https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-87

МРНТИ: 31.23.01

**Ұ. Әмзеева[1,2*], А. Нурлыбек[2], К. Аскарулы[1], Ж. Токтарбай[1], С. Азат[1]**
[1]Satbayev University,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Сатпаева, 22
[2]Казахский Национальный университет им. аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

# ЗЕЛЕНЫЙ СИНТЕЗ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ РАН

***Аннотация:*** *В данном обзоре рассмотрены современные подходы к «зеленому» синтезу серебряных нанокомпозитов, а также основные типы сорбентов, методы их модификации и перспективы биомедицинского применения. Серебряные наночастицы (AgNPs) являются одним из наиболее перспективных классов наноматериалов благодаря выраженным антибактериальным, противовоспалительным свойствам. Вместе с тем традиционные физические и химические методы их синтеза связаны с использованием токсичных реагентов, высокими температурами и значительными энергетическими затратами, что ограничивает их экологическую и практическую применимость.*

*В связи с этим в последние годы активно развиваются подходы «зеленого» синтеза, основанные на использовании растительных экстрактов, микроорганизмов и природных биополимеров. Биологически активные соединения растений, включая полифенолы, флавоноиды, терпеноиды, сахара и белки, выступают в качестве природных восстановителей и одновременно стабилизирующих агентов при формировании наночастиц серебра. Особый интерес представляет иммобилизация AgNPs на различных сорбционных материалах, позволяющая уменьшить агрегацию частиц, повысить их коллоидную стабильность и обеспечить контролируемое высвобождение ионов серебра. Серебряные нанокомпозиты на основе сорбентов демонстрируют высокий потенциал для применения в раневых покрытиях, системах локальной доставки лекарственных средств, диагностических сенсорах и антибактериальных материалах.*

*Полученные результаты указывают на то, что использование зеленых методов синтеза и сорбционных матриц позволяет создавать экологически безопасные и функционально активные наноматериалы с улучшенными биомедицинскими характеристиками.*

***Ключевые слова:*** *серебряные наночастицы, зеленый синтез, нанокомпозиты, сорбенты, биомедицина, антибактериальные материалы.*

## Введение

Нанотехнологии занимают важное место в современной биомедицине благодаря возможности создания материалов с уникальными физико-химическими и биологическими свойствами. Среди различных наноматериалов серебряные наночастицы (AgNPs) в последние годы привлекают значительное внимание благодаря их выраженным антибактериальным, противовоспалительным и антиангиогенным свойствам, что обусловливает широкий спектр их применения в биомедицине, включая раневые покрытия, системы адресной доставки лекарственных средств, диагностические сенсоры и противомикробные материалы [1]. Однако традиционные физические и химические методы синтеза AgNP зачастую сопровождаются использованием токсичных реагентов, органических растворителей, высоких температур и многостадийных процессов очистки, что ограничивает их биосовместимость и экологическую безопасность [2]. В связи с этим в последние годы активно развиваются методы «зеленого» синтеза серебряных наночастиц, основанные на использовании растительных экстрактов, микроорганизмов, грибов и природных полимеров. Биологические компоненты в таких системах выполняют одновременно функции восстановителей и стабилизаторов, что позволяет уменьшить токсичность процесса, повысить стабильность наночастиц и улучшить их биосовместимость. Кроме того, зеленый синтез рассматривается как перспективный и экологически безопасный подход к получению наноматериалов для медицинских и фармацевтических целей [3].

©Ұ. Әмзеева, А. Нурлыбек, К. Аскарулы, Ж. Токтарбай, С. Азат, 2026

Особый интерес представляют сорбенты и пористые носители, модифицированные серебряными наночастицами. Использование сорбентов способствует снижению агломерации наночастиц, повышению их устойчивости и контролируемому высвобождению ионов серебра [4-5]. Кроме того, такие композитные системы облегчают удаление наноматериалов из биосреды и позволяют регулировать деградацию и функциональные свойства биоматериалов. Благодаря развитой поверхности и сорбционным свойствам носителей возможно создание многофункциональных нанокомпозитов с улучшенными антибактериальными характеристиками [6-7].

Серебряные нанокомпозиты на основе сорбентов обладают значительным потенциалом для биомедицинского применения. Они демонстрируют высокую эффективность в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов, перспективны для разработки перевязочных материалов, систем локальной доставки антибиотиков, а также диагностических платформ для обнаружения микроорганизмов [2, 8]. В связи с этим исследования, посвященные зеленому синтезу серебряных нанокомпозитов и оценке их биомедицинских свойств, являются актуальным направлением современной нанобиотехнологии.

Целью данного обзора является анализ современных методов зеленого синтеза серебряных нанокомпозитов, модифицированных на сорбентах, а также рассмотрение их биомедицинских свойств и перспектив практического применения.

**Зеленый синтез серебряных наночастиц.** Зеленый синтез представляет собой экологически безопасный подход к получению наноматериалов с использованием природных восстановителей и стабилизаторов. Основной задачей данного подхода является снижение токсичности процессов синтеза и минимизация образования опасных побочных продуктов.

В качестве биологических агентов для синтеза AgNPs широко применяются: растительные экстракты, бактерии, грибы, природные полисахариды и белки.

Биомолекулы природного происхождения восстанавливают ионы серебра Ag+ до металлического серебра $Ag^0$ и одновременно стабилизируют поверхность наночастиц, предотвращая их агломерацию. Этот подход соответствует принципам зеленой химии, поскольку использует водную среду, безопасные восстанавливающие агенты, комнатную или умеренную температуру и снижает образование опасных побочных продуктов, при этом часто повышая биосовместимость по сравнению с традиционными химическими методами [9-11].

Растительные экстракты являются наиболее распространенными агентами зеленого синтеза благодаря доступности, низкой стоимости и высокому содержанию биологически активных веществ. Экстракты листьев, корней, плодов и цветков различных растений содержат фенольные соединения, флавоноиды, алкалоиды и органические кислоты, участвующие в восстановлении ионов серебра [12-14]. Функциональные группы, такие как гидроксильные, карбонильные и карбоксильные фрагменты, играют решающую роль в процессах переноса электронов, инициируя тем самым нуклеацию и образование наночастиц. В дополнение к своей восстановительной активности, эти биомолекулы могут адсорбироваться на поверхности наночастиц и выступать в качестве стабилизирующих агентов, способствуя стабилизации наночастиц и функционализации поверхности [15-16].

После нуклеации фитохимические вещества и связанные с ними биомолекулы, включая белки и полисахариды, стабилизируют наночастицы серебра за счет стерических и электростатических взаимодействий. Покрытие поверхности предотвращает агрегацию наночастиц в водной и физиологической средах и повышает коллоидную стабильность [15]. Кроме того, биомолекулярная оболочка, образующаяся на поверхности наночастиц, может способствовать последующим процессам биоконъюгации и интеграции в полимерные или сорбентные матрицы для биомедицинских применений, таких как перевязочные материалы, системы доставки лекарств и биосенсоры.

Соотношение между растительным экстрактом и прекурсором серебра существенно влияет на кинетику нуклеации и роста наночастиц. Изменения соотношения экстракта к $AgNO_3$ влияют на распределение частиц по размерам, морфологию и коллоидную стабильность. Для получения относительно небольших и монодисперсных наночастиц серебра обычно используются соотношения от приблизительно 1:9 до 1:3 (экстракт:$AgNO_3$,

об./об.); однако оптимальные условия сильно зависят от фитохимического состава выбранного растительного экстракта и используемых параметров синтеза (рис. 1) [17].

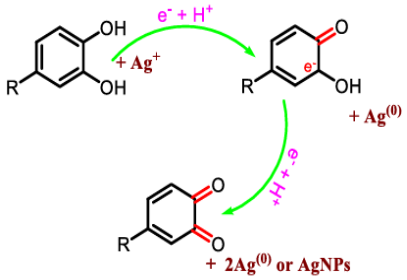



Рисунок 1 – Механизм «зеленого» синтеза наночастиц серебра (Ag NPs)

В результате синтезированные наночастицы серебра характеризуются улучшенной биосовместимостью и функциональностью поверхности по сравнению с наночастицами, полученными традиционными химическими методами. Такой подход позволяет разрабатывать относительно простые и масштабируемые протоколы синтеза, перспективные для промышленного применения в соответствии с принципами «зеленой химии» [18-19].

Преимуществами растительного синтеза являются:

- простота процесса;
- отсутствие токсичных реагентов;
- высокая скорость образования наночастиц;
- возможность контроля размера и формы AgNPs.

Ключевым параметром проектирования является растительная среда: состав экстракта, его концентрация, pH и метод экстракции оказывают сильное влияние на кинетику нуклеации, рост и стабилизацию, определяя тем самым конечное распределение размеров наночастиц, характеристики поверхностного плазмонного резонанса и химический состав поверхности, имеющие значение для последующих применений [20-22].

Водная экстракция, как правило, предпочтительнее из-за ее простоты, низкой токсичности и совместимости с биомедицинскими приложениями. В большинстве протоколов растительные материалы промывают, сушат и подвергают экстракции с использованием дистиллированной воды или водных растворителей при умеренном нагреве, чтобы сохранить термолабильные биоактивные соединения, обеспечивая при этом эффективное удаление восстанавливающих агентов. Физико-химические свойства синтезированных AgNPs сильно зависят от состава экстракта и используемых параметров синтеза [15, 23].

Размеры синтезированных с использованием водных растительных экстрактов наночастиц обычно варьируются от приблизительно 5 до 60 нм, а полосы поглощения поверхностного плазмонного резонанса (SPR) обычно наблюдаются в диапазоне 400-450 нм. Различия в размере, морфологии и оптических свойствах наночастиц связаны с различиями в фитохимическом составе, концентрации прекурсоров, pH, температуре и времени реакции [24-27].

Характеризация растительных экстрактов является важным аспектом воспроизводимого «зеленого» синтеза. Аналитические подходы, такие как определение общего содержания фенольных соединений, фитохимический скрининг и инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR), широко используются для идентификации функциональных групп и биологически активных соединений, участвующих в образовании и стабилизации наночастиц [16, 23]. Сопоставление состава экстракта с характеристиками наночастиц позволяет лучше понять механизмы восстановления, поведение при стабилизации и воспроизводимость биосинтезированных наночастиц серебра от партии к партии (рис. 2, табл. 1) [25].

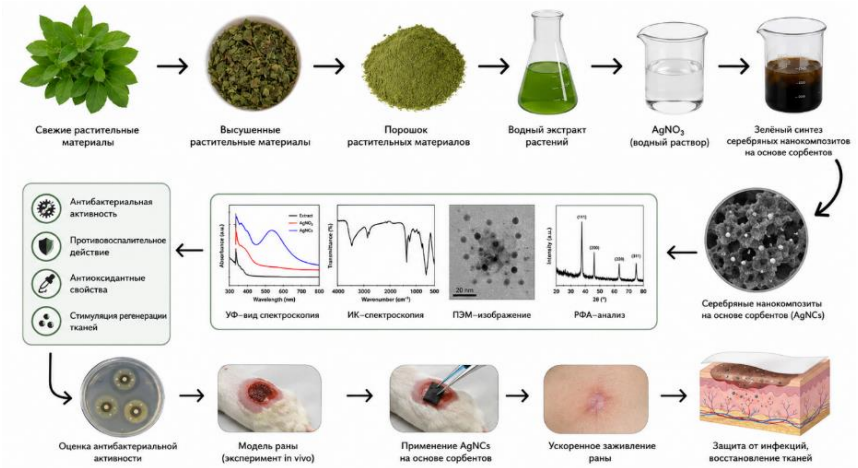



Рисунок 2 – Схематическое представление зеленого синтеза серебряных нанокомпозитов на основе сорбентов, их физико-химической характеристики и применения для лечения ран

Таблица 1 – Растительные экстракты, используемые для зеленого синтеза AgNPs: характеристики наночастиц и их биологическая активность

| Растение | Используемая часть | Размер nm | Форма | Био активность | Референс |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *Crataegus douglasii* | плод | 29.28 | наночастицы имели почти сферическую форму | **антибактериальная активность против** *S. aureus* **и** *E. coli*. | [28] |
| *Artemisia nilagirica* | листья | 70-90 | сферические, 10-45 нм | антибактериальная активность, **антимикробная активность** | [29] |
| *Vitis vinifera* | плод | 18-20 | сферические наночастицы | антибактериальная активность в отношении как грамположительных бактерий *Bacillus subtilis*, так и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*. | [30] |
| *Stigmaphyllon littorale* | листья | 5-25 | сферические наночастицы | антибактериальная активность в отношении *Pseudomonas putida*, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* и *Micrococcus luteus*. | [31] |
| *Euphorbia prostrata* | листья | 25-80 nm | стержневидной формы | пестицидная активность | [32] |
| *Dodonaea viscosa* | листья | 16 | сферические наночастицы | **антимикробная активность** | [33] |
| *Cucumis prophetarum* | листья | 30-50 | полиморфная форма: эллипсоидальная и неправильная | злокачественная опухоль печени | [34] |
| *Azadirachta indica* | листья | 2-18 | наночастицы треугольной и шестиугольной формы | **рак шейки матки** | [35] |
| *Terminalia mantaly* | листья, стебель, корни | 11-83 | анизотропные наночастицы | антибактериальная активность | [36] |
| *Melia dubia* | листья | 7.3 | наночастицы неправильной формы | рак молочной железы | [37] |
| *Calophyllum tomentosum* | листья | 24 | сферические наночастицы | **антибактериальная, антиоксидантная, антидиабетическая, противовоспалительная и антитирозиназная активность** | [38] |
| *Punica granatum* | листья | 48 | гранецентрированная кубическая кристаллическая структура | **противоопухолевая, антидиабетическая и антиоксидантная активность** | [39] |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| *Ocimum basilicum* | семена | 13.82 | сферические наночастицы | антибактериальная активность в отношении как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий | [40] |
| *Aconitum toxicum* Reichenb. | корни | 53-67 | сферические наночастицы | антиоксидантная и митостимулирующая активность | [41] |
| *Aloe vera* | листья | 5-50 | октаэдр | **антимикробная активность** | [42] |
| *Eclipta prostrate* | листья | 35-60 | шестиугольники, треугольники и пятиугольники | ларвицидная активность | [43] |
| *Hibiscus rosa sinensis* | цветки | 14 | наночастицы призматической или сферической формы | ларвицидная активность | [44] |
| *Pistacia atlantica* | порошок семян | 10-50 | сферические наночастицы | антибактериальная активность в отношении *S. aureus* | [45] |
| *Withania somnifera* | листья | 5-30 | сферические наночастицы | AgNPs с квазοοбратимым окислительно-восстановительным поведением; антибактериальная активность в отношении *E. coli* и *S. aureus*; противогрибковая активность в отношении *A. niger*, *A. flavus* и *C. albicans* | [46] |
| *Tribulus terrestris L* | сушненые плоды | 16-28 | сферические наночастицы | Антибактериальная активность в отношении *S. pyogenes*, *P. aeruginosa*, *E. coli*, *S. aureus* и *B. subtilis*. | [47] |

**Основные типы сорбентов, модифицированных серебряными наночастицами.**

Модификация наночастиц серебра (AgNPs) на сорбентах является эффективной стратегией для повышения стабильности наночастиц, снижения агрегации и контроля высвобождения ионов серебра. Использование пористых носителей с большой площадью поверхности также облегчает включение AgNPs в биомедицинские устройства, диагностические системы, антимикробные покрытия и материалы для защиты окружающей среды [48-50]. Сорбенты с развитой пористостью и большой площадью поверхности повышают способность к загрузке наночастиц и усиливают взаимодействие с биологическими и химическими мишенями [51-52].

Для модификации AgNP используются различные классы сорбентов, включая активированный уголь, цеолиты, материалы на основе диоксида кремния, биополимерные матрицы, гидрогели, материалы на основе целлюлозы и углеродсодержащие наноматериалы, такие как графен и углеродные нанотрубки. Эти материалы различаются по физико-химическим свойствам, которые влияют на распределение наночастиц, стабильность, кинетику высвобождения и функциональные характеристики в биомедицинских и экологических приложениях [53].

Активированный уголь обеспечивает большую площадь поверхности и пористость, что позволяет наносить значительное количество наночастиц серебра и потенциально способствует быстрому антимикробному действию или катализу при модификации наночастиц серебра на его поверхности или внутри пор [49-50]. Наночастицы серебра (AgNPs) могут быть иммобилизованы на поверхности углерода путем химического восстановления или загружены в виде наночастиц в углеродные матрицы; функционализация поверхности (например, карбоксильные, гидроксильные группы) способствует стабильности связывания и может влиять на профили высвобождения ионов серебра и биоактивность.

Наночастицы серебра на активированном угле широко исследуются в качестве антимикробных фильтрующих материалов, интерфейсов для лечения ран и каталитических систем, хотя равномерность загрузки и совместимость с порами остаются практическими соображениями [50].

Цеолиты и сорбенты на основе диоксида кремния. Природные и синтетические цеолиты широко исследуются в качестве эффективных сорбентов для модификации наночастиц серебра (AgNP) благодаря их четко выраженной микропористой структуре, большой площади поверхности, термической стабильности и ионообменной способности [48]. Отрицательно заряженный пористый каркас цеолитов обеспечивает эффективную адсорбцию ионов серебра и способствует равномерному распределению и удержанию AgNP внутри пористой структуры. Такая модификация повышает стабильность наночастиц, снижает агрегацию и позволяет контролировать высвобождение ионов серебра [54-55].

Композиты на основе цеолитов, нагруженных серебром, демонстрируют выраженную антимикробную активность против широкого спектра микроорганизмов и сохраняют хорошую стабильность в водной среде [5]. Благодаря этим свойствам, нанокомпозиты AgNP на основе цеолитов считаются перспективными материалами для биомедицинских и экологических применений, включая фильтрующие мембраны, волокнистые маты, антимикробные покрытия и системы перевязочных материалов для ран. Кроме того, ионообменные свойства цеолитов способствуют более длительному антимикробному действию и снижению цитотоксичности по сравнению со свободными наночастицами [56-57].

Монолитные кремнеземные материалы широко используются в качестве носителей для модификации наночастиц серебра благодаря их большой площади поверхности, химической стабильности и регулируемой пористой структуре. Кремнеземные монолиты, нагруженные наночастицами серебра, могут обеспечивать селективную адсорбцию и быстрое разделение аналитов за счет гидрофобных и π–π взаимодействий, особенно с ароматическими соединениями [58]. Эти системы обладают хорошей возможностью многократного использования и простыми процедурами регенерации, что делает их перспективными материалами для аналитического биосенсорного анализа, предварительной обработки образцов и технологий разделения.

Монолиты на основе диоксида кремния и монолитные матрицы. Монолитные кремнеземные сорбенты, модифицированные аминопропильными группами, широко исследуются в качестве стабильных платформ для модификации наночастиц серебра. Такие материалы обеспечивают высокую механическую стабильность, возможность многократного использования и эффективное распределение наночастиц внутри пористой структуры [5]. Модифицированные наночастицы серебра улучшают адсорбционные свойства за счет дополнительных электростатических и π–π взаимодействий с целевыми аналитами, что делает эти системы пригодными для твердофазной экстракции (ТФЭ), аналитического разделения и биосенсорных применений [48].

Наночастицы серебра на кремнеземной подложке также перспективны для биомедицинских применений благодаря химической стабильности и биосовместимости кремнеземных поверхностей. Модификация наночастиц на кремнеземных матрицах повышает стабильность наночастиц и позволяет проводить дальнейшую биофункционализацию для антимикробных покрытий, диагностических интерфейсов и медицинских устройств. В материалах для перевязочных материалов на основе кремнезема нанокомпозиты могут сохранять структурную целостность, обеспечивая при этом длительную антимикробную активность и контролируемое высвобождение серебра [54].

Биополимеры и природные полимеры в качестве сорбентов. Биополимеры, такие как хитозан, альгинат, производные целлюлозы и материалы на основе крахмала, широко используются в качестве матриц для модификации наночастиц серебра благодаря их биосовместимости, биоразлагаемости и обилию функциональных групп, способных стабилизировать наночастицы серебра [58]. Эти материалы могут служить как носителями для модтфткации наночастиц, так и реакционной средой для синтеза наночастиц *in situ*.

Хитозан является одним из наиболее широко изученных биополимеров для систем на основе наночастиц серебра. Присутствие амино- и гидроксильных групп способствует стабилизации наночастиц и сильному взаимодействию с полимерными матрицами. Нанокомпозиты на основе хитозана могут быть получены в виде пленок, гидрогелей и мембран, пригодных для перевязочных материалов, антимикробных покрытий и фильтрующих материалов [59].

Альгинат, производные целлюлозы и матрицы на основе крахмала обеспечивают мягкие и экологически чистые условия обработки, а также гибкие форматы материалов, такие как гранулы, пленки и гидрогели [52]. Эти системы могут обеспечивать контролируемое высвобождение серебра и снижать цитотоксичность, связанную с наночастицами, благодаря биосовместимой природе полимерной матрицы [60].

Материалы на основе целлюлозы и лигнина также являются перспективными носителями для иммобилизации наночастиц серебра. Целлюлозные гидрогели и наноцеллюлозные композиты обладают высокой пористостью, способностью удерживать воду и благоприятными механическими свойствами, что делает их привлекательными для заживления ран, тканевой инженерии и антимикробных применений. Такие матрицы могут образовывать стабильные металлогелевые структуры с длительной антимикробной активностью [61].

Гидрогели и целлюлозные сетки также используются для иммобилизации наночастиц серебра благодаря их пористости, биосовместимости и способности обеспечивать контролируемое высвобождение серебра [61]. Эти материалы широко исследуются для использования в перевязочных материалах для ран и антимикробных системах.

Углеродсодержащие наноматериалы, включая графен и углеродные нанотрубки, используются в качестве носителей наночастиц серебра благодаря их большой площади поверхности, механической стабильности и электропроводности, что делает их перспективными для биосенсорных и антимикробных применений [54].

При использовании серебряных наночастиц в составе раневых сорбционных повязок необходимо учитывать возможность их высвобождения в раневую среду. Степень высвобождения зависит от характера взаимодействия наночастиц с сорбентом, его структуры и свойств, а также от состава и продолжительности контакта с раневым экссудатом. При правильно подобранных условиях включение AgNPs в сорбционный материал может способствовать их удержанию в повязке и обеспечивать постепенное поступление активного компонента в область раны. Вместе с тем высвобождение свободных наночастиц и их последующее проникновение в окружающие ткани потенциально может увеличивать риск локального или системного воздействия серебра. Поэтому при разработке таких повязок важно контролировать степень удерживания AgNPs в сорбенте и профиль высвобождения серебра, обеспечивая необходимую антимикробную активность непосредственно в области раны при минимальном поступлении серебра в системный кровоток.

Модификация серебряных наночастиц на сорбентах способствует снижению агломерации, повышению стабильности нанокомпозитов и контролируемому высвобождению ионов серебра. Такой подход позволяет повысить антимикробную эффективность, снизить цитотоксичность и улучшить взаимодействие наночастиц с микроорганизмами благодаря развитой поверхности и высокой сорбционной способности носителей.

**Методы получения нанокомпозитов**

Для синтеза наночастиц серебра можно использовать различные сорбенты, включая активированный уголь, материалы на основе диоксида кремния, цеолиты, хитозановые пленки, целлюлозные гидрогели и наноматериалы на основе углерода. В качестве прекурсора серебра обычно используется нитрат серебра ($AgNO_3$) в различных концентрациях в зависимости от требуемой загрузки наночастиц [62]. Для экологически чистого синтеза наночастиц широко применяются экологически чистые восстановители, такие как растительные экстракты, полифенолы, сахара и полисахариды, в то время как для сравнения могут использоваться традиционные восстановители, включая борогидрид натрия и аскорбиновую кислоту. В качестве реакционной среды обычно используется деионизированная вода. Для повышения стабильности наночастиц могут быть добавлены дополнительные стабилизирующие агенты, такие как хитозан, альгинат, цитрат или поливинилпирролидон (ПВП).

Процесс синтеза обычно оптимизируется путем варьирования концентрации $AgNO_3$, типа восстановителя, pH, температуры и времени реакции. Основные оцениваемые параметры включают размер и морфологию наночастиц, загрузку наночастиц на поверхность сорбента, поведение высвобождения ионов серебра, коллоидную стабильность и антимикробную активность [63].

Пропитка сорбентов раствором $AgNO_3$ с последующим восстановлением. Один из наиболее часто используемых методов включает пропитку сорбента раствором $AgNO_3$ с последующим восстановлением ионов $Ag^+$ до металлического серебра. Сорбенты промывают, сушат и выдерживают в контролируемых условиях. Затем сорбент погружают в раствор $AgNO_3$ на определенный период времени для адсорбции ионов серебра в пористой структуре [64-65].

Синтез *in situ* на поверхностях сорбентов. Синтез *in situ* широко используется для достижения равномерного распределения наночастиц и сильного взаимодействия между наночастицами серебра (AgNPs) и матрицей сорбента.

Ионы серебра адсорбируются или образуют комплексы на поверхности сорбента, после чего происходит восстановление *in situ* для образования наночастиц серебра, локализованных в местах связывания, внутри пор или вдоль поверхности [51]. Такой подход обычно обеспечивает однородное распределение и прочную адгезию благодаря одновременному образованию наночастиц и их иммобилизации в центрах нуклеации.

Химический состав поверхности сорбента (аминные, карбоксильные, гидроксильные группы) и его пористость выступают в качестве зародышеобразующих матриц, влияя на размер и дисперсию частиц [66]. Условия восстановления можно регулировать для обеспечения контролируемого роста внутри пор или на функциональных группах, что позволяет получать частицы размером от нескольких до десятков нанометров.

Модификация предварительно синтезированных наночастиц серебра. Предварительно синтезированные наночастицы серебра также могут быть иммобилизованы на сорбентах с помощью адсорбции или методов функционализации поверхности. Этот метод позволяет точно контролировать размер наночастиц и химический состав поверхности перед иммобилизацией. Поверхности сорбентов могут быть модифицированы функциональными группами для улучшения прикрепления и стабильности наночастиц.

Ультразвуковые и микроволновые методы. Ультразвуковые и микроволновые методы все чаще используются для повышения эффективности загрузки наночастиц и сокращения времени синтеза. Ультразвуковая обработка улучшает массоперенос и дисперсию наночастиц, тогда как микроволновое облучение ускоряет кинетику восстановления и способствует равномерному образованию наночастиц.

Синтезированные нанокомпозиты обычно характеризуются с помощью УФ-видимой спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеновской дифракции (РД) и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье). Поведение при загрузке и высвобождении серебра обычно анализируется с помощью методов ICP-OES или ICP-MS [67].

**Антимикробные свойства и механизм действия**

Синтезированные в зеленом виде наночастицы серебра (AgNP) проявляют мощные антимикробные свойства, их прямое применение может привести к быстрому высвобождению ионов серебра (Ag+), усилению системного воздействия и потенциальным цитотоксическим или экологическим эффектам. Чтобы преодолеть эти ограничения, эффективной стратегией стала иммобилизация или инкапсулирование AgNP в подходящие сорбирующие материалы [68]. Иммобилизация помогает регулировать высвобождение ионов серебра, повышает стабильность наночастиц, уменьшает агрегацию и позволяет повторно или долгосрочно использовать их в различных биомедицинских и экологических приложениях, таких как датчики, системы фильтрации, повязки на раны и противомикробные покрытия [69-70].

Активированный уголь и биоуголь являются одними из наиболее широко исследованных сорбентов для иммобилизации AgNP из-за их большой площади поверхности, пористой структуры и высокой адсорбционной способности. Эти материалы обеспечивают большое количество активных центров для загрузки и стабилизации наночастиц, что приводит к улучшению дисперсии и устойчивым антимикробным свойствам. Композиты из активированного угля и биоугля, функционализированные AgNP, продемонстрировали эффективность не только против микробных патогенов, но также при адсорбции и удалении красителей, тяжелых металлов и органических загрязнителей из систем сточных [68-69].

Синергетическое сочетание адсорбционных свойств и антимикробной активности делает эти композиты привлекательными для технологий экологической реабилитации и

очистки воды. Кроме того, системы на основе биоугля, полученные из сельскохозяйственных отходов, способствуют устойчивости за счет использования недорогих и возобновляемых ресурсов биомассы.

Гидрогели и биоразлагаемые полимерные матрицы представляют собой еще один важный класс сорбентов, используемых для иммобилизации AgNP. Полимеры, такие как хитозан, поливиниловый спирт (ПВС), альгинат и желатин, обычно используются из-за их биосовместимости, биоразлагаемости и способности образовывать гидратированные трехмерные сети. Включение AgNP в эти матрицы обеспечивает локализованную и контролируемую антимикробную активность, одновременно снижая прямое воздействие свободных наночастиц [69-71].

Гидрогели, наполненные AgNP, особенно перспективны для заживления ран и тканевой инженерии. Гидратированная полимерная среда сохраняет влагу в месте раны, поддерживает регенерацию тканей и обеспечивает постепенное высвобождение противомикробных агентов. Гидрогели на основе хитозана дополнительно обладают собственными антимикробными и кровоостанавливающими свойствами, что еще больше повышает эффективность лечения. Эти материалы продемонстрировали улучшенную биосовместимость, снижение цитотоксичности и пролонгированную антимикробную эффективность по сравнению с составами свободных AgNP.

Серебро образует защитный барьер против различных патогенов и микроорганизмов, включая грамотрицательные бактерии (*E. coli*), грамположительные бактерии (*S. aureus*), вирусы и грибы [72]. Сетчатая структура пептидогликанового слоя клеточной стенки определяет механическую прочность бактерий и, соответственно, влияет на степень проникновения серебра в клетки [73].

Серебряные наночастицы повреждают клеточную стенку бактерий, вызывая повреждение ДНК и подавляя размножение бактериальных клеток [74]. Благодаря малым размерам и высокому соотношению площади поверхности к объему они способны физически связываться с поверхностью микроорганизмов. AgNPs проникают через липидный бислой клеточной мембраны и нарушают ее целостность [75]. Такое повреждение приводит к образованию пор в мембране, утечке внутриклеточного содержимого и последующей гибели клетки. Исследования также показывают, что серебряные наночастицы взаимодействуют с интегральными мембранными белками, включая транспортные белки и ионные каналы, вызывая денатурацию клеточных структур. Кроме того, AgNPs способны связываться с атомами серы в ферментах и сульфгидрильными группами белков, расположенных на поверхности бактериальной клетки [76].

В исследованиях AgNP, опосредованных растениями, был оценен широкий спектр клинически значимых и пищевых патогенов. Часто тестируемые микроорганизмы включают *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Bacillus subtilis, Enterococcus faecium, Listeria monocytogenes* и *Pseudomonas aeruginosa*, а также представителей семейства *Enterobacteriaceae*, таких как *Klebsiella* spp. и виды *Salmonella* [77-79]. Антибактериальную эффективность обычно оценивают с помощью диффузионного анализа в агаре, измерения минимальной ингибирующей концентрации (МИК) и минимальной бактерицидной концентрации (МБК) [80-82]. Данные диаметры зон ингибирования и значения МПК значительно различаются в зависимости от растительного источника, используемого для синтеза наночастиц, и физико-химических свойств полученных AgNP.

Кинетика высвобождения ионов $Ag^+$ является одним из основных факторов, определяющих антимикробную эффективность и цитотоксичность серебряных нанокомпозитов. Ионы $Ag^+$ высвобождаются в результате постепенного окисления металлического серебра, при этом скорость их образования и диффузии зависит от размера и морфологии наночастиц, состояния их поверхности, состава стабилизирующего покрытия и матрицы нанокомпозита, а также от pH и состава окружающей среды. Для применения при лечении ран предпочтительным является контролируемое и постепенное высвобождение $Ag^+$, позволяющее поддерживать эффективную локальную концентрацию серебра в течение необходимого периода и уменьшать риск его накопления до цитотоксических уровней.

При этом достижение терапевтической концентрации $Ag^+$ без повреждения клеток кожи определяется наличием определенного терапевтического окна. Концентрации, эффективные против патогенных микроорганизмов, могут оказывать различное влияние на фибробласты и

кератиноциты в зависимости от продолжительности воздействия и особенностей конкретного нанокомпозита. Поэтому оптимизация состава серебряных нанокомпозитов должна быть направлена на обеспечение достаточной антимикробной активности при минимальном воздействии на клетки, участвующие в регенерации тканей. В связи с этим при оценке перспективности таких материалов необходимо учитывать не только суммарное количество высвобожденного серебра, но и динамику высвобождения $Ag^+$ во времени в сочетании с показателями антимикробной активности и клеточной жизнеспособности.

Серебряные наночастицы (AgNPs), синтезированные с использованием методов «зеленого» синтеза, демонстрируют значительный потенциал для применения в экологическом и промышленном секторах. Использование растительных экстрактов в качестве восстановителей и стабилизаторов при синтезе наночастиц представляет собой экологически безопасную, экономически эффективную и малотоксичную альтернативу традиционным химическим и физическим методам получения наноматериалов. Данный подход способствует снижению энергозатрат и минимизации образования опасных побочных продуктов, что делает его перспективным для масштабируемого промышленного производства.

Растительно-опосредованные AgNPs находят применение в технологиях очистки воды и сточных вод [83], производстве антимикробных текстильных материалов [67], упаковки пищевых продуктов [84], а также в системах дезинфекции поверхностей [85]. Высокая антимикробная активность и каталитические свойства серебряных наночастиц обеспечивают эффективное подавление микробного загрязнения в промышленных, медицинских и общественных средах. Кроме того, способность AgNPs взаимодействовать с широким спектром микроорганизмов делает их перспективными компонентами функциональных покрытий и композитных материалов.

**Заключение**

Зеленый синтез серебряных наночастиц представляет собой одно из наиболее перспективных направлений современной нанотехнологии, сочетающее эффективность получения функциональных наноматериалов с принципами экологической безопасности и устойчивого развития. Использование растительных экстрактов и биологических компонентов в процессах синтеза позволяет получать биосовместимые AgNPs с выраженными антимикробными свойствами при минимизации токсичных побочных продуктов и энергозатрат.

Интеграция серебряных наночастиц с различными сорбентами и матричными материалами способствует повышению их коллоидной стабильности, предотвращению агрегации и обеспечению контролируемого высвобождения ионов серебра. Такие нанокомпозитные системы характеризуются улучшенными эксплуатационными и биологическими свойствами, что значительно расширяет возможности их практического применения.

Серебросодержащие нанокомпозиты обладают высоким потенциалом в биомедицинской сфере, включая создание антибактериальных покрытий, раневых повязок, диагностических платформ, сенсорных систем и носителей для адресной доставки лекарственных препаратов. Высокая антимикробная активность AgNPs в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов делает их перспективными компонентами материалов нового поколения для профилактики и лечения инфекционных заболеваний.

Несмотря на достигнутые успехи, дальнейшее развитие данной области требует решения ряда научных и технологических задач, связанных со стандартизацией методов синтеза, оценкой токсикологической безопасности, изучением долгосрочного воздействия наночастиц на биологические системы и окружающую среду, а также обеспечением воспроизводимости и масштабируемости производственных процессов. Совершенствование зеленых методов синтеза и разработка безопасных и эффективных нанокомпозитных систем открывают широкие перспективы для внедрения серебряных наноматериалов в медицинскую, экологическую и промышленную практику.

**Список литературы**

1. Strategies for antidepressants extraction from biological specimens using nanomaterials for analytical purposes: A review / Kh. Murtada et al // Microchemical Journal. – 2019, № 150.

2. Dakova I. Polymeric Materials in Speciation Analysis Based on Solid Phase Extraction / I. Dakova, T. Yordanova, I. Karadjova // Preprints.org. – 2023. https://doi.org/10.20944/preprints202311.0998.v1.
3. Djerahov L. Self-standing chitosan film loaded with silver nanoparticles as a tool for selective determination of Cr(VI) by ICP-MS /L. Djerahov, P. Vasileva, I. Karadjova // Microchemical Journal. – 2016. – № 129. https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.06.007.
4. Poskus V. Silver-coated monolithic silica column for separation of trans fatty acids / V. Poskus, V. Vickackaite // Separation Science Plus. – 2018. https://doi.org/10.1002/sscp.201800115.
5. Poskus V. Silver-coated monolitic silica column for separation of benzo[a]pyrene from petroleum / V. Poskus, V. Vickackaite, J. Rokaite // Chemija. – 2021. – № 32(2). https://doi.org/10.6001/chemija.v32i2.4432.
6. Returning to Nature for the Design of Sorptive Phases in Solid-Phase Microextraction / G. Mafra et al // Separations. – 2020. – № 7(1). https://doi.org/10.3390/separations7010002.
7. Advances in organic–inorganic hybrid sorbents for the extraction of organic and inorganic pollutants in different types of food and environmental samples / Ng Nyuk-Ting et al. – 2018. – № 1(1). https://doi.org/10.1002/jssc.201700689.
8. Silver Nanoparticles as a New Generation of Antimicrobial Prophylaxis / I. Garipov et al // Journal of Siberian Federal University Biology. – 2019. – № 12(3). https://doi.org/10.17516/1997-1389-0301.
9. Green nanoscience for healthcare: Advancing biomedical innovation through eco-synthesized nanoparticle / A. Ayub et al // Biotechnology Reports. – 2025. – № 47. https://doi.org/10.1016/j.btre.2025.e00913.
10. Tasleem M. Design of Short Peptides for the Reduction of Silver Ions and Stabilization of Nanocomposites in Combating Bacterial Infections / M. Tasleem, A.M. Matouk, M. Abbas // ChemBioChem. – 2025. – № 26(11): e202500122. https://doi.org/10.1002/cbic.202500122.
11. Marpu S.B. Shining Light on Chitosan: A Review on the Usage of Chitosan for Photonics and Nanomaterials Research / S.B. Marpu, E.N. Benton Shining // IJMS. – 2018. – № 19(6). https://doi.org/10.3390/ijms19061795.
12. Pedroso-Santana S. The Use of Capping Agents in the Stabilization and Functionalization of Metallic Nanoparticles for Biomedical Applications / S. Pedroso-Santana, N. Fleitas-Salazar // Particle & Particle Systems Characterization. – 2022. – № 40 (2). https://doi.org/10.1002/ppsc.202200146.
13. Potential Theranostics Application of Bio-Synthesized Silver Nanoparticles (4-in-1 System) / S. Mukherjee et al // Theranostics. – 2014. – № 4(3). https://doi.org/10.7150/thno.7819.
14. Silver Micro-Nanoparticle-Based Nanoarchitectures: Synthesis Routes, Biomedical Applications, and Mechanisms of Action / Md A. Wahab et al // Polymers. – 2021. – № 13(17). https://doi.org/10.3390/polym13172870.
15. Synthesis of Silver Nanoparticles from the Aqueous Extract of Leaves of Ocimum sanctum for Enhanced Antibacterial Activity / C. Ramteke et al // Journal of Chemistry. – 2012. – № 1. https://doi.org/10.1155/2013/278925.
16. Bio-Fabrication of Silver Nanoparticles Using Citrus aurantifolia Fruit Peel Extract (CAFPE) and the Role of Plant Extract in the Synthesis / T. Mustapha et al // Plants. – 2023. – № 12(8). https://doi.org/10.3390/plants12081648.
17. Study on Critical Micelle Concentration Influence in Green Synthesis of Silver Nanoparticles Assisted by Sapindus mukorossi Aqueous Extract / R.L. Olteanu et al // Rev. Chim. – 2018. – № 69(6). https://doi.org/10.37358/rc.18.6.6321.
18. A Review on Bioinspired and Green Synthesis of Silver Nanoparticles with Their Antimicrobial Activity / S. Roy et al // Journal of Survey in Fisheries Sciences. – 2023. – № 6. https://doi.org/10.53555/sfs.v10i1s.2147.
19. Akhtar M.S. Biogenic Synthesis of Metallic Nanoparticles by Plant Extracts. ACS Sustainable Chem /M.S. Akhtar, J. Panwar, Y.S. Yun // Eng. – 2013. – № 1(6). https://doi.org/10.1021/sc300118u.
20. Factors Influencing the Green Synthesis of Metallic Nanoparticles Using Plant Extracts: A Comprehensive Review / A. Azad et al // Pharmaceutical Fronts. – 2023. – № 05(03). https://doi.org/10.1055/s-0043-1774289.
21. Selection of Suitable Biological Method for the Synthesis of Silver Nanoparticles / M.A. Sabri et al // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2016. – № 6. https://doi.org/10.5772/62644.

22. Antibacterial and antioxidant potential analysis of Verbascum sinaiticum leaf extract and its synthesized silver nanoparticles / J.M. Geyesa et al // Heliyon. – 2024. – № 10(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24215.
23. A Review on Different Plants Extract Mediated Silver Nanoparticles: Preparation, Antimicrobials, and Antioxidant / N.A. Negm et al // Egyptian Journal of Chemistry. – 2021. – № 65(5) https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.99747.4637.
24. One-pot phytosynthesis of nano-silver from *Mentha longifolia* L.: their characterization and evaluation of photodynamic potential / B. Javed et al // Materials Research Express. – 2020. – № 7(5). https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab903b.
25. Ahsan A. Phytogenic Silver Nanoparticles Derived from Ricinus communis and Aloe barbadensis: Synthesis, Characterization, and Evaluation of Biomedical Potential / A. Ahsan, G. Gao, W. Tian // Bioengineering. – 2025. – № 12(11). https://doi.org/10.3390/bioengineering12111273.
26. Biosynthesis of Silver Nanoparticles from Eucalyptus corymbia Leaf Extract at Optimized Conditions / M.Jo. Sila et al // NHC. – 2019. – № 25. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/nhc.25.32.
27. Methylene Blue Dye Degradation Using Silver Nanoparticles Synthesized from Andographis Paniculata Leaves Extract / N. Noorafsha et al // JPRI. – 2021. – № 33 (47B). https://doi.org/10.9734/jpri/2021/v33i47b33103.
28. Ghaffari-Moghaddam M. Plant mediated green synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles using Crataegus douglasii fruit extract / M. Ghaffari-Moghaddam, R. Hadi-Dabanlou //Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Т. 20, № 2. – P. 739-744.
29. Biosynthesis, characterisation and anti-bacterial effect of plant-mediated silver nanoparticles using Artemisia nilagirica / M. Vijayakumar et al // Industrial crops and products. – 2013. – Т. 41. – P. 235-240.
30. Green synthesis of silver nanoparticles by using Grape / Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. – 2013. – Т. 4. – №. 1. – С. 1271-1278.
31. Roy K. Green synthesis of silver nanoparticles by using Grape / PC, Roy K. Biswas S. // Res. J. Pharm. Biol. Chem. – 2013. – Sci 4.1. – P. 1271-1278.
32. Microwave assisted green synthesis of silver nanoparticles using Stigmaphyllon littorale leaves, their characterization and anti-microbial activity / K.R. Kudle et al // International Journal of Nanomaterials and Biostructures. – 2013. – Т. 3, № 1. – P. 13-16.
33. Efficacy of plant-mediated synthesized silver nanoparticles against Sitophilus oryzae / A.A. Zahir et al // Journal of Biopesticides. – 2012. – Т. 5. – P. 95.
34. Biosynthesis of Cu, ZVI, and Ag nanoparticles using Dodonaea viscosa extract for antibacterial activity against human pathogens / S.C.G. Kiruba Daniel et al // Journal of nanoparticle research. – 2013. – Т. 15, № 1. – P. 1319.
35. Biosynthesis of silver nanoparticles using Cucumis prophetarum aqueous leaf extract and their antibacterial and antiproliferative activity against cancer cell lines / P.R. Meena et al // ACS omega. – 2020. – Т. 5, № 10. – P. 5520.
36. Effect of biologically synthesized silver nanoparticles on human cancer cells / A. Mishra et al // Science of Advanced Materials. – 2012. – Т. 4, № 12. – P. 1200-1206.
37. Enhanced anti-bacterial activity of biogenic silver nanoparticles synthesized from Terminalia mantaly extracts / M.S. Majoumouo et al. // International journal of nanomedicine. – 2019. – P. 9031-9046.
38. Kathiravan V. Synthesis of silver nanoparticles from Melia dubia leaf extract and their in vitro anticancer activity / V. Kathiravan, S. Ravi, S. Ashokkumar // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2014. – Т. 130. – P. 116-121.
39. Characterization, antibacterial, antioxidant, antidiabetic, anti-inflammatory and antityrosinase activity of green synthesized silver nanoparticles using Calophyllum tomentosum leaves extract / M. Govindappa et al // Results in Physics. – 2018. – Т. 9. – P. 400-408.

40. Exploiting antidiabetic activity of silver nanoparticles synthesized using Punica granatum leaves and anticancer potential against human liver cancer cells (HepG2) / R.G. Saratale et al // Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology. – 2018. – Т. 46, № 1. – P. 211-222.
41. Pirtarighat S. Biosynthesis of silver nanoparticles using Ocimum basilicum cultured under controlled conditions for bactericidal application / S. Pirtarighat, M. Ghannadnia, S. Baghshahi // Materials Science and Engineering. – 2019. – № 98. – P. 250-255. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.090, 2-s2.0-85059348273.
42. Phytosynthesis of gold and silver nanoparticles enhance in vitro antioxidant and mitostimulatory activity of Aconitum toxicum Reichenb. rhizomes alcoholic extracts / N.A. Sutan et al // Materials Science and Engineering. – 2018. – № 93. – P. 746-758. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.042, 2-s2.0-85051968727.
43. Shape- and size-controlled synthesis of silver nanoparticles using Aloe vera plant extract and their antimicrobial activity / K. Logaranjan et al // Nano Res. Lett. – 2016. – № 11. – P. 520.
44. Rajakumar G. Larvicidal activity of synthesized silver nanoparticles using Eclipta prostrata leaf extract against filariasis and malaria vectors / G. Rajakumar, A.A. Rahuman // Acta Tropica. – 2011. – № 118. – P. 196-203.
45. Philip D. Green synthesis of gold and silver nanoparticles using Hibiscus rosa sinensis / D. Philip // Phys. E Low Dimens. Syst. Nanostruct. – 2010. – № 42. – P. 1417-1424.
46. Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Eucalyptus leucoxylon Leaves Extract and Evaluating the Antioxidant Activities of the Ex tract / M. Rahimi-Nasrabadi et al // Natural Product Research. – 2014. – № 28. – P. 1964-1969. https://doi.org/10.1080/14786419.2014.918124.
47. Raut R.W. Photosensitized Synthesis of Silver Nanoparticles Using Wi thania somnifera Leaf Powder and Silver Nitrate / R.W. Raut, V.D. Mendhulkar, S.B. Kashid // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. – 2014. – № 132. – P. 45-55. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.02.001.
48. Bio synthesis of Silver Nanoparticles from Tribulus terrestris and Its Antimicrobial Activity: A Novel Biological Approach / V. Gopinath et al // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2012. – № 96. – P. 69-74. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.03.023.
49. Greener synthesis of chemical compounds and materials / O.V. Kharissova et al // R. Soc. open sci. – 2019. – № 6(11). http://dx.doi.org/10.1098/rsos.191378.
50. Chitosan-Based Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation of Mercury Pollution / G.M. Confidence et al // Polymers. – 2023. – № 15(3). – P. 482. https://doi.org/10.3390/polym15030482.
51. Current Research on Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Applications / S. Dawadi Katuwal et al // Journal of Nanomaterials. – 2021. – № 6. https://doi.org/10.1155/2021/6687290.
52. An antibacterial submicron fiber mat with in situ synthesized silver nanoparticles / P.J. Rivero et al // J of Applied Polymer. Sci. – 2012. – № 126(4). https://doi.org/10.1002/app.36886.
53. Anis Sh.F. Functional materials in desalination: A review / Sh.F. Anis, R. Hashaikeh, N. Hilal // Desalination. – 2019. – № 468. https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114077.
54. Recent Advances in Porous Bio-Polymer Composites for the Remediation of Organic Pollutants / N.S. Tadayoni et al // Polymers. – 2024. – № 16(11). https://doi.org/10.3390/polym16111543.
55. Size-Controlled Silver Nanoparticles Supported by Pyrolytic Carbon from Microcrystalline Cellulose / D. Huang et al // IJMS. – 2023. – № 24(19). https://doi.org/10.3390/ijms241914431.
56. Iodine solid sorbent design: a literature review of the critical criteria for consideration /B. Riley et al // Mater. Adv. – 2024. – № 5. https://doi.org/10.1039/d4ma00266k.
57. Plant-Based Extracts as Reducing, Capping, and Stabilizing Agents for the Green Synthesis of Inorganic Nanoparticles / Z. Villagran et al // Resources. – 2024. – № 13(6). https://doi.org/10.3390/resources13060070.
58. Rus A. Silver Nanoparticles (AgNP) impregnated filters in drinking water disinfection / A. Rus, D. Leordean, P. Berce // MATEC Web Conf. – 2017. – № 137(6). https://doi.org/10.1051/matecconf/201713707007.
59. Recent Advances in the Removal of Radioactive Iodine and Iodide from the Environment / S. Patil et al // ACS EST Water. – 2023. – № 3(8). https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00111.

60. Hydrogel Based on Cellulose and Mangosteen Rind Extract With Antibacterial Activity: Preparation and Characterization / T. Nguyen et al // Biopolymers. – 2025. – № 116(3):e70024. https://doi.org/10.1002/bip.70024.
61. Recent Advances in Adsorptive Nanocomposite Membranes for Heavy Metals Ion Removal from Contaminated Water: A Comprehensive Review / F. Damiri et al // Materials. – 2022. – № 15(5). https://doi.org/10.3390/ma15155392.
62. Cellulose-Based Metallogels - Part 3: Multifunctional Materials / A. Mikhailidi et al // Gels. – 2023. – № 9(11). https://doi.org/10.3390/gels9110878.
63. Ahmed A. Analyzing formation of silver nanoparticles from the filamentous fungus Fusarium oxysporum and their antimicrobial activity / A. Ahmed, H. Hamzah, M. Maaroof // Turk J Biol. – 2018. – № 42(1). – P. 54-62. https://doi.org/10.3906/biy-1710-2.
64. Aloe vera extract functionalized zinc oxide nanoparticles as nanoantibiotics against multi-drug resistant clinical bacterial isolates / K. Ali et al // J. Colloid Interface Sci. – 2016. – № 472. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.03.021.
65. Verma A. Controllable synthesis of silver nanoparticles using Neem leaves and their antimicrobial activity / A. Verma, M.S. Mehata // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2016. – № 9(1). https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.11.001.
66. Lalitha A. Green synthesis of silver nanoparticles from leaf extract Azhadirachta indica and to study its anti-bacterial and antioxidant property / A. Lalitha, R. Subbaiya, P. Ponmurugan // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2013. – № 2. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.006.
67. Green synthesis of silver nanoparticles using *Azadirachta indica* aqueous leaf extract / S. Ahmed et al // J. Radiat. Res. Appl. Sci. – 2016. – № 9. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.006.
68. Thepsiri J. Green synthesis of silver nanoparticles using Ageratum conyzoides for activated carbon compositing to prepare antimicrobial cotton fabric / J. Thepsiri, S. Audtarat, Th. Dasri // Nanotechnology Reviews. – 2025. – № 14. – P. 20250181. https://doi.org/10.1515/ntrev-2025-0181.
69. Silver nanoparticles with multimodal biological activities integrated into advanced material platforms for chronic wound management / J. Guan et al // Nanoscale. – 2025. – № 17(32). https://doi.org/10.1039/d5nr02066b.
70. Silver nanoparticle-infused hydrogels for biomedical applications: A comprehensive review / J. Calsis et al // Journal of the Chinese Chemical Society. – 2024. – № 72(2). https://doi.org/10.1002/jccs.202400303.
71. Sustainable Synthesis of Novel Green-Based Nanoparticles for Therapeutic Interventions and Environmental Remediation / S. Singh et al // Acs Synthetic Biology. – 2024. – № 13(7). https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00206.
72. Green-synthesized silver nanoparticle hydrogels for biofilm-infected wounds: Bridging sustainability and clinical translation / R.F. Muslim et al // Frontiers in Pharmacology. – 2025. – № 16. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1694144.
73. Gurunathan S. Biologically synthesized silver nanoparticles enhances antibiotic activity against Gram-negative bacteria / S. Gurunathan // J. Ind. Eng. Chem. – 2015. – № 29. https://doi: 10.1016/j.jiec.2015.04.005.
74. Antibacterial properties and mechanism of graphene oxide-silver nanocomposites as bactericidal agents for water disinfection / B. Song et al // Biochemistry and Biophysics. – 2016. – № 604. https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.018.
75. Plant extract preparation and green synthesis of silver nanoparticles using Swertia chirata: Characterization and antimicrobial activity against selected human pathogens / M.A. Shereen et al // Heliyon. – 2024. – №10. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28038.
76. Silver Nanoparticles and Silver Ions as Potential Antibacterial Agents / A. Hamad et al // Organomet. Polym. Mater. – 2020. – № 30. https://doi.org/10.1007/s10904-020-01744-x.
77. Assessment of antioxidant, cytotoxicity, antibacterial, antifungal, and cutaneous wound healing activities of green synthesized manganese nanoparticles using Ziziphora clinopodioides Lam leaves under in vitro and in vivo condition / B. Mahdavi et al // Appl. Organomet. Chem. – 2021. – № 35. https://doi.org/10.1002/aoc.5248.
78. Bose D. Biogenic synthesis of silver nanoparticles using guava (*Psidium guajava*) leaf extract and its antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa* / D. Bose, S. Chatterjee // Appl Nanosci. – 2015. – № 6. https://doi.org/10.1007/s13204-015-0496-5.

79. Patel A. Metal nanoparticles produced by plants with antibacterial properties against Staphylococcus aureus / A. Patel // Braz. J. Biol. – 2022. – № 6. – P. 82:e268052. https://doi.org/10.1590/1519-6984.268052.
80. Green Biosynthesis, Antioxidant, Antibacterial, and Anticancer Activities of Silver Nanoparticles of Luffa acutangula Leaf Extract / D. Nallappan et al // BioMed Research International. – 2021. – № 29. – P. 5125681. https://doi.org/10.1155/2021/5125681.
81. Patil S.P. Psidium guajava leaves assisted green synthesis of metallic nanoparticles: a review /S.P. Patil, P.M. Rane // Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci. – 2020. – № 9. https://doi.org/10.1186/s43088-020-00088-2.
82. Green Synthesis of Metallic Nano-Particles and Their Potential in Bio-Medical Applications / T. Shafiq et al // Nano Biomedicine and Engineering. – 2021. – № 13(2). https://doi.org/10.5101/nbe.v13i2.p191-206.
83. Bioactive Compounds from Guava Leaves (Psidium guajava L.): Characterization, Biological Activity, Synergistic Effects, and Technological Applications / H. Huynh et al // Molecules. – 2025. – № 30(6). https://doi.org/10.3390/molecules30061278.
84. Tarannum N. Facile green synthesis and applications of silver nanoparticles: a state-of-the-art review / N. Tarannum, Divya, Y.K. Gautam // RSC Adv. – 2019. – № 9(60). https://doi.org/10.1039/C9RA04164H.
85. Comprehensive Review of Silver Nanoparticles in Food Packaging Applications / E.E. Okur et al // Int. J. Mol. Sci. – 2025. – № 26(20). https://doi.org/10.3390/ijms26209842.
86. Green synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial effects / X. Xin et al // Front. Chem. Eng. Sec. Sustainable Process Engineering. – 2022. – № 4. https://doi.org/10.3389/fceng.2022.941240.

***Сведения о финансировании***

*Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR27199301 «Разработка климатически-нейтральных новых материалов, передовых технологиий и методов для защиты окружающей среды от антропогенных загрязнений и изменения климата»).*

**Ұ. Әмзеева[1,2*], А. Нурлыбек[2], Қ. Асқаруұлы[1], Ж. Токтарбай[1], С. Азат[1]**
[1]Satbayev University, 050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22
[2]Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Әл-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

## КҮМІС НАНОКОМПОЗИТТЕРІНІҢ ЖАСЫЛ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ЖАРАЛАРДЫ ЕМДЕУДЕГІ ҚОЛДАНЫЛУЫ

*Бұл мақалада күміс нанобөлшектерін (AgNPs) «жасыл» синтездеудің қазіргі заманғы тәсілдері, сондай-ақ сорбенттердің негізгі түрлері, оларды модификациялау әдістері және биомедициналық қолдану перспективалары қарастырылған. Күміс нанобөлшектері (AgNPs) бактерияға қарсы, қабынуға қарсы қасиеттері айқын көрінетін ең перспективалы наноматериалдар класының бірі болып табылады. Алайда оларды алудың дәстүрлі физикалық және химиялық әдістері улы реагенттерді қолданумен, жоғары температуралармен және едәуір энергетикалық шығындармен байланысты, бұл олардың экологиялық және практикалық қолданылуын шектейді.*

*Осыған байланысты соңғы жылдары өсімдік экстракттарын, микроорганизмдерді және табиғи биополимерлерді қолдануға негізделген «жасыл» синтез тәсілдері қарқынды дамуда. Өсімдіктердің биологиялық белсенді қосылыстары, соның ішінде полифенолдар, флавоноидтар, терпеноидтар, қанттар және ақуыздар, күміс нанобөлшектерін түзу кезінде табиғи тотықсыздандырғыш әрі тұрақтандырғыш агенттер ретінде қызмет етеді. AgNPs-ті әртүрлі сорбциялық материалдарға иммобилизациялау ерекше қызығушылық тудырады, себебі бұл бөлшектердің агрегациясын азайтып, олардың коллоидтық тұрақтылығын арттыруға және күміс иондарының бақыланатын босап шығуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сорбенттер негізіндегі күміс нанокомпозиттері жараларды емдеуге арналған таңғыштарда, дәрілік заттарды жергілікті жеткізу жүйелерінде, диагностикалық сенсорларда және бактерияға қарсы материалдарда жоғары әлеуетке ие.*

*Алынған нәтижелер «жасыл» синтез әдістері мен сорбциялық матрицаларды қолдану биомедициналық қасиеттері жақсартылған, экологиялық қауіпсіз және функционалды белсенді наноматериалдарды жасауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.*

***Түйін сөздер:*** *күміс нанобөлшектері, жасыл синтез, нанокомпозиттер, сорбенттер, биомедицина, бактерияға қарсы материалдар.*

**U. Amzeyeva[1,*], A. Nurlybek[2], K. Askaruly[1], Zh. Toktarbay[1], S. Azat[1]**
[1]Satbayev University, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, , Satbayev st. 22
[2]Al Farabi Kazakh National University, 050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, al-Farabi Ave., 71
*e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru

## GREEN SYNTHESIS OF SILVER NANOCOMPOSITES AND THEIR APPLICATION IN WOUND HEALING

*In this review, modern approaches to the green synthesis of silver nanocomposites are discussed, along with the main types of sorbents, their modification methods, and prospects for biomedical applications. Silver nanoparticles (AgNPs) are among the most promising classes of nanomaterials due to their pronounced antibacterial, anti-inflammatory properties. However, conventional physical and chemical methods of their synthesis involve the use of toxic reagents, high temperatures, and significant energy consumption, which limits their environmental sustainability and practical applicability.*

*In recent years, green synthesis approaches based on the use of plant extracts, microorganisms, and natural biopolymers have been actively developed. Bioactive plant compounds, including polyphenols, flavonoids, terpenoids, sugars, and proteins, act as natural reducing agents and simultaneously serve as stabilizing agents during the formation of silver nanoparticles.*

*Particular interest lies in the immobilization of AgNPs on various sorbent materials, which allows the reduction of particle aggregation, improves their colloidal stability, and ensures controlled release of silver ions. Silver nanocomposites based on sorbents demonstrate high potential for applications in wound dressings, local drug delivery systems, diagnostic sensors, and antibacterial materials.*

*The obtained results indicate that the use of green synthesis methods and sorbent matrices enables the development of environmentally safe and functionally active nanomaterials with enhanced biomedical properties.*

***Key words:*** *silver nanoparticles, green synthesis, nanocomposites, sorbents, biomedicine, antibacterial materials.*

### Сведения об авторах

**Ұлпан Әмзеева*** – Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

**Алия Нурлыбек** – PhD докторант, Казахский Национального Университета имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: nurl_al@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.

**Кыдыр Аскарулы** – PhD, ассоц.профессор, Сатбаев Университет; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.

**Жексенбек Токтарбай** – PhD, ассоц.профессор, Сатбаев Университет, научный сотрудник лаборатории инженерного профиля; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.

**Сейтхан Азат** – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының жетекшісі, PhD, профессор; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

### Авторлар туралы мәліметтер

**Ұлпан Әмзеева*** – Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері, Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

**Алия Нурлыбек** – PhD докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurl_al@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.

**Кыдыр Аскарулы** – PhD, ассоц.профессор, Сәтбаев Университеті; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.

**Жексенбек Тоқтарбай** – PhD, қауым.профессор, Сәтбаев Университеті, Инженерлік-бейінді зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.

**Сейтхан Азат** – Сатбаев Университет, Руководитель лаборатории инженерного профиля, PhD, профессор; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-4131-0905.

### Information about the authors

**Ulpan Amzeyeva*** – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ulpan-92.kz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7193-4404.

**Aliya Nurlybek** – PhD student, Scientific Researcher of the Research Center for Medicinal Plants, Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurl_al@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9797-284X.
**Kydyr Askaruly** – PhD, Associate Professor, Satbayev University; e-mail: k.askaruly@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8998-0409.
**Zhexenbek Toktarbay** – Satbayev University, researcher at the Engineering Laboratory; e-mail: zhexenbek.toktarbay@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4502-5503.
**Seitkhan Azat** – Satbayev University, Head of the Laboratory of Engineering Profile, PhD, professor; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4131-0905.

*Поступила в редакцию 01.06.2026*
*Поступила после доработки 04.09.2026*
*Принята к публикации 07.09.2026*

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-88

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 70.25.17

**А.Р. Кажмуратов***, **И.О. Сапаргали**, **Е.Н. Есжан**, **М.С. Кунарбекова, М. Токтар**
Satbayev University, 050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22
*e-mail: aidynkazhmuratov@gmail.com

# ВОЗДЕЙСТВИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ВОДНУЮ СРЕДУ И ЕЁ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ: ОБЗОР

***Аннотация:*** *В статье представлен обзор современных возможностей холодной атмосферной плазмы (ХАП) для очистки воды. Актуальность связана с загрязнением водных объектов устойчивыми антропогенными веществами – фармацевтическими соединениями, генами антибиотикорезистентности (ARG), микропластиком, ионами тяжёлых металлов и синтетическими красителями. Рассмотрены физико-химические механизмы воздействия ХАП: генерация активных форм кислорода и азота (RONS), УФ-излучение, импульсные электрические поля, электрогидравлическая кавитация, а также концепция плазмоактивированной воды. Описаны основные конфигурации плазменных реакторов - диэлектрический барьерный разряд (ДБР), атмосферная плазменная струя (АППС) и электрогидравлический разряд (ЭГД) - с их сравнительными характеристиками. Проанализирована эффективность ХАП для четырёх классов загрязнителей. Для антибиотиков и ARG степень удаления достигает 72-99% и выше, для микропластика показаны поверхностное окисление и агломерация с одновременной деградацией сорбированных поллютантов, для тяжёлых металлов – декомплексация органо-металлических комплексов и последующее осаждение, для синтетических красителей - обесцвечивание более чем на 95%. Следует подчеркнуть, что для тяжёлых металлов и микропластика ХАП обеспечивает преимущественно трансформацию химической формы и агрегатного состояния загрязнителя, тогда как его фактическое удаление из воды достигается на последующих стадиях осаждения, коагуляции или фильтрации; безвозвратная деструкция вплоть до минерализации характерна главным образом для органических загрязнителей (антибиотики, красители). Проведён сравнительный анализ ХАП с традиционными методами (хлорирование, озонирование, УФ, биологическая очистка). Показано, что основное преимущество ХАП - синергетический многофакторный механизм, позволяющий одновременно деградировать разнородные загрязнители в сложных водных матрицах, что недостижимо для монофакторных традиционных технологий.*

***Ключевые слова:*** *тяжёлые металлы, микропластик, антибиотики, очистка воды, холодная плазма, ДБР-реактор, RONS, сточные воды.*

## ВВЕДЕНИЕ

По данным ООН, к 2030 году глобальный дефицит пресной воды может достичь 40% от текущих потребностей [1]. Совокупное влияние индустриализации, демографического роста, изменения климата и интенсификации агропромышленного комплекса систематически ухудшает качество водных источников за счёт поступления устойчивых антропогенных

©А.Р. Кажмуратов, И.О. Сапаргали, Е.Н. Есжан, М.С. Кунарбекова, М. Токтар, 2026