

УДК: 615.9:577.112

DOI: [10.52754/16948610_2026_1_4](https://doi.org/10.52754/16948610_2026_1_4)

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В МЕДИЦИНЕ

КҮМҮШ НАНОБӨЛҮКЧӨЛӨРҮНҮН МЕДИЦИНАДА КОЛДОНУЛУШУ

APPLICATION OF SILVER NANOPARTICLES IN MEDICINE

Абдуллаева Жыпаргуль Душабаевна

Абдуллаева Жыпаргуль Душабаевна

Abdullaeva Zhyrargul Dushabaevna

к.х.н., PhD, Ошский государственный университет
х.и.к., PhD, Ош мамлекеттик университети
Candidate of Chemical Sciences, PhD, Osh State University

jypar.science@oshsu.kg

ORCID: 0000-0001-5777-4478

Жоробекова Майрамбу Бектемировна

Жоробекова Майрамбу Бектемировна

Zhorobekova Mairambu Bektemirovna

преподаватель, Ошский государственный университет
окутуучу, Ош мамлекеттик университети
Lecturer, Osh State University

mjorobekova@oshsu.kg

ORCID: 0009-0009-0549-359X

Матаипова Анаркан Кушубаковна

Матаипова Анаркан Кушубаковна

Mataipova Anarkan Kushubakovna

к.х.н., Ошский государственный университет
х.и.к., Ош мамлекеттик университети
Candidate of chemical sciences, Osh State University

mataipova@list.ru

ORCID: 0000-0001-6326-508X

Султанов Кудайберди Дадаевич

Султанов Кудайберди Дадаевич

Sultanov Kudaiberdi Dadaevich

преподаватель, Ошский государственный университет
окутуучу, Ош мамлекеттик университети
Lecturer, Osh State University

sultanovkudajberdi@gmail.com

ORCID:0009-0004-1543-2428

Омоева Жайнагуль Сейдалиевна

Омоева Жайнагуль Сейдалиевна

Omoeva Zhainagul Seidalievna

преподаватель, Ошский государственный университет

окутуучу, Ош мамлекеттик университети

Lecturer, Osh State University

omoeva77@mail.ru

ORCID: 0009-0001-3868-2735

Жумаева Айчурок Токтосуновна

Жумаева Айчурок Токтосуновна

Zhumaeva Aichurok Toktosunovna

преподаватель, Ошский государственный университет

окутуучу, Ош мамлекеттик университети

Lecturer, Osh State University

ajumaeva@oshsu.kg

ORCID: 0000-0001-8438-2576

Кочкор уулу Бакыт

Кочкор уулу Бакыт

Kochkor uulu Bakyt

преподаватель, Ошский государственный университет

окутуучу, Ош мамлекеттик университети

Lecturer, Osh State University

tb_uzgen_tb@mail.ru

ORCID: 0009-0000-8401-6736

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В МЕДИЦИНЕ

Аннотация

Актуальность. В данной работе рассматриваются основные направления применения наночастиц серебра в медицине. Особое внимание уделяется их использованию в качестве антибактериальных, противовирусных и противогрибковых агентов. Описаны механизмы антимикробного действия наночастиц серебра, включающие повреждение клеточных мембран микроорганизмов, генерацию активных форм кислорода, ингибирование ферментативной активности и нарушение репликации ДНК. Рассмотрены применения наночастиц серебра в раневых покрытиях, перевязочных материалах и медицинских имплантатах, где они способствуют снижению риска инфекционных осложнений и ускорению процессов регенерации тканей. Рассматриваются перспективы использования наночастиц серебра в системах доставки лекарственных средств и в тканевой инженерии. Определение антимикробной активности наночастиц серебра осуществлена диск диффузионным методом на агаре Мюллера-Хинтона в соответствии с методическими указаниями приказа Министерства Здравоохранения Кыргызской Республики № 729 от 25.10.2018.

В результате исследования получены патенты на способ синтеза наночастиц оксида цинка и смеси наночастиц оксида цинка и серебра, способ приготовления антибактериальных перевязочных материалов с наночастицами серебра.

В заключение подчёркивается необходимость дальнейших фундаментальных и прикладных исследований, направленных на оптимизацию свойств наночастиц серебра, повышение их безопасности и разработку стандартов применения в медицинской практике. Полученные данные подтверждают высокий потенциал наночастиц серебра как многофункционального инструмента в современной медицине и обосновывают целесообразность их дальнейшего изучения и внедрения.

Ключевые слова: наночастицы серебра, нанотехнологии в медицине, биомедицинские наноматериалы, антимикробная активность, антибактериальные свойства, противовирусное действие, противогрибковая активность.

Күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн медицинада колдонулушу

Аннотация

Маанилүүлүк. Бул эмгекте медицина тармагында күмүш нанобөлүкчөлөрүн колдонуунун негизги багыттары каралат. Алардын антибактериалдык, вируска каршы жана козу карындарга каршы агенттер катары колдонулушуна өзгөчө көңүл бурулган. Күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн антимикробдук таасир этүү механизмдери сүрөттөлөт, аларга микроорганизмдердин клеткалык мембраналарынын бузулушу, активдүү кычкылтек формаларынын пайда болушу, ферменттик активдүүлүктүн басаңдашы жана ДНК репликациясынын бузулушу кирет. Өзүнчө бөлүм күмүш нанобөлүкчөлөрүн жараат жабуучу материалдарда, тануучу каражаттарда жана медициналык имплантаттарда колдонууга арналган, мында алар инфекциялык татаалдашуулардын коркунучун азайтууга жана ткандардын регенерация процессин тездетүүгө өбөлгө түзөт. Цинк оксиди жана күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн антимикробдук активдүүлүгүн аныктоо Кыргыз Республикасынын Саламаттык сактоо министрлигинин 2018-жылдын 25-октябрындагы № 729 буйругу менен бекитилген методикалык көрсөтмөлөргө ылайык Мюллер–Хинтон агарында диск-диффузиялык ыкма аркылуу жүргүзүлгөн. Изилдөөнүн жыйынтыгында цинк оксиди нанобөлүкчөлөрүн жана цинк оксиди менен

Application of silver nanoparticles in medicine

Abstract

Relevance. In recent decades, nanotechnology has become an essential component of modern medicine, offering new approaches to the diagnosis, prevention, and treatment of various diseases. Among a wide range of nanomaterials, silver nanoparticles (AgNPs) have attracted significant attention due to their pronounced antimicrobial properties, broad spectrum of biological activity, and relatively simple synthesis. This paper reviews the main directions of silver nanoparticles application in medicine, with particular emphasis on their antibacterial, antiviral, and antifungal activities. The mechanisms of antimicrobial action of silver nanoparticles are discussed, including disruption of microbial cell membranes, generation of reactive oxygen species, inhibition of enzymatic activity, and interference with DNA replication. It is shown that the biological effectiveness of AgNPs strongly depends on their size, shape, concentration, and surface functionalization. Special attention is paid to the use of silver nanoparticles in wound dressings, medical coatings, and implantable devices, where they contribute to infection control and enhanced tissue regeneration. perspectives of application of silver nanoparticles in systems of drug delivery and tissue engineering are also considered. The antimicrobial activity of zinc oxide and silver nanoparticles was assessed using the disk diffusion

күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн аралашмасын синтездөө ыкмасына, ошондой эле күмүш нанобөлүкчөлөрүн камтыган антибактериалдык таңуучу материалдарды даярдоо ыкмасына патенттер алынган.

Жыйынтыктап айтканда, күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн касиеттерин оптималдаштырууга, алардын коопсуздугун жогорулатууга жана медициналык практикада колдонуу стандарттарын иштеп чыгууга багытталган мындан аркы фундаменталдык жана колдонмо изилдөөлөрдүн зарылдыгы баса белгиленет. Алынган маалыматтар күмүш нанобөлүкчөлөрүнүн заманбап медицинада көп функционалдуу курал катары жогорку потенциалга ээ экенин тастыктап, аларды мындан ары изилдөөнүн жана практикада кеңири киргизүүнүн максатка ылайыктуулугун негиздейт.

method on Mueller-Hinton agar in accordance with the guidelines specified in Order No. 729 of the Ministry of Health of the Kyrgyz Republic dated October 25, 2018. As a result of the conducted research, patents were granted for a method for the synthesis of zinc oxide nanoparticles and a composite of zinc oxide and silver nanoparticles, as well as for a method for the fabrication of silver nanoparticle-based antibacterial bandages.

In conclusion, the necessity for further fundamental and applied research aimed at optimizing the properties of silver nanoparticles, improving their safety profile, and developing standardized medical applications is emphasized. The available evidence confirms the high potential of silver nanoparticles as multifunctional agents in modern medicine and supports their continued investigation and clinical translation.

Ачкыч сөздөр: күмүш нанобөлүкчөлөрү, күмүш (AgNPs), медицинадагы нанотехнологиялар, биомедициналык наноматериалдар, антимикробдук активдүүлүк, антибактериалдык касиеттер, вирууска каршы активдүүлүк, козу карындарга каршы активдүүлүк.

Keywords: silver nanoparticles, silver (AgNPs), nanotechnology in medicine, biomedical nanomaterials, antimicrobial activity, antibacterial properties, antiviral activity, antifungal activity.

Введение

Развитие нанотехнологий в последние десятилетия оказало существенное влияние на различные области науки и техники, в том числе на медицину. Использование наноматериалов позволяет создавать новые лекарственные формы, улучшать свойства медицинских изделий и повышать эффективность лечения инфекционных и воспалительных заболеваний. Среди большого разнообразия наноматериалов особый интерес представляют наночастицы серебра, обладающие выраженными антимикробными свойствами и широким спектром биологической активности (Vidyasagar et al., 2023).

Серебро издавна применялось в медицине в качестве антисептического средства. Однако именно переход к наноразмерному состоянию позволил существенно усилить его биологическое действие и расширить области применения. В связи с ростом антибиотикорезистентности микроорганизмов поиск альтернативных антимикробных агентов, включая наночастицы серебра, является актуальной задачей современной медицины.

Физико-химические свойства наночастиц серебра

Наночастицы серебра представляют собой частицы размером от 1 до 100 нм, обладающие высокой удельной поверхностью и повышенной реакционной способностью. Их физико-химические свойства, такие как размер, форма, заряд поверхности и степень агрегации, существенно влияют на биологическую активность и эффективность применения в медицинских целях, табл.1 (Ма и др., 2018).

Таблица 1. Физические свойства наночастиц серебра

	Макро	Нано	Размер, нм	Агрегатное состояние
Цвет	Серебро-белый	Серый	70-150	Порошок
Температура плавления	961.78 °С	960 °С	70-150	
Температура кипения	2162 °С	2312 °С	70-150	
Плотность	10,49 г/см ³	5,8 г/см ³	70-150	
Теплопроводность	429 Вт/(м·К)	2,0 Вт/(м·К)	30-50	
Электрическое сопротивление	1,59×10 ⁻⁸ Ом·м	1,997×10 ⁻⁸ Ом·м	100	

Химические свойства наночастиц серебра (AgNPs) определяются их высокой реакционной способностью и большой площадью поверхности по сравнению с массовым металлом. AgNPs способны отдавать ионы серебра (Ag⁺), участвуя в окислительно-восстановительных реакциях, что обеспечивает их антимикробную и противовирусную активность. Они могут индуцировать образование активных форм кислорода (АФК), которые повреждают белки, липиды и нуклеиновые кислоты микроорганизмов и вирусов (Hamida et

al., 2020). Наночастицы активно взаимодействуют с функциональными группами биомолекул, такими как сульфгидрильные и аминные группы, изменяя структуру и активность белков. Химические свойства AgNPs также определяются их поверхностной модификацией с помощью полимеров, лигандов или белков, что повышает стабильность коллоида, биосовместимость и специфичность взаимодействия с клетками и вирусами. Кроме того, AgNPs могут окисляться с образованием оксидной пленки (Ag_2O), сохраняющей биологическую активность, а их химическая реакционная способность зависит от условий среды, включая pH, ионную силу и наличие органических веществ.

Свойства и методы измерения наночастиц серебра представлены в табл.2. Уменьшение размеров частиц приводит к увеличению площади контакта с биологическими объектами, что усиливает антимикробное действие серебра. Кроме того, модификация поверхности наночастиц различными стабилизаторами и функциональными группами позволяет регулировать их растворимость, биосовместимость и направленность действия.

Таблица 2. Свойства и методы измерения наночастиц серебра

№	Свойство	Метод измерения	Единицы	Примечания
1	Средний размер частиц	TEM / DLS	нм	Средний диаметр наночастиц
2	Распределение по размерам	TEM / DLS	нм	Ширина распределения (полидисперсность)
3	ζ-потенциал	Zetasizer	мВ	Определяет стабильность коллоида
4	Поверхностный заряд	Zetasizer	мВ	Связан со стабилизацией частиц
5	Форма частиц	TEM / SEM	-	сферическая, треугольная, многогранная
6	Кристалличность	XRD	-	Соответствие кристаллической решётке Ag
7	Оптические свойства	UV-Vis спектроскопия	λ_{max} (нм)	Пик поверхностного плазмонного резонанса
8	Стабильность коллоида	Время хранения	Дни	Изменение цвета или агрегация
9	Поверхностная функционализация	FTIR	cm^{-1}	Связь фитохимикатов с поверхностью AgNPs
10	Концентрация наночастиц	ICP-MS / UV-Vis	$\mu g/ml$	Для количественной оценки

Механизмы антимикробного действия

Антимикробное действие наночастиц серебра обусловлено комплексом механизмов. Одним из основных является повреждение клеточной стенки и мембран микроорганизмов, что приводит к нарушению их целостности и гибели клетки (More et al., 2023). Наночастицы

серебра также способны генерировать активные формы кислорода, вызывающие окислительный стресс и повреждение внутриклеточных структур.

Наночастицы серебра (AgNPs) обладают выраженной антимикробной активностью против бактерий, вирусов, грибов и некоторых простейших. Их действие многогранно и связано с физико-химическими и биохимическими взаимодействиями с клетками микроорганизмов.

Наночастицы серебра способны прикрепляться к клеточной стенке и цитоплазматической мембране микроорганизмов. Это приводит к **дестабилизации структуры мембраны**, увеличению её проницаемости и, в конечном итоге, к **лизису клетки**, **рис.1**. Грамотрицательные бактерии обычно более чувствительны из-за тонкого слоя пептидогликана и высокой проницаемости мембраны.

Наночастицы серебра AgNPs катализируют образование **активных форм кислорода** (АФК), супероксид-анионов, перекиси водорода, гидроксильных радикалов. АФК вызывают **окислительный стресс**, повреждают белки, липиды и нуклеиновые кислоты, нарушая жизненно важные функции клеток и приводя к их гибели. Ионы серебра, высвобождаемые из наночастиц, связываются с **тиольными (-SH) группами** белков и ферментов. Это приводит к **ингибированию ферментативной активности**, нарушая метаболизм, дыхание и производство энергии, что снижает жизнеспособность микроорганизмов. Внутри клетки наночастицы серебра взаимодействуют с нуклеиновыми кислотами. Они **связываются с ДНК и РНК**, вызывая структурные изменения, препятствуя репликации и транскрипции. Это ведет к остановке клеточного цикла и подавлению размножения микроорганизмов. Наночастицы серебра также препятствуют прикреплению микроорганизмов и формированию биопленок на поверхностях. Биопленки часто повышают устойчивость бактерий к антибиотикам, **наночастицы серебра** снижают этот эффект, повышая эффективность терапии (Hosnedlova et al., 2022).

Факторы, влияющие на антимикробную активность. 1) размер: мелкие наночастицы (<10 нм) обладают большей поверхностью и более сильным антимикробным действием; 2) **форма**: шарообразные, треугольные и палочковидные наночастицы различаются по активности из-за особенностей поверхности; 3) **поверхностная модификация**: покрытия и функционализация (цитрат, полимеры) влияют на стабильность частиц, высвобождение ионов и взаимодействие с микроорганизмами; 4) **концентрация**: более высокие концентрации увеличивают активность, но необходимо учитывать токсичность для клеток человека.

Антимикробное действие наночастиц серебра является **многофакторным процессом**, включающим разрушение мембран, окислительный стресс, ингибирование ферментов и нарушение структуры нуклеиновых кислот. Эти механизмы делают AgNPs высокоэффективными против широкого спектра патогенов и перспективными для применения в медицине, в раневых покрытиях, на медицинских имплантатах и в системах доставки лекарств.

Противовирусный потенциал наночастиц для лечения коронавирусных инфекций обусловлен их уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими воздействовать на вирус на различных этапах его жизненного цикла. Наночастицы способны взаимодействовать с поверхностными белками коронавируса, в частности S-белком, что приводит к блокированию связывания вируса с рецептором ACE2 и препятствует

проникновению вируса в клетку. Кроме того, они могут нарушать целостность липидной оболочки вируса и вызывать структурные изменения вирусных белков, снижая его инфекционность. После проникновения вируса в клетку наночастицы способны подавлять репликацию вирусной РНК и ингибировать активность ключевых вирусных ферментов, а также индуцировать окислительный стресс, приводящий к повреждению вирусных компонентов (Sarkar et al., 2022). Наночастицы серебра (AgNPs) эффективно ингибировали активность SARS-CoV-2, при этом различные поверхностные модификации и размеры частиц обуславливали различную вирулицидную активность; наибольший противовирусный эффект был выявлен у наночастиц размером 50 нм (He et al., 2022).

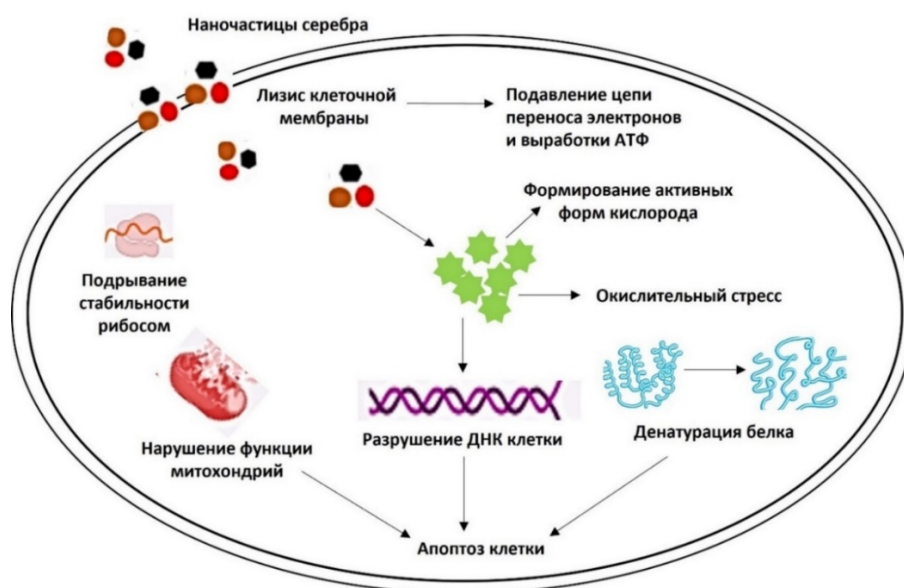


Рисунок 1. Механизм действия наночастиц серебра против грамположительных и грамотрицательных бактерий

Материалы и методы исследования

Данные о реактивах: нитрат серебра (AgNO_3), **химическое наименование:** азотнокислое серебро, **молярная масса:** 169,87 г/моль, ГОСТ 1277-75 (не менее 99,8% для ч.д.а.).

Фазовый состав образцов определяли методом рентгенофазового анализа на дифрактометре AL-27MINI в диапазоне 2θ от 10° до 70° . Скорость сканирования составляла $4^\circ/\text{мин}$ при шаге $0,04^\circ$. Рабочее напряжение и сила тока составляли соответственно 30 кВ и 10 мА, AL-24 (Япония).

Морфологию и размер наночастиц исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе СЭМ ЭДС Jeol JSM-IT200LA (Япония), высокоточное измерение размеров частиц проводили методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе JEOL JEM-2100 (Япония).

Для синтеза наночастиц серебра были применены методы химического взаимодействия растворов (Абдуллаева и др., 2025а), последовательность синтеза наночастиц серебра приведена на схеме 1. Наночастицы серебра также были синтезированы из экстрактов различных растений (Abdullaeva, 2017), схема 2. Определение антимикробной активности наночастиц серебра проводилось с использованием диск-диффузионного метода на агаре Мюллера–Хинтона в соответствии с методическими указаниями приказа Министерства здравоохранения Кыргызской Республики № 729 от 25.10.2018. В качестве тест-культур

использовались стандартные штаммы микроорганизмов. Оценка результатов осуществлялась по диаметру зон задержки роста.

Для анализа структурного и фазового состава синтезированных наночастиц серебра применены рентгенофазовый РФА анализ для определения кристалличности и размера синтезированных наночастиц, UV-Vis спектроскопия (420–450 нм), ТЭМ/СЭМ для определения размера и морфологии наночастиц.

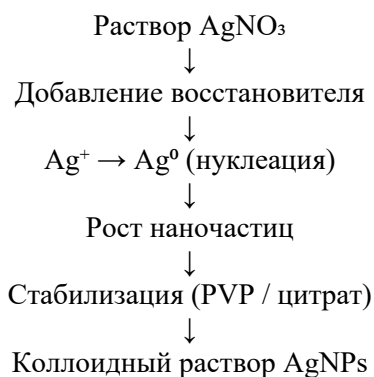


Схема 1. Последовательность действий в синтезе наночастиц серебра химическим взаимодействием.



Изменение цвета раствора
(жёлтый → коричневый)



Коллоидный раствор
наночастиц серебра (AgNPs)

Схема 2. Последовательность действий во время синтеза наночастиц серебра из экстрактов растений.

Синтез наночастиц серебра из экстракта шпината и киви относится к «зелёным» (биогенным) методам получения наносеребра и основан на восстановительной способности фитохимических соединений растения, рис. 2. Экстракт шпината и киви содержит полифенолы, флавоноиды, аскорбиновую кислоту, аминокислоты и другие биомолекулы, которые одновременно выступают восстановителями и стабилизаторами наночастиц. При смешивании водного экстракта шпината с раствором ионов серебра происходит восстановление до металлического Ag^0 , что сопровождается характерным изменением окраски раствора вследствие поверхностного плазмонного резонанса. Образующиеся наночастицы серебра с наноразмерным диапазоном и относительно узким распределением по размерам благодаря стабилизации поверхности растительными метаболитами. Способ отличается экологичностью, простотой, отсутствием токсичных реагентов и делает полученное наносеребро перспективным для биомедицинских и фармацевтических применений. Условия реакции, факторы влияния представлены на рис. 3.

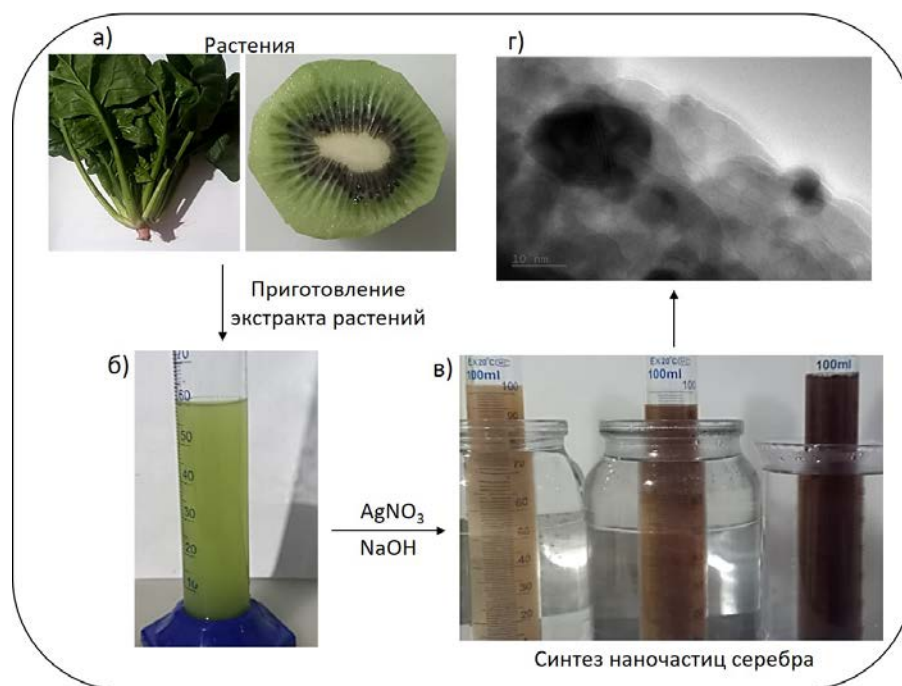


Рисунок 2. а) листья шпината *Spinacia oleracea* и плод киви *Actinidia deliciosa* для синтеза наночастиц серебра; б) приготовление экстракта растений; в) синтез наночастицы серебра из экстрактов растений; г) ТЭМ фотография синтезированных наночастиц серебра, шкала 10 нм.

При синтезе наночастиц серебра восстановлением нитрата серебра экстрактом шпината одновременно протекают реакции восстановления, окисления и комплексообразования. В результате, помимо целевых Ag^0 -наночастиц, образуются неорганические и органические побочные продукты (растворимые комплексы $[\text{Ag}(\text{OH})_2]^-$, $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$, полифенолы,

флавоноиды, органические кислоты, белки).

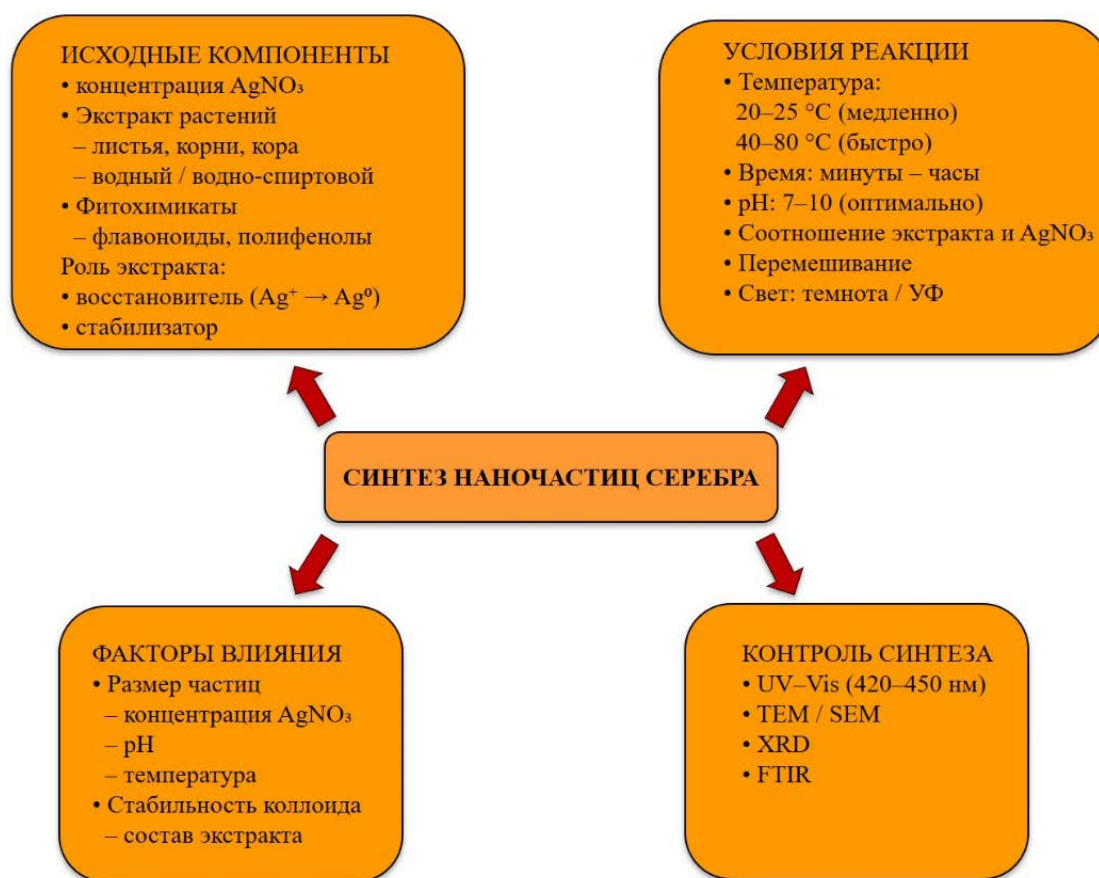


Рисунок 3. Исходные компоненты, условия реакции, факторы влияния и контроль синтеза наночастиц серебра в исследовании

Результаты и обсуждение

В ходе исследования установлено, что наночастицы серебра проявляют высокую антимикробную активность в отношении исследуемых микроорганизмов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования наночастиц серебра и их композиций с наночастицами оксида цинка в составе антибактериальных перевязочных материалов. Антибактериальная активность наночастиц серебра против грамотрицательных и грамположительных бактерий представлена в табл. 3.

Таблица 3. Антибактериальная активность наночастиц серебра

№	Микроорганизм	Тип бактерии	Диаметр зоны ингибирования (мм)	МИС (µг/мл)	МВС (µг/мл)
1	<i>Escherichia coli</i>	Грамотрицательная	10 мм	4,58 ± 1,59 мкг/мл	30 – 127 мкг/мл
2	<i>Staphylococcus aureus</i>	Грамположительная	10-13 мм	0,48 – 8 мкг/мл	20 – 110 мкг/мл
3	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Грамотрицательная	10 – 14 мм	0,1 – 5 мкг/мл	20 – 80 мкг/мл
4	<i>Bacillus subtilis</i>	Грамположительная	12 – 15 мм	2 -12 мкг/мл	4 – 25 мкг/мл

5	Salmonella enterica	Грамотрицательная	13 – 18 мм	2 -12,5 мкг/мл	4 – 25 мкг/мл
---	---------------------	-------------------	------------	-------------------	------------------

Диаметр зоны ингибирования (мм) — результат метода «диск-диффузии»; МИС — минимальная концентрация, при которой рост бактерий подавляется; МВС — минимальная концентрация, при которой бактерии погибают.

Результаты статистического анализа

Статистическая обработка результатов исследования антибактериальной активности наночастиц серебра проводилась с целью оценки влияния их концентрации на диаметр зоны ингибирования роста, минимальную ингибирующую концентрацию (МИС) и минимальную бактерицидную концентрацию (МВС) в отношении следующих микроорганизмов: *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*, табл.4.

Таблица 4. Результаты однофакторного корреляционного анализа на влияние концентрации наночастиц серебра

Показатель	F	p	Статистическая значимость
Рост <i>Staphylococcus aureus</i>	152,4	<0,001	значимо
Рост <i>Escherichia coli</i>	134,7	<0,001	значимо
Зона ингибирования (<i>S. aureus</i>)	96,2	<0,001	значимо
Зона ингибирования (<i>E. coli</i>)	82,5	<0,001	значимо

Применение наночастиц серебра в медицине

Наночастицы серебра обладают значительным потенциалом для применения в современной медицине благодаря выраженным антимикробным свойствам и возможности интеграции в различные медицинские изделия, табл.4. Вместе с тем остаются актуальными вопросы биосовместимости и безопасности, требующие дальнейших фундаментальных и прикладных исследований. Разработка стандартизированных методов получения и применения наночастиц серебра позволит расширить возможности их использования в клинической практике.

Раневые покрытия и перевязочные материалы. Одним из наиболее распространённых направлений применения наночастиц серебра является их использование в раневых покрытиях и перевязочных материалах рис.4. Включение наночастиц серебра в состав перевязочных средств позволяет снизить риск инфицирования ран, ускорить процессы заживления и предотвратить развитие воспалительных осложнений.

Медицинские имплантаты. Наночастицы серебра применяются для модификации поверхности медицинских имплантатов с целью предотвращения образования бактериальных биоплёнок. Это особенно важно при использовании ортопедических и стоматологических имплантатов, где риск инфекции остаётся высоким.

Системы доставки лекарственных средств. Перспективным направлением является использование наночастиц серебра в системах доставки лекарственных препаратов. Такие системы позволяют обеспечить контролируемое высвобождение активных веществ и

повысить эффективность терапии.

Таблица 4. Применение наночастиц серебра в медицине

№	Область применения	Конкретные формы / изделия	Механизм действия	Преимущества	Примечания
1	Антибактериальная терапия	Мази, гели, растворы для обработки ран	Повреждение клеточной стенки, связывание ДНК, АФК	Эффективны против грамположительных и грамотрицательных бактерий, включая устойчивые штаммы	Возможна цитотоксичность при высокой концентрации
2	Ранозаживление	Раневые повязки, гидрогели, биополимерные плёнки	Подавление инфекции, стимуляция регенерации, снижение воспаления	Быстрое заживление, предотвращение инфицирования	Размер и концентрация частиц влияют на эффективность
3	Медицинские покрытия и импланты	Катетеры, ортопедические и стоматологические импланты, хирургические швы	Предотвращение образования бактериальных биоплёнок	Длительная защита от инфекции	Требуется контроль биосовместимости, стабильности покрытия
4	Противовирусное действие	Экспериментальные растворы и покрытия	Блокирование прикрепления вируса, инактивация вирусных белков	Потенциально эффективны против вирусов гриппа, герпеса, ВИЧ	Исследуется в основном <i>in vitro</i> ; клиническая эффективность ограничена
5	Противогрибковая активность	Кремы, покрытия медицинских изделий	Нарушение клеточной стенки грибов, подавление роста	Эффективны против <i>Candida</i> , <i>Aspergillus</i>	Требуется оптимизация концентрации, возможна цитотоксичность
6	Онкология (перспективное направление)	Носители лекарственных средств, фототермическая терапия	Индукция апоптоза опухолевых клеток, разрушение клеточных мембран	Возможность таргетной доставки препаратов	На стадии исследований, требуется оценка безопасности
7	Диагностика и биосенсоры	Биосенсоры, тест-системы, системы визуализации	Оптические свойства: SPR, флуоресценция	Высокая чувствительность, быстрое обнаружение	Требуется стандартизация, высокая стоимость оборудования

Оценка биосовместимости и безопасности применения приготовленных антибактериальных повязок, содержащих наночастицы оксида цинка и серебра для лечения ожоговых ран, были протестированы и испытаны в лаборатории и подтверждены протоколами лабораторных испытаний № 59 от 13.02.2024, № 60 от 13.02.2024, № 61 от 13.02.2024

Лаборатории отдела испытаний Ошского городского центра профилактики заболеваний и Госсанэпиднадзора с функциями координации деятельности службы по Ошской области.

В результате проведённых исследований были получены патенты на способ синтеза наночастиц оксида цинка, смеси наночастиц оксида цинка и серебра, а также на способ приготовления антибактериальных перевязочных материалов с наночастицами (Абдуллаева и др., 2025b; Абдуллаева и др., 2025c).

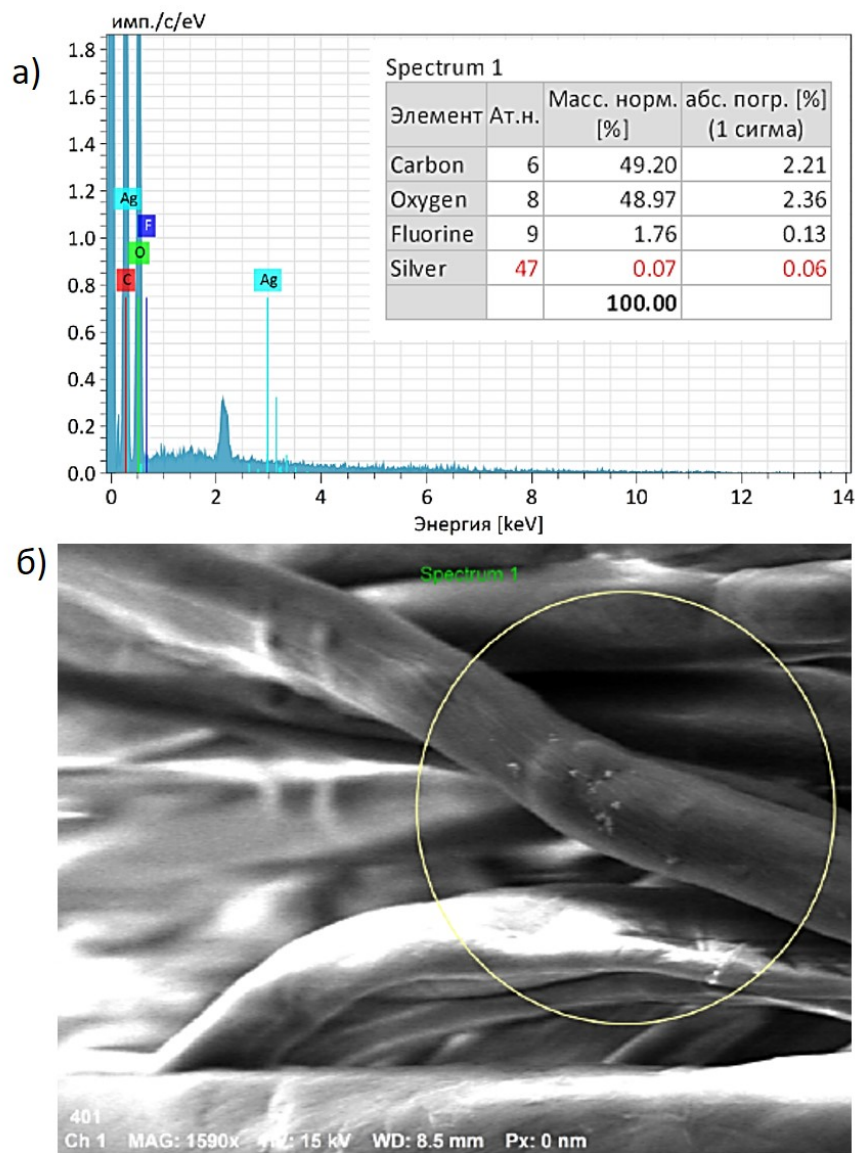


Рисунок 4. а) График энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии антибактериального перевязочного материала с наночастицами серебра. Содержания элементов в масс.% указаны в таблице; б) СЭМ фотография мононити антибактериального перевязочного материала с наночастицами серебра, шкала 10 мкм.

Перспективы использования наночастиц серебра в системах доставки лекарственных средств и в тканевой инженерии выглядят многообещающими благодаря уникальным физико-химическим и биологическим свойствам этих наноструктур. Наночастицы серебра обладают высокой поверхностной активностью, позволяющей эффективно связывать и транспортировать лекарственные молекулы, обеспечивая контролируемое высвобождение и направленное действие на целевые ткани, что способствует повышению терапевтической

эффективности и снижению побочных эффектов. Их выраженная антимикробная активность особенно ценна в тканевой инженерии, где риск инфекционных осложнений при имплантации конструкций из тканей или материалов остаётся существенной проблемой; интеграция серебряных наночастиц в биосовместимые матрицы улучшает сопротивляемость имплантатов микробному обсеменению без значительного подавления клеточной активности. Кроме того, модификация поверхности наночастиц биомолекулами или полимерами позволяет адаптировать их к специфическим биологическим условиям, улучшать целевую устойчивость и уменьшать токсичность, что открывает перспективы для их применения в регенеративной медицине от доставки генетического материала до стимулирования роста клеток и сосудистого восстановления. В совокупности эти свойства делают наночастицы серебра привлекательными компонентами новых мультимодальных платформ для терапии и регенерации тканей.

Выводы

Полученные патенты на синтез наночастиц оксида цинка и серебра и на метод изготовления антибактериальных перевязочных материалов с наночастицами подтверждают практический потенциал этих исследований и открывают возможности для их промышленного применения.

Наночастицы серебра обладают выраженной дозозависимой антибактериальной активностью против микроорганизмов *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*. Минимальная ингибирующая концентрация (МИС) и минимальная бактерицидная концентрация (МВС) варьируют в зависимости от вида бактерий и размеров наночастиц, что подтверждает необходимость индивидуального подбора концентрации в медицинских приложениях. Концентрация AgNPs 10–25 мкг/мл обеспечивает оптимальный баланс между антибактериальной активностью и низкой цитотоксичностью для клеток человека. При концентрации ≥ 50 мкг/мл отмечается достоверное снижение жизнеспособности клеток, что ограничивает возможности применения высоких доз. Синтез с использованием экстракта шпината обеспечивает образование стабильных наночастиц с органической оболочкой, которая стабилизирует коллоид и частично уменьшает цитотоксичность. Одновременно образуются побочные компоненты - дегидроаскорбиновая кислота, окисленные полифенолы, белково-Ag-комплексы, Ag₂O которые могут влиять на размер частиц, их морфологию и биологическую активность. **Статистическая обработка данных** показал статистически значимое влияние концентрации AgNPs на диаметр зоны ингибирования, МИС и МВС для всех исследованных микроорганизмов ($p < 0,001$).

Наночастицы серебра могут применяться в медицине для разработки антибактериальных покрытий, растворов для дезинфекции и компонентов лекарственных форм. Синтез с использованием растительных экстрактов обеспечивает экологически безопасное производство наноматериалов, снижает токсичность и обеспечивает дополнительную биостабилизацию частиц.

Список литературы

1. Vidyasagar, Patel, R.R., Singh, S.K., Singh, M. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles: methods, biological applications, delivery and toxicity. *Mater. Adv.*, 2023, 4, 1831, <https://doi.org/10.1039/d2ma01105k>
2. Ма, С., Чжен, К., Чень, И. (2018). Свойства, применения и методы получения наносеребра.

Международный студенческий научный вестник, 6,
<https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19414> (дата обращения: 31.01.2026).

3. Hamida, R.S., Ali, M.A., Goda, D.A., Khalil, M.I., Al-Zaban, M.I. (2020). Novel Biogenic Silver Nanoparticle-Induced Reactive Oxygen Species Inhibit the Biofilm Formation and Virulence Activities of Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus (MRSA) Strain. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 533389. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00433>
4. More, P.R., Pandit, S., Filippis, A., Franci, G., Mijakovic, I., Galdiero, M. (2023). Silver Nanoparticles: Bactericidal and Mechanistic Approach against Drug Resistant Pathogens. *Microorganisms*, 11(2), 369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>
5. Hosnedlova, B., Kabanov, D., Kepinska, M., B Narayanan, V. H., Parikesit, A. A., Fernandez, C., Bjørklund, G., Nguyen, H. V., Farid, A., Sochor, J., Pholosi, A., Baron, M., Jakubek, M., Kizek, R. (2022). Effect of Biosynthesized Silver Nanoparticles on Bacterial Biofilm Changes in *S. aureus* and *E. coli*. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 12(13), 2183. <https://doi.org/10.3390/nano12132183>
6. Sarkar, J., Das, S., Aich, S., Bhattacharyya, P., Acharya, K. (2022). Antiviral potential of nanoparticles for the treatment of Coronavirus infections. *Journal of trace elements in medicine and biology: organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 72, 126977. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.126977>
7. He, Q., Lu, J., Liu, N., Lu, W., Li, Y., Shang, C., Li, X., Hu, L., Jiang, G. (2022). Antiviral Properties of Silver Nanoparticles against SARS-CoV-2: Effects of Surface Coating and Particle Size. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 12(6), 990. <https://doi.org/10.3390/nano120609>
8. Abdullaeva, Z. (2017). *Synthesis of Nanoparticles and Nanomaterials*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54075-7_3
9. Абдуллаева Ж.Д., Бепиев Э.А., Урмонов Д.Г., Табалдыев А.Т., Топчубаева Б.Т. (2025а). Способ синтеза наночастиц оксида цинка и смеси наночастиц оксида цинка и серебра. Кыргызпатент № 424, 30.05.2025, Бишкек.
10. Абдуллаева, Ж.Д., Абдуллаев Д.К., Калматов Р.К., Урмонов Д.Г., Эркинали уулу Б, Топчубаева Э.Т. (2025b). Способ приготовления антибактериальных перевязочных материалов с наночастицами. Кыргызпатент № 427, 30.06.2025, Бишкек.
11. Абдуллаева, Ж., Абдураупова, Н., Жоробекова, М., Матураимов, А. (2025с). Применение наночастиц в лечении ожоговых ран. *Вестник Ошского государственного университета*, (3), 15–31. https://doi.org/10.52754/16948610_2025_3_0_2