила

тяжести руды (или центробежная сила), Трение между рудой и дном желоба, минералы разной плотности завершают разрыхление слоя и разделение, где минералы с большей плотностью на дне резервуара становятся концентратом, а минералы с малой плотностью становятся хвостами. Спиральный желоб относится к прерывистому режиму работы. Когда концентрат на дне будет отложен на определенную высоту, подача будет прекращена и концентрат будет отсортирован.

**Процесс извлечения золота спиральным концентратом.** Процесс извлечения золота на спиральной обогатительной фабрике представляет собой процесс извлечения золота с использованием спиральной обогатительной фабрики в качестве основного оборудования. Этот процесс извлечения золота заключается в следующем: рудная суспензия, подаваемая сверху желоба, течет вниз по желобу в форме спирали. Во время течения частицы руды расслаиваются. Крупные частицы с малой плотностью распределяются по внешнему краю спирального желоба, а мелкие частицы с большой плотностью распределяются по внутреннему краю спирального желоба. Стратифицированный тяжелый продукт выгружается через разгрузочное отверстие внутреннего дна желоба перехватчиком, а легкий продукт выгружается концом спирального желоба.

**Процесс извлечения золота конусной обогатительной фабрикой.** Процесс извлечения золота конусной обогатительной фабрикой представляет собой процесс извлечения золота с использованием конусного концентратора в качестве основного оборудования. Желоб конусного концентратора веерообразный, длина желоба около 1 м, загрузочный конец шириной 125-400 мм, поверхность желоба наклонная [19].

Рудный шлам подается из центра верхнего конца и распределяется через распределительный конус для поступления в конус экстракции. Частицы руды расслаиваются по плотности во время потока по конусу добычи, а легкие и тяжелые продукты разделяются перехватывающим портом в конце.

Простой процесс и низкие инвестиции. Отсутствие необходимости использования химикатов, низкая стоимость переработки полезных ископаемых, меньшее загрязнение окружающей среды. В некоторых случаях использование гравитационной сепарации для предварительного обогащения, а также использование флотации или цианирования для извлечения промежуточных продуктов может сэкономить затраты. Подходит для добычи крупного золота.

Если для извлечения золота используется процесс разделения одной гравитацией, скорость извлечения золота будет низкой. Этот процесс необходимо сочетать со флотацией, цианированием и другими процессами [20].

#### **1.4.2 Процесс флотационного извлечения золота**

Процесс флотационного извлечения золота основан на разнице физических и химических свойств поверхности руды и обрабатывается флотационным реагентом, чтобы полезный минерал прилип к пузырьку для достижения цели извлечения золота.

Золото является легко плавающим минералом, поэтому флотационный процесс извлечения золота всегда был одним из эффективных способов переработки золотосодержащих руд. В первичных месторождениях золота золотые минералы часто сосуществуют с сульфидными минералами, такими как пирит, халькопирит, галенит и сфалерит. Эти минералы являются легко плавающими минералами и образуют стабильные минерализованные пены. Они являются идеальными минералами-носителями для золотых минералов. Процесс флотационного извлечения золота позволяет максимально обогатить золото в сульфидный концентрат. Процесс флотации в основном используется для переработки зернобобовой золотой руды. Процесс флотационного извлечения золота также может быть использован для переработки россыпного золота, но, поскольку оно может быть экономически извлечено с помощью недорогого процесса гравитационной экстракции, процесс флотации редко используется в промышленном производстве [21].

**Подготовка руды перед процессом извлечения золота.** Сырая руда измельчается, просеивается, измельчается и классифицируется (иногда требуется промывка и обесшламливание) для получения частиц соответствующего размера, а затем поступает на стадию процесса флотации.

**Добавьте флотационный реагент.** Поверхностные свойства минералов изменяются под действием различных химических веществ, контролируется стабильность пузырьков, регулируется ионный состав суспензии для создания подходящих условий флотации, а также осуществляется разделение и обогащение минералов.

**Перемешивание с аэрацией.** При механическом перемешивании воздух рассеивается на пузырьки, а частицы руды достаточно взвешены и способствуют растворению и диспергированию флотационного реагента.

**Минерализация пузырьков.** Процесс экстракции может быть достигнут только в том случае, если селективность полезных минеральных частиц легко прилипает к пузырькам, а пустая порода с трудом прилипает к пузырькам.

**Выброс минерализованной пены.** Пенный продукт соскребается скребком или автоматически высыпается в концентрат.

Процесс флотационного извлечения золота обычно используется для переработки золотосодержащей сульфидной руды с высокой плавучестью, поскольку процесс флотации может максимизировать обогащение золота в сульфидный минеральный концентрат, а стоимость процесса извлечения золота низкая [22].

Флотационный процесс извлечения золота также используется для переработки полиметаллических золотосодержащих руд, таких как золото-медные, золото-свинцовые, золото-висмутовые, золото-медно-свинцово-цинково-серные руды. Для данного типа руды процесс флотации позволяет эффективно выявлять и извлекать различные золотосодержащие сульфидные концентраты, что способствует комплексному извлечению минеральных ресурсов. Для так называемых «упорных руд», которые не могут быть извлечены непосредственно путем амальгамации или цианирования, также необходимо использовать комбинированный процесс, включающий флотационный процесс извлечения золота.

Для добычи крупнозернистой золотой руды сложно использовать процесс флотации, особенно если размер зерна золота превышает 0,2 мм. Для труднодоступных во флотационных условиях руды, например, кварцсодержащей золотосодержащей руды без сульфидов, трудно получить стабильную флотационную пену после суспензии. Таким образом, производительность флотации при извлечении золота не будет превосходной. Для процесса флотации золота необходим процесс дробления и измельчения, а также должно быть израсходовано огромное количество флотационного реагента. Таким образом, процесс флотации с точки зрения экономических показателей является более дорогостоящим, чем гравитационная сепарация и обработка амальгамы.

Основными металлическими минералами в золотоносном кварцевом руднике в Китае являются галенит, халькопирит, пирит, самородное золото, а минералы пустой породы в основном кварта. В процессе флотационного извлечения золота сернистая кислота и известь используются в качестве ингибитора, сульфат меди в качестве активатора, этилксантогенат и бутилксантогенат в качестве коллекторов, а сосновое масло в качестве пенообразователя. Дозировка каждого средства составляет 15 г/т соснового масла, 130-140 г/т ксантогената, 4000 г/т извести, 350 г/т медного купороса и 40 л/т серной кислоты. Полученный золотомедный концентрат содержит 23 % меди и 150 г/т золота, а золото-свинцовый концентрат содержит 58 % свинца и 40 г/т золота. Общий коэффициент извлечения золота составляет 91 % [23].

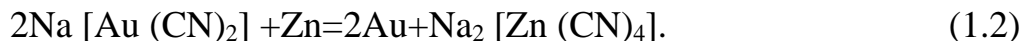
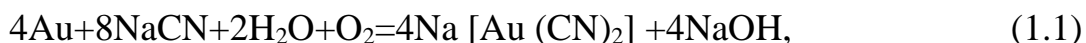
## **1.5 Методы выщелачивания золота**

Выщелачивание золота – это процесс, используемый для извлечения золота из руд. Существует несколько методов, используемых для выщелачивания золота, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Некоторые распространенные методы выщелачивания золота включают в себя:

Выбор метода выщелачивания зависит от таких факторов, как характеристики руды, соображения стоимости, экологические нормы и желаемая эффективность извлечения [24].

### 1.5.1 Процесс выщелачивания золота цианированием

Процесс цианирования золота – это метод, при котором золото извлекается из золотосодержащих руд с использованием водного раствора цианида в качестве растворителя, а затем золото извлекается из золотосодержащего раствора выщелачивания. Он включает в себя процесс цианидного выщелачивания и процесс извлечения золота из осадения. Сначала золото в золотосодержащей руде вступает в реакцию с цианидом, образуя комплекс в растворе, а затем золото удаляется из раствора в металл реакцией вытеснения с использованием химически активного металла, такого как цинк [25]. Уравнение реакций:



Конкретные этапы процесса извлечения золота цианированием в основном включают: стадию подготовки руды, стадию выщелачивания и стадию извлечения металла.

**Стадия подготовки руды.** Стадия подготовки руды является важным процессом для извлечения золота, который в основном заключается в дроблении и измельчении руды для уменьшения размера частиц руды. Это может гарантировать, что золото присутствует в водном растворе цианида в наиболее экономичной форме извлечения, тем самым увеличивая коэффициент извлечения золота.

В дополнение к процессу дробления и измельчения, золотая руда, содержащая сульфидные или углеродистые минералы, требует дополнительной обработки перед переработкой. Это связано с тем, что цианид выщелачивает в первую очередь сульфид, а не металл, что приводит к потреблению цианида. Чтобы противодействовать этому эффекту, эти руды могут сначала пройти процесс флотации, чтобы ограничить взаимодействие с цианидом в процессе выщелачивания. Кроме того, также можно изменить процесс выщелачивания, добавив активированный уголь для преимущественной адсорбции золота.

**Стадия выщелачивания.** Концентрация цианида, используемого в процессе выщелачивания, колеблется от 300 до 500 мг/л (от 0,03 до 0,05 % в пересчете на NaCN), в основном в зависимости от минералогии руды.

В процессе выщелачивания измельченная руда сначала транспортируется в ряд резервуаров для выщелачивания, и суспензия перемешивается с помощью механической силы или путем впрыска воздуха для увеличения контакта между цианидом и золотом и повышения эффективности выщелачивания. Затем цианид растворяет золото в руде, образуя стабильный комплекс металл-цианид. В начале выщелачивания рН суспензии повышают до рН 10-11 с помощью извести, чтобы гарантировать, что при добавлении цианида она не сможет образовать токсичный газообразный цианистый водород.

Активированный уголь используется в процессе экстракции растворенного золота либо путем введения его непосредственно в резервуары СІЛ (уголь в выщелачивании), либо в отдельные резервуары СІР (уголь в пульпе) после выщелачивания. Активированный уголь адсорбирует растворенный металл из суспензии выщелачивания, тем самым концентрируя его на твердые частицы. Затем углерод отделяют от суспензии путем просеивания и подвергают дальнейшей обработке для извлечения адсорбированного металла.

**Стадия восстановления металла.** Золото извлекается из раствора сначала с помощью цементации на цинковом порошке или концентрирования металла с помощью адсорбции на активированном угле, затем элюирования и в заключение цементации цинком или электролизом. Наиболее экономичным методом является адсорбция растворенного золота активированным углем, что позволяет легко добиться разделения твердого и твердого вещества. Для этого частицы руды, как правило, должны быть меньше 100 мкм, а частицы углерода – более 500 мкм. Эти шаги могут быть выполнены после процесса СІЛ или СІР [26].

Активированный уголь в контакте с пульпой, содержащей золото и/или серебро, обычно может восстановить более 99,5 % металлов в растворе за 8-24 часа, в зависимости от реакционной способности угля, количества используемого угля и эффективности смесителя. Адсорбированное на активированном угле золото извлекается из угля путем электролиза, а затем уголь возвращается в адсорбционный контур для дальнейшего использования. Полученное золото будет аффинировано путем обжига в золотые слитки, содержащие 70-90 % золота. Затем слиток дополнительно очищается до чистоты 99,99 % или 99,999 % с помощью хлорирования, плавки и электрорафинирования. Характеристики процесса извлечения золота цианированием:

Скорость извлечения золота цианированием очень высока. А золото может быть произведено на месте, что позволяет избежать различных недостатков транспортировки золотосодержащего концентрата на дальние расстояния, что способствует повышению экономической выгоды предприятий [27].

Процесс извлечения золота длится долго, а скорость извлечения медленная. Являясь высокотоксичным материалом, цианид представляет серьезную угрозу для экологической среды и животного мира. Поэтому при использовании

цианида для извлечения золота выброс шламовых отходов должен строго контролироваться. Чтобы избежать ущерба окружающей среде, наносимого цианидом, многие владельцы рудников начинают использовать новые малотоксичные или малотоксичные выщелачивающие агенты для извлечения золота, которые могут не только заменить цианид натрия без изменения исходного оборудования и процесса цианирования, но и могут обеспечить 100 % защиту окружающей среды.

В Японии имеется завод по цианированию золота и серебра мощностью 270 тонн в сутки, в котором металлические минералы в основном включают самородное золото, серебро и пирит. Минералы пустой породы в основном состоят из кварца и кальцита. Золото существует в основном в свободном состоянии в руде. Руда содержит 5,0 г/т золота и 20 г/т серебра. Завод полностью использует метод цианирования шлама, окончательный коэффициент извлечения золота составляет 97,6 %, а коэффициент извлечения серебра – 89 %. Хвосты содержат 0,12 г/т золота и 2,4 г/т серебра [28].

### **1.5.2 Кучное выщелачивание золота**

В технологиях добычи золота широко используется технологический процесс кучного выщелачивания золота из-за его простоты, низкого энергопотребления, меньшей конфигурации оборудования, низких капитальных вложений в строительство и производственных затрат, что особенно подходит для обработки низкосортной золотой руды [29].

В производстве обычный процесс кучного выщелачивания золота в основном включает шесть этапов: подготовка руды, строительство площадки для выщелачивания, сооружение отвала, приготовление выщелачивающего раствора, распределение и сбор раствора, переработка обогащенного раствора (драгоценного раствора).

**Подготовка руды.** Этап подготовки руды в основном включает операции дробления, гранулирования и предварительной обработки, целью которых является улучшение выщелачиваемости руды и проницаемости кучного выщелачивания, предотвращение неравномерности потока жидкости, засорения, стока канавы и других явлений, повышение скорости извлечения золотой руды и снижение расхода выщелачивающего раствора.

Различные процессы дробления осуществляются в соответствии со свойствами руды и технологическими требованиями. Отработанная руда, как правило, не нуждается в дроблении (30 %), размер частиц руды после двухступенчатого дробления составляет 30-50 мм (53 %), а размер частиц руды после трехступенчатого дробления составляет 9-19 мм (17 %). Было доказано, что дробление является одним из ключевых технических звеньев для обеспечения

хорошей проницаемости руды и повышения скорости выщелачивания золотой руды.

Сначала требуется гранулирование мелкодисперсной руды и руды с высоким содержанием глины. Добавление определенного количества (3-6 кг/т) цементно-известкового клея к руде, затем добавление соответствующего количества раствора цианида натрия, поддержание влажности руды 8-12 %, отверждение 8-12 часов, таким образом, формируется рудная группа. Обработка гранулятом улучшает проницаемость рудного отвала, поддерживает достаточный приток кислорода, заранее растворяет золото цианидом и значительно повышает скорость выщелачивания золота.

В этом процессе часто используется цилиндрический гранулятор, дисковый гранулятор, многосекционный ленточный гранулятор.

Среди них ленточный гранулятор может напрямую отправлять мелкодисперсную руду после гранулирования на поле кучного выщелачивания, в то время как цилиндрический гранулятор особенно подходит для руды с высоким содержанием глины.

В процессе гранулирования иногда необходимо добавлять выщелачивающий раствор для предварительной обработки руды, целью которого является улучшение проницаемости кучного выщелачивания и скорости выщелачивания полезных компонентов руды.

**Конструкция площадки для выщелачивания.** Чтобы собрать богатую жидкость и предотвратить утечку раствора, дно площадки следует отремонтировать и засыпать перед закладкой кучи. Материалами, используемыми при строительстве площадок для выщелачивания, являются глина, песок, гравий, асфальт, железобетон, пластиковая пленка или резиновая пластина. В зависимости от различных материалов толщина защитного слоя обычно составляет 300-600 мм. Продольные и поперечные дренажные канавы засыпаются блочной рудой в подушечном слое, а затем слой крупной руды укладывается по всей нижней плите для защиты нижней площадки.

**Формирование кучи.** Цель создания отвала – придать рудному отвалу хорошую и равномерную проницаемость и гарантировать, что склон не обрушится. Высота рудного отвала в основном зависит от проницаемости рудного отвала, содержания выщелачивающего агента в выщелачивающем растворе, оборудования и метода, используемого при создании отвала.

Как правило, высота кучи составляет 3-9 м, а высота кучи необработанной руды может достигать 46 м. Существует множество способов создания кучи, таких как метод с несколькими кучами, многослойный метод, метод наклона. Большинство установок кучного выщелачивания золота часто используют автомобили, фронтальные погрузчики, бульдозеры для выгрузки руды для создания отвала и своевременного его разрыхления.



**Приготовление выщелачивающего раствора.** Выщелачивающий раствор, используемый для выщелачивания полезных компонентов из золотой руды, готовится из воды и выщелачивающего агента по определенной формуле. Обычные выщелачивающие агенты включают серную кислоту, азотную кислоту, соляную кислоту, карбонат натрия, бикарбонат натрия, карбонат аммония, бикарбонат аммония, сульфат железа, хлорид, йодид натрия, йодид калия, сульфат аммония, воздух, кислород, перманганат, оксиды азота, перекись водорода и хлорат. Формулу и дозировку выщелачивающего раствора необходимо определять в зависимости от вида минерала, минерального состава и химического состава. Как правило, при кучном выщелачивании золота используется щелочной раствор цианида натрия.

**Распределение и сбор раствора.** Распределение раствора заключается в равномерном распылении выщелачивающего раствора на верхнюю поверхность рудной кучи, а система распределения раствора состоит из резервуара для распределения жидкости, насоса, инфузионной трубы, распылительной трубы и распылительного устройства, установленных на рудной куче.

Возьмем в качестве примера распылитель: в сети распылительных трубопроводов используются высокопрочные полиэтиленовые трубы, в распылительной головке используется поворотная разбрызгивающая головка с широким радиусом распыления, крупными и равномерными каплями распыления, которые нелегко распылять и которые удобны в установке.

В процессе распыления одним из способов является равномерное распыление выщелачивающего раствора на кучу руды, другим - достижение требуемой интенсивности распыления, то есть количества распыления на единицу площади за единицу времени, обычно 0,1-0,4 л/м<sup>2</sup>·мин, время распыления составляет примерно 1/3-1/2 от общего времени. После распыления обогащенный раствор со дна кучи поступает в резервуар для сбора раствора через канаву для раствора, а затем перекачивается в цех.

**Переработка обогащенного раствора (*precious solution*).** Золото извлекается путем адсорбции углерода и десорбционного электролиза (или осаждения цинковой пыли взамен цинковой). Активированный уголь становится обогащенным золотом углеродом из-за поглощения золота пульпой. После завершения операции адсорбции золоуглеродсодержащая пульпа направляется на угольное сито через воздухоподъемник для отделения пульпы от активированного угля. После грохочения и промывки пульпа направляется на десорбцию и электролиз.

При высокой температуре и высоком давлении анионы, легко адсорбируемые активированным углем, добавляются в систему десорбции, а  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  заменяется для получения золотосодержащего шлама и бедного углеродом, чтобы осуществить десорбцию золота. Драгоценная жидкость,

полученная десорбцией золотосодержащего углерода, извлекается путем ионизации с получением чистого золота [30].

### **1.5.3 CIP и CIL выщелачивания золота**

Золотодобывающая промышленность в значительной степени полагается на промышленные смесители в процессах CIP и CIL выщелачивания золота. CIP обозначает углерод в пульпе, в то время как CIL обозначает углерод в выщелачивании. Оба процесса включают извлечение золота из руды путем растворения его в растворе, содержащем цианид, и адсорбции его на активированном угле, что создает идеальный углеродный состав. Смесители играют решающую роль в этих процессах, облегчая перемешивание суспензии в резервуарах [31].

Углерод в пульпе (CIP): процесс получения углерода в пульпе является разновидностью обычного процесса цианирования. Руду дробят, тонко измельчают и выщелачивают цианидом в серии резервуаров с перемешиванием для растворения золота. Вместо отделения твердых частиц от исходного раствора, как в традиционном процессе цианирования, в выщелачиваемую суспензию добавляют гранулированный активированный уголь. Углерод адсорбирует золото из шламового раствора и удаляется из шлама путем грубого просеивания. На практике это достигается с помощью серии из пяти или шести резервуаров с перемешиванием, в которых углерод и рудный шлам контактируют ступенчатым противоточным способом. Это значительно увеличивает возможную загрузку золота в углерод при поддержании высокого процента извлечения. Углерод удерживается в отдельных CIP-емкостях с помощью экранов CIP-емкостей. Размер отверстий грохотов CIP-резервуаров таков, что тонкоизмельченные частицы руды будут проходить через грохоты, но крупный углерод - нет. Для этого приложения были опробованы практически все мыслимые типы экранов, причем некоторые типы оказались гораздо более успешными, чем остальные.

Углерод при выщелачивании (CIL): Процесс выщелачивания углерода объединяет выщелачивание и углерод в пульпе в единую технологическую операцию. Резервуары для выщелачивания оснащены сетками для удержания углерода, а резервуары CIP исключены. Углерод добавляется при выщелачивании, так что золото адсорбируется углеродом почти сразу же, как только оно растворяется в растворе цианида. Процесс CIL часто используется, когда в золотой руде присутствует самородный углерод. Этот самородный углерод адсорбирует выщелоченное золото и препятствует его извлечению. Это явление обычно называют "предварительным ограблением". Углерод, добавленный в CIL, более активен, чем самородный углерод, поэтому золото

будет преимущественно адсорбироваться углеродом, который может быть извлечен при вскрытии [32].

#### 1.5.4 Бактериальное выщелачивание золота

Термин «выщелачивание», используемый в золотодобыче, относится к извлечению и растворению твердой матрицы под действием жидкой фазы. В процессе биологического выщелачивания микроорганизмы, такие как бактерии, действуют в качестве жидкой фазы. В случае биологического выщелачивания золота роль жидкой фазы играют бактерии, такие как *Acidobacillus ferrooxidans* и *Acidobacillus thiooxidans*. Организмы, использующие этот метод биологического выщелачивания, получают свою метаболическую энергию за счет окисления сульфидов и ионов железа. Неорганические субстраты, такие как сульфиды, элементарная сера, ферментативно преобразуются в АТФ путем окислительного фосфорилирования для получения химической энергии. Для биосинтеза клеточной биомассы потребность в углероде удовлетворяется за счет атмосферного CO<sub>2</sub> или растворения карбонатных минералов в рудах. Хотя в основном используются хемолитоавтотрофные бактерии, гетеротрофные бактерии и грибы, водоросли, водные папоротники, торф, дрожжи, умеренно теплолюбивые бактерии и экстремально теплолюбивые археоны постепенно привлекают внимание к методам биологического выщелачивания [33].

Технология биологического выщелачивания позволяет извлекать более 95 % всего золота в зависимости от минерального состава обрабатываемой руды и степени предварительной обработки. В Чили в лабораторных условиях при извлечении золота из сложной руды с использованием *Acidobacillus ferrooxidans* было получено 30 000 кг золота. Руда содержала 8,2 % Fe, 0,78 % Cu, 0,88 % As и 3,5 г Au на тонну, а основными металлоносными минералами были пирит, арсенопирит, гематит и халькопирит. После 10 дней биологического выщелачивания начальная концентрация увеличилась с 13 % до 97 % по сравнению с методом цианирования. Цены на золото на мировом рынке изменчивы, и биовыщелачивание предлагает альтернативу, экономически выгодную и устойчивую альтернативу извлечению золота непрерывному использованию и действенности метода цианирования, который также может увеличить темпы производства золота. Технология биологического выщелачивания проста по своей природе и не требует обширных технических знаний. В настоящее время биологическое выщелачивание используется в промышленных масштабах для производства золота, меди и урана. В будущем эта технология может быть использована для извлечения цинка, кобальта, никеля, молибдена и других тяжелых металлов. Биологическое выщелачивание также может быть использовано для переработки промышленных отходов,

гетеротрофного выщелачивания, получения биологической выгоды, обогащения бокситов, удаления железа и других подобных применений. Сравнивая биологическое выщелачивание и традиционную технологию выщелачивания, мы можем увидеть различия между ними. В другом традиционном процессе обычно используется ртуть, которая также является известным токсином для людей, животных и окружающей среды. Биологическое выщелачивание не лишено некоторых недостатков, и этот процесс является медленным по сравнению с традиционными методами [34].

### **1.5.5 Тиосульфатное выщелачивание золота**

Тиосульфатное выщелачивание – это процесс, при котором золото извлекается из руд без использования цианида.

Тиосульфатное выщелачивание золотых руд имеет большой потенциал для снижения воздействия на окружающую среду. В отличие от цианида, который является высокотоксичным, химические вещества, используемые в процессе тиосульфатного выщелачивания, безвредны.

Этот процесс во многих случаях приводит к извлечению, близкому к полученному при цианидном выщелачивании. При добыче, на которую влияет «предварительное обогащение» руд, извлечение может быть значительно выше, чем при цианидном. Тиосульфатное выщелачивание особенно хорошо подходит для современных технологий извлечения золота методом «смола в пульпе» (RIP)

Тиосульфатное выщелачивание – это щелочной процесс (обычно работающий в диапазоне pH от 8 до 10), поэтому при извлечении не возникает проблем с коррозией оборудования [35].

Основными химическими компонентами процесса тиосульфатного выщелачивания (тиосульфат аммония и сульфат сернокислого аммония) являются обычные удобрения. Это открывает дополнительные возможности для использования отходов обогащения в сельском хозяйстве в регионах с благоприятными экологическими условиями [36].

## **1.6 Сорбционное извлечение золота из продуктивных выщелачивания**

Извлечение золота определяется как отделение ионов золота из насыщенного раствора. Распространенными подходами к извлечению золота из раствора цианидов являются

*Адсорбция активированным углем или ионообменной смолой:* использование активированного угля или некоторых материалов ионообменной смолы для адсорбции  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  из раствора золота.

*Цементация цинка (процесс Меррилла-Кроу):*  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  может быть восстановлена до  $\text{Au}(0)$  и осаждена добавлением цинка в раствор.

*Экстракция растворителем:* используя экстрагенты типа ионных жидкостей,  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  можно извлечь из раствора золота.

Среди этих подходов адсорбция активированным углем является основной промышленной процедурой извлечения  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  из-за высокой эффективности, богатых ресурсов и экономических преимуществ.

Активированный уголь — это углеродсодержащий адсорбент, имеющий развитую пористую структуру и большую площадь поверхности [37].

Активированный уголь может быть получен практически из любых угледобывающих материалов. Отходы шунгитовых пород Восточного Казахстана, отваливаемые при добыче полиметаллических руд, могут служить перспективным источником сырья для производства сорбентов. Кроме того, сорбенты могут быть получены из первичных отходов различного углеродсодержащего растительного сырья: рисовой шелухи, косточек абрикосов, скорлупы кокосовых орехов, соломы различных сельскохозяйственных культур, початков кукурузы, древесины (щепы) деревообрабатывающей промышленности и продуктов их переработки (фурфурол и др.), а также из каменных углей и другие источники. Это обстоятельство существенно повышает интерес к разработке новых эффективных видов сорбентов, которые могут быть использованы как в анализах, так и в технологии извлечения золота. В настоящее время почти на всех золотодобывающих предприятиях используются активные угли для извлечения золота из сложных промышленных растворов.

Использование активированного угля для извлечения золота из цианидных растворов широко распространено в горнодобывающей промышленности. В результате практических и теоретических достижений последних лет процесс извлечения углерода из суспензии стал предпочтительным методом извлечения золота из золотоцианидных суспензий или разбавленных растворов. В этом процессе золото адсорбируется на активированном угле непосредственно из цианидной суспензии. На следующем этапе происходит адсорбированное золото элюируется из активированного угля с использованием эффективных элюентов. Существует три основных метода элюирования, используемых в промышленности: (1) процесс Zadra, (2) метод Англо-американской исследовательской лаборатории (ARL) и (3) использование органических растворителей, таких как ацетонитрил или метанол [38].

В ходе элюирования Zadra горячие растворы 1 % гидроксида натрия и 0,2 % цианида натрия повторно пропускаются через активированный уголь, на котором золото адсорбируется в течение 72 часов при температуре 95-100 °C при

атмосферном давлении для десорбции ионов золота. В процессе AARL активированный уголь с сорбированным золотом контактируют с 5 %-ным содержанием цианида натрия и 1 %-ным содержанием гидроксида натрия с последующим элюированием горячей деионизированной водой при температуре 100-120 °С в течение 8-12 часов. Процессы Zadra и AARL эффективны для десорбции золота из активированных углей, но применение этих процессов ограничено высокими энергозатратами, большими капиталовложениями, высоким давлением, длительной продолжительностью элюирования и использованием высоких концентраций цианида натрия.

Основными преимуществами активированного угля являются его высокая селективность по отношению к золоту и цветным металлам, простота получения и крупный размер частиц. Следует отметить, что физические и химические свойства активированных углей могут сильно влиять на поглощение золота. Основными требованиями, предъявляемыми к активированным углям, предназначенным для извлечения золота, являются: (1) высокая производительность абсорбции, (2) высокая скорость абсорбции и (3) хорошая стойкость к истиранию. Второе свойство важно при сорбции золота из суспензии.

Скорлупа кокосовых орехов является наиболее широко используемым сырьем в мире для производства активированного угля, пригодного для использования в суспензиях. Однако расширение производства золота требует использования других источников сырья для получения активированного угля. Обилие, доступность, экологичность и низкая стоимость сельскохозяйственных отходов, таких как фруктовые косточки и рисовая шелуха, делают эти отходы реальными кандидатами в качестве сырья для получения активированного угля.

В Казахстан большая часть активированного угля импортируется из Китая, Российской Федерации и Нидерландов. Тем не менее, можно сократить количество импортируемого активированного угля, используя сырье, получаемое из углеродных материалов. Сельскохозяйственные материалы, полученные в процессе выращивания, такие как семена миндаля, абрикосов или фисташек, початки кукурузы и древесина, являются незаменимым и перспективным сырьем для производства активированного угля [39].

## **1.7 Автоматизация в процессе обогащения золота**

С развитием науки и техники о человеке также развивается технология автоматического управления, охватывающая практически все области производственной деятельности человека. Применение технологии автоматизации в процессе обогащения золота может эффективно снизить эксплуатационные расходы и использование фармацевтических препаратов для повышения безопасности эксплуатации и эффективности производства.

Будущее развитие заводов по переработке золотосодержащего сырья будет все больше зависеть от механизации и автоматизации процесса обогащения [40].

Технология автоматизации на заводе по обогащению горного золота относится к применению технологии автоматизации в процессе обогащения, таком как дробление и грохочение, измельчение, флотация, цианирование и фильтрация и т. д.

Конструкция автоматизации соответствует следующим принципам: установите централизованный контроль и допускайте ручное управление; все оборудование для создания цепочки, в принципе, запускается последовательно в порядке, обратном направлению материала; мониторинг и запись работы обогатительного оборудования в режиме реального времени; простой и понятный человеко-машинный интерфейс позволяет персоналу легко проверять работу оборудования и исторические данные в любое время; можно управлять дистанционным запуском и остановкой; и статистические отчеты могут выводиться через регулярные промежутки времени [41].

**Стадия дробления.** На данном этапе основными машинами, управляемыми с помощью технологии автоматизации, являются щековая дробилка и конусная дробилка. На станках установлены чувствительные устройства для измерения нагрузки на станки. Система автоматического управления состоит из центра мониторинга и шкафа автоматического управления, который собирает рабочие данные машины в режиме реального времени и дистанционно включает или выключает машину в режиме реального времени.

Система главного диспетчерского пункта передает сигналы на щековую и конусную дробилки повсюду, которые разделены на входные и выходные сигналы для отражения рабочего состояния машин и управления запуском и остановкой. Графический дисплей показывает работу дробилки в динамическом режиме со значениями тока, размера дробления и производительности в режиме реального времени. В случае неисправностей, таких как высокие температуры подшипников, перерасход системы охлаждения и смазки, главный дисплей диспетчерской выдает раннее предупреждение или предлагает техническое обслуживание посредством графических изменений или звуковых сигналов тревоги.

**Стадия измельчения.** На данном этапе основными машинами, управляемыми с помощью технологии автоматизации, являются полуавтогенная мельница и шаровая мельница. Контроль за работой мельницы осуществляется с помощью программного обеспечения верхнего компьютера, обеспечивающего обмен данными в режиме реального времени между перерабатывающим заводом и диспетчерской платформы автоматизации. Система мониторинга может отслеживать ряд условий, таких как размер мельницы, расход, пропускная способность руды, температуру подшипников двигателя мельницы, ток,

напряжение и неисправности оборудования, и своевременно подавать сигналы тревоги. С точки зрения функциональной реализации, это то же самое, что и этап дробления, обеспечивающий удаленный запуск и остановку мельницы, отображение кривой объема обработки, кривой размера частиц, кривой давления и температуры и т. д., Хранение исторических данных с функцией запроса и т. д.

**Стадии флотации и концентрирования.** Для определения давления воздуха в процессе флотации необходимо установить датчики давления на воздуховодах подачи воздуха и регуляторы частоты вращения на воздуходувках. Положение уровня жидкости в резервуаре для перекачки концентрата также необходимо определять в режиме реального времени, что, в свою очередь, регулирует скорость работы шламowego насоса для перекачки концентрата, чтобы гарантировать поддержание уровня жидкости в разумных пределах. Определение мощности и нижнего уровня жидкости загустителя в режиме реального времени и регулирование работы сливного шлангового насоса в соответствии с уровнем жидкости и концентрацией. Мониторинг в режиме реального времени работы резервуаров для выщелачивания и перемешивания, таких как температура, подшипники, двигатели.

**Стадии цианирования, десорбционного электролиза и фильтр-пресса.** Благодаря особым этапам процесса обогащения золота - цианированию и десорбционному электролизу - применение автоматизации особенно повысило эффективность этих процессов, позволяя в режиме реального времени определять расход раствора, концентрацию суспензии и объем подаваемого сырья. В систему подачи воздуха были добавлены датчики давления, которые измеряют объем подаваемого воздуха и давление подаваемого воздуха и своевременно выдают предупреждение. В резервуар для смешивания цианидных хвостов был добавлен уровнемер для определения высоты уровня в режиме реального времени [42].

Проверка расхода и концентрации резервуара для смешивания цианидов и установка регулятора частоты на впускном насосе для управления подачей руды в резервуар для смешивания цианидов. Установлен детектор концентрации, помогающий смешивать раствор гидроксида натрия при настройке электролита десорбции. В то же время в системе десорбционного электролиза установлены датчики для измерения давления, расхода и температуры и передачи данных на главную консоль в режиме реального времени. После анализа данных параметры оборудования пересматриваются в соответствии с требованиями технологического процесса для получения лучших результатов десорбционного электролиза.

На этапе фильтр-пресса компьютер автоматически управляет включением и выключением фильтр-пресса. В бассейне обратного насоса установлен измеритель уровня жидкости для запуска и остановки обратного насоса в зависимости от уровня жидкости [43].



## 2 Экспериментальная часть

Исследования по сорбционной добыче золота проводились с использованием синтетических и продуктивных растворов золота, полученных в результате выщелачивания золотосодержащих руд цианидом. Для исследований были использованы следующие пробы, реагенты и оборудование.

### 2.1 Исходные материалы и оборудование

- 1 – золотосодержащая проба месторождения Акбакай;
- 2 – продуктивный золотосодержащий раствор месторождения Акбакай;
- 3 – сорбент на основе активированного угля марок NoritRO;
- 4 – ионит Аквасорб, полученный из кокоса;
- 5 – активированный уголь на основе шунгита;
- 6 – лабораторная сорбционная колонка;
- 7 – электронно-зондовый микроанализатор;
- 8 – спектрометр X-Calibur SDD LE “Xenometrix”;
- 9 – лабораторный иономер «рН-150 М»;
- 10 – атомно-эмиссионный анализ с применением спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 5100 DV, Perkin Elmer;
- 11 – спектрометр Savant AA, фирма "GBC Scientific Equipment, Pty", Австралия;
- 12 – электронно-зондовым микроанализатором марки Superprobe 733 фирмы JEOL, Япония.

### 2.2 Методика экспериментов

Для определения элементного анализа проведен атомно-эмиссионный анализ с применением спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 5100 DV, Perkin Elmer. Для определения кристаллической структуры используют рентгенфазовый анализ – электронно-зондовым микроанализатором марки Superprobe 733 фирмы JEOL, Япония.

Для определения элементного состава использован рентгенфлуоресцентный анализ – энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре X-Calibur SDD LE «Xenometrix».

Содержание металлов в растворе определялись атомно-абсорбционным спектрометром Savant AA с пламенным атомизатором.

Для определения концентрации  $H^+$ /рН растворов – использован лабораторный иономер марки «рН-150 М» со стандартными электродами.

### **Методика сорбции в статическом режиме.**

Сорбцию золота осуществляли по методике: ионит с массой 1 г перемешивали с 500 мл продуктивным раствором, продолжительность составила 1 сутки, т.е. 24 часов. После истечения времени сорбции ионит отделяли от раствора и его заливали новой порцией исходного цианидного раствора и в течение 24 часов продолжали перемешивать.

Исследования по исследованию влияния примесей металлов на извлечение золота проводилось в 6 циклов. После каждого цикла насыщения сорбента металлом раствор был проанализирован на содержание золота и металлов-примесей методами химического анализа и атомно-абсорбционной спектроскопией.

В статических условиях обменная емкость выбранных сорбентов определялась по формуле:

$$E(\text{СОЕ}), \% = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}}{C_{\text{исх}}} \cdot \frac{V}{m} \quad (2.1)$$

где  $C_{\text{исх}}$  - исходная концентрации металла в растворе, мг/дм<sup>3</sup> или ммоль/дм<sup>3</sup>;

$C_{\text{равн}}$  - равновесная концентрации металла в растворе, мг/дм<sup>3</sup> или ммоль/дм<sup>3</sup>;

$m$  - масса сорбента, г;

$V$  - объем раствора, дм<sup>3</sup>.

### **2.3 Результаты физико-химических исследований**

Физико-химическими исследованиями проб месторождения Акбакай установлено, что содержание золота в руде составляет 3,73 г/т. Основными компонентами руды являются кремнезем 64,7 %, глинозем 14,00 %, оксиды кальция 5,73 %, магния 5,61 %, калия 3,41 %, натрия – 2,93 %. Рудообразующими фазами являются пирит, арсенопирит.

Исследования по сорбции проводились с продуктивными растворами, полученных выщелачиванием проб золотосодержащего месторождения Акбакай с содержанием основных компонентов, мг/л: Au – 11,66; Ag – 2,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18.

Результаты химического анализа показывает, что руда на 94,27 % состоит из литофильных минералов. Содержание благородных металлов золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т соответственно. Содержание мышьяка – 0,241. Физико-химическими исследованиями установлено следующий химический состав руды (таблица 2.1)

Таблица 2.1 – Химический состав руды месторождения Акбакай

Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %	Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %
<i>SiO<sub>2</sub></i>	68,70	<i>Zn</i>	0,00445
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	13,70	<i>Cu</i>	0,0054
<i>CaO</i>	5,38	<i>As</i>	0,241
<i>MgO</i>	2,47	<i>Sb</i>	<0,005
<i>MnO</i>	0,0071	<i>Ba</i>	0,036
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,18	<i>Bi</i>	<0,005
<i>K<sub>2</sub>O</i>	3,68	<i>Cd</i>	<0,0002
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	2,21	<i>Cr</i>	0,0096
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,73	<i>Co</i>	0,0012
<i>C<sub>общ</sub></i>	0,9	<i>Mo</i>	<0,0005
<i>CO<sub>2</sub></i>	2,71	<i>Ni</i>	<0,005
<i>Fe<sub>общ</sub></i>	3,06	<i>Sr</i>	0,015
<i>Fe<sub>окисл</sub></i>	2,55	<i>Sn</i>	<0,005
<i>Fe<sub>сульф</sub></i>	0,51	<i>W</i>	<0,01
<i>S<sub>общ</sub></i>	0,5	<i>Hg</i>	<0,003
<i>S<sub>сульфат</sub></i>	<0,25	<i>Au</i> , г/т	5,73
<i>Pb</i>	0,0044	<i>Ag</i> , г/т	1,22

Рентгендифракционным методом анализа установлено (таблица 2.2), что основными рудными фазами являются пирит, арсенопирит и лимониты, а породообразующими минералами являются кремнезем, полевые шпаты, кальцит, мусковит, хлориты и др. Железо в окисленной форме преобладает над сульфидной формой. В руде также присутствуют акцессорные минералы титана типа апатит.

Таблица 2.2 – Минеральный состав проб руды месторождения Акбакай

Минерал, группа минералов	Массовая доля, %	Минерал, группа минералов	Массовая доля, %
Породообразующие минералы		Рудообразующие минералы	
Кварц	44,0	Пирит	0,8
Полевые шпаты	30,5	Арсенопирит	0,5
Кальцит	6,1	Оксиды/гидроксиды Fe	0,9
Мусковит	9,0	Акцессорные (минералы Ti, апатит)	1,5
Хлорит	6,7	Итого:	100

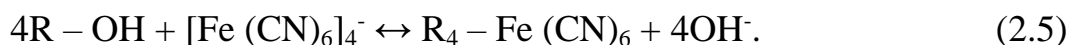
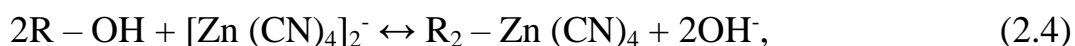
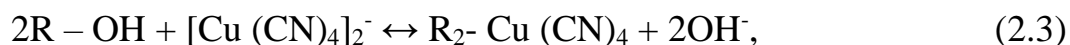
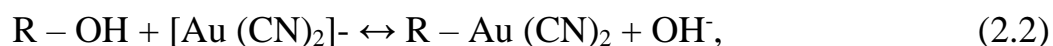
В руде в сотых и тысячных долях присутствуют окисленные и сульфидные меди, цинка. Полезным компонентом в пробе руды месторождений «Акбакай» является золото. Известно, что для выщелачивания золота из такого вида сырья эффективно применить гравитационное обогащение с последующим процессом цианидного выщелачивания.

## 2.4 Исследования по извлечению золота сорбцией

Для извлечения золота из продуктивных растворов, полученных выщелачиванием эффективно применять сорбцию с активированными углями, выбор которого является важной проблемой на каждом месторождении золота.

Для выбора эффективного ионита проведены эксперименты по сорбции из модельных растворов с активированными углями NoritRO, Аквасорб и сорбента на основе шунгита.

Извлечение металлов сорбцией проводилось из модельного раствора цианида натрия с содержанием мг/л: Au – 11,66; Ag – 22,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18. При сорбции цианистых комплексов металлов из растворов ионитами и/или активированными углями протекают реакции анионного обмена, которые описываются нижеследующими:



При сорбции металлов необходимо учесть устойчивость цианистых комплексов целевых металлов и металлов примесей, соразмерность ионных радиусов анионов и пор сорбента, взаимодействие между цианистыми комплексами металлов с функциональными группами сорбентов, энергию притяжения между ионами и т.д. В зависимости от таких факторов определяется конечное количество сорбированных ионов в анионите и/или в активированном угле.

В результате проведения экспериментов по сорбции в статическом режиме определены статическая обменная емкость сорбентов-активированных углей марок NoritRO, аквасорб и сорбента на основе шунгита. Полученные результаты приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты сорбции золота в статическом режиме

Сорбенты	СОЕ, мг/г
Активированный уголь NoritRO	0,88
Аквасорб	0,63
Активированный уголь на основе шунгита (СШ)	0,32

Из полученных данных видно, что самой наибольшей значением СОЕ обладает активированный уголь марки NoritRO, затем последует активированный уголь АКВАСОРБ. Наихудшие результаты по СОЕ показала активированный уголь на основе шунгита, ее значение почти в 2,75 раза ниже по сравнению с показателем сорбента NoritRO и в 2,75 раза ниже по сравнению с показателем сорбента Аквасорб.

Далее были исследованы влияние продолжительности процесса сорбции и значения рН на извлечение золота с сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ. Результаты приведены на рисунках 1 и 2.

Изучение сорбционной активности сорбентов от продолжительности процесса сорбции показали (рисунок 1), что статистическая обменная емкость активированного угля марки NoritRO по сравнению сорбентом марки Аквасорб было выше. Полное насыщение сорбента ионами золота в количестве 99 % для сорбента NoritRO достигается за 120 минут, тогда как сорбент Аквасорб за это время адсорбирует всего 85 % золота. Активированный уголь на основе шунгита уступает по статической обменной емкости вышеназванным сорбентам почти в 2 раза и за 60 минут сорбционное извлечение золота составило 51 %, а за 160 минут всего 52 %.

Результаты исследования влияния рН на показатели процесса сорбции сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ показали (рисунок 2), что сорбенты NoritRO и Аквасорб хорошо извлекают золото при всех значения рН раствора. Максимальное значение степени извлечения достигается при рН равном 10 и составляют 100 и 85 % соответственно. С увеличением рН от 10 до 14 показатели сорбции Аквасорб и NoritRO снижаются и составляют 90 и 70 % соответственно. Изменение рН сильно влияет на сорбционные свойства активированного угля на основе шунгита – ее сорбционные свойства улучшаются при сильнокислотной области, при рН 2 извлечение золота составило 64 %, затем с повышением рН от 2 до 6 показатели сорбции резко падают, т.е. в среде с рН равном 6 сорбция золота из раствора практически не идет. Дальнейшее повышение рН раствора от 6 до 14 приводят к улучшению сорбционных свойств и степень извлечения золота увеличивается с 0 до 52 %.

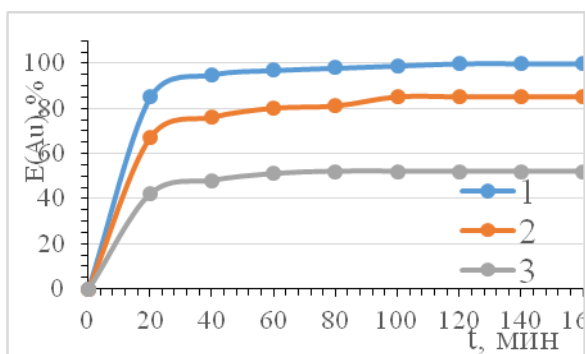


Рисунок 1 – Кинетические кривые извлечения золота из цианидных растворов различными сорбентами

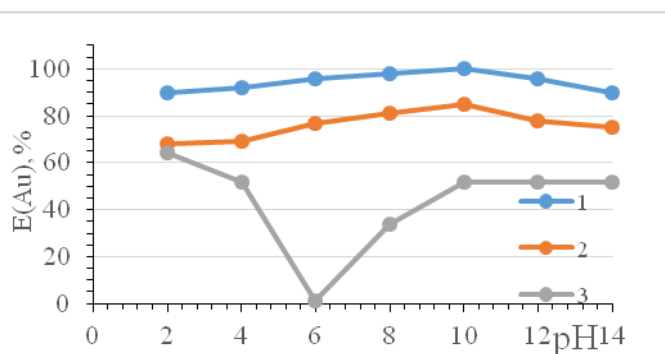


Рисунок 2 – Влияние рН среды на извлечение золота из цианидных растворов различными сорбентами

На основе полученных результатов экспериментов по изучению влияния различных параметров для дальнейших исследований в качестве оптимального сорбента золота был выбран сорбент NoritRO.

Исследования влияния примесей металлов на извлечение золота сорбентами марки NoritRO проводились с использованием раствора вышеприведенного состава. Результаты приведены на таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты извлечения металлов сорбентами на основе активированных углей

Продолжительность сорбции, мин	Извлечение металлов примесей, %				
	Au	Ag	Fe	Cu	Zn
30	75,2	66,1	12,4	9,2	7,5
60	90,3	85,2	14,8	11,4	9,2
90	92,1	88,2	15,6	13,2	10,1
120	96,8	89,3	16,2	15,1	12,1
150	96,7	90,4	18,7	13,2	9,7
180	97,6	91,5	26,3	10,3	5,6
1440	98,7	97,5	14,7	7,4	4,2
2880	99,5	98,6	10,2	5,1	4,0

Как показывают результаты, все примеси сорбируются активированным углем из-за его высокой сорбционной емкости. Однако, при увеличении продолжительности сорбции до 2 суток содержание примесей металлов в сорбенте снижаются. Это подтверждает вывод о том, что ионы примесей металлов замещаются ионами золота, и извлекаются в раствор [44].

Далее были изучены влияние числа стадии сорбции на сорбционную способность ионита NoritRO примесей серебра, меди, железа и цинка из цианистого раствора. Результаты приведены ниже на рисунках 3-4.

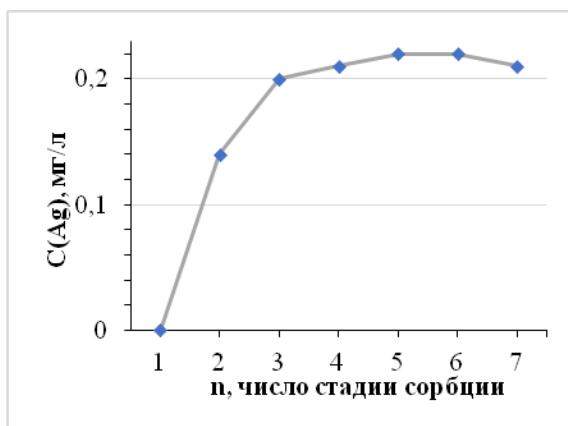


Рисунок 3 – Зависимость концентрации серебра в растворе от цикла сорбции

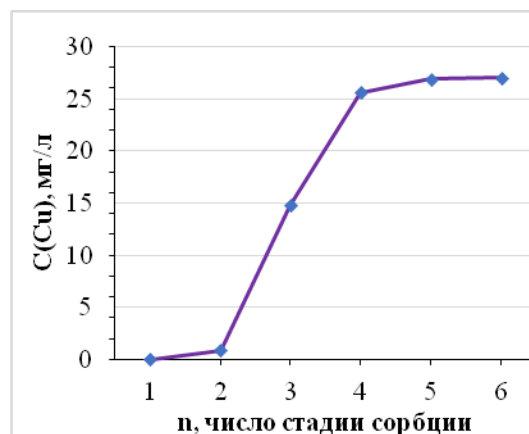


Рисунок 4 – Зависимость концентрации меди в растворе от цикла сорбции

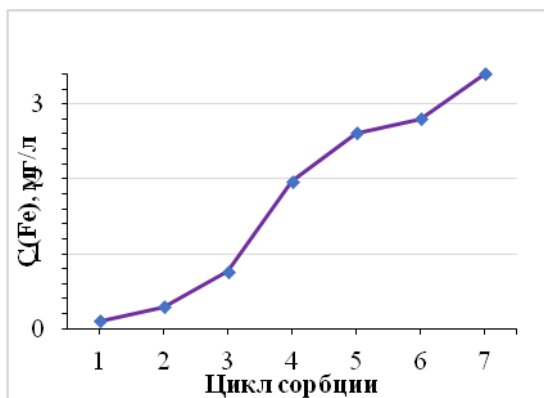


Рисунок 5 – Зависимость концентрации железа в растворе от цикла сорбции

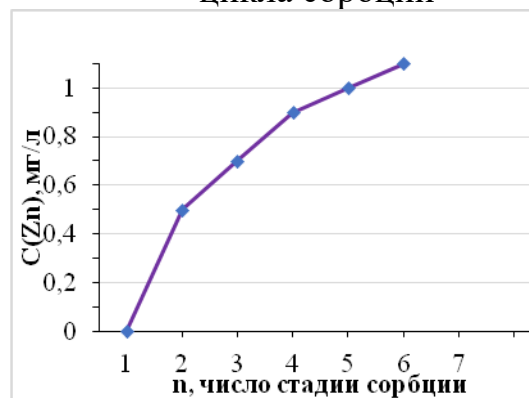


Рисунок 6 – Зависимость концентрации цинка в растворе от цикла сорбции

Определение содержания металлов в растворе после каждого этапа сорбции проводились химическим и атомно-абсорбционным спектрометрическим методами анализа. Результаты экспериментов приведены на рисунках 3-6.

Как показали результаты наших исследований, выбранный активированный уголь хорошо извлекает наряду с ионами золота ионов примесей металлов – серебра, меди, железа и цинка. В последующие стадии, т.е. начиная со второй стадии сорбции наблюдается вытеснение примесей металлов и замещение ионами золота из структуры активированного угля, что заметно при

определении концентрации примесей в растворе. Среди всех ионов примесей плохо вытесняются ионы меди и серебра, что подтверждается с выводами приведенные в исследования [45]. Но несмотря на это использованный в экспериментах активированный уголь показал высокую селективность к золоту и серебру.

Золотосодержащая руда состава (таблица 2.1) месторождения Акбакай поступает на гравитационное обогащение, где степень обогащения составляет 53-56 %. Концентрат далее направляется на цианидное выщелачивание, в результате которого извлекается от 69,42 до 78,33 % золота. При цианидном выщелачивании руд месторождения Акбакай получают продуктивный раствор состава, мг/л: золото 500 – 600 мг/л, железо 80-90 мг/л, медь – 0,40-0,50 мг/л, серебро – 100-150 мг/л. Процесс сорбции проводится с использованием сорбента NoritRO с содержанием твердой фазы 40 %, продолжительностью цикла 8 часов.

## 2.5 Процесс сорбции на золото извлекательной фабрике Акбакай

На золото извлекательной фабрике Акбакай для переработки золотосодержащих цианидных растворов в качестве сорбента используется активированный кокосовый уголь NoritRO. Он готовится из скорлупы кокосового ореха и подвергается процессу, называемому активацией для того, чтобы увеличить сорбционную способность. Активированный уголь смешивается с пульпой и контактирует с ней в течение времени, достаточном для сорбции золота и серебра из раствора.

Сорбция (уголь в пульпе) используется для восстановления растворенного золота из предварительно выщелоченной пульпы. Золото в цианидно-щелочном растворе вырабатывает  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  комплекс закрепленный с кальцием  $\text{Ca}^{2+}$  катионы содержатся в большом количестве из известки, используемой в качестве рН модификатора. Золото в цианидно-щелочном растворе преимущественно выступает как  $\text{Ca}^{2+}[2[\text{Au}(\text{CN})_2]^- (\text{aq})$ . В цикле сорбции, растворенное золото в пульпе, смешивается с активированным углем. Активированный уголь – высокопористое вещество, имеющее активные сорбирующие участки на поверхности. Когда пульпа с растворенным золотом смешивается с активированным углем, золото- цианистый раствор поглощается активной поверхностью активированного угля. Избирательные поверхности активированного угля способны поглощать растворенное золото, давая 95 % извлечения. Следующее уравнение показывает полную реакцию выщелачивания и цикла адсорбирования.





Благоприятные условия поглощения золото-цианистого раствора углем: высокая концентрация  $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$ . Уровень  $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$  всегда высок при выделении из извести, которая добавляется в пульпу в качестве рН модификатора, достаточная концентрация  $\text{CN}^-(\text{aq})$ , высокая сорбционная активность угля. Требуемая концентрация цианида в щелочных растворах для благоприятной абсорбции золото-цианистого раствора углем составляет 90-120 мг/л. Низкое содержание цианида приводит к снижению процесса абсорбции на уголь и увеличения содержания металла в жидкой фазе в хвостах.

Таблица 2.5 – Характеристики емкостей и технологические режимы работы отделения сорбции

Наименование показателей	Единица измерения	Значение
Количество резервуаров	штук	6
Плотность пульпы	т/м <sup>3</sup>	1,34
Производительность по твердому	т/ч	155
Производительность по пульпе	м <sup>3</sup> /ч	296
% твердого в пульпе	%	39
Полезный объем каждого чана	м <sup>3</sup>	78
Концентрация угля	г/л	50
Общий запас угля в чанах	т	12
Размер ячейки сита механизма Pumpcell	мм	0,63
Общий активный объем выщелачивания	м <sup>3</sup>	468
Общее время выдержки	ч	1,58
Продолжительность перекачки насыщенного угля	час	1
Содержание золота в жидкой фазе хвостов сорбции	мг/л	0,02
Концентрация цианида в хвостах сорбции	г/л	0,1-0,15
Концентрация извести в хвостах сорбции	г/л	0,15-0,2
Тип грохота вывода насыщенного угля		Высокочастотный, вибрационный

Продолжение таблицы 2.5

Наименование показателей	Единица измерения	Значение
Тип просеивающей поверхности грохота насыщенного угля		Полиуретановая панель
Размер ячейки просеивающей поверхности грохота насыщенного угля	мм	0,63
Тип контрольного грохота хвостов сорбции		Высокочастотный, вибрационный
Тип просеивающей поверхности контрольного грохота хвостов сорбции		Полиуретановая панель
Размер ячейки просеивающей поверхности контрольного грохота хвостов сорбции	мм	0,63

Таблица 2.6 – Metallургический баланс золота

Наименование продукта	Масса, т/год	Содержание Au, г/т	Масса Au, г/год	Распределение Au, %
Вход:				
Раствор выщелачивания - 39% ТФ	1876923	0,61	1141743	55,90
Пустой + свежий уголь	1460	50,0	73000	3,57
ТФ хвостов выщелачивания	1200000	0,60	714720	34,99
Пустой раствор с электролиза	22633,8	5,0	113169,1	5,54
Всего			2042632	100,00
Выход:				
ЖФ хвостов сорбции	1899557	0,02	37991	1,86
ТФ хвостов сорбции	1200000	0,60	714720	34,99
Разрушенный уголь	36,0	50	1800,00	0,09
Насыщенный уголь	1460	882	1288121	63,06
Всего			2042632	100,00

Цикл процесса сорбции происходит на установке Pumpcell Plant компании Kemix, где любой чан может быть первым или последним. Система питания сорбции спроектирована с расчетом подачи пульпы в любой из чанов сорбции. То есть головной чан сорбции отсекается, для вывода золотосодержащего угля, и питание сорбции переводится в следующий чан. После вывода золотосодержащего угля с головного чана и перекачки в него обеззолоченного угля после десорбции, данный чан становится хвостовым (последним). В системе Pumpcell межкаскадный грохот, насос для угля и агитатор пульпы встроены в один механизм только с одним первичным приводом. Всего установлено шесть резервуаров Pumpcell, каждый из которых имеет полезный объем 78 м<sup>3</sup> и общий объем составляет 468 м<sup>3</sup>, общее время сорбции или контакта составляет 1,5 часов. Каждый резервуар содержит 2 тонны активированного угля, что составляет одну порцию элюирования. С целью компенсировать сокращенное время контакта с углем, его концентрация в каждом резервуаре увеличивается до 50 г/л. Пульпа, выходящая с установки Pumpcell, характеризуется содержанием золота в растворе не выше 0,02 мг/л, серебра – 0,2-0,3 мг/л, меди – 10-15 мг/л, железа – 50-65 мг/л. Это показывает о высокой степени сорбции золота и сорбционной активности сорбента NoritRo.

Насыщенный уголь собирается из резервуаров Pumpcell для дальнейшего элюирования: из первого резервуара Pumpcell извлекается 2 тонны насыщенного угля, который после сбора насыщенного угля станет последним. Когда насыщенный уголь извлекается, его заменяют восстановленным углем из цикла элюирования или из печи для термической регенерации угля. Хвостовая пульпа процесса под действием силы тяжести стекает на контрольный грохот для угля. Подрешетный продукт грохота откачивается в цикл обезвреживания от цианидов для следующей стадии обработки [46].

## **2.6 Автоматизация процесса сорбционного цианирования золота**

Применение автоматизации при процессе извлечения золота из активированных углей обеспечивает повышение эффективности процесса за счет:

- управления технологическим процессом на основе постоянных показаний датчиков и анализаторов, а также корректировки режимов управления оператором на основе оперативных лабораторных анализов;
- обеспечения контроля технологического процесса в различных режимах работы;
- анализа состояния технологического процесса, обнаружения предаварийных ситуаций и предотвращения аварий при необходимости

переключения технологических узлов в безопасное состояние как автоматически, так и по инициативе персонала;

- предоставления управленческому персоналу завода информации о технологическом процессе для принятия решений по контролю, учету, анализу, планированию и управлению производством;

- улучшение условий труда обслуживающего персонала;

- сокращения влияния человеческого фактора.

Контроль и автоматизация технологических процессов выполнены по следующим объектам:

- корпус сорбции;

- насосная станция производственной воды;

- насосная станция технологических растворов.

Проектом предусматривается следующий технологический контроль:

- верхних и нижних уровней в дренажных зумпфах № 1, 2 и 3 - датчик-реле уровня РОС-301;

- верхних и нижних уровней в контактном чане № 1, зумпфах № 3 и 4 - датчик-реле уровня РОС-301;

- верхних, нижних и нижних аварийных уровней в зумпфе № 1 и зумпфе № 2 - датчик-реле уровня РОС-301;

- верхних, средних и нижних уровней в цистернах № 1, 2 и 3 - датчик-реле уровня РОС-301;

- рН продуктивного, оборотного и промежуточного растворов в цистернах № 1, 2 и 3 - чувствительный элемент ДПГ-4М-13 и преобразователь промышленный П-210;

- температуры продуктивного раствора в цистерне № 1 - термометр манометрический, показывающий ТКП-100-М1;

- расхода продуктивного, оборотного и промежуточного растворов в общих трубопроводах № 1, 2, 3, 4 и 5 - индукционный расходомер;

- ИР-61М и интегратор И-1;

- давления в общих трубопроводах № 1, 2, 3, 4 и 5 - разделитель мембранный РМ-5319 и манометр показывающий МП-4У;

- наличия паров синильной кислоты (HCN) в воздухе помещений - сигнализатор паров синильной кислоты ССК-4;

- давления после насосов № 1, 2 и 3 - разделитель мембранный РМ-5319 и манометр показывающий МП-4У;

- содержание золота в цианистых растворах (экспресс-анализ) - анализатор «СПЕКТР-5».

Значения всех измеренных параметров отображаются на панели. Если измеренный параметр превышает допустимый предел, немедленно подается сигнал тревоги.

Панель управления содержит: технологический пульт управления, пульт сигнализации, пульт оператора, дисплей с клавиатурой. Контрольно-измерительные приборы и панель управления расположены на технологическом пульте управления. На пульте оператора расположены устройство индикации, переключатели режимов работы, задатчики для локальных цепей автоматического управления и пусковое оборудование. Для повышения надежности работы оборудования предусмотрен переход от автоматического управления к ручному. Используя дисплей, по запросу оператора можно получить информацию о параметрах аварийной зоны и с помощью клавиатуры ввести управляющие действия, устраняющие аварийную ситуацию.

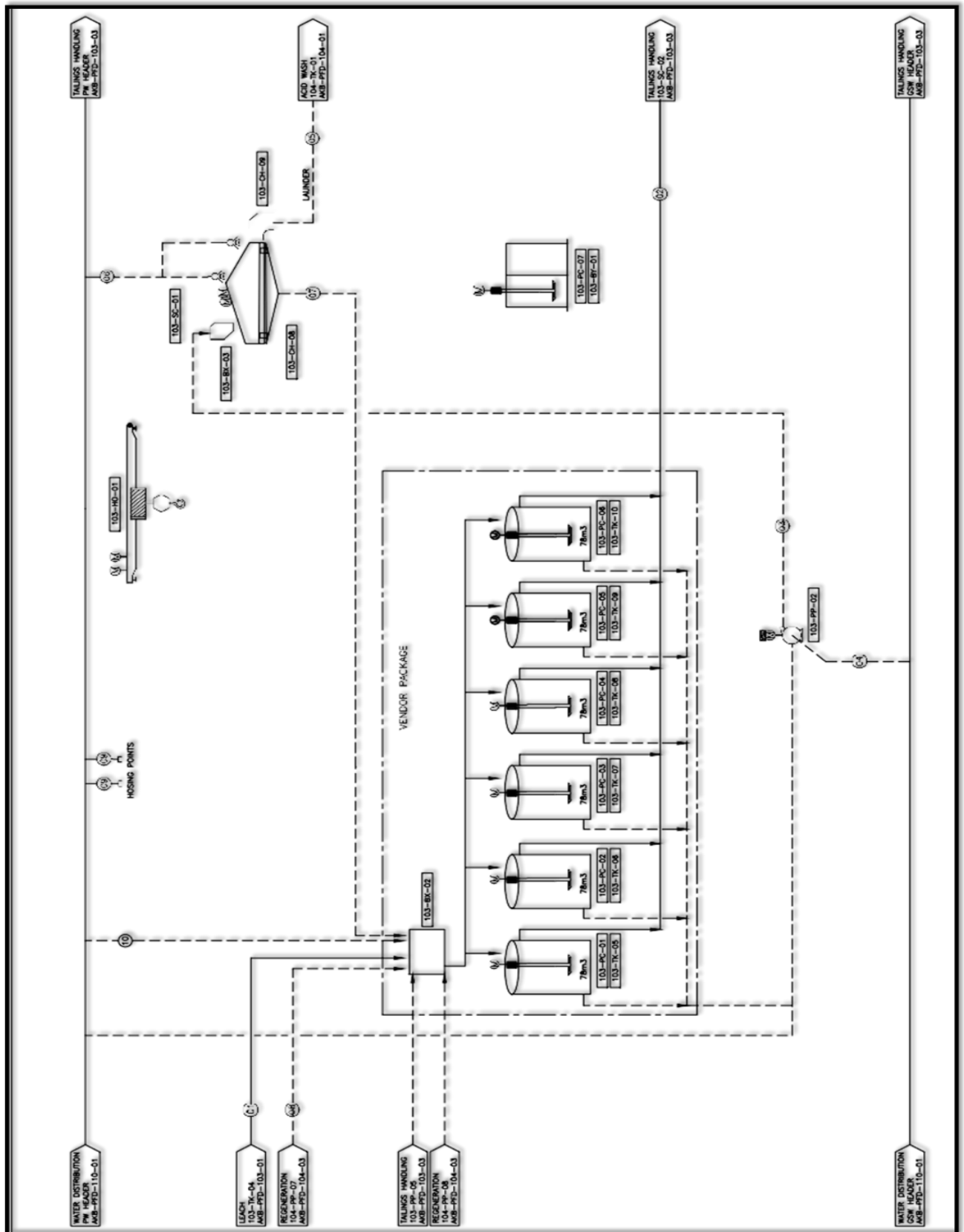


Рисунок 7 – Функциональная схема автоматизации

### 3 Экономика процесса сорбции

Затраты на приобретение исходных реагентов

Затраты на исходные реагенты для участка переработки концентрата представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Затраты на исходные компоненты

Наименование	Норма расхода	Расход т/год	Цена за тонну, тенге	Затраты в год, тыс. тенге /год
Активированный уголь NoritRO, кг/т	0,03	36,0	1 820 000	65 520 000
Аквасорб, кг/т	0,06	42,0	1 800 000	75 600 000
Активированный уголь на основе шунгита (СШ), кг/т	0,08	46,0	1 700 000	78 200 000
NaCN, кг/т	0,195	233,6	2 000 000	467 200 000
Дистиллированная вода, мл	1000	70 000	700 000	4 900 000
Известь, кг/т	0,200	300,0	38 500	11 550 000
NaOH, кг/т	0,150	250,6	390 000	97 734 000

#### 4 Принципы правил соблюдения безопасности в сорбционном цеху

В технологическом процессе используется известный процесс цианирования. Наиболее опасным из используемых вредных химических веществ является цианистый натрий, находящийся в виде водных растворов и пульпы, из которых при снижении рН выделяется синильная кислота. ПДК в воздухе рабочей зоны  $0,3 \text{ мг/м}^3$ . В процессе цианирования и сорбции при  $\text{pH} = 10-11$  в технологических растворах, в основном, присутствуют соли цианистоводородной кислоты ( $\text{NaCN}$  и т. д.), а уже при  $\text{pH} = 9$  и менее происходит образование цианистого водорода ( $t_{\text{кип}} \text{HCN} = 25,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

В проекте необходимо предусмотреть мероприятия по промышленной безопасности и санитарии в отделениях выщелачивания, сорбции, так как существует опасность выделения токсичной синильной кислоты в атмосферу производственных помещений.

При добавлении в цианидные растворы и пульпу извести или гидроксида натрия степень гидролиза цианида натрия снижается и соответственно снижается выделение синильной кислоты в атмосферу. Так, при содержании в цианистом растворе  $0,001 \%$  гидроксида натрия ( $\text{pH} = 10$ ) степень гидролиза цианида натрия составляет  $17 \%$ , при концентрации гидроксида натрия в растворе  $0,004 \%$  ( $\text{pH} = 11,5$ ) гидролизует  $2,4 \%$  цианида натрия, а при концентрации гидроксида натрия  $0,02 \%$  ( $\text{pH} = 12,3$ ) гидролизует  $1,2 \%$  цианида натрия.

Результаты анализов аспирационного воздуха при растворении цианида в производственных условиях показывают, что в газовую фазу выделяется около  $0,004 \%$  гидролизованной синильной кислоты в час. Для относительно безопасного ведения процесса цианирования и сорбции при измельчении добавляется известь и для поддержания  $\text{pH} 10,5-11$  в чаны выщелачивания предусмотрена добавка гидроксида натрия. Работать в помещениях выщелачивания, сорбции, регенерации и электролиза разрешается только при непрерывно действующей общеобменной вентиляции. Воздух, удаляемый вытяжными вентиляционными системами при цианировании и регенерации насыщенного угля, перед выпуском в атмосферу очищается от токсичных веществ до содержаний, не превышающих предельно-допустимых концентраций путем поглощения раствором гидроксида натрия. Воздух приточных вентиляционных систем подается в рабочую зону к фиксированным рабочим местам и проходам. Для контроля концентрации цианидов в производственной атмосфере рекомендуется использовать газоанализатор - детектор газа Drager CN 04 - CD - 01, который, в случае обнаружения газа цианистого водорода в зоне, включает визуальную и звуковую сигнализацию. Детектор также посылает сигнал на остановку насоса для дозировки цианида. Для контроля концентрации цианидов в пульпе рекомендуется использовать



автоматическую систему контроля цианидов онлайн-анализатор ТАС 1000. Полы (в том числе под емкостями и оборудованием) должны иметь уклон в сторону дренажных каналов и зумпфов, исключающих скопление растворов пульпы. Дренажная система полов, состоящая из каналов и зумпфов с насосами, обеспечивает сбор всех стоков и их возврат в технологический процесс. Полы, стены, потолки и строительные конструкции цехов и отделений золотоизвлекательных организаций, где применяются высокотоксичные реагенты, выполняются плотными, гладкими и покрываются гидрофобным покрытием, не впитывающие растворы и легко моющиеся.

Для оказания неотложной помощи на всех переделах отделения цианирования и сорбции устраиваются профилактические пункты. Пункты размещаются на всех рабочих площадках с таким расчетом, чтобы расстояние от них до любого цианосодержащего оборудования не превышало 25 м.

Место работ по сорбционному обогащению металлов должно быть огорожено и обозначено предупреждающими знаками снаружи.

Запрещается принимать пищу на объекте, где проводится сорбционное концентрирование металлов.

Для подъема людей на поверхность сорбционной колонны необходимо иметь лестницу с двухсторонними поручнями.

Все трубопроводы, резервуары и оборудование с растворами цианидов и кислот должны иметь надпись «ЯД», а открытые пруды-отстойники с растворами цианидов и кислот — защитные ограждения.

Потенциально опасные места на производственной площадке должны быть оборудованы автоматической сигнализацией, подающей звуковой и световой сигналы при превышении предельно допустимых концентраций цианидов и кислот в воздухе рабочей зоны.

Все виды работ в сорбционном цехе должны выполнять не менее двух рабочих с использованием необходимых средств индивидуальной защиты.

Меры безопасности в отделениях приготовления цианидных растворов, осаждения или сорбции золота, осаждающей очистки, плавки должны соответствовать требованиям настоящих Правил для отделений золотоизвлекательных предприятий с цианидной технологией.

Реакторы должны быть оборудованы техническими средствами контроля уровня заполнения растворами, сигнализацией и блокировкой, исключающими превышение установленного уровня.

Дозировка компонентов растворов и их смешивание должны осуществляться автоматизированными способами, исключающими бурную реакцию с выделением газов и выбросами смесей.

Чистку сливной арматуры реактора следует проводить только при полной остановке мешалки, отсутствии раствора в реакторе и после закрытия подводных трубопроводов.

Для аварийного сброса растворов в конструкции реактора следует предусмотреть специальный выпуск с соответствующими коммуникациями или емкостями.

При эксплуатации реакторов крышки на них должны быть плотно закрыты и закреплены.

Перед пуском реактора необходимо включить вытяжную и общеобменную вентиляцию. Чтобы исключить возможность запуска реактора до включения системы вентиляции, должна быть установлена соответствующая система шлюзования и сигнализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для переработки золота из руд месторождения Акбакай эффективно принимать цианидное выщелачивание. Физико-химическими исследованиями установлено, что руда содержит свободное золото и основные золотосодержащие минералы, такие как пирит, арсенопирит, лимониты. Содержание золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т соответственно. Содержание мышьяка в руде очень низкое и составляет всего 0,043 %. Основными минералами пустой породы в руде являются кремнезем, глинозем, полевой шпат, слюды, хлориты и др.

Сорбционное извлечение золота с различными сорбентами (активированными углями различных марок) показали, что эффективность сорбента падает в следующем порядке NoritRO > Аквасорб > СШ, степень извлечения золота с сорбентов NoritRO составляет 99 %. На показатели степени извлечения золота влияет рН среды и продолжительность сорбции. Эксперименты по извлечению золота с активированным углем NoritRO из цианидного раствора, содержащие примеси металлов такие как серебро, медь, железо, цинк показали, что при сорбции все примеси металлы извлекаются сорбентом, но в последующих циклах они вытесняются цианидным комплексом золота. При сорбции золота из продуктивных растворов на месторождении Акбакай сорбентом NoritRO степень извлечения составляет 95–96 %. Содержание в пульпе после сорбции не превышает 0,02 мг/л.

Автоматизация процесса сорбции золота может быть полезной для увеличения эффективности производства, сокращения времени и затрат на процесс, а также для соблюдения стандартов качества и безопасности.

Во время расчета было подсчитано 3 различных активированных угля. Наиболее эффективным является Noritro.

При работе с цианидами растворами персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты и проинструктирован по работе с соответствующими реагентами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 Beladi H., Trinh C. T., & Chao C. / Цены на золото, культурные факторы и пандемия Covid-19: международный анализ. Исследования в области международного бизнеса и финансов. - 2023. - С. 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.102051>

2 Gui Q., Fu L., Hu Y., Di H., Liang M., Wang S., & Zhang L./ Извлечение золота с использованием альтернатив цианиду: Ультразвуковое упрочнение и его кинетика обучения. Разработка полезных ископаемых. -2022. - С. 191. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107939> (на английском языке)

3 Staunton W. P., / Углерод в пульпе при переработке золотой руды, под ред. Адамса М., издательство Elsevier: Амстердам, Нидерланды. - 2016. - С.515-552

4 Sun C., Zhang X., Kou J., Xing Y./ Обзор процесса извлечения золота с использованием нецианидных выщелачивателей: основы, достижения и проблемы, связанные со щелочными серосодержащими выщелачивателями Int. J. Miner. Metall. Mater. - 2020. - Т. 27. - С.417-431

5 Меретуков М.А., Орлов М. А. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1990. 416 с.

6 Лолейт С.И., Меретуков М.А., Стрижко Л. С., Гурин К. К. Современные проблемы металлургии и материаловедения благородных металлов. М.: Изд-во МИСИС, 2012. 196 с

7 Котляр Ю. А. Металлургия благородных металлов / Ю. А. Котляр, М.А. Меретуков, Л. С. Стрижко. М.: МИСИС: Руда и металлы, 2005. Т.2. 392 с.

8 Воробьев А. Е., Гпадуш А.Д. Геохимия золота. Ресурсы и технологии России. - М.: Изд-во РУ/ДН, 2000. - 432 с.

9 Высоцкий Э. А. и др. Геология металлических полезных ископаемых//Учебное пособие для студентов вузов. Минск «Тетра Системс», 2006. – С. 228–236.

10 Адамс, М.Д., Бергер, А. М., 1998а. Характеристика и определение содержания углеродистых примесей в золотых рудах. Мин. 10(11), 919-927.

11 Adams, M.D., Burger, A.M., 1998b. Characterization of carbonaceous preg-robbes and abraded carbon in gold residues. CIM Montreal '98. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Canada 8pp.

12 Adams, M.D., Swaney, S.J., Friedl, J., Wagner, F.E., 1996. Preg-robbing minerals in gold ore and residues. In: Hidden Wealth, SAIMM, Johannesburg, pp. 163–172.

13 Мировой рынок золота / Электронный ресурс, режим доступа: <https://goldinrussia.ru/ru/ru/investizii-v-zoloto/o-zolote>

14 Рынок золота / Электронный ресурс, режим доступа: [https://www.metalresearch.ru/gold\\_market.html](https://www.metalresearch.ru/gold_market.html)

15 Верховин С.С. Золотодобывающая промышленность Казахстана. <https://zolotodb.ru/article/11194>

16 Рынок золота / Электронный ресурс, режим доступа: [https://www.ugmk.com/analytics/surveys\\_major\\_markets/precious-metals](https://www.ugmk.com/analytics/surveys_major_markets/precious-metals)

17 Алгебраистова Н.К., Самородский П.Н., Колотушкин Д.М., Прокопьев И.В. Технология извлечения золота из техногенного золотосодержащего сырья // Переработка руд. - 2018. - № 1. - С. 31-35.

18 Богудлова А.И., Войлошников Г.И., Матвеева Т.Н. Повышение эффективности переработки золотосодержащих сульфидных руд // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2017. - Т. 21, №12. - С. 195.

19 Пелих В.В. Особенности переработки гравитационных концентратов на модуле интенсивного цианирования “Акация” // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2013. - № 7 (78). - С. 109–114.

20 Бочаров В.А., Абрютин Д.В. Технология золотосодержащих руд. - Москва: Изд. Дом МИМиС, 2011. 420 с.

21 Кадыров А.А., Кадыров Н.А., Ахмедов Х. Интенсификация флотационного обогащения золотосодержащих руд поверхностно-активными веществами // Вестник ТашГТУ. - 2013. - № 4. - С. 157-160

22 Разработка способа извлечения золота из продуктивных растворов кучного и подземного выщелачивания с применением нерегенерируемых активированных углей одноразового использования / М. Ф. Шереметьев, М. И. Хараш, М. И. Фазлуллин. М. : ИД «Руда и Металлы», 2005. 328 с.

23 Рябой В. И., Шепета Е. Д., Кротов В. П., Голиков В. В. Новые диалкилдитиофосфаты для флотации Си, Аи и серебро содержащих руд // Обогащение руд. – 2014. – № 1. – С. 29–33.

24 Бобоев И.Р., Стрижко Л.С., Эргашев Н.У., Горбунов Е.П. Гидрометаллургический способ выщелачивания тугоплавкого окисленного золотосодержащего сырья // Научный журнал "ScienceRise". - 2014. - № 5/2 (4). – С. 7-10. DOI: 10.15587 / 2313-8416.2014.30563

25 Dai A., Simons P., Breuer A./ Обзор технологий извлечения цианида меди для цианирования медьсодержащих золотосодержащих руд. -2012. – Т. 25. - С. 1 -13.

26 Пелих В.В., Салов В. М. К вопросу управления процессом цианирования золота // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2012. –№ 11 (70). – С. 163–170.

27 Фридман И.Д. Влияние углеродистых веществ, содержащихся в рудах, на процесс цианирования / И.Д. Фридман, Е.Е. Савари, Н.Н. Демина // Цветные металлы, 1979. №9. С. 104-106.

28 Лодейщиков В.В. Цианирование и экология // Золотодобыча. 2008. №113. С. 3-7.

29 Справочник под редакцией Караганова В.В., Ушкенова Б.С. Кучное выщелачивание золота – зарубежный опыт и перспективы развития. - Алматы, 2002. - 288 с.

30 Шипнигов А.А., Минеева Т.С. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд // В сборнике: Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2020. С. 80-82.

31 Fleming C.A., Mezei A., Bourricaudy E., Canizares M., Ashbury M. / Факторы, влияющие на скорость выщелачивания и адсорбции цианида золота на активированном угле, и их влияние на конструкцию систем CIL и CIP. - 2011. - Т. 24 (6). - С. 484 -494.

32 Fleming, C.A., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M., and Ashbury, M.2011. Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. Minerals Engineering, vol. 24, no. 6. pp. 484–494.

33 Турысбекова Г.С., Меретуков М.А., Бектай Е.К. Золото: инновации в химии и металлургии. – Алматы, 2015. – С. 179-188.

34 Абдрашитова С.А. Роль гетеротрофных бактерий в установлении и окислении элементов с переменной валентностью: автореф...докт.биол. наук: Ташкент, 1992.

35 Zhang H., Ritchie /., La Brooy S. 11 Hydrometallurgy. 2004. V. 72. P.291-301.

36 Aylmore, M.G., D. M. Muir (2001), Thiosulfate Leaching of Gold (a Review), Minerals Engineering, v. 14, № 2, pp. 135-174, doi : 10.1016/S0892-6875(00)00172-2.

37 Барченков В.В. «Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих флотоконцентратов с применением активных углей». Из во «Республиканская типография», г. Улан-Удэ, 2007 г.

38 Sayiner B., Asarkan N. / Влияние цианидов серебра, никеля и меди на адсорбцию золота на активированном угле в растворах цианидного выщелачивания. Физико - химия. Проблемы шахтера. Процесс. – 2014. - Т. 50. - С.277-287.

39 Алтынбек Sh.Ch., Байконурова А. О. Исследование влияния состава золотосодержащих растворов на сорбцию золота природными и синтетическими ионообменниками. Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. Сборник 4. №308. 2016. P.

40 Лысенюк А.А., Вильнина А.В. Разработка системы управления технологическим процессом - Томск.: ТПУ, 2008. - 34 с.

41 Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности - М.: Химия, 1985.- 350 с.

42 Шиврин Г.Н., Стрижко В.С. Технологические расчеты процессов и оборудования золотоизвлекательных заводов. Красноярский ордена Трудового Красного знамени институт имени М.И. Калинина - Красноярск, 1976. - 92 с.

43 Ёлшин В.В., Колодин А.А., Овсяков А.Е. Внедрение автоматизированной системы управления циклом измельчения и классификации на Коммунарской золотоизвлекательной фабрике // Цветная металлургия. 2008. № 4. С. 24–31.

44 Dai A., Simons P., Breuer A./ Обзор технологий извлечения цианида меди для цианирования медьсодержащих золотосодержащих руд. -2012. – Б. 25. - Б. 1–13.

45 Sayiner B., Asarkan N. / Влияние цианидов серебра, никеля и меди на адсорбцию золота на активированном угле в растворах цианидного выщелачивания. Физико - химия. Проблемы шахтера. Процесс. – 2014. - Т. 50. - С.277-287.

46 Технологический регламент золотоизвлекательной фабрики месторождения «Акбакай» Жамбылской области. – 2021.

## Приложение А

050026, Республика Казахстан,  
г. Алматы, ул. Карасай батыра, 146, оф. 401  
тел. +7 747 343 15 02

E-mail: [Tatyana.Dolina@interrin.kz](mailto:Tatyana.Dolina@interrin.kz)  
[minmag.kz](http://minmag.kz)

научно-технический и производственный

**ГОРНЫЙ**  
ЖУРНАЛ КАЗАХСТАНА  
Қазақстанның кен журналы

10.06.2024

### ВЫПИСКА

*из реестра регистрации статей в Горном журнале Казахстана*

Настоящим подтверждаю, что статья «Исследование сорбции золота активированным углем в присутствии металлов примесей» (авторы Н.Қ. Нұрғабыл, К.К. Мамырбаева) зарегистрирована в реестре регистрации статей редакции Горного журнала Казахстана за №20240503 от 03.05.2024 г. и будет опубликована в течение одного года.

Ответственный редактор

Т.С. Долина

*Tatyana Dolina T.S.*



**Н.Қ.Нұрғабыл, К.К. Мамырбаева\***

*Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)*

**Исследование сорбции золота активированным углем в присутствии металлов  
примесей**

**Аннотация.** Целью настоящей работы являлась исследование сорбционных свойств сорбентов, полученных на основе активированного угля (NoritRO, АКВАСОРБ) и шунгита. Эксперименты по определению оптимального сорбента проводились с цианистым раствором состава, мг/л: Au – 11,66; Ag – 2,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12. Установлено, что при сорбции золота с использованием сорбентов NoritRO, АКВАСОРБ и сорбент на основе шунгита, наибольшим значением емкости обладает ионит марки NoritRO. Оптимальным значением pH среды для извлечения золота с NoritRO и АКВАСОРБ явился 10, для сорбента на основе шунгита pH=6. При проведении сорбции золота из многокомпонентного раствора с NoritRO наблюдается соизвлечение примесей металлов. При сорбции золота из реального цианистого продуктивного раствора с сорбентом NoritRO в 6 стадий степень извлечения золота достигает 96–99 %.

**Ключевые слова:** золото, свободное золото, цианидное выщелачивание, сорбент, активированный уголь, извлечение, pH, примеси металлов.

**Металдардың қоспалардың қатысуымен белсендірілген көмірмен алтынның  
сорбциясын зерттеу**

**Аңдатпа.** Бұл жұмыстың мақсаты белсендірілген көмір (NORITRO, АКВАСОРБ) және шунгит негізінде алынған сорбенттердің сорбциялық қасиеттерін зерттеу болды. Оңтайлы сорбентті анықтау бойынша эксперименттер құрамның цианид ерітіндісімен жүргізілді, мг/л: Au – 11,66; Ag – 2,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12. Noritro сорбенттерін, АКВАСОРБТЫ және шунгит негізіндегі сорбентті қолдана отырып, алтынды сорбциялау кезінде Noritro маркалы ионит сыйымдылықтың ең үлкен мәніне ие екендігі анықталды. Noritro және АКВАСОРБ бар алтынды алу үшін ортаның оңтайлы pH мәні 10, шунгит негізіндегі сорбент үшін pH=6 болды. NoritRO сорбентімен нақты цианидті өнімді ерітіндіден алтынды 6 сатыда сорбциялау кезінде алтынды алу дәрежесі 96-99% жетеді.

**Түйінді сөздер:** алтын, бос алтын, цианидті шаймалау, сорбент, белсендірілген көмір, экстракция, pH, металл қоспалары.

**Investigation of gold sorption by activated carbon in the presence of impurity metals**

**Abstract.** The purpose of this work was to study the sorption properties of sorbents obtained on the basis of activated carbon (NoritRO, AQUASORB) and shungite. Experiments to determine the optimal sorbent were carried out with a cyanide solution of the composition, mg/l: Au – 11.66; Ag – 2.16; Fe – 0.68; Cu – 8.45, Zn – 8.12. It was found that when gold is sorbed using NoritRO sorbents, AQUASORB and a sorbent based on shungite, the ionite of the NoritRO brand has the highest capacity value. The optimal pH value of the medium for extracting gold from NoritRO and AQUASORB was 10, for a sorbent based on shungite, pH = 6. When gold is sorbed from a real cyanide productive solution with NoritRO sorbent in 6 stages, the degree of gold extraction reaches 96-99%.

**Keywords:** gold, free gold, cyanide leaching, sorbent, activated carbon, extraction, pH, metal impurities.

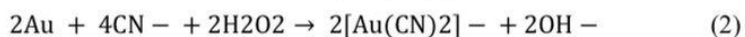
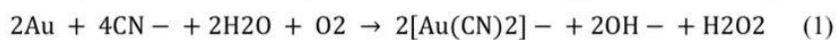
### **Введение**

Золото благодаря уникальным свойствам находит широкое применение в электронной технике, ювелирном производстве, медицине, нанотехнологии и т.д., кроме этого, его активно применяют как актив во всех странах мира.

В настоящее время с бурным развитием электронной промышленности, нанотехнологии и мировой нестабильностью резко возрос спрос на золото [1].

Казахстан обладает крупными запасами золота, по данным World Gold Council, на 1 июня 2022 года запасы золота в Казахстане составляли 373,4 т. Примерно 60 % золота в стране сосредоточено в первичных месторождениях и 38 % золота – в полиметаллических рудах. Однако, многие казахстанские месторождения относятся к бедным упорным золотосодержащим месторождениям с низкими содержаниями золота. Для поддержания объема производство золота в производство все шире вовлекаются низкосортное золотосодержащее сырье. Извлечение золота из таких руд производится, главным образом, с использованием процесса цианирования с одновременным и/или последующим селективным рафинированием и концентрированием золота процессом ионного обмена (сорбцией) [2, 3]. Альтернативными реагентами выщелачивания являются тиомочевина, тиосульфат, галогенидные растворы и др. [4, 5].

При выщелачивании золотосодержащего концентрата цианидным раствором протекают следующие химические реакции известные как уравнения Эльснера:



При взаимодействии цианидным раствором золото окисляется кислородом воздуха и образует комплексный анион  $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$  со степенью окисления +1.

Новыми разновидностями цианидного процесса являются способ извлечения золота непосредственно из цианистых рудных пульп с использованием специально разработанных ионитов. Насыщенный золотом сорбент затем отделяют от пульпы и перерабатывают отдельном цикле с получением золотосодержащего продукта. В зависимости от характера перерабатываемой руды сорбция золота из пульп осуществляется двумя методами - после предварительного выщелачивания («сорбент в пульпе» или «sorbent-in pulp», CIP) или одновременная сорбция с выщелачиванием руды («сорбент – в выщелачивании», «sorbent-in leach», CIL). При кучном цианистом выщелачивании, данный метод называют «сорбент в растворах» («sorbent-in-solution», CIS). На предприятиях часто используют два варианта сорбции: «пульповой» (CIP, CIL) и «растворный» (CIS) [6, 7, 8].

Для селективного извлечения золота из растворов выщелачивания применяются процессы ионного обмена, жидкостная экстракция, осаждение цинком и т.д.

Среди всех эффективным и широко используемым процессом селективного извлечения золота из растворов является сорбция золота активированным углем. Активированный уголь получают из различных углеродсодержащих прекурсоров (из древесины, различных углей, костных остатков животных, скорлупы кокосового ореха и т.д.) карбонизацией при высокой температуре (в интервале температуры 800-900 °С) с последующей активацией химическим способом или обработкой водяным паром. При этом формируется высокопористая прочная структура, которая обеспечивает его высокие сорбционные свойства. В зависимости от температурного режима обработки. Образования различных функциональных групп уголь может проявлять анионо- и катионообменные свойства [9,10,11]. При наличии примесей в растворе выщелачивания различных активных ионов эффективность процесса сорбции активированным углем, впоследствии производительность всего предприятия может сильно понижается. Поэтому на каждом предприятий золота актуальной проблемой является исследование сорбционных свойств сорбентов, а также влияния примесей на извлечение золота.

Целью настоящего исследования явилась – исследование сорбции золота и примесей активированным углем из растворов выщелачивания месторождения Акбакай.

### **Материалы и методика**

Объектом исследования явился продуктивный раствор, полученный выщелачиванием золотосодержащих проб месторождения Акбакай и сорбенты на основе активированного

угля марок NoritRO полученный из кокоса, Аквасорб и активированный уголь на основе шунгита.

Атомно-эмиссионный анализ проводился с применением спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 5100 DV, Perkin Elmer, рентгенфазовый анализ - электронно-зондовым микроанализатором марки Superprobe 733 фирмы JEOL, Япония, рентгенфлуоресцентный анализ - энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре X-Calibur SDD LE "Xenometrix". Содержание металлов в растворе определялись атомно-абсорбционным спектрометром SavantAA с пламенным атомизатором, pH растворов - с помощью лабораторного иономера «pH-150 M» со стандартными электродами.

#### ***Методика сорбции в статическом режиме.***

Сорбцию золота осуществляли по методике: ионит с массой 1 г перемешивали с 500 мл продуктивным раствором, продолжительность составила 1 сутки, т.е. 24 часов. После истечения времени сорбции ионит отделяли от раствора и его заливали новой порцией исходного цианидного раствора и в течение 24 часов продолжали перемешивать.

Исследования по исследованию влияния примесей металлов на извлечение золота проводилось в 6 циклов. После каждого цикла насыщения сорбента металлом раствор был проанализирован на содержание золота и металлов-примесей методами химического анализа и атомно-абсорбционной спектрометрией.

В статических условиях обменная емкость выбранных сорбентов определялась по формуле:

$$E(\text{COE}), \% = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}}{C_{\text{исх}}} \cdot \frac{V}{m}, \quad (22)$$

где  $C_{\text{исх}}$  - исходная концентрации металла в растворе, мг/дм<sup>3</sup> или ммоль/дм<sup>3</sup>;

$C_{\text{равн}}$  – равновесная концентрации металла в растворе, мг/дм<sup>3</sup> или ммоль/дм<sup>3</sup>;

$m$  – масса сорбента, г;

$V$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>.

#### **Результаты и дискуссия**

Физико-химическими исследованиями проб месторождения Акбакай установлено, что содержание золота в руде составляет 3,73 г/т. Основным компонентами руды являются кремнезем, 64,7 %, глинозем 14,00%, оксиды кальция (5,73%), магния (5,61%), калия 3,41%, натрия – 2,93%. Рудообразующими фазами являются пирит, арсенопирит.

Исследования по сорбции проводились с продуктивными растворами, полученных выщелачиванием проб золотосодержащего месторождения с содержанием основных компонентов, мг/л: Au – 11,66; Ag – 2,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18.

Физико-химическими исследованиями установлено следующий химический состав руды (рисунок 1)

Таблица 1.

**Химический состав руды месторождения Акбакай**

Кесте 1.

**Кендердің химиялық құрамы Акбакай кен орны**

Table 1.

**Chemical composition of the ore Akbakay deposit**

Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %	Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %
<i>SiO<sub>2</sub></i>	68,70	<i>Zn</i>	0,00445
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	13,70	<i>Cu</i>	0,0054
<i>CaO</i>	5,38	<i>As</i>	0,241
<i>MgO</i>	2,47	<i>Sb</i>	<0,005
<i>MnO</i>	0,0071	<i>Ba</i>	0,036
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0,18	<i>Bi</i>	<0,005
<i>K<sub>2</sub>O</i>	3,68	<i>Cd</i>	<0,0002
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	2,21	<i>Cr</i>	0,0096
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,73	<i>Co</i>	0,0012
<i>C<sub>общ</sub></i>	0,9	<i>Mo</i>	<0,0005
<i>CO<sub>2</sub></i>	2,71	<i>Ni</i>	<0,005
<i>Fe<sub>общ</sub></i>	3,06	<i>Sr</i>	0,015
<i>Fe<sub>окисл</sub></i>	2,55	<i>Sn</i>	<0,005
<i>Fe<sub>сульф</sub></i>	0,51	<i>W</i>	<0,01
<i>S<sub>общ</sub></i>	0,5	<i>Hg</i>	<0,003
<i>S<sub>сульфат</sub></i>	<0,25	<i>Au, г/т</i>	5,73

<i>Pb</i>	0,0044	<i>Ag</i> , г/т	1,22
-----------	--------	-----------------	------

Результаты химического анализа показывает, что руда на 94,27 % состоит из литофильных минералов. Содержание благородных металлов золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т соответственно. Содержание мышьяка – 0,241.

Рентгендифракционным методом анализа установлено (таблица 2), что основными рудными фазами являются пирит, арсенопирит и лимониты, а породообразующими минералами являются кремнезем, полевые шпаты, кальцит, мусковит, хлориты и др. Железо в окисленной форме преобладает над сульфидной формой. В руде также присутствуют акцессорные минералы титана типа апатит.

Таблица 2 – Минеральный состав проб руды месторождения Акбакай

Минерал, группа минералов	Массовая доля, %	Минерал, группа минералов	Массовая доля, %
Породообразующие минералы		Рудообразующие минералы	
Кварц	44,0	Пирит	0,8
Полевые шпаты	30,5	Арсенопирит	0,5
Кальцит	6,1	Оксиды/гидроксиды Fe	0,9
Мусковит	9,0	Акцессорные (минералы Ti, апатит)	1,5
Хлорит	6,7	Итого:	100

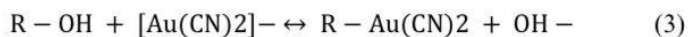
В руде в сотых и тысячных долях присутствуют окисленные и сульфидные меди, цинка. Полезным компонентом в пробе руды месторождений «Акбакай» является золото.

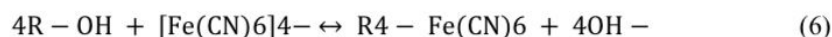
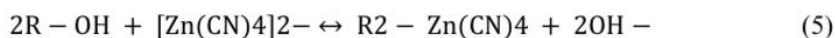
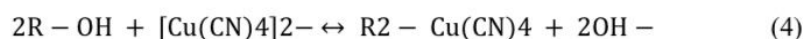
Известно, что для выщелачивания золота из такого вида сырья эффективно применить гравитационное обогащение с последующим процессом цианидного выщелачивания.

Для извлечения золота из продуктивных растворов, полученных выщелачиванием эффективно применять сорбцию с активированными углями, выбор которого является важной проблемой на каждом месторождении золота.

Для выбора эффективного ионита проведены эксперименты по сорбции из модельных растворов с активированными углями NoritRO, Аквасорб и сорбента на основе шунгита.

Извлечение металлов сорбцией проводилось из модельного раствора цианида натрия с содержанием мг/л: Au – 11,66; Ag – 22,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45, Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18. При сорбции цианистых комплексов металлов из растворов ионитами и/или активированными углями протекают реакции анионного обмена, которые описываются нижеследующими:





При сорбции металлов необходимо учесть устойчивость цианистых комплексов целевых металлов и металлов примесей, соизмерность ионных радиусов анионов и пор сорбента, взаимодействие между цианистыми комплексами металлов с функциональными группами сорбентов, энергию притяжения между ионами и т.д. В зависимости от таких факторов определяется конечное количество сорбированных ионов в анионите и/или в активированном угле.

В результате проведения экспериментов по сорбции в статическом режиме определены статическая обменная емкость сорбентов-активированных углей марок NoritRO, аквасорб и сорбента на основе шунгита. Полученные результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

**Результаты сорбции золота в статическом режиме**

**Кесте 2.**

**Статикалық режимде алтын сорбциясының нәтижелері**

**Table 2.**

**Results of gold sorption in static mode**

Сорбенты	COE, мг/г
Активированный уголь NoritRO	0,88
Аквасорб	0,63
Активированный уголь на основе шунгита (СШ)	0,32

Из полученных данных видно, что самой наибольшей значением COE обладает активированный уголь марки NoritRO, затем последует активированный уголь АКВАСОРБ. Наихудшие результаты по COE показала активированный уголь на основе

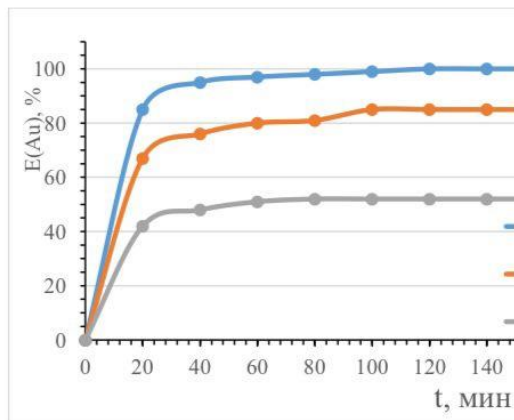
шунгита, ее значение почти в 2,75 раза ниже по сравнению с показателем сорбента NoritRO и в 2 раза Аквасорб.

Далее были исследованы влияние продолжительности процесса сорбции и значения pH на извлечение золота с сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ. Результаты приведены на рисунках 1 и 2.

Изучение сорбционной активности сорбентов от продолжительности процесса сорбции показали (рисунок 1), что статистическая обменная емкость активированного угля марки NoritRO по сравнению сорбентом марки Аквасорб было выше. Полное насыщение сорбента ионами золота в количестве 99% для сорбента NoritRO достигается за 120 минут, тогда как сорбент Аквасорб за это время адсорбирует всего 85 % золота. Активированный уголь на основе шунгита уступает по статической обменной емкости вышеназванным сорбентам почти в 2 раза и за 60 минут сорбционное извлечение золота составило 51%, а за 160 минут всего 52%.

Результаты исследования влияния pH на показатели процесса сорбции сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ показали (рисунок 2), что сорбенты NoritRO и Аквасорб хорошо извлекают золото при всех значения pH раствора. Максимальное значение степени извлечения достигается при pH равном 10 и составляют 100 и 85% соответственно. С увеличением pH от 10 до 14 показатели сорбции Аквасорб и NoritRO снижаются и составляют 90 и 70 % соответственно. Изменение pH сильно влияет на сорбционные свойства активированного угля на основе шунгита – ее сорбционные свойства улучшаются при сильноокислотной области, при pH 2 извлечение золота составило 64%, затем с повышением pH от 2 до 6 показатели сорбции резко падают, т.е. в среде с pH равном 6 сорбция золота из раствора практически не идет. Дальнейшее повышение pH раствора от 6 до 14 приводят к улучшению сорбционных свойств и степень извлечения золота увеличивается с 0 до 52%.

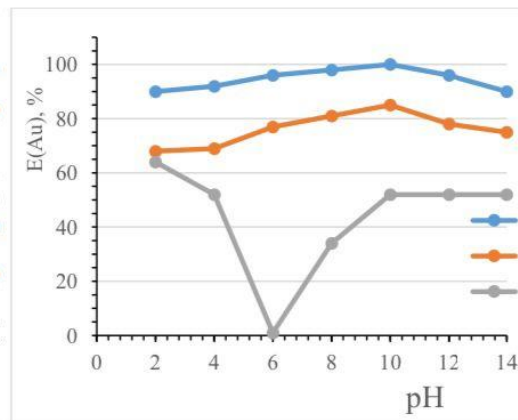




**Рисунок 1. Кинетические кривые извлечения золота из цианидных растворов различными сорбентами**

**Сурет 1. Әр түрлі сорбенттермен цианидті ерітінділерден алтынды бөліп арудың кинетикалық қисықтары**

**Figure 1. Kinetic curves of gold extraction from cyanide solutions by various sorbents**



**Рисунок 2. Влияние pH среды на извлечение золота из цианидных растворов различными сорбентами**

**Сурет 2. Әр түрлі сорбенттермен цианид ерітінділерінен алтын алуға қоршаған ортаның pH әсері**

**Figure 2. The effect of the pH of the medium on the extraction of gold from cyanide solutions by various sorbents**

На основе полученных результатов экспериментов по изучению влияния различных параметров для дальнейших исследований в качестве оптимального сорбента золота был выбран сорбент NoritRO.

Исследования влияния примесей металлов на извлечение золота сорбентами марки NoritRO проводились с использованием раствора вышеприведенного состава. Результаты приведены на таблице 3.

**Таблица 3.**

**Результаты извлечения металлов сорбентами на основе активированных углей**

**Кесте 3.**

**Белсендірілген көмір негізіндегі сорбенттермен металдарды бөліп алу нәтижелері**

**Table 3.**

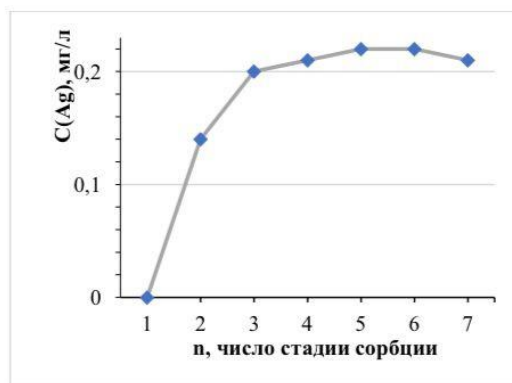
**Results of metal extraction by sorbents based on activated carbons**

Продолжительность сорбции, мин	Извлечение металлов примесей, %				
	Au	Ag	Fe	Cu	Zn
30	75,2	66,1	12,4	9,2	7,5
60	90,3	85,2	14,8	11,4	9,2
90	92,1	88,2	15,6	13,2	10,1
120	96,8	89,3	16,2	15,1	12,1
150	96,7	90,4	18,7	13,2	9,7
180	97,6	91,5	26,3	10,3	5,6
1440	98,7	97,5	14,7	7,4	4,2
2880	99,5	98,6	10,2	5,1	4,0

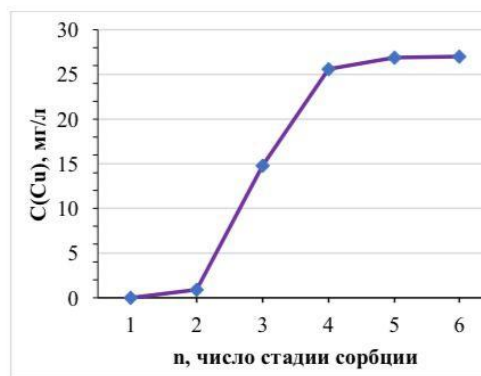
Как показывают результаты, все примеси сорбируются активированным углем из-за его высокой сорбционной емкости. Однако, при увеличении продолжительности сорбции до 2 суток содержание примесей металлов в сорбенте снижаются. Это подтверждает вывод о том, что ионы примесей металлов замещаются ионами золота, и извлекаются в раствор [11].

Далее были изучены влияние числа стадии сорбции на сорбционную способность ионита NoritRO примесей серебра, меди, железа и цинка из цианистого раствора. Результаты приведены ниже на рисунках 3-4.

Определение содержания металлов в растворе после каждого этапа сорбции проводились химическим и атомно-абсорбционным спектрометрическим методами анализа. Результаты экспериментов приведены на рисунках 3 -6.



**Рисунок 3. Зависимость концентрации серебра в растворе от цикла сорбции**



**Рисунок 4. Зависимость концентрации меди в растворе от цикла сорбции**

Сурет 3. Ерітіндідегі күміс концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі

Figure 3. Dependence of the silver concentration in solution on the sorption cycle

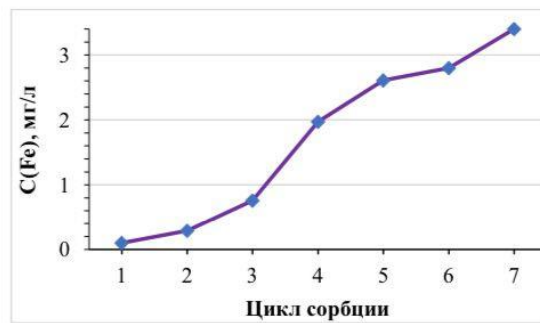


Рисунок 5. Зависимость концентрации железа в растворе от цикла сорбции

Сурет 5. Ерітіндідегі темір концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі

Figure 5. Dependence of the concentration of iron in solution on the sorption cycle

Сурет 4. Ерітіндідегі мыс концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі

Figure 4. Dependence of the copper concentration in solution on the sorption cycle

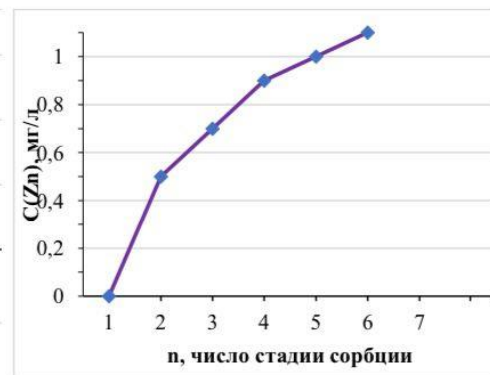


Рисунок 6. Зависимость концентрации цинка в растворе от цикла сорбции

Сурет 6. Ерітіндідегі мырыш концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі

Figure 6. Dependence of zinc concentration in solution on the sorption cycle

Как показали результаты наших исследований, выбранный активированный уголь хорошо извлекает наряду с ионами золота ионов примесей металлов – серебра, меди, железа и цинка. В последующие стадии, т.е. начиная со второй стадии сорбции наблюдается вытеснение примесей металлов и замещение ионами золота из структуры активированного угля, что заметно при определении концентрации примесей в растворе. Среди всех ионов примесей плохо вытесняются ионы меди и серебра, что подтверждается с выводами приведенные в исследования [12]. Но несмотря на это использованный в экспериментах активированный уголь показал высокую селективность к золоту и серебру.

Золотосодержащая руда состава (таблица 1) месторождения Акбакай поступает на гравитационное обогащение, где степень обогащения составляет 53-56%. Концентрат далее направляется на цианидное выщелачивание, в результате которого извлекается от 69,42 до 78,33% золота. При цианидном выщелачивании руд месторождения Акбакай получают продуктивный раствор состава, мг/л: золото 500-600 мг/л, железо 80-90 мг/л, медь – 0,40-0,50 мг/л, серебро – 100-150 мг/л. Процесс сорбции проводится с использованием сорбента NoritRO с содержанием твердой фазы 40%, продолжительностью цикла 8 часов.

Цикл процесса сорбции происходит на установке Pumpcell Plant компании Kemix, где любой чан может быть первым или последним. Система питания сорбции спроектирована с расчетом подачи пульпы в любой из чанов сорбции. То есть головной чан сорбции отсекается, для вывода золотосодержащего угля, и питание сорбции переводится в следующий чан. После вывода золотосодержащего угля с головного чана и перекачки в него обеззолоченного угля после десорбции, данный чан становится хвостовым (последним). В системе Pumpcell межкаскадный грохот, насос для угля и агитатор пульпы встроены в один механизм только с одним первичным приводом. Всего установлено шесть резервуаров Pumpcell, каждый из которых имеет полезный объем 78 м<sup>3</sup> и общий объем составляет 468 м<sup>3</sup>, общее время сорбции или контакта составляет 1,5 часов. Каждый резервуар содержит 2 тонны активированного угля, что составляет одну порцию элюирования. С целью компенсировать сокращенное время контакта с углем, его концентрация в каждом резервуаре увеличивается до 50 г/л. Пульпа, выходящая с установки Pumpcell, характеризуется содержанием золота в растворе не выше 0,02 мг/л, серебра – 0,2-0,3 мг/л, меди – 10-15 мг/л, железа – 50-65 мг/л. Это показывает о высокой степени сорбции золота и сорбционной активности сорбента NoritRo.

Насыщенный уголь собирается из резервуаров Pumpcell для дальнейшего элюирования: из первого резервуара Pumpcell извлекается 2 тонны насыщенного угля, который после сбора насыщенного угля станет последним. Когда насыщенный уголь извлекается, его заменяют восстановленным углем из цикла элюирования или из печи для термической регенерации угля. Хвостовая пульпа процесса под действием силы тяжести стекает на контрольный грохот для угля. Подрешетный продукт грохота откачивается в цикл обезвреживания от цианидов для следующей стадии обработки.

### **Заключение**

Для переработки золота из руд месторождения Акбакай эффективно принимать цианидное выщелачивание. Физико-химическими исследованиями установлено, что руда содержит свободное золото и основные золотосодержащие минералы, такие как пирит, арсенопирит, лимониты. Содержание золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т

соответственно. Содержание мышьяка в руде очень низкое и составляет всего 0,043%. Основными минералами пустой породы в руде являются кремнезем, глинозем, полевой шпат, слюды, хлориты и др.

Сорбционное извлечение золота с различными сорбентами (активированными углями различных марок) показали, что эффективность сорбента падает в следующем порядке NoritRO>Аквасорб>СШ, степень извлечения золота с сорбентов NoritRO составляет 99%. На показатели степени извлечения золота влияет рН среды и продолжительность сорбции. Эксперименты по извлечению золота с активированным углем NoritRO из цианидного раствора, содержащие примеси металлов такие как серебро, медь, железо, цинк показали, что при сорбции все примеси металлы извлекаются сорбентом, но в последующих циклах они вытесняются цианидным комплексом золота.

При сорбции золота из продуктивных растворов на месторождении Акбакай сорбентом NoritRO степень извлечения составляет 95-96%. Содержание в пульпе после сорбции не превышает 0,02 мг/л.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. *Beladi H., Trinh C. T., & Chao C. / Цены на золото, культурные факторы и пандемия Covid-19: международный анализ. Исследования в области международного бизнеса и финансов. - 2023. - С. 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.102051> (на английском языке)*
2. *Gui Q., Fu L., Hu Y., Di H., Liang M., Wang S., & Zhang L./ Извлечение золота с использованием альтернатив цианиду: Ультразвуковое упрочнение и его кинетика обучения. Разработка полезных ископаемых. -2022. - С. 191. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107939> (на английском языке)*
3. *Stanton W. P., / Углерод в пульпе при переработке золотой руды, под ред. Адамса М., издательство Elsevier: Амстердам, Нидерланды. - 2016. - С.515-552 (на английском языке)*
4. *Sun C., Zhang X., Kou J., Xing Y./ Обзор процесса извлечения золота с использованием нецианидных выщелачивателей: основы, достижения и проблемы, связанные со щелочными серосодержащими выщелачивателями Int. J. Miner. Metall. Mater. - 2020. - Т. 27. - С.417-431 (на английском языке)*
5. *Sousa R., Regufe M. J., Fiúza A., Leite M. M., & Futuro A. / Систематический обзор устойчивой добычи золота из необработанных руд с использованием альтернативных реагентов для выщелачивания. Добывающая промышленность и общество. - 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101018> (на английском языке)*

6. Yefremova S.V., Kablanbekov A.A., Anarbekov K.K., Bunchuk L.V., Sukharnikov Y. I., Bogdanovich N.I., Terlikbaeva A.Z., Zharmenov A.A., / Углеродный сорбент на основе специального мелкодисперсного кокса для извлечения золота, химии твердого топлива. - 2019. - Т. 53. - С. 208–213 (на английском языке)
7. Fleming C.A., Mezei A., Bourricaudy E., Canizares M., Ashbury M. / Факторы, влияющие на скорость выщелачивания и адсорбции цианида золота на активированном угле, и их влияние на конструкцию систем CIL и CIP. - 2011. - Т. 24 (6). - С. 484 -494 (на английском языке)
8. Soleimani M., Kaghazchi T. / Активированная твердая оболочка абрикосовых косточек: перспективный адсорбент для извлечения золота. -2008. – Т. 16. - С. 112–118(на английском языке)
9. Jia and Steele C.J. and Hayward I.P. and Thomas K.M. / Механизм адсорбции частиц золота и серебра на активированных углях. Углерод. - 1998. – Т. 36. - С. 1299 -1308(на английском языке)
10. Van Deventer, Bazhko J., Yahorava V. / Сравнение ионообменных смол, селективных по отношению к золоту, и активированного угля для извлечения золота из медных растворов для выщелачивания золота. Конференция ALTA 2014 по золоту и драгоценным металлам, Мельбурн, Австралия, ALTA Металлургический сервис. – 2014. – С. 18(на английском языке)
11. Dai A., Simons P., Breuer A./ Обзор технологий извлечения цианида меди для цианирования медьсодержащих золотосодержащих руд. -2012. – Т. 25. - С. 1 -13 (на английском языке)
12. Sayiner B., Acarkan N. / Влияние цианидов серебра, никеля и меди на адсорбцию золота на активированном угле в растворах цианидного выщелачивания. Физико - химия. Проблемы шахтера. Процесс. – 2014. - Т. 50. - С.277-287(на английском языке)

#### **ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1. Beladi H., Trinh C. T., & Chao C. / Алтын бағасы, мәдени факторлар және Covid-19 пандемиясы: халықаралық талдау. Халықаралық бизнес және қаржы саласындағы зерттеулер. -2023. - Б. 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.102051>(ағылшын тілінде)
2. Gui Q., Fu L., Hu Y., Di H., Liang M., Wang S., & Zhang L. / Пайдалану арқылы алтын алу цианидке балама: ультрадыбыстық қатайту және оның оқу кинетикасы. Пайдалы

- қазбаларды игеру. - 2022. - Б. 191. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107939>  
(ағылшын тілінде)
3. Staunton W. P., / Алтын кенін өңдеу кезіндегі пульпадағы көміртегі, ред. Адамс М., Elsevier баспасы: Амстердам, Нидерланды -2016. - Б. 515-552. (ағылшын тілінде)
  4. Sun C., Zhang X., Kou J., Xing Y. / Цианидті емес сілтілендіргіштерді қолдану арқылы алтын алу процесіне шолу: сілтілі күкіртті сілтілендіргіштермен байланысты негіздер, жетістіктер және мәселелер. - 2020. - Б. 27.- Б. 417-431 (ағылшын тілінде)
  5. Sousa R., Regufe M. J., Fiúza A., Leite M. M., & Futuro A. / Баламалы сілтілеу реагенттерін қолдана отырып, өңделмеген кендерден тұрақты алтын өндіруге жүйелі шолу. Өндіруші өнеркәсіп және қоғам. - 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101018> (ағылшын тілінде)
  6. Yefremova S.V., Kablanbekov A.A., Anarbekov K.K., Bunchuk L.V., Sukharnikov Y. I., Bogdanovich N.I., Terlikbaeva A.Z., Zharmenov A.A., / Алтын қатты отын алу үшін арнайы ұсақ дисперсті кокс негізіндегі көміртекті сорбент. - 2019. - Б. 53. - Б. 208–213. (ағылшын тілінде)
  7. Fleming C.A., Mezei A., Bourricaudy E., Canizares M., Ashbury M. / Белсендірілген көмірдегі алтын цианидінің шаймалау және адсорбция жылдамдығына әсер ететін факторлар және олардың CIL және CIP жүйелерінің дизайнына әсері. - 2011. - Б. 24 (6). - Б. 484 -494 (ағылшын тілінде)
  8. Soleimani M., Kaghazchi T. / Өрік шұңқырларының белсендірілген қатты қабығы: алтынды алу үшін перспективалы адсорбент. -2008. – Б. 16. - Б. 112–118 (ағылшын тілінде)
  9. Jia and Steele C.J. and Hayward I.P. and Thomas K.M. / Белсендірілген көмірдегі алтын мен күміс бөлшектерін адсорбциялау механизмі. Көміртек. - 1998. – Б. 36. - Б.1299 - 1308 (ағылшын тілінде)
  10. Van Deventer, Bazhko J., Yakhorava V. /Алтынға селективті ион алмастырғыш шайырлар мен алтынды шаймалау үшін мыс ерітінділерінен алтын алу үшін белсендірілген көмірді салыстыру. Алтын және бағалы металдар бойынша 2014 ALTA конференциясы, Мельбурн, Австралия, ALTA металлургиялық қызмет. – 2014. – Б. 18 (ағылшын тілінде)
  11. Dai A., Simons P., Breuer A./ Обзор технологий извлечения цианида меди для цианирования медьсодержащих золотосодержащих руд. -2012. – Б. 25. - Б. 1–13 (ағылшын тілінде)

12. Sayiner B., Acarkan N. / Күміс, никель және мыс цианидтерінің цианидті шаймалау ерітінділеріндегі белсендірілген көмірдегі алтынның адсорбциясына әсері. *Физика-химия. Шахтер мәселелері. Процесс.* – 2014. – Б. 50. – Б.277-287 (ағылшын тілінде)

## REFERENCE

1. Beladi H., Trinh C. T., & Chao C. / *Gold prices, cultural factors, and Covid-19 pandemic: An international analysis. Research in International Business and Finance.* - 2023. - V 66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2023.102051> (In English)
2. Gui Q., Fu L., Hu Y., Di H., Liang M., Wang S., & Zhang L. / *Gold extraction using alternatives to cyanide: Ultrasonic reinforcement and its leaching kinetics. Minerals Engineering.* - 2022. - V 191. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107939> (In English)
3. Staunton W. P. / *Carbon-in-pulp, In Gold Ore Processing, ed.: Adams, M., Elsevier: Amsterdam, Netherlands.* - 2016. - V. - P. 515-552. (In English)
4. Sun C., Zhang X., Kou J., Xing Y. / *A review of gold extraction using noncyanide lixivants: Fundamentals, advancements, and challenges toward alkaline sulfur-containing leaching agents Int. J. Miner. Metall. Mater.* - 2020. - V. 27. - P. 417-431 (In English)
5. Sousa R., Regufe M. J., Fiúza A., Leite M. M., & Futuro A. / *A systematic review of sustainable gold extraction from raw ores using alternative leaching reagents. The Extractive Industries and Society.* - 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101018> (In English)
6. Yefremova S.V., Kablanbekov A.A., Anarbekov K.K., Bunchuk L.V., Sukharnikov Y. I., Bogdanovich N.I., Terlikbaeva A.Z., Zharmenov A.A., / *Carbon sorbent based on special fine coke for the extraction of gold, Solid Fuel Chem.* - 2019.- V. 53. - P. 208–213. (In English)
7. Fleming C.A., Mezei A., Bourricaudy E., Canizares M., Ashbury M. / *Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits.* - 2011. - V. 24 (6). - P. 484 - 494. (In English)
8. Soleimani M., Kaghazchi T. / *Activated hard Shell of apricot stones: a promising adsorbent in gold recovery.* -2008. – V. 16. - P. 112–118 (In English)
9. Jia and Steele C.J. and Hayward I.P. and Thomas K.M. / *Mechanism of adsorption of gold and silver species on activated carbons. Carbon.* - 1998. – V. 36. - P. 1299-1308(In English)
10. Van Deventer, Bazhko J., Yahorava V. / *Comparison of Gold-Selective Ion Exchange Resins and Activated Carbon for the Recovery of Gold from Copper Gold Leach Liquors. ALTA 2014 Gold - precious metals Conference, Melbourne, Australia, ALTA Metallurgical Service.* – 2014. – V. 18(In English)



11. Dai A., Simons P., Breuer A. / *A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores.* -2012. – V. 25. - P. 1 - 13 (In English)
12. Sayiner B., Acarkan N. / *Effect of silver, nickel, and copper cyanides on gold adsorption on activated carbon in cyanide leach solutions.* *Physicochem. Problems Miner. Process.* – 2014. - V. 50. - P. 277-287 (In English)

#### ***Сведения об авторах***

***Нургабыл Н.К.*** магистрант кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university](mailto:nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university); <https://orcid.org/0009-0004-2319-7114>

***Мамырбаева К.К.***, доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [k.mamyrbayeva@satbayev.university](mailto:k.mamyrbayeva@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-1094-5345>

#### ***Авторлар туралы мәліметтер:***

***Нургабыл Н.К.*** Satbayev University «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасының магистранты (Алматы қ., Қазақстан), [nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university](mailto:nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university); <https://orcid.org/0009-0004-2319-7114>

***Мамырбаева К.К.***, Ph.D докторы, Satbayev University «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан), [k.mamyrbayeva@satbayev.university](mailto:k.mamyrbayeva@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-1094-5345>

#### ***Information about the authors***

***Nurgaby1 N. K.***, master's student of the Department "Metallurgical Processes, Heat Engineering and Technology of Special Materials" Satbayev University, [nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university](mailto:nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university) (Almaty, Kazakhstan)

***Mamyrbaeva K.K.***, Doctor Ph.D., Associate Professor of the Department of "Metallurgical Processes, Heat Engineering and Technology of Special Materials" Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)