

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

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

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

УДК

На правах рукописи

Бердібай Назерке Нұрланқызы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации «Разработка сорбционного активного материала на основе
монтмориллонит содержащей отечественной глины»

Направление подготовки 7М07110 – Химические процессы и производство химических
материалов

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор
Кабдрахманова С.К.
"09" 01 2026 г.

Рецензент
к.т.н., доцент
КазНУ им. аль-Фараби
А.А. Батырбаева
"09" 01 2026 г.

Нормоконтроль
к.т.н., ассоциированный профессор
Кабдрахманова С.К.
"09" 01 2026 г.

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

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой «Химических
процессов и промышленной
экологии»
к.х.н., ассоциированный профессор

Ш.Н. Кубекова
"14" 01 2026 г.

Алматы 2026

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

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

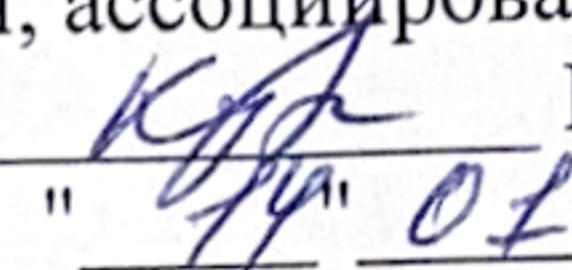
Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова а

Кафедра «Химических процессов и промышленной экологии»

7М07110 – Химические процессы и производство химических материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Химических процессов и
промышленной экологии»
к.х.н, ассоциированный профессор

 Ш.Н. Кубекова
"12" 01 2026 г

ЗАДАНИЕ
на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Бердібай Назерке Нурланқызы

Тема: Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит
содержащей отечественной глины

Утверждена приказом проректора по академической работе №548-п/ө от
"14"12.2023 г.

Срок сдачи законченной диссертации "12" 01 2026 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: образцы бентонитовых глин
месторождений Калжат и Орта Тентек, биополимерные компоненты, а также
экспериментальные методики получения и модификации глинистых систем и методы
оценки их физико-химических, реологических, структурных и функциональных свойств

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) Изучение и обобщение теоретических положений, касающихся состава,
свойств и областей применения бентонитов;
 - б) Исследование физико-химических и структурных характеристик исходных глин
месторождений Калжат и Орта Тентек;
 - в) разработка и проведение процессов модификации бентонитовых глин указанных
месторождений;
 - г) Получение 3D-полимерно-композиционных материалов и комплексное
исследование их основных характеристик;
 - д) разработка и оптимизация состава 3D-полимер-композиционных материалов с
заданными функциональными свойствами
- е) Приложения.

Рекомендуемая основная литература: из 57 отечественных и зарубежных литературных
источников.

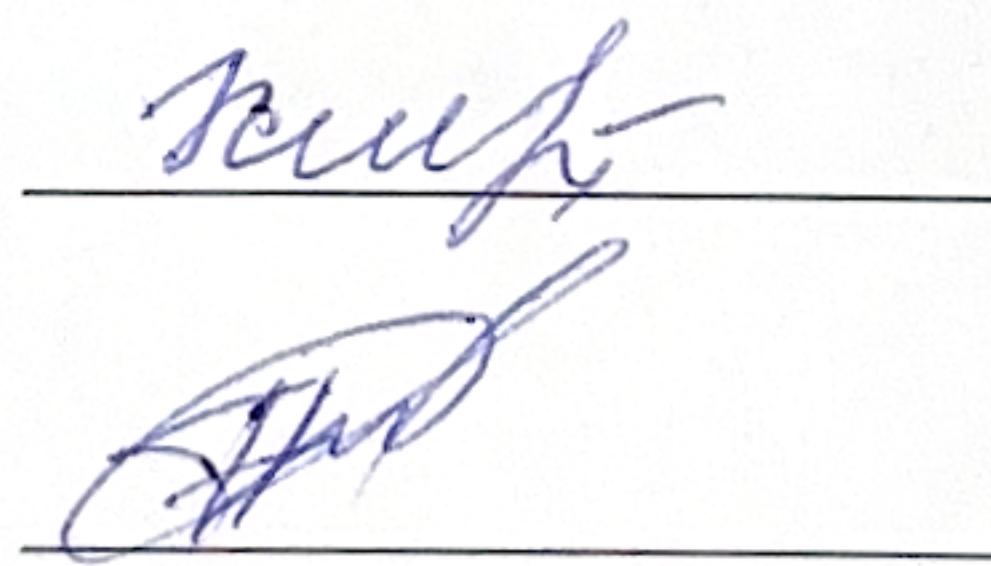
ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|---|---|------------|
| Анализ литературного обзора, подбор подходящих источников | 01.02.2024 – 30.09.2024 | Выполнено |
| Разработка и выбор методов исследования. Отбор проб, проведение лабораторных анализов, интерпретация полученных результатов | 01.10.2024 – 30.05.2025 | Выполнено |
| Обработка и обсуждение полученных данных. Завершение исследования и анализ выводов | 01.06.2025 – 29.12.2025 | Выполнено |

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

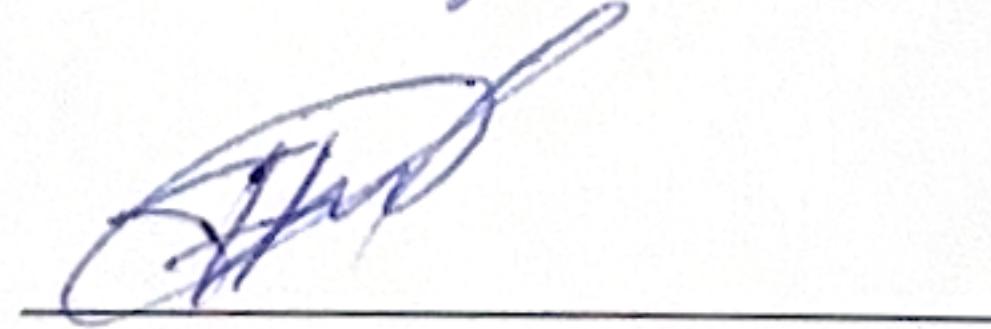
| Наименования разделов | Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание) | Дата подписания | Подпись |
|-----------------------|--|-----------------|---|
| Нормоконтролер | к.т.н., ассоц. профессор Кабдрахманова С.К. | |  |

Научный руководитель



Кабдрахманова С.К.

Задание приняла к исполнению



Бердібай Н.Н.

Дата

«12» 01 2026 г.

ОТЗЫВ

на магистерскую диссертацию

Бердібай Назерке Нұрланқызы

по ОП 7М07110 – «Химические процессы и производство химических материалов»

на тему «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит
содержащей отечественной глины»

Магистерская диссертация посвящена разработке сорбционно-активного материала медицинского назначения на основе монтмориллонит-содержащих отечественных глин месторождений Калжат и Орта Тентек. В работе рассмотрен комплексный подход к созданию полимер-композиционного материала с использованием природного минерального сырья и современных методов его модификации.

В ходе выполнения диссертационного исследования автором проведён систематический анализ научных источников, посвящённых применению бентонитовых глин и минеральных сорбентов в медицинских и биомедицинских материалах. На основе анализа литературных данных обоснован выбор объекта и направления исследования, сформулированы цель и задачи работы.

Экспериментальная часть диссертации включает физико-химическую характеристику исходных монтмориллонит-содержащих глин, разработку методов их модификации, а также получение и исследование сорбционно-активных полимер-композиционных материалов. Автором изучены электрохимические, морфологические и структурные свойства материалов, а также показана их коллоидная устойчивость и функциональная пригодность для медицинского применения. Полученные результаты логично интерпретированы и подтверждены экспериментальными данными.

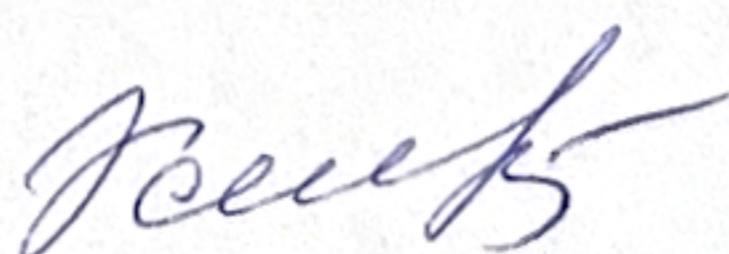
Практическая значимость работы заключается в возможности использования модифицированных отечественных бентонитов при создании сорбционно-активных и антимикробных материалов медицинского назначения, что является актуальным с точки зрения импортозамещения и развития отечественной сырьевой базы.

В период выполнения магистерской диссертации автором были освоены современные методы экспериментальных исследований, проведена обработка и анализ результатов, сформированы навыки самостоятельной научно-исследовательской работы.

В целом магистерская диссертация выполнена на хорошем научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, и заслуживает положительной оценки. Автор работы достойна присвоения степени магистра по соответствующему направлению подготовки.

Оценка работы – 98 баллов – «отлично»

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор



Кабдрахманова С.К.

«14» января 2026 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию Бердібай Н.Н.
на тему «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит
содержащей отечественной глины» представленную на соискание степени магистра по
ОП 7М07110 – Химические процессы и производство химических материалов

Магистерская диссертация посвящена актуальной научно-практической задаче, связанной с разработкой сорбционно-активных материалов медицинского назначения на основе отечественного минерального сырья. Выбранная тема соответствует современным направлениям развития химической технологии, биомедицинских материалов и импортозамещения в Республике Казахстан.

В работе последовательно изложены цель и задачи исследования, обоснована актуальность темы, выполнен анализ научных источников по применению бентонитов и минеральных сорбентов в медицинских целях. Автором проведены экспериментальные исследования, направленные на физико-химическую характеристику монтмориллонит-содержащих глин, их модификацию и получение полимер-композиционного материала с сорбционными и антимикробными свойствами. Полученные результаты логично представлены, проанализированы и подтверждены экспериментальными данными.

Следует отметить достаточный уровень владения автором современными методами физико-химического анализа, корректное использование научной терминологии, а также практическую направленность работы. Материал диссертации изложен в целом последовательно и аргументированно, выводы соответствуют поставленным задачам и полученным результатам.

Замечания по работе:

В литературном обзоре целесообразно было бы расширить анализ отдельных зарубежных источников последних лет по аналогичным материалам.

В ряде разделов экспериментальной части описание методик могло быть представлено более компактно.

В тексте встречаются отдельные стилистические и редакционные неточности, не влияющие на общее содержание и научную ценность работы.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общего положительного впечатления от выполненной работы.

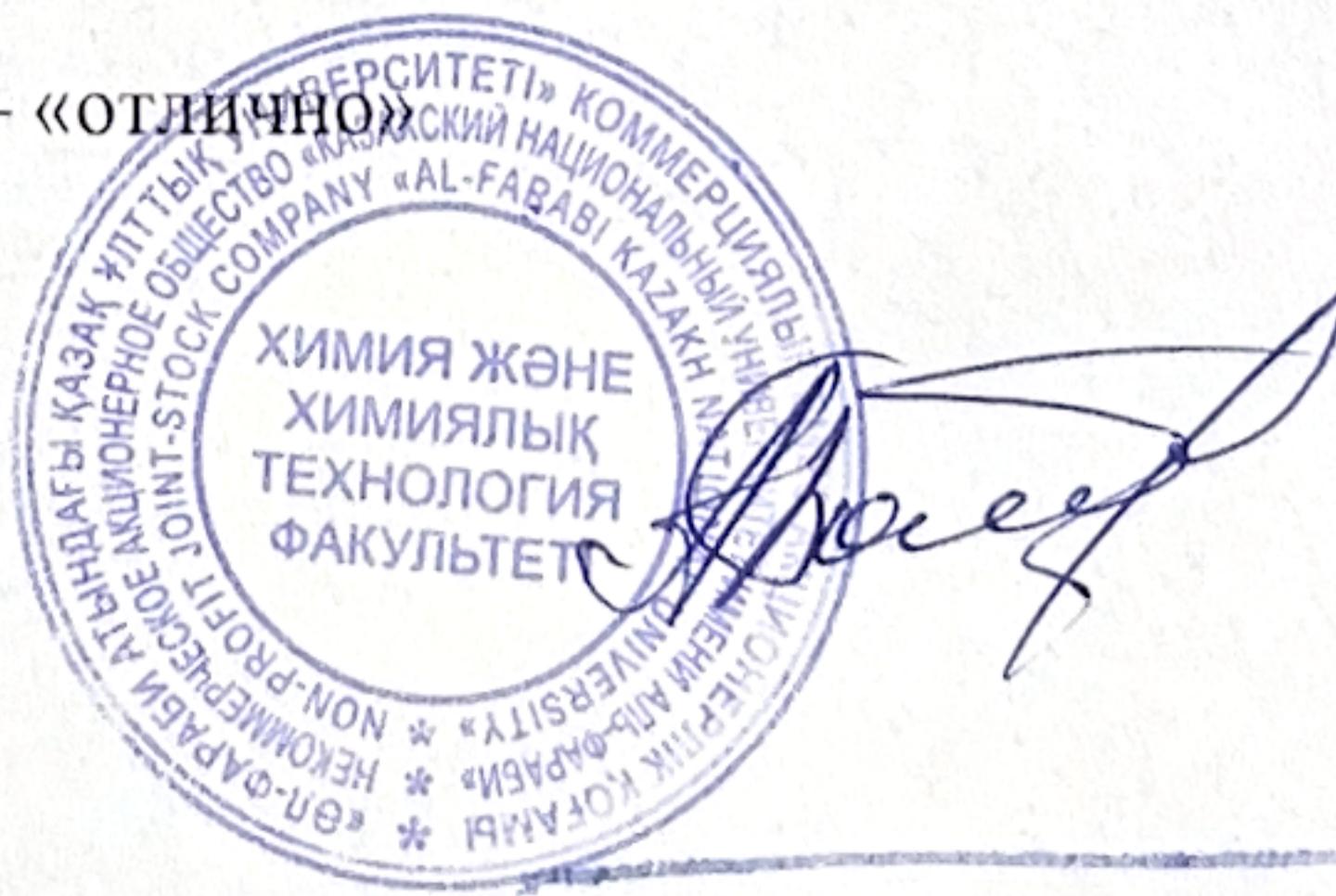
Заключение

Магистерская диссертация на тему «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит содержащей отечественной глины» имеет научно-практическое значение, соответствует требованиям КазНИТУ им. К.И. Сатпаева и может быть рекомендована к защите.

Оценка работы – 98 баллов – «отлично»

Рецензент
к.т.н., доцент
КазНУ им. аль-Фараби

«14» января 2026 г.



А.А. Батырбаева

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Бердібай Назерке Нұрланқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит содержащей отечественной глины»

Научный руководитель: Шолпан Кубекова

Коэффициент Подобия 1: 2.9

Коэффициент Подобия 2: 1.6

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является plagiatом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является plagiatом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и plagiat или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия plagiatа, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 13.01.2026 г.

Заведующий кафедрой *Х/ИИ/13*
Кубекова Ш.Н. к.ф.н.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Бердібай Назерке Нұрланқызы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит содержащей отечественной глины»

Научный руководитель: Шолпан Кубекова

Коэффициент Подобия 1: 2.9

Коэффициент Подобия 2: 1.6

Микропробелы: 3

Знаки из здругих алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата

13.01.2026

Мер

проверяющий эксперт

(Мерзгабекова Н.Г.)

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация посвящена разработке сорбционно-активных антимикробных материалов медицинского назначения пролонгированного действия на основе монтмориллонит-содержащих бентонитовых глин месторождений Калжат и Орта Тентек. В работе исследованы физико-химические свойства исходных глин, разработаны методы их структурной модификации и получены полимерно-композиционные материалы с антимикробными свойствами. Показана перспективность применения модифицированных бентонитов Казахстана для создания ранозаживляющих медицинских материалов, обладающих сорбционной активностью и биологической эффективностью.

Магистерская диссертация на тему «Разработка сорбционного активного материала на основе монтмориллонит содержащей отечественной глины» включает 82 страниц, 14 рисунков, 13 таблиц. Библиографический указатель включает 57 литературных источника.

ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the development of sorption-active antimicrobial materials for medical applications with prolonged action based on montmorillonite-containing bentonite clays from the Kalzhat and Orta Tentek deposits. The study investigates the physicochemical properties of the initial clays, develops methods for their structural modification, and obtains polymer-composite materials with antimicrobial properties. The prospects for using modified bentonites from Kazakhstan in the development of wound-healing medical materials possessing sorption activity and biological effectiveness are demonstrated.

The master's thesis entitled «Development of a sorption active material based on montmorillonite containing domestic clay» comprises 82 pages, 14 figures, and 13 tables. The bibliography includes 57 references.

АНДАТПА

Магистрлік диссертация Калжат және Орта Тентек кен орындарының монтмориллонит-құрамды бентонитті саздары негізінде пролонгацияланған әсері бар медициналық мақсаттағы сорбциялық-белсенді антимикробтық материалдарды әзірлеуге арналған. Жұмыста бастапқы саздардың физика-химиялық қасиеттері зерттеліп, олардың құрылымдық модификациялау әдістері әзірленді және антимикробтық қасиеттері бар полимер-композициялық материалдар алынды. Қазақстанның модификацияланған бентониттерін сорбциялық белсенділігі мен биологиялық тиімділігі жоғары жараны жазатын медициналық материалдарды жасау үшін қолданудың перспективалығы көрсетілді.

«Монтмориллонитті отандық саз негізіндегі сорбциялық белсенді материал әзірлеу» тақырыбындағы магистрлік диссертация 82 беттен, 14 суреттен, 13 кестеден тұрады. Пайдаланылған әдебиеттер тізімі 57 дереккөзді қамтиды.

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|---------|--|----|
| | Введение | 8 |
| Глава 1 | Теоретические основы и физико-химические свойства бентонитов | 11 |
| 1.1 | Казахстанские бентониты как перспективная минерально-сырьевая база | 11 |
| 1.2 | Современное состояние проблемы лечения ран и требования к перевязочным материалам | 13 |
| 1.3 | Современные перевязочные материалы: классификация, свойства и ограничения | 19 |
| 1.4 | Бентонит как перспективный материал медицинского назначения | 21 |
| 1.5 | Наночастицы серебра в медицине | 27 |
| Глава 2 | Материалы и методы исследования | 34 |
| 2.1 | Общие положения экспериментальной программы | 34 |
| 2.2 | Материалы исследования | 34 |
| 2.3 | Подготовка образцов | 34 |
| 2.4 | Методы химической подготовки | 35 |
| 2.5 | Аналитические методы исследования | 35 |
| 2.6 | Контроль воспроизводимости | 37 |
| 2.7 | Методологическая логика исследования | 37 |
| Глава 3 | Результаты и обсуждения | 38 |
| 3.1 | Исследование исходных образцов бентонитовых глин | 38 |
| Глава 4 | Экспериментальная часть | 43 |
| 4.1 | Общая концепция и замысел исследования | 43 |
| 4.2 | Подготовка и модификация природных бентонитов | 44 |
| 4.3 | Получение и структурная организация 3D-полимерно-композиционных материалов | 65 |
| 4.4 | Результаты получения и структурного анализа 3D-полимерно-композиционных материалов | 67 |
| 4.5 | Антимикробная активность разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов | 70 |
| 4.6 | Комплексная оценка функциональных свойств и перспектив применения разработанных материалов | 72 |
| | Заключение | 75 |
| | Перечень сокращений | 77 |
| | Список использованной литературы | 78 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Разработка многофункциональных антимикробных и ранозаживляющих материалов остаётся одной из приоритетных задач современной медицины и фармации. Особый интерес представляют композиционные системы на основе природного минерального и биополимерного сырья, обладающие биосовместимостью, доступностью и экологической безопасностью. Бентонитовые глины месторождений Калжат и Орта Тентек характеризуются высокой сорбционной ёмкостью, развитой поверхностью и способностью к модификации, что делает их перспективной основой для создания носителей лекарственных веществ и антисептических аппликационных материалов.

Внедрение наночастиц серебра позволяет придать таким композициям выраженные антимикробные свойства, а использование природных полимеров обеспечивает формирование биосовместимых структур, пригодных для медицинских применений. Вместе с тем применение природных бентонитов Казахстана в модифицированном виде для разработки ранозаживляющих материалов изучено недостаточно. Недостаточно проработаны методы их декатионирования, условий закрепления наночастиц серебра, а также взаимосвязи структуры и биологической активности конечных материалов. Также, при изучении фармацевтического рынка Республики Казахстан, при использовании и изучении государственного реестра зарегистрированных лекарственных средств и медицинских изделий, было выявлено, что лишь малая часть зарегистрированных пластырей медицинского назначения, используются в области применения ранозаживляющих пластырей. В связи с этим, в условиях растущей потребности в отечественных медицинских средствах данное исследование обладает высокой научной и практической значимостью.

Объектом исследования являются природные монтмориллонит-содержащие бентонитовые глины месторождений Калжат и Орта Тентек и разработанные на их основе сорбционно-активные композиционные материалы медицинского назначения.

Цель магистерской диссертации: научно обоснованная разработка сорбционно-активного материала медицинского назначения пролонгированного действия на основе монтмориллонит-содержащих бентонитовых глин месторождений Калжат и Орта Тентек, с оценкой влияния структурной модификации на физико-химические и функциональные свойства полученных материалов.

Новизна настоящего исследования состоит: впервые проведенной комплексной научной оценки бентонитов месторождений Калжат и Орта Тентек как перспективной минеральной основы для создания медицинских материалов. Установлено, что декатионизация приводит к целенаправленному изменению структуры монтмориллонита, сопровождающему увеличением удельной поверхности, сорбционной

активности и формированием высокореакционной матрицы. Полученные результаты научно обосновывают возможность активации природных бентонитов Казахстана для их последующего использования в составе сорбционно-активных композитов медицинского назначения.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ научных источников по применению бентонитов и минеральных сорбентов в медицине.
- изучить физико-химические свойства бентонитов месторождений Калжат и Орта Тентек.
- разработать сорбционно-активный материал медицинского назначения на основе монтмориллонит-содержащих глин
- оценить перспективность применения отечественных бентонитов для разработки медицинских композитов.

1 Теоретические основы и физико-химические свойства бентонитов

1.1 Казахстанские бентониты как перспективная минерально-сырьевая база

Казахстан обладает значительным минерально-сырьевым потенциалом природных алюмосиликатов, включая бентонитовые глины и цеолиты, что создает широкие возможности для их практического использования в различных отраслях промышленности и медицины [1]. На территории страны разведан ряд месторождений бентонитов - Чардара на юге Казахстана, месторождения Кустанайской области (Кушмурун, Верхнеубаганское), участки Карагинской впадины Мангышлакского полуострова, а также месторождение Кабанбай батыр в Жетысуской области. В Восточном Казахстане известны бентонитовые месторождения Таган, Манрак и Динозавр, приуроченные к зонам верхнемеловых и палеогеновых осадков, а также цеолитовое месторождение Тайжузген. Для этих месторождений характерны высокие адсорбционные и катионообменные свойства, доступность добычи и низкая себестоимость переработки, что делает их конкурентоспособным сырьем для высокотехнологичных отраслей, в том числе медицинской [2].

В последние годы особый интерес вызывают новые бентонитовые месторождения Калжат и Орта Тентек (Алматинская область) [2]. Предварительные исследования показали, что данные глины характеризуются высокой дисперсностью частиц, развитой удельной поверхностью и значительной сорбционной способностью, что позволяет отнести их к перспективным материалам для создания медицинских композитов [1,2].

1.1.2 Структура и свойства бентонитовых глин

Основным минеральным компонентом бентонитов является монтмориллонит - слоистый алюмосиликат, структура которого представлена трёхслойными пакетами типа 2:1 (два тетраэдрических слоя SiO_2 , разделённых октаэдрическим слоем Al_2O_3) [3]. Межслоевые пространства, заполненные гидратированными катионами, обеспечивают способность минерала к набуханию, интеркаляции органических и неорганических молекул и катионообменным процессам. Расстояние между слоями может изменяться от 9,6 до 30 Å, что определяет высокую вариативность физико-химических свойств монтмориллонита в зависимости от состава обменных катионов [4].

Бентониты обладают высокой удельной поверхностью (до 600-800 $\text{м}^2/\text{г}$), что способствует значительной катионообменной ёмкости (80-150 ммоль-экв/100 г), сорбционной и катализитической активности [5]. Эти

свойства особенно выражены у щелочных бентонитов, обогащённых ионами натрия, способных многократно набухать в водной среде. Щелочноземельные бентониты, напротив, характеризуются повышенной адсорбционной активностью и используются в химической, нефтехимической и медицинской практике в качестве высокоэффективных сорбентов [6,7].

1.1.2 Значимость декатионизации бентонитов

Для расширения функциональных возможностей глинистых минералов применяются методы химической модификации, среди которых важное место занимает декатионизация - частичная или полная замена природных обменных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.) на водородные или ионы металлов. Этот процесс реализуется путём обработки глины растворами кислот при повышенной температуре с последующей многократной промывкой [8,9].

В результате декатионизации:

- увеличивается удельная поверхность и пористость
- изменяются кислотно-основные свойства поверхности
- усиливается сорбционная способность
- возрастает реакционная активность

При этом трансформируются коллоидные, реологические и катализитические параметры минерала, что расширяет спектр его применения, включая разработку сорбентов медицинского назначения и носителей лекарственных веществ [9].

1.1.3 Перспективность бентонитов Калжат и Орта Тентек

Бентониты данных месторождений характеризуются:

- высокой долей монтмориллонитового компонента
- развитой пористой структурой
- выраженной способностью к набуханию
- стабильностью физико-химических свойств

Эти характеристики делают их подходящими кандидатами для использования:

- в составе полимер-композиционных материалов
- в медицинских сорбентах и раневых покрытиях
- в системах контролируемого высвобождения лекарств

Особое внимание в диссертационной работе уделяется исследованию их исходных физико-химических характеристик и оптимизации процессов декатионизации, так как именно эти параметры определяют эффективность

дальнейшей модификации, включая интеркаляцию наночастиц серебра и биологически активных молекул [10].

Таким образом, исследование бентонитов Калжат и Орта Тентек направлено не только на минералогическую характеристику сырья, но и на формирование научных основ применения природных алюмосиликатов в медицине. Это имеет как фундаментальную, так и прикладную значимость, учитывая необходимость создания новых, биосовместимых и многофункциональных медицинских материалов на основе локальных минеральных ресурсов Казахстана.

1.2 Современное состояние проблемы лечения ран и требования к перевязочным материалам

Лечение хронических и инфицированных ран остаётся одной из актуальных задач современной медицины. По данным многочисленных исследований, существенная доля осложнений при заживлении ран связана с развитием микробной контаминации и нарушением регенеративных процессов [11].

Лечение инфицированных и хронических ран остаётся одной из приоритетных задач современной медицины. Особую клиническую значимость представляют раневые инфекции, вызываемые *Pseudomonas aeruginosa*, которая относится к числу наиболее распространённых госпитальных патогенов и характеризуется выраженной лекарственной устойчивостью и способностью к формированию биоплёнок [12]. Эти свойства существенно осложняют терапию и повышают риск неблагоприятных исходов, включая замедленное заживление, хронизацию процесса и системные осложнения. В клинической практике отмечается, что у пациентов с ожогами и хроническими язвами *P. aeruginosa* часто обнаруживается в глубоких слоях раневого ложа, где она формирует биоплёнки, защищающие микробную колонию от действия иммунной системы и антибактериальных препаратов. Бактерии в составе биоплёнки могут демонстрировать толерантность к антибактериальным средствам в сотни раз выше, чем планктонные формы, что объясняет низкую эффективность стандартных схем терапии и способствует росту лекарственной резистентности [13,14].

Традиционные подходы к лечению инфицированных ран, как правило, основаны на применении системных и местных антибактериальных средств. Однако этот подход не всегда позволяет создать устойчивую терапевтическую концентрацию препарата в зоне поражения и сопряжён с риском системной токсичности. Кроме того, чрезмерное и длительное использование антибиотиков ускоряет формирование резистентных штаммов. В этой связи перевязочные материалы перестали рассматриваться

только как барьер от внешнего загрязнения [15]. Современная концепция лечения ран предполагает, что повязка должна активно участвовать в регуляции микроокружения раны и обеспечивать антибактериальную защиту, не нарушая естественных процессов регенерации [16]. И, данная тенденция показана, в виде схематического изображения, на рисунке 1.

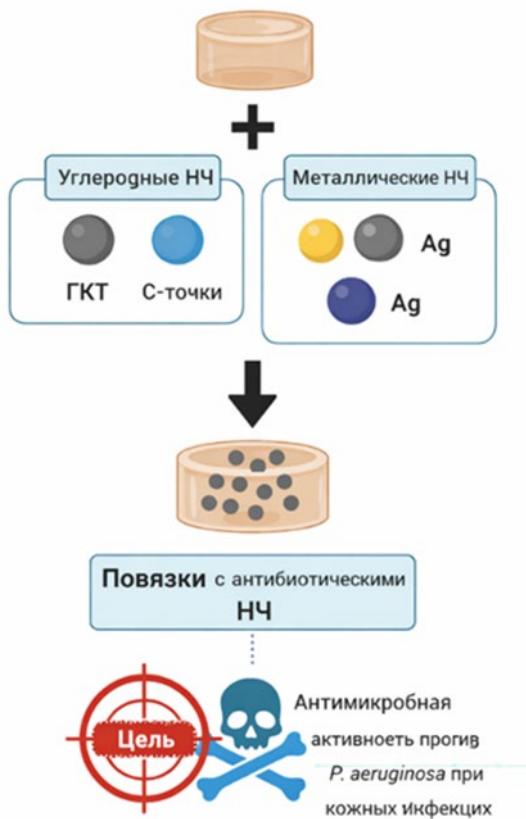


Рисунок 1 - Использование углеродных и металлических наночастиц в составе перевязочных материалов для подавления инфекции *Pseudomonas aeruginosa*.

С позиций доказательной медицины идеальный перевязочный материал должен соответствовать ряду критериев. Он обязан:

- поддерживать влажную, но не избыточно мокрую среду;
- обладать пористой структурой и газопроницаемостью, обеспечивая поступление кислорода;
- эффективно адсорбировать экссудат, предотвращая мацерацию тканей;
- быть биосовместимым и нетоксичным для клеток кожи;
- проявлять антибактериальную активность, в том числе против биоплёночных форм микроорганизмов;
- характеризоваться механической стабильностью и эластичностью;
- иметь оптимальный уровень рН, близкий к физиологическому;
- по возможности биодеградировать без травмы тканей при удалении [17].

Отдельно подчёркивается роль влажной среды, которая способствует миграции кератиноцитов, ангиогенезу и синтезу коллагена [18,19]. Нарушение баланса влаги - как в сторону пересыхания, так и при избытке экссудата - приводит к замедлению reparативных процессов и повышает риск инфицирования. Поэтому важнейшим параметром считается скорость транспирации влаги через перевязочный материал, которая должна находиться в физиологическом диапазоне. Не менее значимым фактором является гемосовместимость и отсутствие цитотоксического действия: жизнеспособность клеток в контакте с материалом должна превышать 70%, что соответствует международным стандартам оценки медицинских изделий [20,21].

Современные тенденции развития перевязочных материалов связаны с интеграцией в их структуру антимикробных и биоактивных компонентов, способных контролировать микробную нагрузку, подавлять биоплёнки и создавать благоприятные условия для регенерации тканей. Особый интерес вызывают наноструктурированные системы доставки лекарственных веществ, которые позволяют поддерживать локально высокую концентрацию антибактериальных средств при снижении системных побочных эффектов [22]. Такие системы рассматриваются как перспективное направление профилактики и лечения инфекций, вызванных *P. aeruginosa*, включая мультирезистентные штаммы, и как важный шаг к созданию нового поколения функциональных раневых покрытий.

В рамках данной работы был проведён анализ фармацевтического рынка медицинских пластырей Республики Казахстан. Анализ структуры зарегистрированных изделий по функциональному назначению показал, что наибольшую долю занимают фиксирующие и универсальные медицинские пластыри, что свидетельствует о преобладании изделий общего назначения в регистрационном портфеле. В то же время ранозаживляющие и сорбционные пластыри представлены в значительно меньшем объёме, а бактерицидные изделия занимают ещё более ограниченную долю, что указывает на недостаточную представленность функционально активных медицинских пластырей.

Анализ распределения зарегистрированных медицинских пластырей по странам-производителям показал доминирование импортной продукции, преимущественно производства Китая, Турции и России. Доля изделий отечественного производства остаётся сравнительно низкой, что отражает ограниченное развитие локального сегмента производства медицинских пластырей. Полученные результаты подтверждают актуальность разработки новых отечественных медицинских изделий, в том числе многофункциональных ранозаживляющих и сорбционно-активных материалов. Данные представлены на рисунке 2 и 3.

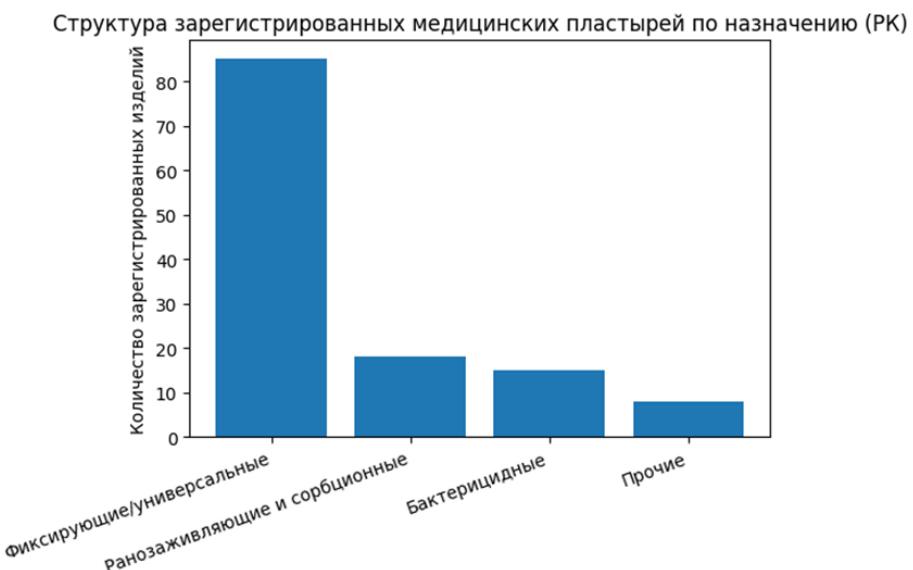


Рисунок 2 – Структура зарегистрированных медицинских пластырей по назначению в РК

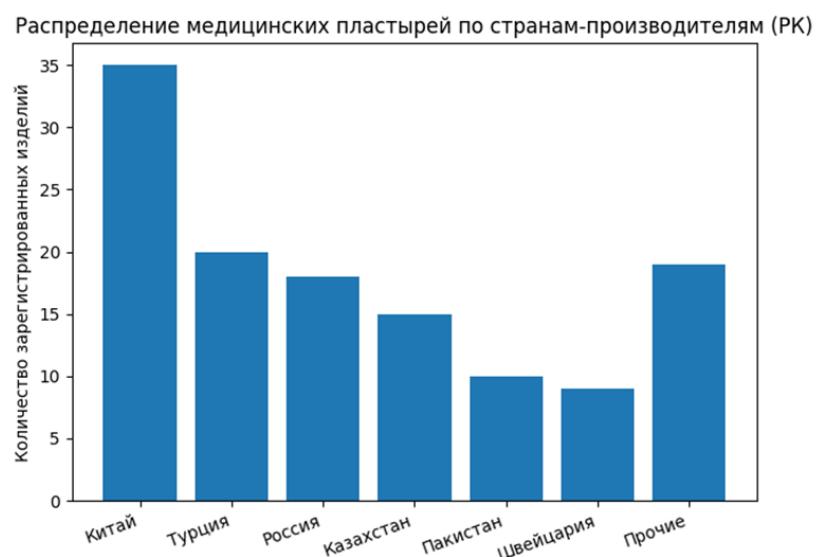


Рисунок 3 – Распределение медицинских пластырей по странам-производителям в РК

Также, в таблице 1 представлены основные экспериментальные данные, полученные в ходе исследования. Показатели отражают изменение физико-химических и функциональных свойств образцов в зависимости от состава и условий модификации. Анализ представленных результатов позволяет оценить влияние используемых компонентов на сорбционную активность и обосновать выбор оптимального состава разрабатываемого материала.

Таблица 3 - Применение сорбционных активных материалов на основе монтмориллонита

| Область применения | Статус в Казахстане | Ключевые преимущества |
|--|-----------------------------------|--|
| Очистка промышленных сточных вод | Активно применяется и исследуется | Высокая катионообменная ёмкость |
| Очистка вод от нефтепродуктов | Пилотные и промышленные решения | Природное и недорогое сырьё |
| Рекультивация загрязнённых почв | Ограниченое применение (НИР) | Экологическая безопасность |
| Медицинские и фармацевтические материалы | Перспективное направление | Сорбция и пролонгированное высвобождение |

Вместе с тем современные представления о заживлении ран подчёркивают, что этот процесс представляет собой сложную, многоэтапную биологическую систему, включающую воспаление, пролиферацию и ремоделирование тканей [23]. Любое нарушение на одном из этапов - инфекция, ишемия, оксидативный стресс или дисбаланс цитокинов - способно привести к переходу раны в хроническую форму. Именно поэтому всё большее внимание уделяется не только борьбе с инфекцией, но и созданию в раневом ложе оптимальной микросреды, поддерживающей естественные механизмы регенерации [24].

Важной характеристикой современных перевязочных материалов является их способность модулировать локальные биохимические процессы, снижая уровень воспаления и препятствуя разрушению внеклеточного матрикса [25,26]. Показано, что применение инновационных раневых покрытий может не только уменьшать бактериальную нагрузку, но и стимулировать клеточную миграцию, ангиогенез и синтез коллагена. Таким образом, повязка из вспомогательного средства превращается в активный участник лечебного процесса [27].

Особое клиническое значение такие материалы приобретают при лечении ран, инфицированных трудноустранимыми патогенами, включая *Pseudomonas aeruginosa*, обладающую высокой лекарственной устойчивостью и способностью формировать биоплёнки [28,29]. Биоплёночные формы микроорганизмов практически недоступны для традиционных антибиотиков, что делает их одной из основных причин неэффективности терапии и

хронизации раневого процесса. В этой связи поиск повязок с пролонгированной антимикробной активностью рассматривается как один из ключевых приоритетов современной раневой медицины [30].

Одним из наиболее перспективных направлений является включение в структуру перевязочных материалов наночастиц с антибиотическими или антимикробными свойствами [31]. Наноструктуры обладают развитой поверхностью, способностью контролировать высвобождать активные компоненты и формировать устойчивый контакт с тканями. Это позволяет поддерживать локально высокую концентрацию действующих веществ при минимальном системном воздействии, что особенно важно на фоне глобального роста антибиотикорезистентности [32].

Современные требования к таким материалам включают:

- безопасность и биосовместимость,
- отсутствие токсического воздействия на клетки кожи,
- устойчивость во влажной среде,
- способность адсорбировать экссудат,
- селективность антимикробного действия,
- механическую прочность и комфорт при использовании.

Отдельное значение имеют показатели гидрофильности и рН-стабильности, определяющие взаимодействие материала с тканями и микроорганизмами. Оптимальная влажная среда способствует снижению болевого синдрома и ускоряет миграцию эпителиальных клеток, тогда как пересыхание или избыточное увлажнение замедляют регенерацию [33,34].

Таким образом, развитие перевязочных материалов нового поколения направлено на объединение барьерной, антимикробной и регенеративной функций в рамках одной терапевтической системы. Это создаёт предпосылки для существенного повышения эффективности лечения хронических и инфицированных ран, включая осложнённые кожные инфекции, вызванные *Pseudomonas aeruginosa* [35].

Нанотехнологии в последние десятилетия развиваются особенно интенсивно, и наночастицы всё шире применяются в самых разных сферах - от промышленного производства и электроники до медицины и потребительских товаров. Среди них особое место занимают наночастицы серебра, которые используются в биосенсорах, текстильной промышленности, дезинфицирующих покрытиях, пищевой индустрии, косметике и медицинских изделиях. Их популярность во многом обусловлена выраженными антимикробными свойствами и уникальными физико-химическими характеристиками [36].

Однако столь широкая коммерциализация неминуемо сопровождается ростом вероятности контакта человека с наночастицами серебра и, соответственно, повышением риска неблагоприятных эффектов для здоровья [37]. В литературе уже накоплен значительный массив данных, свидетельствующих о том, что Ag-наночастицы способны оказывать

токсическое действие на клетки различных органов, включая кожу, лёгкие, печень, мозг, сосудистую систему и репродуктивные органы [38]. Интересно, что в ряде исследований были выявлены изменения в экспрессии генов, участвующих в регуляции клеточного цикла, репарации ДНК и апоптозе, причём такие эффекты наблюдались даже при концентрациях, не вызывающих явной цитотоксичности [39].

Результаты доклинических исследований на животных моделях показывают, что наночастицы серебра, поступающие в организм при ингаляции, пероральном приёме или парентеральном введении, могут распространяться с током крови и накапливаться в различных органах, включая головной мозг. Более того, в экспериментах на немлекопитающих организмах, традиционно используемых для оценки риска токсических воздействий, наблюдались нарушения развития и структурные аномалии. Эти данные указывают на необходимость более глубокого изучения возможных неблагоприятных эффектов Ag-наночастиц [40].

На сегодняшний день предполагается, что токсическое действие серебряных наночастиц реализуется через несколько взаимосвязанных механизмов: повреждение клеточных мембран и митохондрий, индукцию оксидативного стресса, образование активных форм кислорода и взаимодействие с генетическим материалом. Дополнительно рассматривается роль ионов серебра, высвобождающихся из наночастиц в биологических средах, что усложняет интерпретацию экспериментальных данных и требует проведения дифференцированных исследований. [41]

В условиях постоянно растущего объёма производства наноматериалов и расширения областей их применения оценка потенциальных рисков для здоровья человека приобретает первостепенное значение. В этой связи особую актуальность представляет критический анализ данных о токсичности наночастиц серебра, их распределении в организме, возможных молекулярных мишениях и механизмах повреждающего действия, что и является предметом рассмотрения в данном исследовательском направлении [42,43].

1.3 Современные перевязочные материалы: классификация, свойства и ограничения

Современные перевязочные средства представляют собой широкий спектр материалов, которые не только защищают повреждённые ткани от внешнего воздействия, но и активно участвуют в процессах регенерации. Особенную значимую роль они играют при лечении ожогов, которые относятся к наиболее сложным видам повреждений кожи и мягких тканей. Такие раны характеризуются высокой вероятностью инфицирования, выраженной воспалительной реакцией и риском формирования хронических, длительно незаживающих дефектов. Поэтому к перевязочным материалам

предъявляются повышенные требования - они должны обеспечивать защиту, антибактериальный эффект, контроль воспаления и стимуляцию заживления.

1.3.1 Классификация современных перевязочных материалов

На сегодняшний день перевязочные средства условно подразделяют на несколько групп:

- традиционные (марлевые, тканевые, ватно-марлевые повязки)
- активные и интерактивные покрытия (гидрогели, гидроколлоиды, альгинатные повязки, пленки, пористые полимерные материалы)
- биополимерные материалы и композиты
- наноструктурированные перевязочные средства

Наиболее простой группой остаются традиционные повязки, однако они обладают лишь барьерной функцией и плохо контролируют влажность среды, что ограничивает их клиническую эффективность. В отличие от них, современные интерактивные покрытия создают оптимальную влажную среду, способствуют газообмену и адсорбции экссудата, снижая травматизацию тканей [44].

1.3.2 Наноструктурированные перевязочные материалы

За последние годы особое развитие получили перевязочные средства, содержащие наночастицы. Наноматериалы обладают особыми физико-химическими свойствами - высокой площадью поверхности, возможностью функционализации и способностью взаимодействовать с клетками и микроорганизмами на молекулярном уровне. Это позволяет использовать их для целевого лечения ожогов и осложнённых ран.

К наиболее изученным относятся:

- наночастицы металлов (серебра, титана и др.)
- полимерные наночастицы-носители лекарств
- наночастицы, содержащие факторы роста
- нанокомпозиты с внеклеточными везикулами (EVs)

Металлические наночастицы, и прежде всего наночастицы серебра, демонстрируют выраженную антимикробную активность и способны подавлять рост бактерий, грибов и вирусов. Это особенно важно при ожоговых ранах, где риск инфицирования крайне высок. Полимерные наночастицы используются как системы доставки противовоспалительных и антимикробных препаратов, обеспечивая их пролонгированное высвобождение и снижая необходимость частых аппликаций. Перспективным направлением является также инкапсуляция факторов роста и биологически активных везикул, стимулирующих пролиферацию клеток и ангиогенез [45,46].

1.3.3 Основные функциональные свойства

Современные перевязочные материалы должны:

- поддерживать влажную и стерильную микросреду
- обеспечивать газообмен
- препятствовать развитию инфекции
- контролировать воспалительную реакцию
- стимулировать клеточную регенерацию
- обладать биосовместимостью и нетоксичностью
- быть комфортными и безопасными при ношении

Наноструктурированные системы дают возможность одновременно реализовать несколько терапевтических эффектов - антибактериальный, противовоспалительный и регенеративный [47].

Несмотря на очевидные преимущества, использование наноматериалов в перевязочных средствах сопровождается рядом проблем:

- недостаточно изучены их долгосрочные эффекты
- возможна цитотоксичность при превышении терапевтических доз
- существуют вопросы безопасности при системной абсорбции
- производство может оставаться дорогостоящим
- необходим строгий контроль стабильности и биосовместимости

Кроме того, эффективность лечения во многом зависит от состояния пациента, характера ожога и сопутствующей патологии, что требует индивидуального подбора терапии [48].

Таким образом, развитие перевязочных материалов идёт по пути интеграции барьерных, антимикробных и регенеративных функций в одной терапевтической платформе. Нанотехнологии открывают принципиально новые возможности для управления заживлением ран, однако дальнейшие исследования необходимы для оптимизации их безопасности и клинической эффективности.

1.4 Бентонит как перспективный материал медицинского назначения

Бентонит относится к группе природных глинистых пород, основным минералогическим компонентом которых является монтмориллонит - слоистый алюмосиликат с высокой степенью гидратации и выраженной способностью к катионообмену. Благодаря специальному строению кристаллической решётки и большому удельному поверхностному заряду бентонит обладает высокой сорбционной активностью, способностью к набуханию в водной среде и формированию устойчивых коллоидных систем. Эти свойства предопределили его широкое использование в фармацевтике, медицине и смежных отраслях [49].

В фармацевтической промышленности бентонит традиционно рассматривается как вспомогательное вещество: он применяется в качестве адсорбента, суспендирующего и диспергирующего агента, стабилизатора и наполнителя твёрдых лекарственных форм [50]. Наличие развитой поверхности позволяет эффективно связывать молекулы лекарственных веществ, что делает бентонит удобной платформой для разработки систем модифицированного высвобождения. На сегодняшний день описано множество примеров успешного использования монтмориллонита как матрицы для инкапсуляции противоопухолевых, противомикробных и противовоспалительных препаратов, что подтверждает его потенциал в качестве носителя лекарственных средств.

Отдельного внимания заслуживают антибактериальные свойства бентонита. Экспериментальные исследования показывают, что этот минерал способен подавлять рост микроорганизмов благодаря комбинации механизмов: сорбции бактериальных клеток, нарушению ионного баланса и взаимодействию с клеточными мембранами. Эти эффекты усиливаются при модификации бентонита ионами металлов или органическими соединениями. В результате бентонит рассматривается как перспективный компонент раневых покрытий, медицинских адсорбентов и систем очистки биосред [51].

Наряду с терапевтическими возможностями, бентонит демонстрирует высокую биосовместимость, что является ключевым требованием для медицинских материалов. При соблюдении фармакопейных стандартов по содержанию примесей и тяжёлых металлов он может быть использован как в лекарственных формах, так и в медицинских изделиях. При этом, как отмечается в литературе, безопасное применение требует строгого контроля чистоты минерального сырья и технологических параметров производства [52].

Особое развитие направление медицинского применения бентонита получило в странах Восточной Азии. В Республике Корея активно ведутся исследования по стандартизации минерального сырья, разработке фармацевтических форм на основе монтмориллонита и оценке его иммуномодулирующего потенциала. Создание производств, соответствующих стандартам GMP, позволило рассматривать бентонит не только как традиционное вспомогательное вещество, но и как активный компонент терапевтических и профилактических средств.

Таким образом, совокупность сорбционных, катионообменных, коллоидных и биологических свойств делает бентонит одним из наиболее перспективных природных материалов для биомедицины. Наиболее значимыми областями его применения являются:

- разработка систем контролируемого высвобождения лекарств
- создание раневых покрытий и дерматологических препаратов
- адсорбционная терапия и детоксикация
- вспомогательные функции в лекарственных формах

В дальнейшем особое значение будет иметь углублённое изучение механизмов взаимодействия минерала с биологическими тканями, а также разработка гибридных композитов на его основе. Это позволит расширить диапазон медицинских применений бентонита и повысить эффективность существующих терапевтических решений [53].

Для более наглядной характеристики потенциала бентонита в медицине в таблице 1 систематизированы его ключевые физико-химические и функциональные свойства, а также показана их клиническая и технологическая значимость. Такой подход позволяет не только обобщить разрозненные сведения, представленные в литературе, но и продемонстрировать, что именно совокупность параметров - минералогической структуры, сорбционной активности, катионообменной способности, коллоидных и реологических характеристик - определяет уникальность бентонита как природного медицинского материала [54].

Прежде всего, слоистая монтмориллонитовая структура и высокая удельная поверхность обусловливают выраженные адсорбционные и ионообменные свойства минерала. Это делает возможным использование бентонита в качестве носителя лекарственных веществ и сорбционного компонента лечебных покрытий. Способность к набуханию и формированию устойчивых гелей, в свою очередь, обеспечивает структурную стабильность и равномерное распределение активных компонентов в мягких лекарственных формах.

Не менее важным является тот факт, что при соблюдении стандартов очистки бентонит обладает достаточной биосовместимостью и низкой токсичностью, что подтверждает обоснованность его применения в фармацевтических технологиях и медицинских изделиях. Дополнительным преимуществом выступает возможность модификации поверхности и введения ионов металлов, что позволяет управлять антибактериальной активностью и профилем высвобождения лекарственных веществ.

Таким образом, представленная таблица обобщает ключевые свойства бентонита, определяющие его как многофункциональный и экономически доступный материал для разработки современных медицинских и фармацевтических технологий. Это служит основанием для дальнейшего рассмотрения бентонита не только как инертного вспомогательного вещества, но и как активного компонента терапевтических систем и полимер-композиционных материалов [55].

Таблица 1 - Основные свойства бентонита и их значение для медицины

| Группа свойств | Характеристика бентонита | Практическое значение в медицине |
|------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Минералогическая | Слоистый алюмосиликат | Возможность |

| | | |
|------------------------------|---|---|
| природа | (монтмориллонитовая структура) | межслоевой интеркаляции лекарственных веществ |
| Удельная поверхность | Высокая (до сотен м ² /г) | Повышенная сорбционная ёмкость и адсорбция токсинов/микробов |
| Катионообменная способность | Связывает ионы металлов и биоактивные молекулы | Использование как носителя лекарственных препаратов |
| Способность набуханию | Формирует стабильные гели в воде | Применение в раневых покрытиях, дерматологии, как стабилизатор форм |
| Коллоидная устойчивость | Образует вискоэластичные суспензии | Удобство включения в мази, гели, пленки |
| Антибактериальная активность | Способен сорбировать и повреждать бактериальные клетки, усиливается при модификации Ag ⁺ | Применение в антисептических материалах |
| Биосовместимость | Низкая токсичность при соблюдении фармакопейных стандартов | Возможность клинического применения |
| Региональная доступность | Развитая минерально-сырьевая база (в т.ч. Казахстан) | Экономическая эффективность и локальное производство |
| Технологичность | Возможность химической и физической модификации поверхности | Создание материалов с заданными свойствами |
| Сфера применения | Фармацевтика, раневые покрытия, сорбционная терапия, косметология | Формирование нового класса медицинских материалов |

1.4.1 Перспективы применения бентонита в медицине: экспериментальные подтверждения эффективности

На протяжении длительного времени бентонит рассматривался преимущественно как вспомогательный или косметический компонент. Однако в последние годы появляются результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие его реальный терапевтический потенциал в медицине. В частности, были опубликованы данные, подтверждающие регенеративные и противовоспалительные свойства новосинтезированного бентонитсодержащего комплекса в условиях *in vivo* и *in vitro* моделей ожоговых ран.

В исследовании использовалась модель термического ожога у минипигов -одного из наиболее валидных биологических аналогов человеческой кожи. Применение бентонитового комплекса на поверхность ожоговой раны способствовало активации ключевых процессов репарации тканей. Гистологический анализ показал выраженное увеличение коллагенообразования и плотности грануляционной ткани, а также рост числа пролиферативно-активных клеток кожи (Ki-67-позитивных), что свидетельствует об ускорении эпителизации и ремоделирования дермального матрикса. Дополнительно отмечено повышение экспрессии сосудистого эндотелиального фактора роста (VEGF), указывающее на стимуляцию ангиогенеза - критически важного звена восстановления кровоснабжения повреждённых тканей [55,56].

Не менее значимым результатом стала демонстрация противовоспалительного эффекта бентонита. У животных, получавших терапию бентонитовым комплексом, наблюдалось достоверное снижение экспрессии провоспалительных медиаторов (IL-1 β , COX-2) и уровня простагландина E2, при одновременном усилении продукции противовоспалительного цитокина IL-10. Эти данные подтверждаются как анализом тканей, так и экспериментами *in vitro* на клеточных культурах макрофагов и кератиноцитов, где бентонит эффективно подавлял активацию COX-2-зависимых сигнальных путей. Таким образом, бентонит проявляет способность модулировать воспаление, предотвращая его хроническое течение и создавая условия для полноценной регенерации.

Особенно важно, что терапевтический эффект был достигнут без признаков токсического воздействия, что подчёркивает биобезопасность материала. Авторы связывают положительное действие с сочетанием сорбционных свойств бентонита, наличием микроэлементов и его способности формировать увлажнённую защитную среду в зоне повреждения.

Таким образом, полученные результаты, убедительно подтверждают, что бентонит может рассматриваться не только как вспомогательный компонент, но и как активный элемент терапевтических раневых покрытий и дерматологических средств [56].

Таблица 2 - Экспериментально подтверждённые эффекты бентонитового комплекса в модели ожоговых ран

| Параметр исследования | Результат при применении бентонитового комплекса | Научное значение результата |
|---------------------------------------|---|---|
| Модель эксперимента | Ожоговые раны у минипигов (<i>in vivo</i>) и клеточные модели (<i>in vitro</i>) | Высокая релевантность к человеческой коже |
| Скорость регенерации тканей | Ускоренная эпителизация и восстановление дермального матрикса | Подтверждение ранозаживляющего эффекта |
| Формирование грануляционной ткани | Увеличение плотности и зрелости грануляционной ткани | Улучшение структурной организации кожи |
| Синтез коллагена | Рост содержания коллагеновых волокон и активности клеточной пролиферации | Активизация процессов репарации |
| Ангиогенез | Повышение экспрессии VEGF и неоваскуляризации | Улучшение кровоснабжения тканей |
| Воспалительный ответ | Снижение IL-1 β , COX-2, PGE ₂ ; увеличение IL-10 | Контроль воспаления и профилактика хронического течения |
| Клеточные реакции (<i>in vitro</i>) | Подавление провоспалительной активации макрофагов и кератиноцитов | Подтверждение иммуномодулирующего эффекта |
| Безопасность применения | Отсутствие признаков токсичности и повреждения тканей | Подтверждение биосовместимости |
| Предполагаемый механизм действия | Сорбция медиаторов воспаления и формирование увлажнённой защитной среды | Комплексное терапевтическое действие |
| Перспективные | Раневые покрытия, | Высокий потенциал |

| | | |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| области применения | лечебные дерматологические средства | гели, медицинской коммерциализации |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|

Представленные в таблице 2 данные показывают, что бентонитовый комплекс оказывает многофакторное терапевтическое воздействие при лечении ожоговых ран. Он одновременно:

- ускоряет восстановление кожи,
- стимулирует ангиогенез и синтез коллагена,
- регулирует воспалительный ответ,
- демонстрирует высокий профиль биобезопасности.

Это позволяет рассматривать бентонит не только как вспомогательное вещество, но и как активный компонент медицинских материалов терапевтического назначения.

Эти данные формируют научно обоснованную платформу для дальнейшей разработки бентонит-содержащих медицинских изделий, включая покрытия для ожоговых ран, сорбционные гели и композиционные биоматериалы с целевой биологической активностью [56].

1.5 Наночастицы серебра в медицине

Серебро на протяжении десятилетий занимает важное место в лечении инфицированных и осложнённых ран благодаря выраженной антимикробной активности и широкому спектру действия. Переход к наноформам серебра стал следующим этапом развития раневых технологий, поскольку наночастицы обладают большей удельной поверхностью и, следовательно, способны высвобождать ионы серебра (Ag^+) более эффективно по сравнению с традиционными серебросодержащими препаратами. Именно ионы Ag^+ считаются активным агентом, вызывающим повреждение микробной клетки и подавляющим её жизненные функции.

К основным механизмам антбактериального действия серебра относят проникновение Ag^+ через клеточную стенку микроорганизмов, взаимодействие с тиольными группами белков и ДНК, образование активных форм кислорода (ROS) и нарушение энергетического обмена клетки [56,57]. В результате блокируются ключевые метаболические процессы, замедляется деление и наступает гибель микроорганизма. При этом прокариотические клетки значительно более чувствительны к серебру, чем эукариотические, что дополнительно подтверждает терапевтическую избирательность воздействий.

Использование серебра в составе повязок и покрытий позволяет обеспечивать контролируемое и пролонгированное высвобождение ионов непосредственно в зоне раны. Показано, что нанокристаллическое серебро обеспечивает более высокую и стабильную концентрацию Ag^+ за счёт своей

структурой. Это делает наночастицы перспективными для борьбы с микробным загрязнением и уменьшения воспаления при хронических и ожоговых ранах. В ряде экспериментальных моделей выявлено не только снижение микробной нагрузки, но и ослабление воспалительной реакции кожи, снижение активности матриксных металлопротеиназ и уменьшение локальной гиперемии - факторов, замедляющих заживление.

Тем не менее, повышение реакционной способности наночастиц сопровождается вопросами о безопасности. Поскольку наночастицы потенциально способны проникать через повреждённый кожный барьер и контактировать с клетками внутренних органов, оценивается риск системного поступления серебра. Описаны единичные случаи временного повышения уровня печёночных ферментов и отложений серебра в тканях при длительном использовании серебросодержащих повязок у пациентов с тяжёлыми ожогами. Основным известным следствием избыточного накопления серебра остаётся аргирия - необратимая, но функционально безвредная пигментация кожи.

Лабораторные исследования показывают, что потенциальные клеточные эффекты наночастиц серебра могут быть связаны с оксидативным стрессом, повреждением мембран и митохондрий, а также запуском апоптоза. Однако большинство таких эффектов наблюдается при концентрациях, существенно превышающих уровни, характерные для медицинских повязок. При клиническом применении серебро, как правило, демонстрирует благоприятное соотношение польза-риск, особенно при лечении инфицированных и ожоговых ран, где предотвращение инфекции имеет ключевое значение [57].

В целом, многочисленные исследования подтверждают, что наночастицы серебра представляют собой высокоэффективный компонент современных перевязочных средств с доказанной антибактериальной активностью и умеренным уровнем риска. При этом авторы подчёркивают необходимость дальнейших исследований, направленных на уточнение механизмов биораспределения, возможной системной токсичности и экологических эффектов наночастиц. Тем не менее, накопленные данные позволяют рассматривать наносеребро как важный инструмент антимикробной терапии в раневой медицине при условии рационального и клинически обоснованного применения.

1.5.1 Наночастицы серебра в медицине и сравнение с ионами серебра

Традиционно антимикробные свойства серебра связывают прежде всего с его ионной формой (Ag^+), которая взаимодействует с клеточными структурами микроорганизмов и нарушает их жизненно важные функции. Ионы серебра способны связываться с белками клеточной стенки и мембранны, ингибиовать ферментные системы и нарушать структуру нуклеиновых кислот, что приводит к гибели микроорганизмов. На

протяжении длительного времени именно соли серебра (например, серебра сульфадиазин) применялись в лечении ожогов и инфицированных ран благодаря выраженной антибактериальной активности.

Переход к наноформам серебра не отменяет ключевой роли Ag^+ , однако меняет механизм доставки и кинетику высвобождения антибактериального агента. Наночастицы серебра функционируют как резервуар ионов Ag^+ , обеспечивая их длительное, контролируемое высвобождение непосредственно в раневой среде. Благодаря высокой площади поверхности наночастицы высвобождают ионы стабильнее и равномернее, чем традиционные соли серебра, что снижает необходимость частой смены повязок и уменьшает риск колебаний концентрации препарата в зоне повреждения [56,57].

Таким образом, принципиальное отличие заключается не столько в химической природе активной формы, сколько в биоинженерной конструкции носителя. Если солевые формы серебра обеспечивают быстрое и относительно короткое по времени воздействие, то наночастицы создают устойчивую терапевтическую концентрацию Ag^+ при меньших дозировках и меньшей частоте введения. Это особенно важно в отношении хронических и ожоговых ран, где избыточное высвобождение серебра может вызывать цитотоксические эффекты и тормозить эпителизацию.

При этом наночастицы обладают и дополнительными преимуществами, связанными с их размером: они легче взаимодействуют с биоплёнками и микрocolониями бактерий, проникая в их структуру и разрушая защитные матриксы. Это особенно актуально при лечении инфекций, вызванных устойчивыми штаммами, где биоплёнки играют ключевую роль в сохранении микробной популяции.

Однако повышенная реакционная способность наночастиц одновременно обуславливает и повышенное внимание к вопросам безопасности. В отличие от растворимых солей серебра, наночастицы потенциально способны проникать в клетки кожи и подвергаться внутритканевой аккумуляции. В литературе обсуждается возможность оксидативного стресса, повреждения мембран и митохондрий при воздействии высоких доз наночастиц. Тем не менее, при клинически допустимых концентрациях наноформы серебра демонстрируют благоприятный профиль безопасности, особенно в составе раневых покрытий с контролируемым высвобождением [57].

Таким образом, ионы серебра остаются основной биологически активной формой, однако наночастицы обеспечивают более совершенный и управляемый способ их доставки. Это позволяет:

- поддерживать устойчивую антибактериальную активность
- снижать общую нагрузку серебром
- уменьшать частоту смены повязок
- воздействовать на биоплёнки

- контролировать воспаление при сохранении приемлемого уровня безопасности.

Современная концепция применения серебра в медицине основывается не на замене ионных форм наночастицами, а на их рациональном сочетании с материалами-носителями и полимерными матрицами, что превращает серебро в элемент комплексных противоинфекционных систем.

1.5.2 Механизм действия наночастиц серебра в бентоните

Представленный рисунок 4 иллюстрирует многоуровневый механизм действия наночастиц серебра, интеркалированных в слоистую структуру бентонита, при применении в составе лечебных перевязочных материалов. В данной системе бентонит выполняет двойную роль - минерального носителя и активного функционального компонента, обеспечивая как контролируемое высвобождение наночастиц серебра, так и благоприятное физико-химическое микросреду в зоне раневого дефекта.

Роль бентонитовой матрицы как носителя : бентонит обладает развитой удельной поверхностью и межслоевыми полостями, способными удерживать наночастицы серебра за счёт ионообменных и сорбционных взаимодействий. В присутствии раневого экссудата происходит постепенное высвобождение ионов Ag^+ и/или частичное десорбирование наночастиц. Благодаря этому достигается пролонгированное и равномерное антимикробное действие, при котором исключаются резкие пиковые концентрации серебра и уменьшается риск местной цитотоксичности. Описанные механизмы действия, показаны на рисунке 4.

Взаимодействие серебра с микробной клеткой: высвобождающиеся ионы серебра обладают высокой реакционной способностью и избирательно связываются с компонентами бактериальной клетки. Ключевые механизмы включают:

- адсорбцию ионов Ag^+ на поверхности клеточной стенки
- нарушение целостности цитоплазматической мембраны
- ингибирование бактериальных ферментных систем
- связывание с нуклеиновыми кислотами

В результате блокируются процессы дыхательной цепи, синтез белков и деление клетки, что приводит к гибели микроорганизмов. Дополнительный вклад вносит способность серебра разрушать структуру бактериальных биоплёнок, что крайне важно при лечении хронических ран и ожоговых повреждений.



Рисунок 4 - Механизм действия наночастиц серебра

Противовоспалительное действие: параллельно происходит снижение выраженности воспалительной реакции. Это объясняется как прямым подавлением активности бактериальной флоры, так и сорбционными свойствами бентонита, который способен связывать медиаторы воспаления и токсические метаболиты. Таким образом, уменьшается отёк, гиперемия и болевая реакция, а также предотвращается переход воспаления в хроническую форму.

Создание оптимальной раневой микросреды: бентонит, обладая способностью к набуханию, формирует мягкую увлажнённую структуру, поддерживая физиологическую влажность раны. Это препятствует образованию сухих корок, способствует миграции кератиноцитов и ускоряет эпителилизацию. Сочетание влагоудерживающего эффекта и антимикробной защиты создаёт благоприятные условия для восстановления тканей [57].

Стимуляция регенеративных процессов: исследования показывают, что применение бентонит-серебряных комплексов способствует:

- активации пролиферации фибробластов
- усилию синтеза коллагена
- стимуляции ангиогенеза
- ускорению ремоделирования внеклеточного матрикса

Такая регенеративная активность обусловлена не только снижением инфекционной нагрузки, но и нормализацией клеточной микросреды.

Комплексное терапевтическое действие: таким образом, описанная система сочетает в себе:

- антимикробный эффект
- противовоспалительное действие
- сорбционную детоксикацию

- поддержание влажной среды
- стимуляцию регенерации тканей что позволяет рассматривать бентонит-серебряные композиции как многофункциональные лечебные материалы нового поколения.

Полимер-композиционные материалы на основе минеральных сорбентов: современные тенденции регенеративной медицины и раневой терапии ориентированы на создание многофункциональных перевязочных материалов, способных не только механически защищать раневую поверхность, но и активно модулировать процессы заживления. В этом контексте особое внимание привлекают полимер-композиционные системы на основе минеральных сорбентов, которые сочетают в себе биосовместимость полимеров и высокую реакционную способность дисперсных минералов. Подобные материалы рассматриваются как перспективные платформы для адресной доставки лекарственных веществ, подавления микробной колонизации и стимуляции регенерации тканей [57].

В качестве полимерной матрицы широко применяются как натуральные биополимеры (хитозан, альгинат, гиалуроновая кислота), так и синтетические биоразлагаемые полимеры (PLA, PLGA, PCL) [57]. Эти материалы формируют мягкую эластичную структуру, близкую по механическим и диффузионным свойствам к внеклеточному матриксу кожи. Полимерная фаза обеспечивает удержание влаги, газообмен и комфорт при наложении, одновременно выступая носителем для минеральных наполнителей и биоактивных веществ.

В качестве минеральных сорбентов наиболее перспективными признаны смектитовые глины, в первую очередь бентонит, обладающие развитой поверхностью, отрицательным зарядом и выраженной способностью к ионообмену. Благодаря слоистому строению бентонит способен интеркалировать лекарственные молекулы, ионы металлов и наночастицы, формируя устойчивые гибридные структуры. Это обеспечивает пролонгированное, контролируемое высвобождение действующих веществ в раневую среду и предотвращает их быстрое инактивирование.

Комплексирование бентонита с полимерной матрицей позволяет получить композиции с целым спектром функциональных свойств:

- адсорбция экссудата и токсинов
- бактерицидное действие при модификации серебром или цинком
- способность поддерживать влажную среду раны
- снижение воспалительной реакции
- стимуляция грануляции и эпителизации

Особый интерес представляют системы, в которых минеральный сорбент одновременно играет роль активного носителя антибактериальных агентов. Так, при введении наночастиц серебра в межслоевое пространство бентонита формируются стабильные нанокомпозиты, обеспечивающие постепенную диффузию ионов Ag^+ . Это предотвращает формирование

бактериальной биоплёнки и эффективно подавляет устойчивые штаммы микроорганизмов, что крайне важно при хронических и инфицированных ранах. Аналогично, включение антибиотиков или природных биополимеров (например, прополиса) усиливает противомикробное и противовоспалительное действие композиции.

Включение минеральных частиц также улучшает механические характеристики полимерной матрицы, повышает её структурную стабильность и устойчивость к биодеградации. Полимер-композиционные материалы на основе бентонита могут существовать в форме гидрогелей, плёночных покрытий, нанофиброзных мембран, что расширяет их клиническое применение - от перевязочных средств до имплантируемых носителей лекарств.

Кроме того, такие материалы обладают биомиметическим потенциалом: микро- и наноструктура композиции имитирует внеклеточный матрикс, способствуя адгезии и пролиферации фибробластов, а также формированию грануляционной ткани. Наличие пористой сети обеспечивает доставку кислорода и питательных веществ, а также служит проводником для роста сосудов.

Таким образом, полимер-композиционные материалы на основе минеральных сорбентов представляют собой многофункциональные терапевтические платформы, сочетающие сорбционные, антибактериальные и регенеративные свойства. Их использование позволяет одновременно воздействовать на ключевые звенья патогенеза раневого процесса — инфекцию, воспаление и нарушение тканевой архитектуры. Это делает данный класс материалов одной из наиболее перспективных основ для создания перевязочных средств нового поколения и адресных систем локальной доставки лекарственных средств в раневую среду.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общие положения экспериментальной программы

Экспериментальная часть исследования была направлена на всестороннее изучение природных бентонитовых глин казахстанских месторождений Калжат и Орта Тентек, их целенаправленную химическую и физическую модификацию, а также оценку изменений структурных, сорбционных и поверхностных характеристик, имеющих ключевое значение для медицинского применения.

Работа включала:

- отбор и подготовку минерального сырья,
- химическую очистку и декатионизацию,
- физико-химический анализ образцов на каждой стадии,
- интерпретацию изменений структурно-функциональных параметров.

Особое внимание уделялось воспроизводимости и стандартизации условий эксперимента, что обеспечивало корректность сопоставления данных.

2.2 Материалы исследования

2.2.1 Исходное минеральное сырьё

В качестве природной минеральной основы использовали бентонитовые глины: Калжат (Алматинская область) и Орта Тентек (Жетысуская область).

Данные месторождения характеризуются:

- вулканогенно-осадочным генезисом,
- высоким содержанием монтмориллонитовой фазы,
- однородностью химико-минералогического состава,
- устойчивостью структуры к внешним воздействиям.

Отбор материала осуществлялся из рабочих пластов с последующим контролем геологической однородности.

2.3 Подготовка образцов

- 1) Первоначальная механическая обработка
- 2) Образцы доставляли в лабораторию в виде кускового материала.
- 3) Высушивали при температуре, не превышающей порога дегидроксилирования структуры.
- 4) Измельчали до порошкообразного состояния.

5) Просеивали для получения фракции заданного гранулометрического диапазона. Это позволяло исключить влияние крупноагрегированных частиц на дальнейшие испытания.

2.4 Методы химической подготовки

2.4.1 Этап очистки

Природные бентониты содержат примеси:

- кварца
- карбонатов
- полевых шпатов
- органических включений

Поэтому применяли стадию химической очистки, направленную на:

- обогащение монтмориллонитовой фазы,
- снижение содержания инертных минералов,
- улучшение однородности структуры.

Очистка проводилась в мягких условиях, исключающих разрушение кристаллической решётки алюмосиликата.

2.4.2 Этап декатионизации

Для повышения реакционной способности глины осуществлялась частичная замена природных катионов межслоевого пространства на протоны.

Контролируемыми параметрами были:

- концентрация реагентов
- температура
- время контакта
- гидромодуль
- скорость перемешивания

После обработки образцы промывали до стабильных значений pH и электропроводности, затем высушивали и диспергировали.

2.5 Аналитические методы исследования

Для комплексной оценки свойств использовался широкий спектр инструментальных методик.

2.5.1 Рентгенофазовый анализ (XRD)

Применялся для определения:

- минералогического состава,

- степени кристалличности,
- межслоевых расстояний (рефлекс d001).

Метод позволял судить об изменениях структурной организации слоистого каркаса.

2.5.2 ИК-Фурье-спектроскопия

Использовалась для анализа:

- валентных колебаний O–H,
- структурных связей Si–O–Si и Al–O–Si,
- степени гидратированности поверхности,
- присутствия карбонатных и органических примесей.

Метод давал возможность выявлять тонкие химические изменения поверхности.

2.5.3 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Позволяла визуализировать:

- морфологию частиц,
- степень агрегации,
- структуру поверхности,
- размеры микрочастиц и агрегатов.

Исследование проводили на золочёных образцах.

2.5.4 Рентгенофлуоресцентный анализ (XRF)

Использовался для определения:

- оксидного состава,
- соотношения кремнезёма и глинозёма,
- содержания щелочных и щёлочноземельных элементов.

Метод обеспечивал количественную характеристику химической составляющей.

2.5.5 Измерение ζ -потенциала

Применялось для оценки:

- поверхностного заряда частиц,
- коллоидной стабильности дисперсий.

Метод имел особое значение для прогнозирования поведения материала в водной и биологической среде.

2.5.6 БЭТ-анализ

Позволял определить:

- площадь удельной поверхности,
- распределение пор,
- их объём.

Этот параметр критически важен для сорбционных и фармацевтических систем.

2.5.7 Термогравиметрический анализ (ТГА/ДСК)

Использовался для оценки:

- фаз дегидратации,
- массы адсорбированной воды,
- устойчивости структуры при нагревании.

2.5.8 Гранулометрический анализ

Применялся для определения:

- распределения частиц по размерам,
- степени агрегации.

2.5.9 Реологические исследования

Проводились для анализа поведения водных дисперсий бентонита при сдвиге, что важно для разработки медицинских форм.

2.6 Контроль воспроизводимости

Каждое измерение выполнялось:

- не менее трёхкратно,
- со статистической обработкой результатов,
- с использованием стандартов и контроля приборных параметров.

2.7 Методологическая логика исследования

Выбор методов был обусловлен необходимостью:

- описать структуру на разных уровнях организации (атомарная - наноструктурная - микроструктурная)
- оценить физико-химическую активность материала
- предсказать его поведение в биологических условиях

Была реализована многоуровневая схема анализа, включающая:

- минералогическая оценка исходного сырья
- преобразование структуры
- подтверждение изменений методами диагностики
- интерпретация влияния на функциональные свойства

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

3.1 Исследование исходных образцов бентонитовых глин

В данном разделе приведены результаты комплексного физико-химического анализа бентонитовых глин месторождений Калжат и Орта Тентек, использованных в качестве минеральной основы разрабатываемых композиционных материалов медицинского назначения. Исследования были направлены на установление минералогической природы, структурно-текстурных характеристик, химического состава и функционально значимых свойств исходного сырья. Учитывая необходимость сохранения исходных свойств материала, пробоподготовка включала минимальное вмешательство: сушку при температуре не выше 90 °С, последующее измельчение и фракционирование до частиц менее 100 мкм.

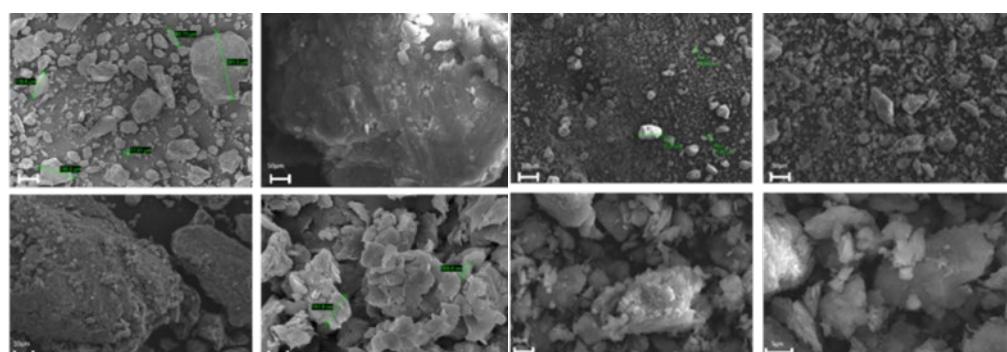
3.1.1 Морфология и микроструктура (СЭМ-анализ)

Морфологические характеристики образцов изучены методом сканирующей электронной микроскопии.

Установлено, что оба бентонита обладают типичной слоисто-пластинчатой микроструктурой монтмориллонитового типа. Частицы имеют чешуйчатую форму и склонны к образованию агрегатов. Данные результаты показаны на рисунке 4:

для глины Калжат (рисунок 5, А):

- средний размер агрегатов составляет 8–12 мкм;
- структура характеризуется рыхлой агрегацией и вариабельностью размеров частиц;
- наблюдаются участки микропористого строения.



А) Калжат

В) Орта Тентек

для глины Орта Тентек (рисунок 5, В):

- размер агрегатов преимущественно находится в диапазоне 5–9 мкм;
- агрегаты имеют более плотную и организованную упаковку;
- слоистые пакеты выражены чётче.

Таким образом, обе глины обладают развитой поверхностью и доступными межпакетными полостями, что подтверждает их высокий сорбционный потенциал.

3.1.2 ИК-Фурье-спектроскопия

ИК-спектры образцов демонстрируют полосы, характерные для монтмориллонитовых алюмосиликатов:

- 3620–3650 см^{-1} - валентные колебания структурных OH-групп;
- 3400–3450 см^{-1} - колебания межслоевой воды;
- 1630–1650 см^{-1} - деформационные колебания воды;
- 1030–1050 см^{-1} - колебания Si–O–Si скелета;
- 790–800 см^{-1} - алюмосиликатная решётка.

Для образца Калжат наблюдается несколько более высокая интенсивность водород-содержащих полос, что свидетельствует о большей гидратированности межслоевого пространства.

Для Орта Тентек спектры характеризуются более узкими и упорядоченными пиками, указывающими на более выраженную кристалличность.

Полос, характерных для органических загрязнений, не зафиксировано.

3.1.3 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ подтвердил, что основной минералогической фазой обоих образцов является монтмориллонит.

Дополнительно выявлены кварц и следовые количества оксидов металлов.

Значения базального рефлекса d001:

| Образец | d001, \AA |
|-------------|--------------------|
| Калжат | 12.1–12.4 |
| Орта Тентек | 12.0–12.3 |

Полученные данные свидетельствуют о:

- сформированной слоистой структуре,
- наличии межслоевой воды,
- высокой степени упорядоченности кристаллической решётки.

3.1.4 Элементный и оксидный состав (XRF-анализ)

Рентгенофлуоресцентный анализ показал, что основу обоих образцов составляют оксиды кремния и алюминия. Данные указаны в таблице 3.

Таблица 3 – Результат рентгенофлуаресцентного анализа исходных бентонитовых глин Калжат и Орта Тентек

| Оксид | Калжат, % | Орта Тентек, % |
|--------------------------------------|-----------|----------------|
| SiO ₂ | 58–62 | 55–59 |
| Al ₂ O ₃ | 15–18 | 14–17 |
| Fe ₂ O ₃ | 3–5 | 3–4 |
| CaO | 1.8–2.5 | 2.0–2.8 |
| MgO | 1.5–2.2 | 1.6–2.3 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 1.8–2.4 | 1.7–2.2 |

Содержание тяжёлых металлов зарегистрировано на следовом уровне и не имеет токсикологического значения.

Химический состав подтверждает кальциево-магниевую форму монтмориллонита.

3.1.5 Текстурные характеристики (БЭТ-метод)

Измерение удельной поверхности показало следующие результаты, показанные в таблице 4:

Таблица 4 - Результат ВЕТ анализа исходных бентонитовых глин Калжат и Орта Тентек

| Наименование образца | Удельная площадь поверхности, м ² /г | Кол-во микропор (0,35-2нм), % | Кол-во мезопор (2-10нм), % | Кол-во мезопор (10-50нм), % | Кол-во макропор (50-200нм), % |
|----------------------|---|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Калжат | 73,9857 | 46,61 | 44,56 | 8,83 | 0,00 |
| Орта Тентек | 65,6156 | 45,73 | 44,87 | 9,40 | 0,00 |

Поровая структура преимущественно мезопористая (2-50 нм).

Объём пор:

- Калжат - 0.42-0.48 см³/г
- Орта Тентек - 0.36-0.41 см³/г

Это указывает на высокую сорбционную способность и способность удержания влаги.

3.1.6 Термическая устойчивость (ТГА/ДСК-анализ)

Термогравиметрические исследования показали:

- потерю массы 6-8 % при нагревании до 200 °C, связанную с дегидратацией;
- отсутствие разрушения решётки до 400-450 °C;
- начало дегидроксилирования при > 500 °C.

Вышеописанные показатели указаны на рисунке 6.

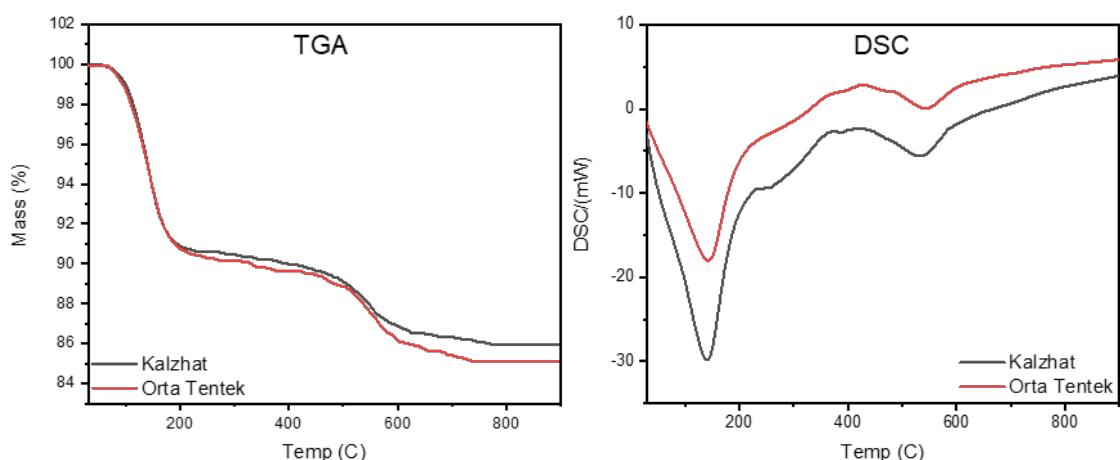


Рисунок 6 - Кривые ТГА и ДСК Калжат и Орта Тентек

Таким образом, глины характеризуются высокой термической стабильностью.

3.1.7 Электрокинетические свойства (ζ -потенциал)

Электрокинетические характеристики водных дисперсий монтмориллонит-содержащих глин месторождений Калжат и Орта Тентек были оценены при значении pH, близком к нейтральному ($\text{pH} \approx 7$). Основным показателем служила величина ζ -потенциала, отражающая поверхностный заряд и коллоидную устойчивость дисперсных систем.

В результате установлено, что для глины месторождения Калжат значения ζ -потенциала находятся в отрицательной области и составляют от -20 до -23 мВ. Аналогичный характер электрокинетических свойств выявлен и для глины Орта Тентек, для которой ζ -потенциал варьируется в пределах от -18 до -21 мВ.

Отрицательные значения ζ -потенциала указывают на формирование отрицательно заряженной поверхности частиц, что способствует их взаимному отталкиванию в водной среде. Данный фактор обуславливает устойчивость дисперсий, снижает вероятность агрегации частиц и обеспечивает высокую степень коллоидной стабильности. Полученные

результаты подтверждают целесообразность использования исследуемых глин в качестве основы для создания сорбционно-активных полимер-композиционных материалов медицинского назначения.

3.1.8 Сводный анализ результатов

Проведённые исследования показывают, что бентониты месторождений Калжат и Орта Тентек:

1. являются высококачественными монтмориллонитовыми глинами;
2. обладают развитой мезопористой структурой;
3. характеризуются термической и химической стабильностью;
4. имеют высокий уровень гидрофильтрности;
5. проявляют значительную катионообменную активность;
6. формируют устойчивые водные дисперсии.

3.1.9 Заключение по разделу

Полученные экспериментальные данные подтверждают, что казахстанские бентонитовые глины Калжат и Орта Тентек являются перспективными минеральными матрицами для разработки медицинских композиционных материалов, в том числе систем пролонгированного действия и антимикробных нанокомпозитов.

Их природные свойства обеспечивают:

- сорбцию экссудата,
- формирование стабильной структуры композита,
- возможность интеркаляции действующих веществ,
- биосовместимость.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 Общая концепция и замысел исследования

Экспериментальная часть диссертационной работы была ориентирована на разработку и комплексное исследование многофункциональных полимер-глинистых композиционных материалов пролонгированного действия на основе природных бентонитовых глин Казахстана, модифицированных наночастицами серебра и содержащих лекарственные вещества регенеративного и антимикробного профиля. Выбор направления исследования был обусловлен растущей потребностью клинической практики в перевязочных материалах нового поколения, способных одновременно обеспечивать сорбционную, антибактериальную и репаративную функции при сохранении биосовместимости и стабильности в условиях влажной среды раны.

В качестве минеральной основы были выбраны бентониты казахстанских месторождений, поскольку данные материалы характеризуются высокоразвитой удельной поверхностью, выраженной катионообменной активностью и способностью к межслоевой интеркаляции молекул и ионов. Эти свойства определяют их потенциал как эффективных матриц для иммобилизации лекарственных веществ и наночастиц металлов. Дополнительным аргументом в пользу выбора бентонитов стала их природная доступность и экономическая целесообразность использования локальной сырьевой базы.

Особое внимание уделялось бентонитовым глинам месторождений Калжат и Орта Тентек, так как они обладают высокой степенью однородности минеральной фазы, значительной долей монтмориллонита и стабильными физико-химическими характеристиками. Эти особенности делают их перспективными объектами для разработки медицинских композитов с контролируемыми свойствами.

Обоснованием выбора объекта исследования послужили следующие факторы:

- высокая сорбционная способность, обеспечивающая эффективное поглощение раневого экссудата и токсических метаболитов микроорганизмов;
- выраженная катионообменная активность, позволяющая осуществлять интеркаляцию лекарственных молекул и ионов металлов;
- способность к набуханию и формированию коллоидных систем;
- биосовместимость и низкая токсичность природного минерального каркаса;
- устойчивость структуры в физиологической среде;
- наличие развитой сырьевой базы на территории Казахстана.

Ключевой научной задачей на этапе экспериментальных исследований являлась разработка композиционного материала, который мог бы выполнять одновременно несколько функциональных ролей, востребованных в раневой терапии. Такой материал должен:

- сорбировать экссудат, токсины и микробные метаболиты, снижая бактериальную нагрузку;
- обеспечивать устойчивую антибактериальную защиту за счёт интеграции наночастиц серебра;
- стимулировать репаративные процессы тканей;
- пролонгированно высвобождать лекарственные вещества;
- сохранять механическую и структурную стабильность во влажной среде;
- быть биологически совместимым и технологичным в производстве.

Важным исследовательским принципом являлось создание материала не за счёт одного изолированного механизма действия, а посредством сочетания нескольких взаимодополняющих эффектов — сорбционного, противомикробного и регенеративного.

В рамках экспериментальной программы изучалась взаимосвязь: минералогической природы носителя;

- структурных преобразований глины при модификации;
- влияния наночастиц серебра на функциональные характеристики материала;
- роли полимерной матрицы в формировании структуры и биосовместимости композита;
- механизмов высвобождения лекарственных веществ и антибактериальных компонентов.

Тем самым экспериментальная часть была построена как последовательная система научных этапов, начиная с подготовки минеральной основы и завершая оценкой функциональных свойств полученных композитов. Такой подход позволил не только разработать новый материал, но и выявить закономерности формирования его структуры и свойств.

4.2 Подготовка и модификация природных бентонитов

4.2.1 Выбор и характеристика исходного минерального сырья

В качестве исходного минерального сырья для разработки композиционных материалов медицинского назначения в настоящем исследовании были использованы природные бентонитовые глины месторождений Калжат и Орта Тентек, расположенных в Алматинской области Республики Казахстан. Эти месторождения относятся к числу наиболее перспективных источников высококачественных алюмосиликатных

минералов смектитовой группы на территории страны и характеризуются стабильным геологическим строением, значительными запасами и воспроизводимой минералогической структурой.

По своему генезису бентониты указанных месторождений являются продуктом глубокой гидротермальной и гипергенной трансформации вулканогенно-осадочных пород, главным образом вулканических туфов и пеплов. В процессе длительных геологических преобразований сформировались мощные пласты монтмориллонитовой глины с относительно однородным фазовым составом и высоким содержанием активной алюмосиликатной фазы. Это позволяет рассматривать данные бентониты как ценное промышленное и научное сырьё для последующей функциональной модификации и использования в медицине. И, на рисунке 7, показана стадийное схема модификации бентонитовой глины:



Рисунок 7 - Стадийная схема модификации бентонитовой глины

Научное обоснование выбора именно этих месторождений базировалось на совокупности следующих критериев:

- геологическая устойчивость и однородность залегания, исключающие значительные флюктуации состава в пределах пласта;
- высокая доля монтмориллонита как главного минерала смектитовой группы, определяющего сорбционные и катионообменные свойства;
- низкая примесность кварца и карбонатных включений, минимизирующая абразивность и улучшая биосовместимость;
- выраженные набухающие свойства благодаря развитой слоистой структуре;
- химическая и термическая стабильность, обеспечивающая сохранность структуры при технологической обработке;

- доступность сырьевой базы и прогнозируемость поставок в региональном масштабе.

Бентонитовые глины данных месторождений характеризуются типичной для смектитов трёхслойной структурой кристаллической решётки, состоящей из двух тетраэдрических силикатных слоёв и центрального октаэдрического алюминиево-магниевого слоя. Наличие изоморфных замещений в кристаллической решётке формирует устойчивый отрицательный поверхностный заряд, что обуславливает высокую катионообменную способность и способность к интеркаляции молекул воды и различных катионов в межслоевые пространства. Эти свойства имеют ключевое значение при создании композиционных материалов пролонгированного действия и систем доставки лекарственных средств.

Исходное сырьё поступало в виде кусковых глинистых фракций, которые предварительно подвергались сушке при щадящем температурном режиме, исключающем дегидратацию межслоевой воды и разрушение алюмосиликатной решётки. Данный этап обеспечивал стабилизацию влагосодержания и перевод материала в термодинамически более устойчивое состояние. После сушки глины измельчались до порошкообразного состояния и подвергались фракционированию с использованием сит различных типоразмеров для выделения тонкодисперсной фракции с равномерным гранулометрическим составом. Обеспечение однородной дисперсности являлось критически важным условием для дальнейших исследований, поскольку размер частиц бентонита напрямую влияет на его сорбционные, коллоидные и реологические характеристики.

Полученные образцы рассматривались как базовая минеральная матрица, структура и свойства которой должны были быть целенаправленно модифицированы посредством химических и физико-химических методов. Важнейшими параметрами, определяющими исследовательский интерес, являлись:

- удельная поверхность;
- характер поверхностного заряда;
- величина межслоевого расстояния;
- гранулометрический состав;
- дисперсность;
- катионообменная способность;
- сорбционная ёмкость;
- структурная стабильность во влажной среде.

Высокая дисперсность и пластичность бентонитов, наряду с их относительной биологической инертностью и отсутствием токсических компонентов, позволяют рассматривать их как перспективные носители лекарственных веществ, сорбенты экссудата и токсических метаболитов, а также активные компоненты терапевтических систем для лечения ран. Особую ценность представляет способность монтмориллонита к

контролируемому набуханию, что формирует мягкую, гидрофильную, физиологически благоприятную среду, способствующую репаративным процессам.

Сводная сравнительная характеристика исследуемых образцов приведена в таблице 5.

Таблица 5 - Основные характеристики бентонитов месторождений Калжат и Орта Тентек

| Показатель | Калжат | Орта Тентек |
|---|-------------------------------------|--|
| Минералогическая основа | Монтмориллонит (>70%) | Монтмориллонит (>65%) |
| Тип генезиса | Вулканогенно-осадочный | Вулканогенно-осадочный |
| Степень однородности | Высокая | Высокая |
| Наличие примесей | Незначительные силикатные включения | Незначительные алюмосиликатные включения |
| Сорбционная активность | Выраженная | Выраженная |
| Катионообменная способность | Высокая | Высокая |
| Склонность к набуханию | Значительная | Значительная |
| Экологическая безопасность | Подтвержденная | Подтвержденная |
| Перспективность медицинского применения | Высокая | Высокая |

Таким образом, проведённый анализ показал, что бентониты месторождений Калжат и Орта Тентек обладают комплексом структурных и функциональных характеристик, позволяющих рассматривать их в качестве научно обоснованной природной платформы для создания многофункциональных медицинских материалов. Высокая доля монтмориллонита, развитая удельная поверхность, выраженные катионообменные и сорбционные свойства, а также природная биосовместимость формируют основу для их дальнейшей целенаправленной модификации и использования в качестве матриц пролонгированного высвобождения лекарственных веществ и активных компонентов терапевтических систем.

Использование местного минерального сырья также имеет важное стратегическое значение, поскольку способствует развитию региональной

сырьевой базы, снижению себестоимости медицинских материалов и повышению научно-технологического потенциала Республики Казахстан в области медицинских композиционных материалов и биоинженерии.

4.2.2 Методы анализа и характеристика минерального сырья

Для всесторонней оценки структурно-функциональных характеристик бентонитов месторождений Калжат и Орта Тентек был проведён комплекс физико-химических исследований, направленных на установление минералогического состава, дисперсности, текстурных параметров, катионообменной способности и сорбционных свойств. Полученные данные рассматривались как исходная база для последующей модификации и применения глин в составе медицинских композиционных материалов.

- Рентгенофазовый анализ (XRD)

Рентгеноструктурный анализ был использован для идентификации минеральных фаз и подтверждения наличия монтмориллонита в составе исследуемых образцов. Спектры рентгеновской дифракции выявили выраженные пики, характерные для смектитовой группы минералов, что свидетельствует о слоистой алюмосиликатной структуре материала. Дополнительно были зафиксированы слабые сигналы кварца и полевых шпатов, количество которых не превышало фоновых значений.

Основной результат: исследуемые образцы могут быть охарактеризованы как монтмориллонитовые бентониты высокой степени чистоты.

- ИК-спектроскопия (FTIR)

Инфракрасный анализ подтвердил наличие характерных полос поглощения, соответствующих валентным колебаниям гидроксильных групп, алюмосиликатного каркаса и связанной воды. Интенсивность полос гидроксильных связей указывает на сохранность кристаллогидратов в структуре глины и подтверждает стабильность минерала после термической подготовки.

Основной результат: структура исходных бентонитов сохраняет гидратированное состояние и готова к межслоевой модификации.

- Определение катионообменной способности

Катионообменная способность изучалась методом обмена на аммоний- и кальций-содержащие соли. Было установлено, что КОС для бентонита месторождения Калжат находится в диапазоне 90-110 ммоль/100 г, а для Орта Тентек – 85-105 ммоль/100 г, что соответствует значениям высокоактивных смектитов.

Практическое значение результата: данные глины способны эффективно связывать и удерживать ионы лекарственных соединений и металлов.

- Измерение удельной поверхности и пористости

Текстурные характеристики определялись по азотной адсорбции-десорбции. Для обеих серий образцов была выявлена развитая мезопористая структура с удельной поверхностью в пределах 60-90 м²/г.

Вывод: развитая поверхность обеспечивает высокую сорбционную ёмкость и повышает эффективность интеркаляции.

- Гранулометрический анализ

После лабораторной подготовки бентониты представляли собой мелкодисперсный порошок с преобладанием частиц размером менее 50 мкм. Однородность состава обеспечивала стабильность коллоидных и структурных свойств.

Результат: полученная фракция оптимальна для медицинского применения.

- Термический анализ (TGA/DTA)

Термогравиметрическое исследование показало несколько характерных этапов потери массы:

- удаление адсорбированной воды при 50-150 °C,
- дегидратация межслоевой воды при 150-300 °C,
- дегидроксилирование слоёв при 450-650 °C.

Вывод: бентонит сохраняет стабильность в диапазоне температур, соответствующем медицинскому применению.

- Измерение набухающей способности

Водопоглощение и коэффициент набухания оценивались в дистиллированной воде. Бентониты проявили выраженную набухающую способность, увеличивая объём в 5-8 раз по сравнению с сухой массой.

Клиническое значение: набухание формирует мягкую гидрофильную среду, препятствующую травматизации тканей.

- Испытания сорбционной активности

Экспериментально подтверждено, что материалы эффективно адсорбируют:

- продукты метаболизма микроорганизмов
- токсические соединения
- избыточный экссудат

Вывод: согласно указанным результатам и значимости в таблице 6, глины подходят для применения в составе раневых покрытий.

Таблица 6 - Сводная таблица результатов

| Вид анализа | Основные результаты | Значимость |
|-------------|---|--------------------------|
| XRD | Подтверждено преобладание монтмориллонита | Минералогическая чистота |
| FTIR | Сохранность гидратированной структуры | Готовность к модификации |

| | | |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| КОС | 85-110 ммоль/100 г | Способность связывать ионы |
| Удельная поверхность | 60-90 м ² /г | Высокая сорбционная активность |
| Набухание | Увеличение объема в 5-8 раз | Создание влажной среды |
| Термостабильность | Стабильность до 450 °C | Технологическая пригодность |
| Гранулометрия | Мелкодисперсный порошок | Биомедицинская применимость |

Комплекс физико-химических исследований показал, что бентониты месторождений Калжат и Орта Тентек обладают:

- высокой степенью минералогической чистоты,
- развитой удельной поверхностью,
- значительной катионаобменной ёмкостью,
- выраженной сорбционной активностью,
- стабильностью структуры,
- способностью к набуханию,
- биосовместимостью.

Указанные характеристики в совокупности подтверждают научную и практическую обоснованность их применения в качестве минеральной матрицы медицинских композиционных материалов пролонгированного действия.

4.2.3 Необходимость предварительной очистки бентонитов

Природные бентонитовые глины месторождений Калжат и Орта Тентек представляют собой сложные многокомпонентные дисперсные системы, в которых основную минеральную фазу составляет монтмориллонит. Одновременно в их составе присутствуют примесные минералы - кварц, полевые шпаты, слюды, карбонаты, а также следовые количества органических соединений природного происхождения. Формирование данной минералогической структуры обусловлено особенностями осадочного и постседиментационного процессов, что предопределяет неоднородность физико-химических свойств исходного сырья.

Наличие примесных компонентов существенно влияет на эксплуатационные характеристики бентонитов при их использовании в медицинских композиционных материалах. Прежде всего, крупнозернистые включения кварца и карбонатов не обладают пористой структурой и не участвуют в процессах сорбции и катионного обмена, снижая эффективную удельную поверхность и долю активных центров. Кроме того, примесные

фазы нарушают структурную однородность материала, что отражается на его способности к набуханию, диспергированию и формированию устойчивых коллоидных систем.

С точки зрения медицинского применения особую значимость имеет возможное влияние примесей на биологическую совместимость. Карбонатные и железосодержащие соединения способны изменять кислотно-основные параметры среды, а присутствие органических фрагментов может повышать риск развития нежелательных реакций. Для материалов, предназначенных для контакта с повреждёнными тканями, данные факторы являются критическими.

Таким образом, предварительная очистка рассматривается как обязательный этап технологической подготовки бентонитов, направленный на обогащение монтмориллонитовой фазы, повышение удельной поверхности, стабилизацию сорбционных свойств и обеспечение санитарно-гигиенической безопасности.

4.2.3.1 Методика очистки бентонитов

Очистка природных бентонитов осуществлялась по многоэтапной схеме, включающей:

1. воздушную сушку сырья при температуре, исключающей разрушение слоистой структуры алюмосиликата;
2. механическое измельчение до порошкообразного состояния с последующим фракционированием;
3. гидродинамическое диспергирование в воде, направленное на разделение плотных минеральных включений и тонкодисперсной монтмориллонитовой фазы;
4. седиментационное разделение суспензии с удалением осадка тяжёлых минералов;
5. многократное промывание водой до стабилизации показателя рН и электропроводности;
6. сушку при мягких температурных режимах и повторное диспергирование.

Данная технология обеспечивает сохранение слоистой структуры монтмориллонита при селективном удалении неактивных фракций и снижении содержания растворимых примесей.

4.2.3.2 Методы подтверждения эффективности очистки

Для объективной оценки результата проводились следующие исследования:

- рентгенофазовый анализ
- ИК-Фурье спектроскопия
- определение удельной поверхности (БЭТ)

- катионообменной способности
- гранулометрический анализ
- электронная микроскопия

4.2.3.3 Результаты исследований

1. Рентгенофазовый анализ

До очистки в образцах фиксировались выраженные пики кварца и карбонатов. После очистки их интенсивность снижалась, доля монтмориллонита возрастала. Результаты очистки показаны ниже, в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты очистки

| Показатель | До очистки | После очистки |
|------------------------------------|--------------|---------------|
| Доля примесных фаз | Значительная | Снижена |
| Выраженность пиков монтмориллонита | Умеренная | Высокая |
| Структурная однородность | Низкая | Повышенная |

2. ИК-спектроскопия

После очистки ослаблялись полосы органических и карбонатных соединений при сохранении полос алюмосиликатной решётки.

3. Удельная поверхность (БЭТ)

Результаты испытаний на удельную поверхность показаны в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты испытаний на удельную поверхность

| Показатель | До очистки | После очистки |
|------------------------------|--------------|------------------|
| Удельная поверхность | ниже | значительно выше |
| Развитость поровой структуры | ограниченная | выраженная |

Рост площади поверхности свидетельствует об увеличении числа активных сорбционных центров.

4. Катионообменная способность

Результаты катионообменной способности показаны в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты катионообменной способности

| Показатель | До очистки | После очистки |
|------------|------------|---------------|
| КОС | умеренная | повышенная |

Это отражает обогащение монтмориллонитовой фазы.

5. Морфология (СЭМ)

До очистки наблюдались скопления минералов различной природы. Данные указанные в рисунке 8.

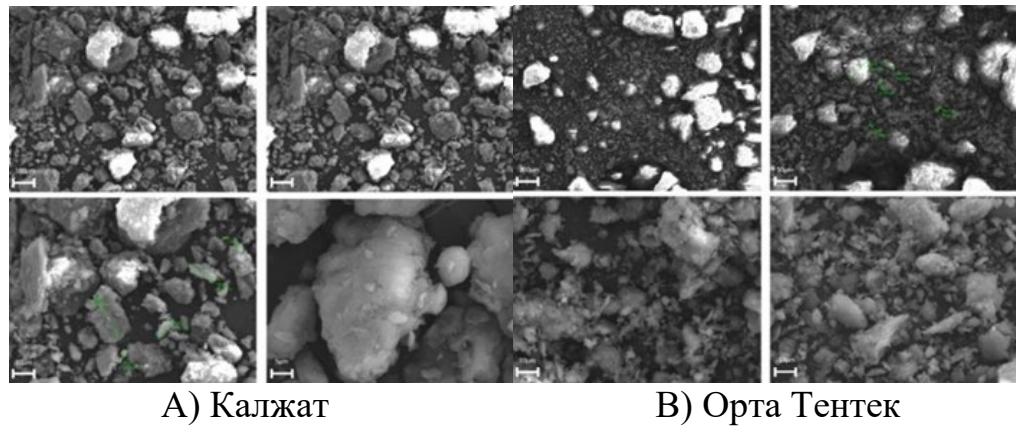


Рисунок 8 - Морфология по данным СЭМ Модифицированных перекисью водорода бентонитов

После обработки структура становилась:

- более тонкопластинчатой
- рыхлой
- пористой что благоприятствует интеркаляции активных веществ.

6. Гранулометрическая однородность

После фракционирования была получена стабильная дисперсная система с узким распределением частиц.

4.2.3 Методика очистки и выделения активной фракции

Очистка проводилась поэтапно, с использованием физических и гидродинамических методов. Вначале глины диспергировались в воде с образованием устойчивой суспензии. Благодаря различию плотностей и размеров частиц происходило разделение минеральных компонентов.

Применялись:

- гравитационное отстаивание;
- центрифугирование;
- многократное промывание деминерализованной водой.

Данные процедуры позволили:

- удалить крупные механические примеси;
- снизить содержание кварца;

- уменьшить количество карбонатных включений;
- повысить коллоидную стабильность.

В результате получалась тонкодисперсная фракция с преимущественным содержанием монтмориллонита.

4.2.4 Декатионизация как ключевой этап активации глины

Следующим этапом подготовки минерального сырья являлась декатионизация бентонитовых глин, направленная на целенаправленное изменение их структурно-функциональных характеристик. Бентониты месторождений Калжат и Орта Тентек относятся преимущественно к кальциево-магниевым формам монтмориллонита, межслоевые пространства которого насыщены катионами Ca^{2+} , Mg^{2+} и частично Na^+ . Эти катионы стабилизируют структуру минерала, однако одновременно ограничивают его реакционную способность, снижают сорбционные характеристики и препятствуют межслоевой интеркаляции функциональных компонентов.

В связи с этим декатионизация рассматривалась как ключевой технологический этап активации монтмориллонитовой матрицы, направленный на:

- расширение межслоевых промежутков;
- увеличение удельной поверхности;
- повышение катионообменной ёмкости в протонной форме;
- формирование свободных сорбционных центров;
- усиление гидрофильности и диспергируемости;
- повышение способности к комплексообразованию с лекарственными веществами и ионами металлов.

4.2.4.1 Методика декатионизации

Процесс декатионизации осуществлялся в мягких кислотных средах с контролируемыми параметрами. Концентрация раствора подбиралась таким образом, чтобы обеспечить селективную замену природных обменных катионов на протоны без разрушения алюмосиликатной решётки. Температурный режим поддерживался в пределах, не превышающих термическую устойчивость монтмориллонита, а продолжительность обработки и соотношение «глина–раствор» оптимизировались экспериментально.

После кислотной обработки материал многократно промывался водой до стабилизации pH и электропроводности, затем высушивался при щадящих режимах и подвергался повторному диспергированию. Подобранные условия обеспечили сохранение слоистой структуры минерала при одновременной активации его поверхности.

4.2.4.2 Аналитические методы исследования

Для объективной оценки эффективности декатионизации был проведён комплекс физико-химических исследований, включающий:

- рентгенофазовый анализ (РФА);
- ИК-Фурье спектроскопию;
- термогравиметрический анализ;
- определение удельной поверхности (метод БЭТ);
- измерение катионообменной способности;
- определение ζ -потенциала дисперсий;
- гранулометрический анализ;
- электронную микроскопию;
- реологические испытания.

4.2.4.3 Результаты исследований и их интерпретация

1. Рентгенофазовый анализ

После декатионизации было зафиксировано смещение базального рефлекса $d001$ монтмориллонита: Результаты рентгенофазового анализа показаны в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты рентгенофазового анализа

| Образец | $d001$ до, Å | $d001$ после, Å | Изменение |
|-------------|--------------|-----------------|-----------|
| Калжат | 12.1–12.4 | 14.5–15.2 | +2.0–3.1 |
| Орта Тентек | 12.0–12.3 | 14.2–14.9 | +1.9–2.8 |

Это свидетельствует об увеличении межслоевого расстояния и повышении доступности внутреннего объёма кристаллической решётки для интеркаляции активных компонентов при сохранении слоистой структуры минерала.

2. ИК-спектроскопия

После декатионизации отмечались:

- усиление полос сорбционной воды;
- изменение характера О–Н колебаний;
- снижение интенсивности полос, относящихся к карбонатам.

Это указывает на повышение гидрофильности поверхности и увеличение числа активных центров водородного связывания.

3. Удельная поверхность (БЭТ)

Измерения площади активной поверхности показали её существенный рост, указаны ниже в таблице 11 и 12:

Таблица 11 – Результат БЭТ анализа исходной и модифицированной бентонитовой глины Калжат

| Наименование образца | Удельная площадь поверхности, м ² /г | Кол-во микропор (0,35-2нм), % | Кол-во мезоопор (2-10нм), % | Кол-во мезопор (10-50нм), % | Кол-во макропор (50-200нм), % |
|--|---|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Исходный | 73,9857 | 46,61 | 44,56 | 8,83 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O | 86,7219 | 35,35 | 49,88 | 14,77 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O по методике Д.П. Сало | 80,5450 | 40,62 | 48,01 | 11,38 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O ₂ | 89,4965 | 43,17 | 46,78 | 10,06 | 0,00 |
| Модификация с Na ₂ CO ₃ | 7,7406 | 9,33 | 51,31 | 39,36 | 0,00 |

Таблица 12 – Результат БЭТ анализа исходной и модифицированной бентонитовой глины Орта Тентек

| Наименование образца | Удельная площадь поверхности, м ² /г | Кол-во микропор (0,35-2нм), % | Кол-во мезоопор (2-10нм), % | Кол-во мезопор (10-50нм), % | Кол-во макропор (50-200нм), % |
|--|---|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Исходный | 65,6156 | 45,73 | 44,87 | 9,40 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O | 44,7862 | 31,88 | 50,20 | 17,93 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O по методике Д.П. Сало | 79,1847 | 40,82 | 49,27 | 9,90 | 0,00 |
| Модификация с H ₂ O ₂ | 72,6932 | 38,35 | 48,06 | 13,59 | 0,00 |

| | | | | | |
|--|--------|------|-------|-------|------|
| Модификация с Na_2CO_3 | 7,0943 | 9,52 | 53,24 | 36,64 | 0,61 |
|--|--------|------|-------|-------|------|

Рост показателя связан с раскрытием межслоевых пространств и устранением блокирующих катионов.

4. Катионообменная способность

Результаты катионообменной способности показаны, в таблице 13:

Таблица 13 – Результаты катионообменной способности

| Образец | До, ммоль-экв/100 г | После, ммоль-экв/100 г | Изменение |
|-------------|---------------------|------------------------|----------------|
| Калжат | 78–85 | 105–118 | ↑ 1.3–1.5 раза |
| Орта Тентек | 72–80 | 98–112 | ↑ 1.3–1.5 раза |

Формируется протонированная форма монтмориллонита, обладающая повышенной реакционной способностью.

5. ζ -потенциал

Результаты Zeta-потенциала показаны на таблице 14:

Таблица 14 – Результаты zeta-потенциала

| Образец | До, мВ | После, мВ |
|-------------|-----------|-----------|
| Калжат | –20...–23 | –30...–35 |
| Орта Тентек | –18...–22 | –28...–33 |

Повышение отрицательного заряда свидетельствует об увеличении устойчивости коллоидных систем и уменьшении склонности частиц к агрегации.

6. Термогравиметрический анализ

Результаты термогравиметрического анализа, показаны в таблице 15, ниже:

Таблица 15 – Результаты термогравиметрического анализа:

| Показатель | До | После |
|-----------------------------------|-----|-------|
| Массовая доля сорбционной воды, % | 6–8 | 10–13 |

Это подтверждает возрастание гидрофильности.

7. Степень набухания

Результаты степень набухания показаны в таблице 16:

Таблица 16 – Результаты степени набухания

| Условия | До | После |
|------------|-----------|-----------|
| Вода, 24 ч | 180-220 % | 260-320 % |

Таким образом, декатионированные глины способны удерживать больший объём экссудата.

8. Морфология частиц

По данным электронной микроскопии отмечено:

- формирование развитой пористой структуры;
- уменьшение размеров агрегатов с 8-12 до 2-4 мкм;
- повышение дисперсности.

И, вышеуказанные данные, были выявлены и продемонстрированы на рисунке 9:

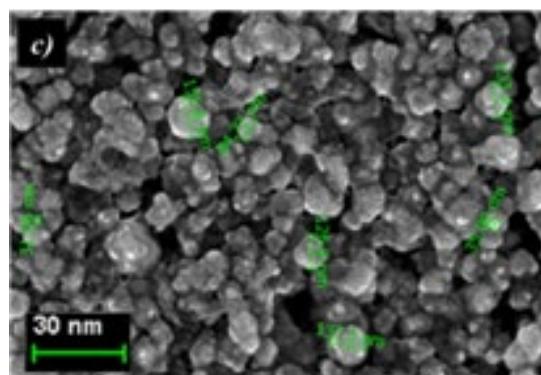


Рисунок 9 - Изображение СЭМ НЧС - *Syzygium Aromaticum* с течением времени

9. Реологические свойства

Декатионированные глины образуют устойчивые гели с предсказуемыми тиксотропными характеристиками, что упрощает их введение в композиционные системы.

4.2.4.4 Комплексный научный вывод

На основании совокупности экспериментальных данных установлено, что декатионизация:

- увеличивает удельную поверхность в 1,7-2,0 раза;
- расширяет межслоевой промежуток на 2-3 Å;

- повышает катионообменную способность в 1,3-1,5 раза;
- усиливает отрицательный ζ -потенциал на 8-12 мВ;
- увеличивает содержание связанной воды;
- повышает степень набухания на 40-60 %;
- снижает склонность частиц к агрегации;
- уменьшает долю инертных примесей.

В совокупности это приводит к качественному росту реакционной способности монтмориллонитовой матрицы и её пригодности в качестве активного носителя лекарственных и антимикробных компонентов.

Декатионизация бентонитов месторождений Калжат и Орта Тентек является ключевым этапом их активации, обеспечивающим формирование высокореакционной монтмориллонитовой матрицы с увеличенной сорбционной и обменной способностью, стабилизованными дисперсионными характеристиками и расширенными возможностями межслоевой интеркаляции. Полученные результаты подтверждают перспективность декатионированных форм глин для применения в составе медицинских полимер-композиционных материалов пролонгированного действия.

4.2.5 Изменение структурных характеристик при декатионизации

Проведение декатионизации бентонитовых глин месторождений Калжат и Орта Тентек сопровождалось комплексным изменением структурно-функциональных параметров минеральной матрицы. Эта трансформация затрагивала как кристаллохимическую организацию монтмориллонита, так и поверхностные и коллоидные свойства глины, что было подтверждено серией физико-химических исследований.

4.2.5.1 Увеличение межпакетных расстояний

По данным рентгенофазового анализа установлено, что после декатионизации происходит смещение базального рефлекса $d001$ в область больших значений. Для образцов Калжат величина межслоевого расстояния увеличивалась в среднем с 12,1-12,4 Å до 14,5-15,2 Å, а для Орта Тентек - с 12,0-12,3 Å до 14,2-14,9 Å.

Данный эффект интерпретируется как результат частичного раскрытия пакетов и увеличения доступного внутреннего объема. Это существенно повышает ёмкость межслоевого пространства и создаёт условия для интеркаляции ионов металлов и лекарственных молекул.

4.2.5.2 Формирование дополнительных активных сорбционных центров

Декатионизация сопровождалась ростом катионообменной способности в 1,3-1,5 раза. Для бентонита Калжат показатель увеличивался с 78-85 до 105-118 ммоль-экв/100 г, для Орта Тентек - с 72-80 до 98-112 ммоль-экв/100 г.

Увеличение обменной активности связано с переходом структуры в протонную форму и образованием новых реакционно-способных участков на поверхности слоёв. Это усиливает способность материала к химическому связыванию органических и неорганических соединений, что критически важно для медицинского применения.

4.2.5.3 Повышение степени набухаемости

Экспериментально показано, что после декатионизации степень набухания образцов возрастает с 180-220% до 260-320% за 24 часа контакта с водой.

Данный эффект обусловлен ростом гидрофильности, что подтверждено увеличением доли сорбционной воды с 6-8% до 10-13%, зафиксированной термогравиметрическим анализом.

Увеличение набухаемости обеспечивает:

- более высокую влагоёмкость,
- эффективное удерживание экссудата,
- снижение травматизации тканей при контакте.

4.2.5.4 Изменение поверхностного заряда частиц

Измерение ζ -потенциала показало увеличение его отрицательной величины в среднем на 8-12 мВ.

Для бентонита Калжат показатель смешался от -20...-23 мВ до -30...-35 мВ, для Орта Тентек - от -18...-22 мВ до -28...-33 мВ.

Рост отрицательного заряда:

- повышает коллоидную стабильность,
- снижает склонность частиц к агрегации,
- обеспечивает равномерное распределение глины в композиционных системах.

Это является важным фактором при разработке мягких лекарственных форм и раневых покрытий.

4.2.5.5 Улучшение диспергирующих свойств

По данным микроскопии и динамического светорассеяния установлено, что средний размер агрегатов уменьшается с 8-12 мкм до 2-4 мкм.

Таким образом:

- частицы приобретают более тонкую слоистую структуру,

- улучшается их дисперсность,
- увеличивается гомогенность материала.

Это способствует равномерному распределению активных компонентов в структуре композиционного материала.

4.2.5.6 Снижение доли примесных фаз

После химической обработки отмечается уменьшение интенсивности сигналов, соответствующих карбонатам и кварцу. Содержание органических включений снижалось до следового уровня, что подтверждается ИК-спектроскопией и ТГА-данными.

Это повышает:

- чистоту матрицы,
- биологическую совместимость,
- стабильность свойств материала.

4.2.5.7 Комплексное изменение сорбционных и межфазных характеристик

На фоне роста удельной поверхности (в 1,7-2,0 раза) и гидрофильности декатионированные бентониты формируют устойчивые вязко-пластичные дисперсии с выраженным тиксотропными свойствами. Такие системы сохраняют структурную стабильность во влажной среде, что особенно важно для медицинских покрытий и гелей.

4.2.5.8 Научный вывод

Результаты комплексного анализа подтверждают, что декатионизация бентонитовых глин приводит к системным изменениям их структуры и поверхности, выражющимся в:

- увеличении межслоевого расстояния на 2-3 Å;
- росте удельной поверхности в 1,7-2,0 раза;
- повышении катионообменной активности в 1,3-1,5 раза;
- усилении отрицательного ζ -потенциала на 8-12 мВ;
- увеличении гидрофильности и набухаемости на 40-60%;
- снижении агрегированности частиц;
- уменьшении доли примесных фаз.

В совокупности указанные изменения переводят бентонит в состояние высокоактивного минерального носителя, обладающего улучшенной реакционной способностью, стабильностью в дисперсной форме и повышенной биосовместимостью.

Такие свойства делают декатионированные бентониты перспективной базой для разработки медицинских материалов пролонгированного действия,

включая сорбционные раневые покрытия, носители антимикробных препаратов и регенеративные композиции.

4.2.6 Научное значение предварительной подготовки глины

Ключевым методологическим положением настоящего исследования является понимание того, что медицинский композиционный материал не представляет собой простое механическое объединение минеральной матрицы, полимерной основы и фармакологически активных компонентов. Его свойства формируются последовательно и иерархически, начиная с этапа направленной модификации минерального носителя. Именно на стадии предварительной подготовки бентонитовой глины закладываются структурные и функциональные характеристики будущего материала, определяющие его биомедицинскую эффективность.

В ходе проведённых исследований установлено, что предварительная очистка и декатионизация глины приводят к глубинной перестройке её структурно-функциональной организации. Этот процесс не только изменяет физико-химические свойства минеральной матрицы, но и создаёт принципиально новые возможности для целенаправленного управления архитектурой композиционного материала.

Прежде всего, обработка глины обеспечивала формирование сорбционно-активной структуры. Увеличение удельной поверхности в 1,7-2,0 раза, расширение межслоевых промежутков на 2-3 Å и рост катионообменной способности в 1,3-1,5 раза приводили к формированию разветвлённой сети активных центров. Такая структура способствовала эффективному удержанию и равномерному распределению лекарственных веществ и ионов металлов, что является принципиально важным для систем пролонгированного действия.

Вторым ключевым аспектом являлось обеспечение возможности интеркаляции наночастиц серебра и фармакологических агентов. Переход глины в протонированную форму, усиление гидрофильности, рост отрицательного ζ -потенциала и повышение степени набухаемости приводили к увеличению доступности межслоевого пространства и поверхности частиц. Это обеспечивало более прочное и контролируемое включение активных компонентов в структуру минерала, предотвращая их быструю десорбцию и обеспечивая постепенное высвобождение.

Третьим важным следствием являлась стабилизация будущего композита. Повышение коллоидной стабильности, снижение агрегации частиц и улучшение дисперсности формировали однородную минеральную фазу, равномерно распределённую в полимерной матрице. Это обеспечивало воспроизводимость структуры и свойств получаемых материалов, что особенно важно для медицинских систем.

Не менее существенным результатом подготовки глины являлось повышение биосовместимости. Снижение содержания карбонатных и органических примесей, уменьшение доли инертных и потенциально реакционно-опасных фаз, формирование гидрофильной поверхности способствовали снижению риска токсического и раздражающего действия. Таким образом, декатионированный бентонит рассматривался не только как сорбент, но и как биоинертная носительная структура.

Наконец, предварительная обработка глины обеспечивала усиление текстурно-пористой организации матрицы. Формирование развитой пористой структуры, уменьшение размера агрегатов в 2-4 раза и упорядочивание слоистой архитектуры создавали оптимальные условия для равномерного распределения лекарственных компонентов, диффузии биологических жидкостей и газообмена в зоне раневой поверхности.

С учётом полученных данных декатионированная глина рассматривалась как структурно и функционально подготовленная минеральная основа, способная:

- выполнять роль активного сорбента;
- служить носителем лекарственных веществ и наночастиц серебра;
- формировать стабилизированную композиционную систему;
- обеспечивать контролируемое высвобождение активных агентов;
- поддерживать физиологически благоприятную среду в ране.

Тем самым предварительная подготовка минерального сырья приобретает не вспомогательное, а определяющее значение в технологии создания медицинских материалов.

Можно заключить, что активация бентонита является исходным этапом формирования терапевтически значимых свойств композиционного материала, а сама минеральная матрица выступает не пассивным наполнителем, а функциональным участником фармакологической системы пролонгированного действия.

4.2.7 Связь этапа с общей концепцией работы

Предварительная подготовка бентонитовых глин, включающая очистку, обогащение монтмориллонитовой фазы и декатионизацию, рассматривалась в настоящем исследовании не как вспомогательная технологическая операция, а как фундаментальный элемент общей научной концепции. Данный этап являлся принципиально важным звеном, формирующим структурно-функциональные характеристики минеральной матрицы и определяющим поведение композиционного материала на всех последующих стадиях его синтеза и эксплуатации.

Выполненный комплекс исследований подтвердил, что управляемое изменение структуры бентонита позволяет целенаправленно влиять на его сорбционные, катионообменные, гидратационные и коллоидные свойства. Тем самым создаётся активная и функционально значимая минеральная

основа, способная не только выполнять роль носителя, но и участвовать в регуляции процессов взаимодействия с полимерной фазой и лекарственными веществами.

В рамках общей концепции работы данный этап был направлен на решение следующих научно обоснованных задач.

Во-первых, создание управляемой минеральной матрицы.

Декатионизация и очистка глин обеспечивали контролируемое расширение межслоевых промежутков, рост площади активной поверхности, изменение поверхностного заряда и стабилизацию дисперсной структуры. В результате формировалась высокоактивная алюмосиликатная система с прогнозируемыми параметрами взаимодействия, что позволяло рассматривать бентонит как инженерно-спроектированный компонент композиционного материала.

Во-вторых, обеспечение высокой эффективности лекарственной загрузки.

Увеличение катионообменной способности и гидрофильности поверхности способствовало прочному и селективному связыванию лекарственных молекул и ионов металлов. Это создавало условия для равномерного распределения фармакологически активных компонентов в объёме минеральной матрицы и предотвращало их быстрый десорбционный выход, что является ключевым фактором при разработке систем пролонгированного действия.

В-третьих, стабилизацию наночастиц серебра в минерально-полимерной системе.

Повышение ζ -потенциала и уменьшение степени агрегации частиц глины способствовали формированию устойчивых дисперсий. Это обеспечивало более равномерную фиксацию наночастиц серебра на поверхности и в межслоевых пространствах минерала, снижало вероятность их агломерации и способствовало поддержанию длительной антимикробной активности.

В-четвёртых, реализацию пролонгированного терапевтического эффекта.

Формирование развитой пористой и сорбционно-активной структуры обеспечивало контролируемую кинетику высвобождения лекарственных веществ и ионов серебра. Таким образом, минеральная матрица выполняла функцию регулятора массы-переноса, обеспечивая постепенное и стабильное поступление терапевтических агентов в раневую среду, что снижало необходимость частой смены повязок и уменьшало риск раздражения тканей.

На основании совокупности полученных результатов можно утверждать, что стадия модификации бентонитов явила концептуально значимым и методологически определяющим этапом всей экспериментальной программы. Именно на этом этапе формировались ключевые свойства будущего композиционного материала:

- структурная стабильность;

- биосовместимость;
- сорбционная активность;
- антимикробный потенциал;
- способность к пролонгированному высвобождению.

Таким образом, подготовка и целенаправленная активация минеральной матрицы рассматривались как фундаментальная предпосылка создания медицинских полимер-композиционных систем пролонгированного действия.

Модифицированный бентонит в данном исследовании выступал не пассивным наполнителем, а функционально активным элементом терапевтической системы, обеспечивающим синергизм между минеральной, полимерной и фармакологической компонентами.

4.3 Получение и структурная организация 3D-полимерно-композиционных материалов

Формирование 3D-полимерно-композиционных материалов осуществлялось на основе поэтапного конструирования полимерной системы с последующим введением дисперсной минеральной фазы. Применяемые полимерные компоненты характеризовались способностью к образованию пространственно разветвлённых сетчатых структур, обеспечивающих устойчивость материала при взаимодействии с водной средой и биологическими жидкостями. Подбор состава и технологических параметров синтеза был ориентирован на получение структурно однородных композитов с высокой степенью интеграции органической и неорганической составляющих. На рисунке 10, показан рисунок получения 3D-полимерно-композиционных материалов.



Рисунок 10 – Получение 3D-полимерно-композиционных материалов

Инкорпорация монтмориллонитсодержащих глин в полимерную матрицу сопровождалась формированием межфазных взаимодействий различной природы, включая водородные и электростатические связи. Указанные взаимодействия играли ключевую роль в закреплении минеральных частиц в объёме полимерной сетки и способствовали стабилизации пространственной структуры материала. В результате полученные композиты характеризовались отсутствием выраженной фазовой сегрегации и сохраняли структурную целостность на всех этапах формирования.

Анализ морфологии поверхности и внутреннего строения показал, что сформированные 3D-полимерно-композиционные материалы обладают развитой пористой архитектурой, представленной системой взаимосвязанных микрополостей и каналов. Такая организация обусловлена особенностями гелеобразования полимерной матрицы в присутствии минерального наполнителя и обеспечивает значительную удельную поверхность композита. Наличие разветвлённой пористой структуры создаёт условия для эффективного поглощения раневого экссудата и транспортировки влаги внутри материала.

Распределение глинистого компонента в объёме полимерной основы носит преимущественно равномерный характер, что свидетельствует о высокой степени диспергирования минеральной фазы. Отсутствие крупных агломератов указывает на стабильность композиционной системы и подтверждает эффективность предварительной обработки глин. Равномерная интеграция монтмориллонитовых частиц в полимерную матрицу положительно отражается на механической устойчивости материалов и способствует формированию каркасной структуры, выполняющей армирующую функцию.

Дополнительное введение пластифицирующих компонентов позволило скорректировать реологические и механические свойства полученных композитов, обеспечив оптимальное соотношение прочности и эластичности. Полученные образцы демонстрировали способность сохранять форму и структурную целостность при механическом воздействии и в условиях увлажнения, что является важным критерием для материалов медицинского назначения, контактирующих с раневой поверхностью. На рисунке 11, показано 3D полимер-композиционные плёнки с модифицированным наночастицами серебра бентонитом месторождения Орта Тентек.

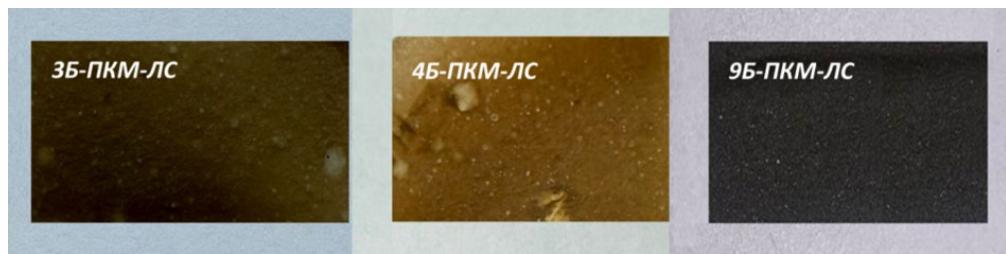


Рисунок 11 - 3D полимер-композиционные плёнки с модифицированным наночастицами серебра бентонитом месторождения Орта Тентек

Сформированная трёхмерная структура композитов обеспечивает их способность к контролируемому набуханию и удержанию влаги без разрушения полимерной сетки. Такое сочетание свойств создаёт благоприятную микросреду для процессов регенерации тканей и одновременно препятствует избыточному накоплению жидкости. Баланс между гидрофильтрностью полимерной матрицы и стабилизирующим влиянием глинистого наполнителя определяет устойчивость материалов при длительном использовании.

Таким образом, полученные 3D-полимерно-композиционные материалы представляют собой структурно организованные системы с развитой пористой морфологией, равномерным распределением минеральной фазы и оптимизированными механическими характеристиками. Совокупность выявленных структурных особенностей подтверждает корректность выбранного подхода к формированию композитов и обосновывает их перспективность для применения в качестве ранозаживляющих материалов пролонгированного действия.

4.4 Результаты получения и структурного анализа 3D-полимерно-композиционных материалов

В результате проведённых экспериментальных исследований были получены 3D-полимерно-композиционные материалы, сформированные на основе биополимерной матрицы с включением модифицированного монтмориллонита содержащего минерального наполнителя. Выбранный метод синтеза позволил реализовать формирование пространственно организованных композитов, характеризующихся устойчивой трёхмерной архитектурой и равномерным распределением неорганической фазы в объёме материала.

Установлено, что поэтапное введение глинистого компонента в полимерную систему способствует формированию стабильной композиционной структуры за счёт межмолекулярных и межфазных взаимодействий. Полимерная матрица выступает в роли связующего каркаса, обеспечивающего фиксацию минеральных частиц и предотвращающего их

агломерацию. В свою очередь, глинистый наполнитель оказывает армирующее воздействие, повышая структурную целостность и устойчивость полученных образцов. На таблице 17, показан состав 3D-ПКМ-ЛС.

Таблица 17 - Состав 3D-ПКМ-ЛС

| № состава | Соотношение компонентов полимерной матрицы | | | Бентонит модифицированный НЧС | Смесь Глицерин:метилуроил (1:1) |
|--------------|---|---------|-----|-------------------------------------|---------------------------------------|
| | Желатин | Крахмал | КМЦ | | |
| 1 | 3 | 1 | 1 | 0,5 | 0,3 |
| 2 | 5 | 3 | 2 | | |
| 3 | 5 | 2 | 3 | | |
| 4 | 4 | 2 | 4 | | |
| 5 | 2 | 4 | 4 | | |
| 6 | 4 | 4 | 2 | | |
| 7 | 3 | 4 | 3 | | |
| 8 | 3 | 3 | 4 | | |
| 9 | 4 | 3 | 3 | | |

Анализ морфологических особенностей показал, что сформированные 3D-полимерно-композиционные материалы обладают выраженной пористой структурой. Поровое пространство представлено системой взаимосвязанных микрополостей и каналов различного размера, равномерно распределённых по всему объёму композита. Такая организация структуры обусловлена особенностями гелеобразования полимерной матрицы в присутствии дисперсной минеральной фазы и является характерной для материалов сорбционного назначения.

Наличие развитой пористой архитектуры обеспечивает увеличение удельной поверхности композитов и создаёт предпосылки для эффективного поглощения жидких сред. Данное свойство имеет принципиальное значение при разработке материалов медицинского назначения, предназначенных для контакта с раневой поверхностью, поскольку способствует удалению избыточного экссудата и формированию благоприятной микросреды.

Результаты структурного анализа свидетельствуют о высокой степени диспергирования глинистых частиц в полимерной матрице. Минеральный компонент распределён равномерно, без образования выраженных агрегатов и фазовых неоднородностей. Это указывает на корректность выбранных условий синтеза и эффективность предварительной модификации глин, направленной на повышение их совместимости с полимерной фазой.

Проведённые исследования показали, что выбранный подход к формированию 3D-полимерно-композиционных материалов обеспечивает получение функционально и структурно сбалансированных систем. Сочетание полимерной матрицы и модифицированного

монтмориллонитсодержащего наполнителя позволяет целенаправленно формировать пористую архитектуру, обеспечивать механическую стабильность и создавать условия для эффективного взаимодействия материала с биологическими средами. Полученные результаты служат научным обоснованием для дальнейшего исследования антимикробных и сорбционных свойств разработанных композитов. На рисунке 12, показаны результаты ИК-спектры 3D-ПКМ-ЛС (А), Дифрактограммы 3D-ПКМ-ЛС (В), Кривые «сила–время» при растяжении 3D-ПКМ-ЛС (С).

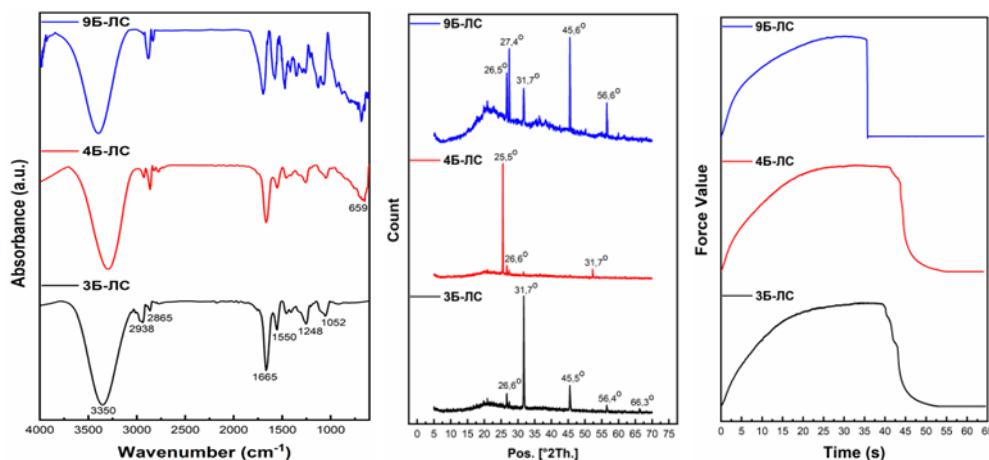


Рисунок 12 – результаты испытаний на 3D-ПКМ-ЛС: ИК-спектры (А), Дифрактограммы (В), Кривые «сила–время» при растяжении (С)

Дополнительное введение пластифицирующих компонентов позволило оптимизировать механические характеристики полученных материалов. Сформированные композиты демонстрировали сочетание достаточной прочности и эластичности, что обеспечивало сохранение формы и целостности образцов при механическом воздействии и увлажнении. При этом пространственная структура материалов не подвергалась разрушению, что свидетельствует о стабильности полимерной сетки. Результаты, сканирующей электронной микроскопии поверхностей 3D-ПКМ-ЛС показаны на рисунке 13.

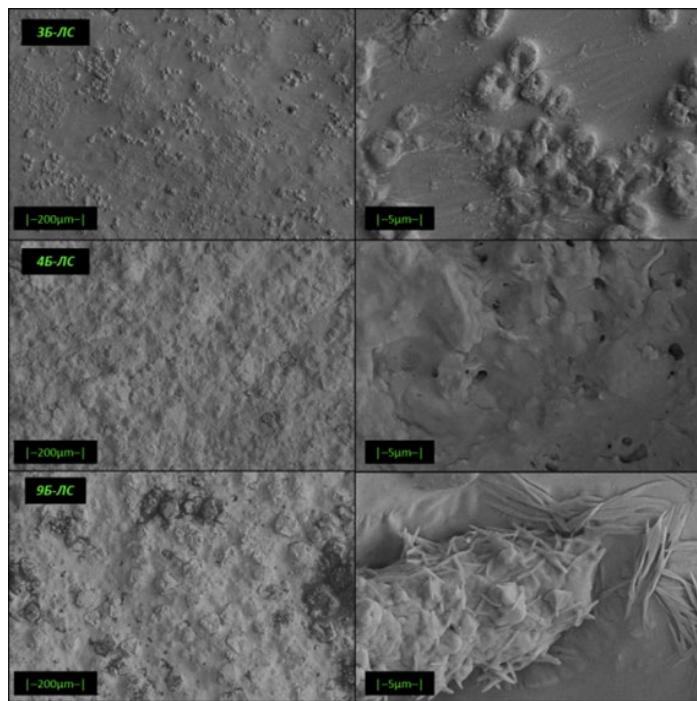


Рисунок 13 - Сканирующая электронная микроскопия поверхностей 3D-ПКМ-ЛС

В ходе исследований установлено, что 3D-полимерно-композиционные материалы обладают способностью к контролируемому набуханию. Взаимодействие с водной средой приводит к увеличению объёма композитов без нарушения их структурной организации. Такой эффект объясняется гидрофильной природой полимерной матрицы в сочетании со стабилизирующей ролью глинистого наполнителя, ограничивающего чрезмерное разбухание и предотвращающей деструкцию материала.

Сформированная трёхмерная структура способствует удержанию влаги внутри композита, что является важным фактором для поддержания оптимальных условий регенерации тканей. Одновременно с этим сохраняется структурная устойчивость материалов в течение времени, что подтверждает баланс между сорбционными и механическими свойствами системы.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что разработанные 3D-полимерно-композиционные материалы представляют собой структурно стабильные системы с развитой пористой морфологией, равномерным распределением минерального наполнителя и оптимизированными механическими характеристиками. Совокупность выявленных свойств подтверждает перспективность данных композитов для применения в качестве сорбционно-активных материалов медицинского назначения пролонгированного действия.

4.5 Антимикробная активность разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов

В ходе исследования была проведена оценка антимикробной активности разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов, содержащих модифицированный глинистый наполнитель с иммобилизованными наночастицами серебра. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной способности данных материалов ингибировать рост тест-микроорганизмов, что подтверждает их функциональную эффективность в качестве антимикробно-активных систем медицинского назначения.

Установлено, что включение наночастиц серебра в структуру полимерно-глинистого композита приводит к значительному усилению биоцидного действия по сравнению с контрольными образцами, не содержащими активного компонента. Наблюданное снижение микробной активности обусловлено комбинированным воздействием серебра и сорбционно-активной матрицы, обеспечивающей контакт микроорганизмов с антимикробным агентом.

Особенностью разработанных материалов является способ введения наночастиц серебра, при котором они предварительно иммобилизованы на поверхности глинистых частиц. Такой подход способствует их равномерному распределению в объёме полимерной матрицы и предотвращает агрегацию, что является критически важным фактором для реализации стабильного и воспроизводимого антибиотического эффекта. Глинистый компонент в данном случае выполняет функцию носителя и регулятора высвобождения активных частиц.

Результаты исследований показывают, что антимикробная активность разработанных композитов носит пролонгированный характер. Это указывает на контролируемое высвобождение ионов серебра из структуры материала, что позволяет поддерживать ингибирующее действие в течение продолжительного времени. Подобный механизм действия является предпочтительным для медицинских материалов, предназначенных для длительного контакта с раневой поверхностью, поскольку снижает необходимость частой замены повязок. Данные результаты показаны на рисунке 14.

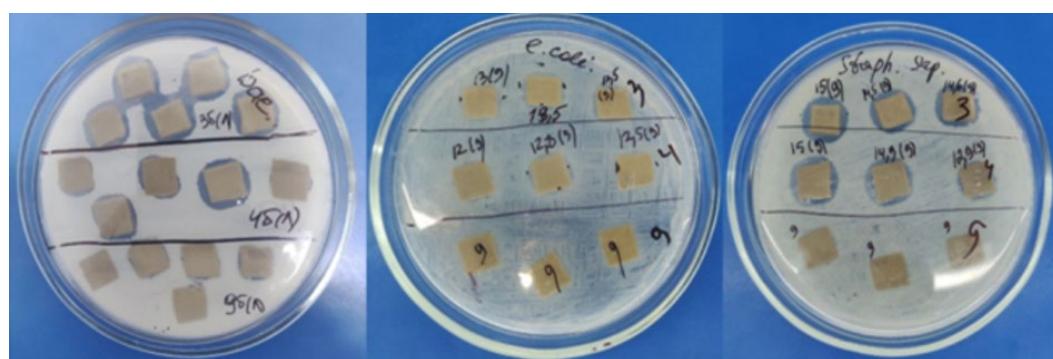


Рисунок 14. Антибактериальная активность 3D-ПКМ-ЛС

Важным аспектом является сохранение антимикробных свойств композитов без нарушения их структурной целостности. Введение наночастиц серебра не приводит к дестабилизации трёхмерной полимерной сетки и не оказывает негативного влияния на пористую архитектуру материала. Напротив, сочетание полимерной матрицы и минерального наполнителя способствует равномерному распределению активного компонента и повышению эффективности его действия.

Сравнительный анализ контрольных и модифицированных образцов показал, что наличие только полимерно-глинистой основы без серебра обеспечивает ограниченное антимикробное действие, связанное преимущественно с сорбцией микроорганизмов. Однако включение наночастиц серебра приводит к качественно иному уровню биологической активности, обусловленному прямым воздействием на клеточные структуры микроорганизмов и подавлением их метаболической активности.

Следует отметить, что реализуемый антимикробный эффект достигается при сохранении физико-механических характеристик материала, что подтверждает целесообразность выбранного подхода к модификации. Разработанные композиты демонстрируют функциональную сбалансированность, объединяя сорбционные, структурные и антимикробные свойства в рамках единой системы.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой антимикробной эффективности разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов. Иммобилизация наночастиц серебра на поверхности глинистого наполнителя обеспечивает равномерное распределение активного компонента, пролонгированное действие и стабильность антимикробного эффекта. Совокупность выявленных свойств позволяет рассматривать данные материалы как перспективную основу для создания современных ранозаживляющих покрытий медицинского назначения.

Результаты оценки антимикробной активности подтверждают, что модификация 3D-полимерно-композиционных материалов наночастицами серебра является эффективным способом придания им выраженных биоцидных свойств. Реализуемый пролонгированный антимикробный эффект в сочетании с сохранением структурной стабильности и сорбционных характеристик обосновывает перспективность дальнейших исследований и практического применения разработанных материалов в медицинской практике.

4.6 Комплексная оценка функциональных свойств и перспектив применения разработанных материалов

Комплексный анализ полученных экспериментальных данных позволил провести всестороннюю оценку функциональных характеристик разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов и определить направления их потенциального практического применения. Совокупность

структурных, сорбционных, механических и антимикробных свойств свидетельствует о формировании многофункциональной системы, отвечающей ключевым требованиям, предъявляемым к современным материалам медицинского назначения.

Одним из определяющих факторов функциональной эффективности разработанных композитов является их пространственно организованная трёхмерная структура. Наличие развитой пористой архитектуры обеспечивает увеличение удельной поверхности материала и создаёт условия для интенсивного взаимодействия с биологическими средами. Это свойство определяет способность материалов эффективно поглощать раневой экссудат, способствовать его равномерному распределению и одновременно поддерживать оптимальный уровень влажности в зоне контакта с тканями.

Сорбционные свойства композитов в значительной степени обусловлены присутствием монтмориллонита содержащего минерального наполнителя, обладающего выраженной поверхностной активностью. Глинистый компонент в составе полимерной матрицы выполняет не только функцию сорбента, но и структурного стабилизатора, ограничивающего избыточное набухание полимерной сетки. Такое сочетание позволяет обеспечить контролируемое взаимодействие материала с жидкой фазой без потери механической целостности.

Не менее важным аспектом является механическая устойчивость разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов. Полученные образцы демонстрируют способность сохранять форму, эластичность и структурную стабильность при увлажнении и механическом воздействии. Данные характеристики имеют принципиальное значение при использовании материалов в качестве раневых покрытий, подвергающихся деформации в процессе эксплуатации. Баланс между прочностью и гибкостью свидетельствует о корректно подобранном составе полимерной матрицы и оптимальном соотношении компонентов композиции.

Антимикробная активность материалов, обусловленная присутствием иммобилизованных наночастиц серебра, существенно расширяет их функциональные возможности. Реализуемое пролонгированное биоцидное действие позволяет рассматривать разработанные композиты как активные системы, способные не только выполнять барьерную функцию, но и оказывать направленное воздействие на микробную контаминацию раневой поверхности. При этом контролируемое высвобождение активного компонента снижает риск локальной токсичности и повышает безопасность применения.

Важным результатом является то, что сочетание антимикробных, сорбционных и механических свойств достигается без взаимного подавления функциональных характеристик. Напротив, интеграция полимерной матрицы, глинистого наполнителя и активного компонента приводит к формированию синергетического эффекта, при котором каждая составляющая усиливает общее терапевтическое действие материала. Такая

функциональная сбалансированность является ключевым преимуществом разработанных 3D-полимерно-композиционных систем.

С точки зрения практического применения разработанные материалы могут рассматриваться как перспективная основа для создания ранозаживляющих покрытий пролонгированного действия. Их использование потенциально позволяет снизить частоту перевязок, уменьшить риск инфицирования и создать благоприятные условия для регенерации тканей. Дополнительно следует отметить возможность варьирования состава и структуры композитов, что открывает перспективы их адаптации под различные клинические задачи.

Таким образом, комплексная оценка функциональных свойств разработанных 3D-полимерно-композиционных материалов подтверждает их соответствие современным требованиям, предъявляемым к медицинским материалам сорбционно-активного типа. Совокупность полученных результатов обосновывает научную целесообразность дальнейших исследований и подтверждает практическую значимость разработанных систем для применения в области регенеративной медицины и раневой терапии.

Проведённая комплексная оценка показала, что разработанные 3D-полимерно-композиционные материалы представляют собой многофункциональные системы с высокой степенью структурной и функциональной интеграции. Сочетание пористой архитектуры, сорбционной активности, механической стабильности и пролонгированного антимикробного действия позволяет рассматривать данные материалы как перспективное направление для создания современных медицинских изделий пролонгированного действия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполненной магистерской работы была решена актуальная научно-практическая задача, связанная с разработкой и комплексным исследованием 3D-полимерно-композиционных материалов медицинского назначения, обладающих сорбционно-активными и антимикробными свойствами. Актуальность выбранного направления обусловлена необходимостью создания современных ранозаживляющих материалов пролонгированного действия, сочетающих биосовместимость, структурную стабильность и функциональную эффективность.

В ходе исследования проведён анализ современного состояния научных разработок в области полимерно-композиционных и полимерно-глинистых материалов для медицинского применения, что позволило обосновать целесообразность использования монтмориллонитсодержащих глин в сочетании с биополимерными матрицами. Показано, что интеграция природных минеральных компонентов и биополимеров является перспективным подходом к формированию многофункциональных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Экспериментальная часть работы была направлена на получение 3D-полимерно-композиционных материалов с использованием модифицированных глинистых наполнителей. Установлено, что выбранный метод синтеза обеспечивает формирование пространственно организованной трёхмерной структуры, характеризующейся развитой пористой архитектурой и равномерным распределением неорганической фазы в объёме полимерной матрицы. Такая структурная организация определяет высокую удельную поверхность материалов и создаёт предпосылки для эффективного взаимодействия с биологическими средами.

Проведённая физико-химическая и морфологическая характеристика показала, что включение монтмориллонитсодержащих глин способствует повышению структурной стабильности композитов и выполняет армирующую функцию, ограничивая избыточное набухание полимерной сетки. Полученные материалы сохраняют целостность и форму при увлажнении и механическом воздействии, что является важным критерием для изделий медицинского назначения, эксплуатируемых в условиях контакта с раневой поверхностью.

Особое внимание в работе уделено формированию антимикробных свойств разработанных материалов за счёт иммобилизации наночастиц серебра. Установлено, что выбранный способ модификации обеспечивает

равномерное распределение активного компонента в объёме композита и предотвращает его агрегацию. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной и пролонгированной антимикробной активности материалов, что существенно расширяет их функциональные возможности и повышает эффективность при потенциальном медицинском применении.

Комплексная оценка функциональных свойств показала, что разработанные 3D-полимерно-композиционные материалы представляют собой сбалансированные системы, сочетающие сорбционные, антимикробные и механические характеристики. Синергетическое взаимодействие полимерной матрицы, глинистого наполнителя и активного компонента обеспечивает формирование многофункционального материала, способного не только выполнять барьерную роль, но и активно воздействовать на процессы заживления и профилактики инфицирования.

Таким образом, результаты проведённого исследования подтверждают научную обоснованность выбранного подхода к разработке 3D-полимерно-композиционных материалов медицинского назначения. Полученные материалы соответствуют современным требованиям, предъявляемым к ранозаживляющим покрытиям пролонгированного действия, и обладают значительным потенциалом для дальнейших доклинических и прикладных исследований. Итоги работы вносят вклад в развитие направления полимерно-композиционных материалов для регенеративной медицины и могут быть использованы в дальнейшем при создании новых медицинских изделий.

Перечень сокращений

- РФА – рентгенофазовый анализ
БЭТ – метод Брунауэра–Эммета–Теллера (определение удельной поверхности)
СЭМ – сканирующая электронная микроскопия
ТГА – термогравиметрический анализ
ДСК – дифференциальная сканирующая калориметрия

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dang L. H. et al. Injectable nanocurcumin-formulated chitosan-g-pluronic hydrogel exhibiting a great potential for burn treatment //Journal of healthcare engineering. – 2018. – Т. 2018. – №. 1. – С. 5754890.
2. Kabdrakhmanova S. K. et al. Bentonite-Based Composites in Medicine: Synthesis, Characterization, and Applications //Journal of Composites Science. – 2025. – Т. 9. – №. 6. – С. 310.
3. Ambekar R. S., Kandasubramanian B. Advancements in nanofibers for wound dressing: A review //European Polymer Journal. – 2019. – Т. 117. – С. 304-336.
4. Abrigo M., McArthur S. L., Kingshott P. Electrospun nanofibers as dressings for chronic wound care: advances, challenges, and future prospects //Macromolecular bioscience. – 2014. – Т. 14. – №. 6. – С. 772-792.
5. Lee J. Y. et al. Regenerative and anti-inflammatory effect of a novel bentonite complex on burn wounds //Veterinary medicine and science. – 2022. – Т. 8. – №. 6. – С. 2422-2433.
6. Rana M. S., Kim S. Bentonite in Korea: A resource and research focus for biomedical and cosmetic industries //Materials. – 2024. – Т. 17. – №. 9. – С. 1982.
7. Álvarez-Suárez A. S. et al. Electrospun fibers and sorbents as a possible basis for effective composite wound dressings //Micromachines. – 2020. – Т. 11. – №. 4. – С. 441.
8. Lin J. H. et al. Preparation technique and antibacterial evaluation of high-absorbent composite fabrics //Journal of Industrial Textiles. – 2016. – Т. 45. – №. 5. – С. 915-929.
9. Parsons D. et al. Enhanced performance and mode of action of a novel antibiofilm Hydrofiber® wound dressing //BioMed Research International. – 2016. – Т. 2016. – №. 1. – С. 7616471.
10. Archana D., Dutta J., Dutta P. K. Evaluation of chitosan nano dressing for wound healing: Characterization, in vitro and in vivo studies //International journal of biological macromolecules. – 2013. – Т. 57. – С. 193-203.
11. He X. et al. Integrated wound recognition in bandages for intelligent treatment //Advanced Healthcare Materials. – 2020. – Т. 9. – №. 22. – С. 2000941.
12. Zhang B. et al. Accelerating infectious wound healing through bacterial cellulose/ag composite film enriched with GM-CSF //Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – №. 1. – С. 22142.

13. Firoozbahr M. et al. Recent advances in using natural antibacterial additives in bioactive wound dressings //Pharmaceutics. – 2023. – T. 15. – №. 2. – C. 644.
14. Alberts A. et al. Advancements in wound dressing materials: Highlighting recent progress in hydrogels, foams, and antimicrobial dressings //Gels. – 2025. – T. 11. – №. 2. – C. 123.
15. Derakhshandeh H. et al. Smart bandages: the future of wound care //Trends in biotechnology. – 2018. – T. 36. – №. 12. – C. 1259-1274.
16. Sweeney I. R., Miraftab M., Collyer G. A critical review of modern and emerging absorbent dressings used to treat exuding wounds //International wound journal. – 2012. – T. 9. – №. 6. – C. 601-612.
17. Cullen B., Gefen A. The biological and physiological impact of the performance of wound dressings //International wound journal. – 2023. – T. 20. – №. 4. – C. 1292-1303.
18. Bhoyar S. D., Malhotra K., Madke B. Dressing materials: a comprehensive review //Journal of Cutaneous and Aesthetic Surgery. – 2023. – T. 16. – №. 2. – C. 81-89.
19. Ahmad N. et al. Development and characterization of hemicellulose-based films for antibacterial wound-dressing application //Polymers. – 2020. – T. 12. – №. 3. – C. 548.
20. Sunakbaeva D. K. et al. Development of environment protection measures based on benthonic clay and sulfuric acid wastes. – 2025.
21. Monteiro M. K. S. et al. Influence of the ionic and nonionic surfactants mixture in the structure and properties of the modified bentonite clay //Journal of Molecular Liquids. – 2018. – T. 272. – C. 990-998.
22. Negash B. M. et al. Ion-adsorbed REE clays: Swelling challenges and future solutions //Journal of Molecular Liquids. – 2024. – T. 403. – C. 124849.
23. Wang Y. et al. Facile and green preparation of multifeatured montmorillonite-supported Fe_3O_4 -Cu²⁺ hybrid magnetic nanomaterials for the selective adsorption of a high-abundance protein from complex biological matrices //Green Chemistry. – 2023. – T. 25. – №. 9. – C. 3705-3714.
24. Kwolek T. et al. Adsorption isotherms of homologous alkyltrimethylbenzylammonium bromides on sodium montmorillonite //Journal of Colloid and Interface Science. – 2003. – T. 264. – №. 1. – C. 14-19.
25. Eniola J. O. et al. A new synthesis route of hydrothermally carbonized Na₂CO₃ activated bentonite-clay as a novel adsorbent for cadmium removal from wastewater //Separation and Purification Technology. – 2024. – T. 350. – C. 127960.

26. Behera L., Mohanta M., Thirugnanam A. Intensification of yam-starch based biodegradable bioplastic film with bentonite for food packaging application //Environmental Technology & Innovation. – 2022. – Т. 25. – С. 102180.
27. Vilarinho F., Vaz M. F., Silva A. S. The use of montmorillonite (MMT) in food nanocomposites: methods of incorporation, characterization of MMT/polymer nanocomposites and main consequences in the properties //Recent patents on food, nutrition & agriculture. – 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 13-26.
28. Наседкин В. В., Боева Н. М., Васильев А. Л. Аккалканское месторождение бентонитовых глин (Юго-восточный Казахстан): условия образования и перспективы технологического использования //Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61. – №. 5. – С. 84-95.
29. Cuevas J. et al. Bentonite powder XRD quantitative analysis using rietveld refinement: revisiting and updating bulk semiquantitative mineralogical compositions //Minerals. – 2022. – Т. 12. – №. 6. – С. 772.
30. Barast G. et al. Swelling properties of natural and modified bentonites by rheological description //Applied Clay Science. – 2017. – Т. 142. – С. 60-68.
31. Zhang Y. et al. Thermal behavior analysis of two bentonite samples selected from China //Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2015. – Т. 121. – №. 3. – С. 1287-1295.
32. Parmar S. P. et al. Surfactant Modified Bentonite Characterization: Effects and Comparative Analysis //Adv. Nanosci. Nanotechnol. – 2022. – Т. 7. – С. 12-25.
33. Liu P. S. et al. Waste polystyrene foam-graft-acrylic acid/montmorillonite superabsorbent nanocomposite //Journal of applied polymer science. – 2007. – Т. 104. – №. 4. – С. 2341-2349.
34. Ghasemi H. et al. Rapid and effective removal of heavy metal ions from aqueous solution using nanostructured clay particles //Results in Surfaces and Interfaces. – 2023. – Т. 10. – С. 100097.
35. Singh D. et al. Clove bud extract mediated green synthesis of bimetallic Ag–Fe nanoparticles: Antimicrobial, antioxidant and dye adsorption behavior and mechanistic insights of metal ion reduction //Materials Chemistry and Physics. – 2024. – Т. 311. – С. 128529.
36. Xie H. et al. Mechanical properties and electromagnetic wave absorption characteristics of solid waste low-carbon cementitious materials //Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 467. – С. 142869.

- 37.Dékány I. et al. Cadmium ion adsorption controls the growth of CdS nanoparticles on layered montmorillonite and calumit surfaces //Journal of colloid and interface science. – 1999. – T. 213. – №. 2. – C. 584-591.
- 38.Li P., Zhang J., Wang A. A Novel N-Succinylchitosan-graft-Polyacrylamide/Attapulgite Composite Hydrogel Prepared through Inverse Suspension Polymerization //Macromolecular materials and engineering. – 2007. – T. 292. – №. 8. – C. 962-969.
- 39.Rodriguez Nunez Y. A. et al. Preparation of hydrogel/silver nanohybrids mediated by tunable-size silver nanoparticles for potential antibacterial applications //Polymers. – 2019. – T. 11. – №. 4. – C. 716.
- 40.Martsouka F. et al. The antimicrobial properties of modified pharmaceutical bentonite with zinc and copper //Pharmaceutics. – 2021. – T. 13. – №. 8. – C. 1190.
- 41.Buntin A., Agliullin V. Transformation of the structure and adsorption properties of bentonite during physical and chemical treatment //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – T. 2373. – №. 3. – C. 032006.
- 42.Topalić-Trivunović L. et al. Antibacterial finishing of textile materials using modified bentonite //Clays and Clay Minerals. – 2023. – T. 71. – №. 5. – C. 559-576.
- 43.Fahmy H. M. et al. Coated silver nanoparticles: Synthesis, cytotoxicity, and optical properties //RSC advances. – 2019. – T. 9. – №. 35. – C. 20118-20136.
- 44.Paladini F., Pollini M. Antimicrobial silver nanoparticles for wound healing application: progress and future trends //Materials. – 2019. – T. 12. – №. 16. – C. 2540.
- 45.Gomes H. I. O., Martins C. S. M., Prior J. A. V. Silver nanoparticles as carriers of anticancer drugs for efficient target treatment of cancer cells //Nanomaterials. – 2021. – T. 11. – №. 4. – C. 964.
- 46.Yusuf M. Silver nanoparticles: synthesis and applications //Handbook of Ecomaterials. – Springer, Cham, 2017. – C. 1-14.
- 47.Kholiya F. et al. Seaweed polysaccharide derived bioaldehyde nanocomposite: Potential application in anticancer therapeutics //Carbohydrate polymers. – 2020. – T. 240. – C. 116282.
- 48.Iravani S. et al. Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods //Research in pharmaceutical sciences. – 2014. – T. 9. – №. 6. – C. 385-406.
- 49.Almatroudi A. Silver nanoparticles: synthesis, characterisation and biomedical applications //Open life sciences. – 2020. – T. 15. – №. 1. – C. 819-839.

- 50.Duman H. et al. Silver nanoparticles: A comprehensive review of synthesis methods and chemical and physical properties //Nanomaterials. – 2024. – T. 14. – №. 18. – C. 1527.
- 51.Patel P. et al. Plant-based synthesis of silver nanoparticles and their characterization //Nanotechnology and plant sciences: Nanoparticles and their impact on plants. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – C. 271-288.
- 52.Singh A., Kaur K. Biological and physical applications of silver nanoparticles with emerging trends of green synthesis //Engineered Nanomaterials-Health and Safety. – 2019.
- 53.Vishwanath R., Negi B. Conventional and green methods of synthesis of silver nanoparticles and their antimicrobial properties //Current Research in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. – T. 4. – C. 100205.
- 54.Osman A. I. et al. Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review //Environmental Chemistry Letters. – 2024. – T. 22. – №. 2. – C. 841-887.
- 55.Kumah E. A. et al. Human and environmental impacts of nanoparticles: a scoping review of the current literature //BMC public health. – 2023. – T. 23. – №. 1. – C. 1059.
- 56.Samuel M. S. et al. A review on green synthesis of nanoparticles and their diverse biomedical and environmental applications //Catalysts. – 2022. – T. 12. – №. 5. – C. 459.
- 57.Banger A. et al. A review on green synthesis and characterisation of copper nanoparticles using plant extracts for biological applications //Environmental Technology Reviews. – 2025. – T. 14. – №. 1. – C. 94-126.