

DOI: 10.7868/S3034574X26040038

Обзор

УДК 579.6

ПОТЕНЦИАЛ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЗЕЛЕННОГО СИНТЕЗА, В КАЧЕСТВЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ

О.И. Гулий*, О.А. Караваева, Л.А. Дыкман

*Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение
Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук»
(ИБФРМ РАН), Саратов, Российская Федерация*

**E-mail: gulyi_olga@mail.ru*

Аннотация. Возникновение лекарственной устойчивости у микробных клеток является серьезной проблемой общественного здравоохранения. Поэтому актуальным становится разработка новых альтернативных антибактериальных средств для борьбы с бактериями, обладающими множественной лекарственной устойчивостью. Стремительное развитие нанотехнологии и синтеза наночастиц способствовало появлению новых стратегий борьбы с микробными клетками. Особую ценность представляют наночастицы серебра, обладающие антибактериальной активностью. Для синтеза наночастиц применяются различные физические и химические методы с использованием токсичных реагентов, которые могут загрязнять окружающую среду, поэтому активно разрабатываются экономичные альтернативные процессы синтеза наноматериалов с применением биологических систем – биологический или «зеленый» синтез наночастиц. Для зеленого синтеза наночастиц могут применяться природные биологические источники, включая грибы, бактерии, растения, животные клетки, вирусы, и их метаболиты. Использование биологических объектов для создания неорганических наночастиц является относительно новым направлением в области биотехнологии. Зеленый синтез наночастиц благородных металлов – это обширная и развивающаяся область исследований. В работе представлены основные принципы технологии зеленого синтеза для получения наночастиц серебра, достоинства и недостатки ее применения. Обсуждаются перспективы применения наночастиц, полученных с применением технологии зеленого синтеза, в качестве противомикробных средств.

Ключевые слова: наночастицы серебра, зеленый синтез, микробные клетки, лекарственная устойчивость

Финансирование. «Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-44-02132).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка для цитирования: Гулий О.И., Караваева О.А., Дыкман Л.А. Потенциал серебряных наночастиц, полученных с привлечением технологии зеленого синтеза, в качестве антибактериальных препаратов. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 4. С. 534–555. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26040038>

DOI: 10.7868/S3034574X26040038

POTENTIAL OF SILVER NANOPARTICLES PRODUCED USING GREEN SYNTHESIS TECHNOLOGY AS ANTIBACTERIAL DRUGS

O.I. Guliy*, O.A. Karavaeva, L.A. Dykman

Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russian Federation

*E-mail: guliy_olga@mail.ru

Abstract. The emergence of drug resistance in microbial cells is a serious public health problem. Therefore, the development of new alternative antibacterial agents to combat multidrug-resistant bacteria is becoming increasingly important. The rapid development of nanotechnology and nanoparticle synthesis has facilitated the emergence of new strategies for combating microbial cells. Silver nanoparticles, which possess antibacterial activity, are particularly valuable. Nanoparticle synthesis involves various physical and chemical methods using toxic reagents that pollute the environment. Therefore, cost-effective alternative processes for synthesizing nanomaterials using biological systems—biological or “green” nanoparticle synthesis—are being actively developed. Natural biological sources, including fungi, bacteria, plants, animal cells, viruses, and their metabolites, can be used for green nanoparticle synthesis. The use of biological sources to create inorganic nanoparticles is a relatively new area of biotechnology. Green synthesis of noble metal nanoparticles is a vast and growing area of research. This paper presents the basic principles of green synthesis technology for producing silver nanoparticles, as well as the advantages and disadvantages of its application. The potential for using nanoparticles obtained using green synthesis technology as antimicrobial agents is discussed.

Keywords: silver nanoparticles, green synthesis, microbial cells, drug resistance

Funding. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 25-44-02132, <https://rscf.ru/en/project/25-44-02132/>).

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflict of interest.

Authors contribution. All authors made significant contributions to the development of the concept, the research, and the preparation of the article.

For Citation: Guliy O.I., Karavaeva O.A., Dykman L.A. Potential of Silver Nanoparticles Produced Using Green Synthesis Technology as Antibacterial Drugs. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(4): 534–555. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26040038>

Множественная лекарственная устойчивость является одной из наиболее серьезных проблем современной медицины. Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), с каждым годом количество бактерий, резистентных к антибиотикам, продолжает увеличиваться, угрожая возникновением эпидемий инфекций, не поддающихся стандартным методам лечения. Тенденция развития множественной лекарственной устойчивости наблюдается по всему миру [21,30,39]. Так, например, в странах Европы с 2007 г. наблюдается стабильное увеличение числа внутрибольничных и внебольничных инфекций, вызванных микроорганизмами с множественной лекарственной устойчивостью, на которые ежегодно приходится более 33000 смертей [20]. В США ежегодное число инфекций, обусловленных антибиотикорезистентностью бактерий, достигает 2 млн с летальными исходами для 29000 пациентов ежегодно [22]. Частота распространения штаммов с множественной устойчивостью к антибиотикам, включая наиболее важные — *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* — в отдельных регионах мира, по данным ВОЗ, достигает 70–80% [14]. Поэтому активно развиваются исследования, направленные на поиск новых противомикробных препаратов. Уникальную возможность в качестве противомикробных лекарств представляют наночастицы. Наночастицы — материалы, размеры которых варьируются от 1 до 100 нанометров. Они обладают уникальными оптическими, электронными, термическими и каталитическими свойствами. Каталитические наночастицы можно создавать на основе разных химических соединений. Так, например, в работе [47] сообщается, что более, чем 40 видов наноматериалов проявляют каталитическую активность, при этом особое внимание уделяется металлам (Fe, Co, Ni, Cu, Zn, V, Mn, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Ce, Pt, Au). Основные методы синтеза

наночастиц, включая биологические, химические и физические, суммированы в работах [31,41,69,70]. Благодаря последним достижениям синтеза, наночастицы стали перспективными платформами для создания антибактериальных препаратов. Особую ценность представляют наночастицы, полученные методом зеленого синтеза. Такие частицы обладают значительными преимуществами по сравнению с другими способами, поскольку отличаются низкой стоимостью, короткими сроками производства, безопасностью и возможностью контролировать объем продукции, что делает биообъекты привлекательной платформой для синтеза наночастиц. Термин «зеленая нанотехнология» относится к различным процедурам, которые устраняют или исключают опасные соединения для окружающей среды. Цель работы — показать перспективы использования наночастиц, синтезированных методом зеленого синтеза, в качестве противомикробных препаратов.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЗЕЛЕНОГО СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ

Зеленая технология синтеза наночастиц характеризуется использованием биовосстановителей, в качестве которых применяют биологически активные вещества (аминокислоты, моносахара, белки, полисахариды и др.), целые организмы, ткани, клетки или их компоненты. Разработка экологических процессов синтеза наночастиц с помощью методов зеленой химии превращается в важную отрасль нанотехнологий. Они обладают множеством преимуществ, таких как простота масштабирования процесса, экономическая эффективность, энергоэффективность, меньшая токсичность и т.д. [3, 19, 32]. Основные преимущества и недостатки различных методов синтеза наночастиц суммированы в табл. 1 [19].

Таблица 1. Основные различия методов синтеза наночастиц [19]

Table 1. Main differences between nanoparticle synthesis methods [19]

Химический синтез	«Зеленый» синтез	Физический синтез
Преимущества		
Высокая производительность	Экономически выгоден и прост в применении	Высокая производительность
Экономически выгодный	Использование возобновляемых ресурсов	Однородный размер и форма наночастиц
Возможность контролировать форму, размер и поверхность	Менее опасные побочные продукты	Высокоскоростной
Универсальность метода	Энергоэффективный	Масштабируемый метод

Таблица 1. Продолжение

Table 1. (Contd.)

Химический синтез	«Зеленый» синтез	Физический синтез
Недостатки		
Необходимость в высококачественных ресурсах и токсичных химикатах	Ограниченные знания о понимании механизмов	Высокий уровень образования отходов и ограниченное количество материалов
Опасные отходы	Масштабируемость	Энергоемкий
Низкая стабильность	Воспроизводимость	Низкая возможность регулировки размера и формы наночастиц

Биологические системы (растения, бактерии, дрожжи, грибы и клетки животных) способны превращать ионы неорганических металлов в металлические наночастицы за счет процесса восстановления, осуществляемого белками и другими метаболитами, которые содержатся в этих организмах. Такие методы биосинтеза наночастиц имеют определенные преимущества перед физическими и химическими методами синтеза. Зеленый синтез часто включает простые процедуры и дешевое сырье, что снижает производственные затраты. Сокращение отходов и опасных побочных продуктов также уменьшает затраты,

связанные с обработкой и утилизацией отходов. Проведение зеленого синтеза в мягких условиях снижает потребление энергии по сравнению с традиционными методами, использующими высокие температуры и давление [79]. Наночастицы, синтезированные зеленым методом, продемонстрировали значительный потенциал в широком спектре биомедицинских применений, они являются мощным инструментом для применения в качестве противомикробных препаратов. Схематическое представление процесса «зеленого» синтеза металлических наночастиц из различных живых организмов представлено на рис. 1 [4].

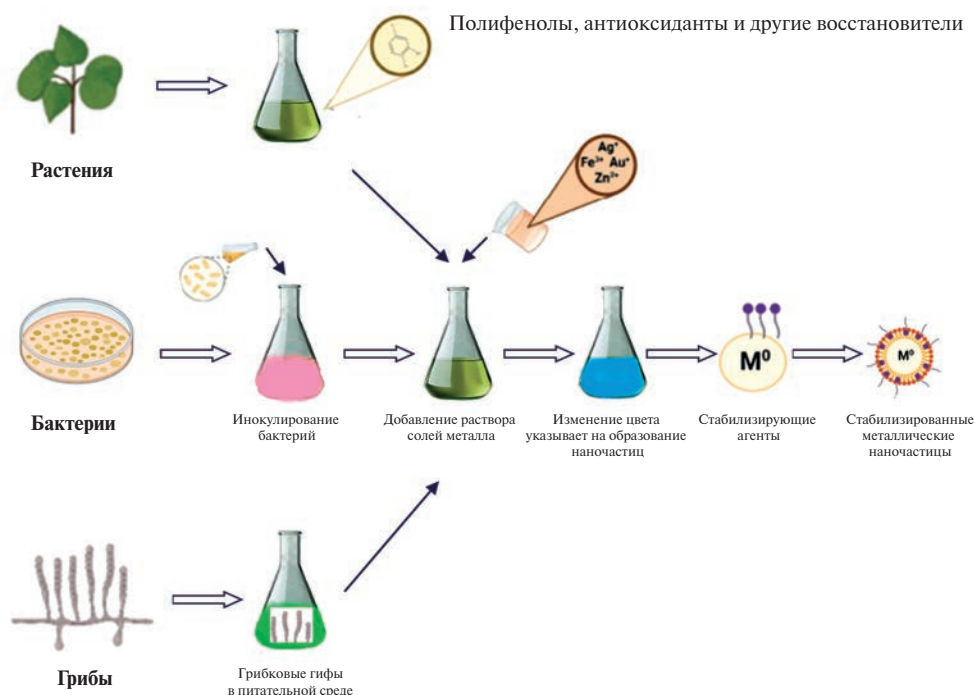


Рис. 1. Схематическое представление процесса «зеленого» синтеза металлических наночастиц из различных живых организмов [4]

Fig. 1. Schematic representation of the process of “green” synthesis of metal nanoparticles using various living organisms [4]

Экстракты растений широко используются в зеленом синтезе наночастиц благодаря богатому содержанию биоактивных соединений, таких как алкалоиды, флавоноиды, терпеноиды, фенольные производные. Эти природные соединения действуют как восстановители и стабилизирующие агенты. К основным типам растительных метаболитов, участвующих в синтезе металлических наночастиц, относятся терпеноиды (эвгенол); флавоноиды (лютеолин, кверцетин); восстанавливающая гексоза с открытой формой цепи; аминокислоты (триптофан и тирозин) и др. В процессе синтеза экстракты растений смешиваются с растворами солей металлов, при этом биоактивные соединения восстанавливают ионы металлов, образуя наночастицы, и предотвращают их агрегацию, покрывая и стабилизируя их. Перспективы использования растений для зеленого синтеза наночастиц суммированы в работах [15,18]. Процесс синтеза обычно происходит при комнатной температуре и не требует дополнительных химических веществ или больших энергетических затрат, что делает его одновременно экологически чистым и экономически эффективным.

Кроме высших растений для биосинтеза наночастиц используют зеленые, бурые и красные водоросли (*Pithophora*, *Ulva*, *Padina*, *Chondrus*, *Sargassum* и др.) или их экстракты. Биосинтез наночастиц с помощью водорослей является экологичным, экономичным, высокопродуктивным, быстрым и энергоэффективным методом [76]. Также для получения наночастиц предложено применять микроводоросли (*Chlorella*, *Spyrogira*, *Dunaliella*, *Dictyochloropsis* и др.) и цианобактерии (*Nostoc*, *Anabaena*, *Arthrospira* и др.). Синтез наночастиц при использовании микроводорослей происходит как внутри, так и вне клеток. Бесклеточные экстракты шире используются для синтеза, чем биомасса. Восстанавливающими агентами часто являются хлорофиллы и каротиноиды. Зачастую, получаемые при этом наночастицы показывали выраженную противоопухолевую активность [25].

Микроорганизмы и грибы также играют значительную роль в «зеленом» синтезе наночастиц, поскольку выделяют ферменты, белки и другие метаболиты, которые способствуют восстановлению и стабилизации наночастиц.

Микроорганизмы посредством специфики метаболических путей способны восстанавливать ионы металлов до наночастиц. Биологическое восстановление обычно происходит в мягких условиях, обеспечивая контролируемую среду синтеза, которая может производить наночастицы определенных размеров и форм. Наночастицы, полученные с применением микробных клеток, могут быть получены как в среде культивирования с бактериями, так и с использованием супернатанта, экзополисахаридов или ферментов, выделенных из клеток. Бактериальные клетки, как эффективные биофабрики, обладают значительной способностью к биовосстановлению ионов металлов, которые могут быть получены в виде нанокристаллов различной морфологии и размеров. Для биосинтеза

применяют бактерии различных родов — *Bacillus*, *Escherichia*, *Zooglea*, *Azospirillum*, *Azotobacter* и др. Некоторые из получаемых наночастиц обладают ярко выраженной бактерицидной, антибиопленочной и противогрибковой активностью. Синтез биологически полученных «зеленых» наночастиц на основе бактерий обладает преимуществами благодаря быстрому росту и размножению бактерий, а также их устойчивостью к экстремальным условиям [42].

Применение грибов для зеленого синтеза наночастиц обеспечивает высокую стабильность последних и хорошо подходит для внеклеточного масштабирования производства. Подобно зеленому синтезу на основе бактерий, наночастицы, полученные на основе грибов, также демонстрируют значительный потенциал в антимикробных применениях, включая как противогрибковую, так и антибактериальную активность. При внеклеточном биосинтезе наночастиц, особенно в случае грибов, выделяется множество восстанавливающих и стабилизирующих агентов, которые могут быть задействованы и влиять на форму и размер наночастиц [52].

Внешняя оболочка вирусов, состоящая из белкового капсида, образует реактогенную поверхность, способную взаимодействовать с ионами металлов, что приводит к образованию наночастиц. Для зеленого синтеза использовали бактериофаг M13, вирус табачной мозаики и др. [58].

Отдельным направлением является биосинтез наночастиц в клетках млекопитающих, для которого используют как нормальные (фибробласты, эпителиальные клетки, клетки микроглии и др.), так и неопластические клетки и выделенные клеточные метаболиты. Данный синтез пользуется популярностью из-за высокой биосовместимости и целевой специфичности, а также меньшими побочными эффектами по сравнению с традиционными синтетическими подходами. Более того, данный синтез прост, экономичен и экологичен [66]. Чаще для биосинтеза наночастиц используют клетки млекопитающих, реже других классов животных (например, дождевых червей).

При всех достоинствах наночастиц, полученных с помощью зеленого синтеза, основная проблема масштабного применения данной технологии заключается в отсутствии воспроизводимости и стандартизации, поскольку изменчивость биологических прекурсоров может приводить к непостоянным характеристикам наночастиц. Такие факторы, как сезонные колебания, метод экстракции и фитохимический состав, влияют на размер, форму и поверхностные свойства наночастиц, что усложняет контроль качества.

Несмотря на эффективность зеленого синтеза в условиях лаборатории, дальнейшее масштабирование и внедрение этих методов в промышленность связано с определенными сложностями, обусловленными необходимостью проведения оптимизации реакторных систем, конструкций с непрерывным потоком и

управления цепочкой поставок биоресурсов. Низкий выход и чистота по сравнению с химическим синтезом, а также ограниченная долговременная стабильность представляют собой практические барьеры для коммерциализации. Отсутствие понимания механизмов восстановления и стабилизирующих процессов в биологических системах также ограничивает возможность точного контроля результатов синтеза [15]. Несмотря на указанные недостатки, продолжаются исследования, направленные на оптимизацию технологии зеленого синтеза наночастиц для их внедрения в различных областях, в том числе особую ценность представляет антимикробная активность наночастиц [90].

АНТИБАКТЕРИАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЗЕЛЕННОГО СИНТЕЗА

Зеленый синтез наночастиц благородных металлов — это обширная и развивающаяся область исследований. Среди различных металлических наночастиц, наночастицы серебра (AgNPs) являются широко распространенными благодаря уникальным свойствам (например, размер и форма, зависящие от оптических, электрических и магнитных свойств) [48]. Более того, было показано, что AgNPs обладают химической стабильностью, хорошей проводимостью, антибактериальной и каталитической активностью, проявляют цитотоксический эффект на раковые клетки [88]. Важно отметить, что практически во всех работах при характеристике синтезированных наночастиц использовали рентгеновскую дифракцию, просвечивающую электронную микроскопию, инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье и спектроскопию поглощения в УФ-видимой области.

AgNPs широко используются в качестве катализаторов химических реакций, биомаркеров и антибактериальных агентов. Существует ряд подходов к синтезу AgNPs, так, например, Ag^+ может быть восстановлен до атомарного Ag химическими, электрохимическими, фотохимическими и биологическими методами. Среди этих способов методы зеленого синтеза, включающие, в частности, использование растительных экстрактов, нетоксичных полимеров и УФ-облучения, являются не только эффективными способами создания безопасных наноструктур, но и позволяют сократить использование или образование опасных для здоровья человека и окружающей среды веществ [35].

AgNPs обладают высокой антимикробной активностью против различных штаммов бактерий, включая мультирезистентные, и низкой токсичностью. При этом основным недостатком таких наночастиц является высокая себестоимость их производства [89]. Поэтому активно развиваются исследования по модернизации синтеза AgNPs. Подавляющее боль-

шинство исследователей сходятся во мнении, что потенциал AgNPs заключается в предотвращении роста и гибели вредных бактерий, вызывающих многие распространенные заболевания человека. Благодаря высокому соотношению площади поверхности к объему и кристаллической структуре поверхности, AgNPs являются перспективными антибактериальными агентами [43, 75]. Наночастицы, полученные с помощью технологии зеленого синтеза, обладают присущими им антимикробными свойствами, потенциал которых для борьбы с патогенами, в том числе, устойчивыми к классическим антибиотикам, будет рассмотрен в следующих разделах.

МЕХАНИЗМ АНТИМИКРОБНОГО ДЕЙСТВИЯ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Механизм антимикробного действия наночастиц во многом зависит от размера, pH и ионной силы среды, а также от типа стабилизирующего агента. Однако полный механизм антибактериального действия AgNPs до сих пор не до конца изучен и объяснен. Одним из возможных бактерицидных механизмов действия AgNPs является высвобождение ионов Ag^+ [17]. Показано, что ион Ag^+ образует комплексы с нуклеиновыми кислотами и взаимодействует с нуклеозидами нуклеиновых кислот, проявляя антибактериальную активность. Наночастицы изменяют проницаемость мембраны, о чем свидетельствует высвобождение сахаров, белков и ядерного материала через поврежденную мембрану [24]. Электростатическое притяжение, а также сродство к серосодержащим белкам усиливают адгезию ионов Ag^+ к клеточной мембране и приводят к разрушению бактериальных оболочек, повышая проницаемость бактериальной клеточной мембраны. Образование активных форм кислорода (АФК) увеличивается из-за образования в клетках свободных ионов Ag^+ , которые могут нарушать высвобождение аденозинтрифосфата [27]. Эти АФК могут играть важную роль в разрушении клеточной мембраны и изменении ДНК, что может вызывать различные проблемы с репликацией ДНК и делением клеток. С другой стороны, свободные ионы Ag^+ могут эффективно препятствовать синтезу белка путем денатурации цитоплазматических рибосомных компонентов [62]. Процент высвобождения ионов Ag^+ может ингибировать рост бактерий, поскольку AgNPs обладают способностью проникать через клеточную стенку бактерий, а также вызывать денатурацию клеточных мембран [51]. Из-за денатурации клеточной мембраны внутриклеточные и внеклеточные компоненты бактериальной клеточной мембраны могут быть разорваны, что также вызывает лизис клеток [8]. Антибактериальные механизмы AgNPs в основном зависят от растворимости наночастиц в реакционной среде, а эффективность растворения зависит от параметров синтеза. Основные механизмы антибактериального воздействия AgNPs на микробные клетки суммированы в работе и на рис. 2 [43].

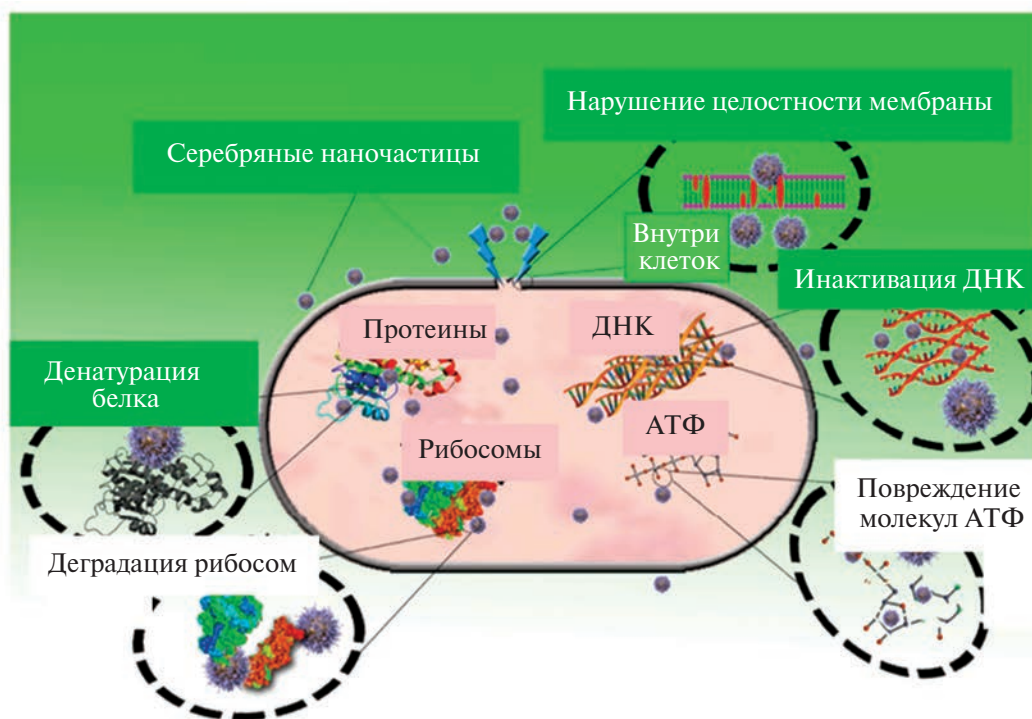


Рис. 2. Основные механизмы антибактериального воздействия AgNPs на микробные клетки [43]

Fig. 2. Main mechanisms of the AgNPs antibacterial action on bacterial cells [43]

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТЕНИЙ И ИХ АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ

Многочисленные виды растений успешно используются при синтезе наночастиц, при этом одним из основных факторов при зеленом синтезе AgNPs является оценка их противомикробного действия. Эффективность применения зеленого метода для синтеза AgNPs с использованием экстракта листьев *Mussaenda frondosa* (дерево дхоби) показана в сравнении с химически синтезированными наночастицами, при котором применяется цитрат натрия [82]. Авторы показали, что были получены AgNPs с широким диапазоном размеров 30–60 нм и различными формами (стержнеобразные, сферические, треугольные и квазисферические), которые продемонстрировали большую стабильность и повышенную антиоксидантную активность. Аналогичные результаты были получены для синтезированных зеленым методом AgNPs с использованием экстрактов листьев огурца и рисовой шелухи (*Cucumis sativus* и *Oryza sativa* L.) по сравнению с коммерческими химическими аналогами [92]. В результате проведенных исследований установлен долговременный антибактериальный эффект таких AgNPs. Более того, было установлено, что наночастицы усиливали фотосинтез растений за счет увеличения содержания хлорофилла. В отличие от химического синтеза, который приводит к образованию избыточного количества АФК, зеленые AgNPs

обладали выраженной долговременной антибактериальной активностью в отношении роста *E. coli*.

В работе [72] AgNPs синтезировали экологически чистым методом с использованием фитомолекул *Olea europaea* в качестве восстанавливающего и стабилизирующего агента. Синтезированные наночастицы продемонстрировали снижение роста всех протестированных штаммов бактерий (*Staphylococcus aureus*, *K. pneumonia*, *P. aeruginosa*). Антибактериальный механизм синтезированных зеленым методом AgNPs был дополнительно оценен с помощью анализа окрашивания живых и мертвых клеток. Анализ окрашивания живых/мертвых клеток проводился против трех видов бактерий с использованием набора для двойного окрашивания. На основании полученных результатов было показано, что одной из возможных причин антибактериального действия синтезированных зеленым методом AgNPs является нарушение целостности клеточной мембраны бактерий.

В другом исследовании сухой экстракт листьев оливы и его активное соединение олеуропеин использовали в качестве восстанавливающих и стабилизирующих агентов для синтеза AgNPs размером от 20 до 25 нм [63]. Антимикробное действие AgNPs проявлялось для всех исследованных микроорганизмов *S. aureus*, *S. epidermidis*, *Bacillus subtilis*, *E. coli*, *K. pneumoniae*, *Salmonella enterica*, *P. aeruginosa*, а также одного штамма дрожжей *Candida albicans*. Значения минимальной ингибирующей концентрации (МИК) составляли от 0,0625 до 0,0312 мМ. Было показано,

что антимикробный эффект AgNPs был значительно выше в отношении грамотрицательных бактерий и дрожжей, чем в отношении грамположительных бактерий.

Водный экстракт листьев *Zataria multiflora* использовали для создания синтезированных экологически чистым способом AgNPs и оценивали их влияние на факторы вирулентности и биопленку *P. aeruginosa*, опосредованное механизмом кворум-сенсинга. Было показано, что субминимальные концентрации синтезированных зеленым методом AgNPs ингибировали различные факторы вирулентности *P. aeruginosa*, включая подвижность бактерий, продукцию пиоцианина, пиовердина и рамнолипидов, активность эластазы и экзопроотеазы. AgNPs продемонстрировали 80% ингибирование биопленок *P. aeruginosa*. Эффективность синтезированных зеленым методом AgNPs *in vitro* против *P. aeruginosa* может быть использована для создания альтернативных терапевтических средств для лечения бактериальных инфекций, особенно для местного применения в случаях раневых инфекций. Кроме того, их можно использовать для покрытия поверхности и предотвращения прикрепления бактерий к медицинским устройствам [16,60].

AgNPs были синтезированы с использованием оливкового масла первого холодного отжима (*Olea europaea* L.) и подсолнечного масла (*Helianthus annuus* L.). Была исследована антимикробная активность оливкового масла первого холодного отжима, подсолнечного масла, а также синтезированных AgNPs против патогенных для человека бактерий. В результате исследований установлено, что синтезированные наночастицы показали более высокую антимикробную активность в отношении всех протестированных микроорганизмов, чем изначальное сырое масло. Следовательно, AgNPs применимы в качестве безопасного природного продукта против мультирезистентных микроорганизмов [56].

Фотоиндуцированный «зеленый» синтез и антимикробная оценка гибридных наночастиц поли(ε-капролактона)/куркумина/экстракта виноградных листьев-Ag (PCL/Cur/GLE-Ag NPs) показаны в работе [35]. Наночастицы PCL/Cur/GLE были синтезированы методом эмульсионно-растворного испарения, а затем использованы как активные наноносители для зеленого синтеза и стабилизации AgNPs на их поверхности. Куркумин и экстракт виноградных листьев были выбраны и включены в состав наноносителей благодаря их антимикробной активности, которая дополнительно повысила эффективность синтезированных AgNPs. Антимикробные свойства наночастиц были исследованы в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий, а также двух штаммов грибов (*E. coli*, *S. aureus*, *S. enterica*, *P. aeruginosa*, *B. subtilis*, *C. albicans*, *Aspergillus flavus*). Результаты показали, что гибридные наночастицы обладали потенциальной антимикробной активностью против патогенных видов бактерий и могут рассматриваться

в качестве альтернативного антибактериального средства.

Была показана возможность производства AgNPs для повышения фотокаталитической активности коммерческого диоксида титана TiO₂ и антибактериальной активности хирургических нитей. Представлен новый метод зеленого синтеза AgNPs из водного экстракта виноградной кожуры, предварительно обработанного кислородом и ультразвуком. Также был использован новый метод электрохимической модификации хирургических нитей. Авторы показали, что рассасывающиеся шовные материалы были функционализированы биосинтезированными AgNPs путем электрохимического и химического осаждения. Шовные материалы продемонстрировали бактериостатическое и противогрибковое действие в отношении грамположительных (*B. subtilis*), грамотрицательных (*E. coli*) и грибка *C. albicans* — патогенов, вызывающих раневые инфекции. Исследование показало, что электрохимическое осаждение AgNPs на нейлоновые хирургические шовные материалы не изменило механические свойства материалов, но придало им антибактериальные свойства [87].

Фитохимические вещества водорослей, включающие гидроксильные, карбоксильные и аминокислотные группы, могут служить как эффективными восстановителями металлов, так и в качестве стабилизирующих агентов, обеспечивающих прочное покрытие металлических наночастиц для потенциального применения в качестве противомикробных средств [34].

Возможность проведения зеленого синтеза AgNPs с применением морской водоросли *Sargassum wightii* показана в работе [75], в результате чего была доказана антибактериальная активность синтезированных AgNPs против патогенов человека *S. aureus*, *Klebsiella pneumoniae* и *Salmonella typhi*.

В исследовании [86] AgNPs были синтезированы с использованием водного фильтрата морской водоросли *Turbinaria conoides* в качестве восстанавливающего агента, и показана активность этих наночастиц против биопленок. Синтезированные наночастицы AgNPs эффективно контролировали образование бактериальных биопленок. Максимальная зона ингибирования была зарегистрирована против *E. coli*, *Salmonella* sp., *Serratia liquefaciens* и *Aeromonas hydrophila*. Метод макропробирочного разведения позволил определить МИК (20–40 мкл/мл) и минимальную бактерицидную концентрацию (МБК) (40–60 мкл/мл) AgNPs. Данное исследование доказало эффективность AgNPs в качестве мощного антимикробного агента и демонстрирует перспективность их дальнейшего применения в решении проблем, связанных с биообрастанием в аквакультурных установках и других морских системах.

Сообщается о получении AgNPs из водного экстракта зеленой пресноводной водоросли *Pithophora oedogonia* путем восстановления нитрата серебра.

Было отмечено, что процесс синтеза был достаточно быстрым и AgNPs образовывались в течение нескольких минут после контакта ионов серебра с экстрактом водорослей. В УФ-спектре водной среды, содержащей ионы серебра, был отмечен пик при 445 нм, соответствующий плазмонному поглощению AgNPs. Сканирующая электронная микроскопия и анализ динамического рассеяния света коллоидных AgNPs показали размер 34 нм. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия выявила сильные сигналы в области серебра и подтвердила наличие AgNPs. Анализ Фурье-преобразования инфракрасного излучения наночастиц показал присутствие белка, который, вероятно, является стабилизирующим агентом, окружающим AgNPs. Более того, антибактериальная активность синтезированных наночастиц продемонстрировала потенциальную ингибирующую активность в отношении семи протестированных патогенных бактерий [78].

Водный экстракт микроводоросли *Dunaliella salina* использовали для восстановления нитрата серебра и создания AgNPs. В УФ-спектре водной среды, содержащей частицы серебра, был обнаружен пик при 454 нм, который связан с плазмонным поглощением AgNPs. Сканирующая электронная микроскопия показала размер AgNPs 35 нм. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия подтвердила присутствие AgNPs, выявив твердый пик в области серебра. Рентгеновская дифракция подтверждена с помощью анализа Фурье-преобразования инфракрасного излучения. Антибактериальные анализы проводились методом дисковой диффузии. Было обнаружено, что синтезированные наноматериалы обладали антибактериальными свойствами, способными воздействовать на *E. coli*, *B. subtilis*, *Enterobacter tobbaci* [74].

С использованием кожуры плодов граната (*Punica granatum*) были синтезированы AgNPs и показано их антимикробное действие на грамотрицательные и грамположительные бактерии. Дополнительно было протестировано цитотоксическое действие AgNPs на клеточной линии рака толстой кишки, и было отмечено, что жизнеспособность клеток составляла 56% и 61% на 3-й и 5-й дни соответственно при воздействии 12,5 мкг AgNPs. Делается вывод, что AgNPs, биосинтезированные с использованием экстракта кожуры граната, могут стать новым, эффективным решением для разработки препарата от рака толстой кишки, и также обладают антибактериальной активностью [28].

AgNPs синтезировали с использованием водного экстракта традиционного лекарственного средства олеорезина, выделяемого из корневища растения *Ferula foetida*, и оценили их цитотоксичность и антимикробную активность в отношении клеточных линий MCF-7 и ряда микробных патогенов [29]. Было установлено, что AgNPs эффективно ингибируют размножение раковых клеток. МИК синтезированных AgNPs составила 7,80 мкг/мл для *E. coli*, *Salmonella* sp. и *S. typhi*. Были получены значения МИК 15,60 мкг/

мл для *S. typhimurium* и *S. aureus* и 31,20 мкг/мл для *K. pneumoniae* и *S. aureus*. Кроме того, были получены значения МИК 15–60 мкг/мл для *C. albicans* и 31,20 мкг/мл для *C. krusei*.

В экспериментальной медицине AgNPs используются в сочетании с различными антибиотиками в качестве антибактериальных средств. Несмотря на то что механизмы данного взаимодействия изучены не полностью, AgNPs способны повышать эффективность некоторых антибиотиков за счет нарушения целостности клеточных мембран, увеличения их проницаемости и возможного влияния на механизмы бактериальной резистентности. Недавние данные свидетельствуют о синергической антибактериальной активности при сочетании AgNPs с ванкомицином [49]. Описано совместное действие амикацина с AgNPs, синтезированных с помощью *Tribulus terrestris*, на раны собак, инфицированные *P. aeruginosa*. Клинические оценки заживления ран проводили по следующим критериям: скорость заживления, время заживления и сравнение между AgNPs и амикацином для определения их антибактериального действия, а также гистологическое исследование кожи. Показано, что по сравнению с амикацином, AgNPs заживляют раны быстрее всего. В зависимости от количества бактерий, AgNPs уменьшали воспаление и увеличивали отложение коллагеновых волокон для лечения поражений кожи. AgNPs также уменьшали количество геморрагических участков и воспалительных клеток в ранах, инфицированных *P. aeruginosa*, способствуя заживлению ран. Было показано, что эти наночастицы уменьшали бактериальное обсеменение ран и способствовали заживлению тканей. Было установлено, что AgNPs могут использоваться в качестве эффективного противомикробного и противовоспалительного средства при заживлении ран вместо антибиотиков [11].

Экстракт листьев *Morinda citrifolia* был исследован на предмет синтеза AgNPs при различных температурах и времени реакции. Синтезированные наночастицы размером от 10 до 60 нм, показали ингибирующую активность в отношении ряда бактерий (*E. coli*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *Enterobacter aerogenes*, *Bacillus cereus* и *Enterococci* sp.) [71].

Антимикробная активность AgNPs, полученных из растений *Agastache foeniculum* и водных экстрактов их каллуса, была продемонстрирована против внутрибольничных инфекций, вызванных *S. aureus*, *Staphylococcus haemolyticus*, *K. pneumoniae* и *Streptococcus pneumoniae*. Синтезированные наночастицы были охарактеризованы с помощью УФ-спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии. Наночастицы имели сферическую форму со средним диаметром 20 нм и 10 нм для синтеза на основе растительных и каллусных экстрактов, соответственно. МИК для наночастиц составляла от 6,25 до 25 мг/л для всех протестированных штаммов. Предположительно, морфология биогенных наночастиц зависит

от концентрации соединений с антиоксидантной активностью в экстрактах [64].

Отходы оливковых листьев были переработаны с помощью нитрата серебра для получения AgNPs сферической формы со средним размером 28 нм, которые проявили различные биологические, антиоксидантные, противораковые свойства в отношении трех линий раковых клеток (MCF-7, HeLa и HT-29), а также антимикробную активность против мультирезистентных бактерий и грибов. AgNPs в концентрациях 2,5–20 мкг/мл значительно подавляли рост шести бактерий: *Listeria monocytogenes*, *B. cereus*, *S. aureus*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni* и *E. coli* с диаметром зоны ингибирования 25–37 мм и шести патогенных грибов (26–35 мм) [13].

С использованием свежих листьев лемонграсса (*Cymbopogon citratus*) проведен зеленый синтез AgNPs и показана их антибактериальная активность в отношении мультирезистентных внутрибольничных изолятов *E. coli*, *S. aureus*, *Proteus mirabilis* и внутрибольничных изолятов *S. typhi*, *K. pneumoniae*. Также изучалась противогрибковая активность этих наночастиц в отношении *C. albicans* (внутрибольничный изолят) и *Aspergillus niger*. Показано эффективное синергетическое действие AgNPs в сочетании с антибиотиками против мультирезистентных внутрибольничных штаммов [53].

Nigella sativa — растение, демонстрирующее большой потенциал для производства зеленых AgNPs с противомикробной активностью против различных бактериальных и грибковых штаммов, выделенных из человеческого стула (*Achromobacter sp.*, *Pseudomonas geniculata*, *Enterobacter sp.*). Исследования токсичности AgNPs проводились в условиях *in vitro*, которые отличаются от условий *in vivo* [37].

Экстракт каллуса *Sesuvium portulacastrum* показал высокую эффективность в синтезе AgNPs сферической формы с размерами от 5 до 20 нм. Экстракты, инкубированные с AgNO₃, показали постепенное изменение цвета на желтовато-коричневый, при этом интенсивность пиков увеличивалась в течение периода инкубации. Контрольный образец без нитрата серебра не показал изменения цвета. Синтезированные

AgNPs ингибировали клинические штаммы бактерий и грибов (*Micrococcus luteus*, *K. pneumoniae*, *Alternaria alternata*, *Penicillium italicum*, *Fusarium equisetii*, *C. albicans*), при этом антибактериальная активность была более выраженной, чем противогрибковая. Антимикробная активность усиливалась при добавлении поливинилового спирта в качестве стабилизирующего агента [54].

Наночастицы золота и AgNPs были синтезированы при комнатной температуре с использованием водного экстракта высушенных плодов *Amomum villosum* с целью придания им антиоксидантных, каталитических, антимикробных свойств и лечебного эффекта против клеток рака молочной железы. Экстракты плодов служили как восстановителями, так и стабилизаторами. Наночастицы успешно восстанавливали метиленовый синий, известный окислительно-восстановительный индикатор. AgNPs показали зоны ингибирования против патогенных *S. aureus* и *E. coli* [81].

Предложен простой и экологически чистый метод синтеза AgNPs из раствора нитрата серебра с использованием водных экстрактов листьев *Clerodendrum viscosum* и показана антибактериальная активность AgNPs методом диффузии в агаре на некоторых бактериях (*E. coli*, *P. aeruginosa*, *B. subtilis*, *S. aureus*) [55].

Разработан экологически чистый подход к синтезу AgNPs с использованием водного экстракта семян *Durio zibethinus* и показаны их антибактериальные, фотокаталитические и цитотоксические свойства. AgNPs продемонстрировали значительную антибактериальную активность против *E. coli*, *B. subtilis*, *Salmonella typhimurium*, *S. typhi*, *Klebsiella sp.*, *Staphylococcus sp.*, показали цитотоксичность в отношении раковых *Artemia salina* и фотокаталитическую активность в отношении метиленового синего. AgNPs могут быть использованы в области водоочистки, фармацевтики, биомедицины, биосенсоров и нанотехнологий в ближайшем будущем [83].

В табл. 2 суммированы сведения о растениях, используемых для зеленого синтеза AgNPs, и тест-штаммах, применяемых для оценки антибактериальной активности полученных наночастиц.

Таблица 2. Растения, использованные для биосинтеза серебряных наночастиц, и тест-штаммы для оценки антибактериальной активности синтезированных серебряных наночастиц

Table 2. Plants used for the biosynthesis of silver nanoparticles and test strains employed for the evaluation of the antibacterial activity of the synthesized silver nanoparticles

Растение/Экстракт	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
Экстракты листьев <i>C. sativus</i> ; рисовая шелуха <i>O. sativa</i>	<i>E. coli</i>	[92]
Фитомолекулы <i>O. europaea</i>	<i>S. aureus</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i>	[72]
Экстракт листьев <i>O. europaea</i> олеуропеин	<i>S. aureus</i> , <i>S. epidermidis</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. enterica</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>C. albicans</i>	[63]

Таблица 2. Продолжение

Table 2. (Contd.)

Растение/Экстракт	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
Водный экстракт листьев <i>Z. multiflora</i>	<i>P. aeruginosa</i>	[16]
Оливковое масло (<i>O. europaea</i>), подсолнечное масло (<i>H. annuus</i>)	<i>K. pneumoniae</i>	[56]
Куркумин и экстракт виноградных листьев	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. enterica</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>C. albicans</i> , <i>A. flavus</i>	[35]
Экстракт виноградной кожуры	<i>B. subtilis</i> , <i>E. coli</i> , <i>C. albicans</i>	[87]
<i>Sargassum wightii</i>	<i>S. aureus</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. typhi</i>	[75]
Водный фильтрат <i>T. conoides</i>	<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> sp.	[86]
Экстракт <i>P. oedogonia</i>	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>V. cholerae</i> , <i>S. flexneri</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>M. luteus</i>	[78]
Водный экстракт <i>D. salina</i>	<i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>E. tobbaci</i>	[74]
Кожура плодов <i>P. granatum</i>	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>P. vulgaris</i> , <i>S. typhi</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. epidermidis</i> , <i>K. pneumonia</i>	[28]
Водный экстракт <i>F. foetida</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. typhi</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>S. aureus</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>C. albicans</i> , <i>C. krusei</i>	[29]
<i>T. terrestris</i>	<i>P. aeruginosa</i>	[11]
Экстракт листьев <i>M. citrifolia</i>	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>E. aerogenes</i> , <i>B. cereus</i> , <i>Enterococci</i> sp.	[71]
<i>A. foeniculum</i>	<i>S. aureus</i> , <i>S. haemolyticus</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. pneumoniae</i>	[64]
Отходы листьев <i>O. europaea</i>	<i>L. monocytogenes</i> , <i>B. cereus</i> , <i>S. aureus</i> , <i>Y. enterocolitica</i> , <i>C. jejuni</i> , <i>E. coli</i>	[13]
Листья <i>C. citratus</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>P. mirabilis</i> , <i>S. typhi</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>C. albicans</i> , <i>A. niger</i>	[53]
Экстракт <i>N. sativa</i>	<i>Achromobacter</i> sp., <i>P. geniculate</i> , <i>Enterobacter</i> sp.	[37]
Экстракт каллуса <i>S. portulacastrum</i>	<i>M. luteu</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>A. alternata</i> , <i>P. italicum</i> , <i>F. equisetii</i> , <i>C. albicans</i>	[54]
Водный экстракт <i>A. villosum</i>	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	[81]
Водный экстракт <i>C. viscosum</i>	<i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i>	[55]
Водный экстракт семян <i>D. zibethinus</i>	<i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>S. typhi</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp.	[83]

ЗЕЛЕНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ПРИМЕНЕНИЕМ БАКТЕРИАЛЬНЫХ КЛЕТОК И ИХ АНТИМИКРОБНАЯ АКТИВНОСТЬ

Несмотря на то, что экстракты растений являются неисчерпаемым источником для производства AgNP и обладают уникальными лечебными свойствами против микробных клеток, сами бактерии также функционируют как «биофабрики» для создания AgNPs. Микробный синтез AgNPs является прекрасной альтернативой химическому синтезу и стал многообещающей альтернативой традиционным химическим методам, которые часто основаны на

использовании опасных реагентов в жестких условиях. Микробные клетки особенно привлекательны благодаря своей способности производить AgNPs с регулируемым размером, формой и свойствами поверхности посредством естественных ферментативных и метаболических процессов. Разнообразный биомолекулярный профиль бактерий, включая ферменты и полисахариды, которые действуют как восстанавливающие и стабилизирующие агенты, способствует экологичности этого подхода. Синтез AgNPs может быть инициирован с помощью различных штаммов бактерий, что позволяет получить широкий спектр физико-химических свойств, таких как размер и форма, которые важны для различных

применений [77]. Эта гибкость позволяет манипулировать параметрами синтеза и свойствами AgNPs, повышая их универсальность. Синтез AgNPs может происходить как внутриклеточно, так и внеклеточно, при этом внеклеточный синтез предпочтительнее из-за более простого процесса очистки по сравнению с внутриклеточным методом [10]. Использование микроорганизмов в синтезе наночастиц представляется экологически чистым и перспективным подходом.

С использованием супернатанта биопленки *P. aeruginosa* PA75 были синтезированы AgNPs, которые продемонстрировали антибактериальную, антибиопленочную и противоопухолевую активность [91]. AgNPs, синтезированные с использованием зеленых технологий, проявили мощную антибактериальную активность против нескольких штаммов бактерий с множественной лекарственной устойчивостью (метициллин-резистентный золотистый стафилококк (MRSA), *E. coli*, *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*), при этом значения МИК варьировали от 7,81 до 15,63 мкг/мл, а значения минимальной бактерицидной концентрации — от 15,63 до 31,25 мкг/мл. Примечательно, что грамотрицательные бактерии были более восприимчивы к AgNPs, чем грамположительные штаммы. Кроме того, AgNPs ингибировали образование биопленки более чем на 80% при концентрациях от 60 до 120 мкг/мл.

Антибактериальный потенциал AgNPs, синтезированных с помощью *Lactobacillus acidophilus* и смешанной культуры лактобактерий, против мультирезистентных изолятов хронического гнойного среднего отита (*P. aeruginosa*, *S. aureus*, *P. mirabilis*, *K. pneumoniae* и *E. aerogenes*) показан с применением метода диффузии в агаре. Зоны ингибирования составили 20–30 мм против грамотрицательных патогенов, при этом значения МИК₅₀ варьировались от 4,8 до 77,5 мкг/мл. AgNPs снижали жизнеспособность бактерий до 7,68–73,50 % при концентрациях до 38,7 мкг/мл, демонстрируя дозозависимую эффективность [12].

Зеленые AgNPs, синтезированные с помощью супернатанта *P. aeruginosa*, показали значительную антибактериальную активность против нескольких штаммов бактерий с множественной лекарственной устойчивостью (МИК — 1 мг/мл) [1]. В общей сложности было исследовано 273 изолята от пациентов отделения интенсивной терапии (*K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*). Диффузионный анализ показал, что комбинированное лечение AgNPs с антибиотиками продемонстрировало значительно большие зоны ингибирования, чем в группах, получавших только антибиотики или только наночастицы. Авторы предположили, что AgNPs могут разрушать клеточные стенки бактерий, тем самым облегчая проникновение антибиотиков в клетку. Также был предложен альтернативный механизм, включающий опосредованное АФК разрушение мембранных липидов и пептидогликанов. Синтезированные микроорганизмами AgNPs имеют потенциальное

применение в борьбе с бактериями с множественной лекарственной устойчивостью, особенно в отделениях интенсивной терапии.

AgNPs, синтезированные зеленым методом с помощью цианобактерий *Anabaena variabilis*, продемонстрировали значительную антимикробную активность, включая синергический эффект при сочетании с антибиотиками и противогрибковыми агентами [5]. Синергическое взаимодействие оценивалось с помощью метода «шахматной доски», где тестировались комбинации AgNPs с антибиотиками и фунгицидами. Результаты показали значения индекса фракционного ингибирования ниже 0,5 для всех комбинаций, что указывает на сильный синергический эффект между обоими классами антимикробных агентов. Эти результаты демонстрируют, что синтез AgNPs зеленым методом на основе бактерий обладает большим потенциалом для использования в синергическом лечении антибиотиками лекарственно-устойчивых патогенов (*P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *E. coli*, *B. cereus*, *C. albicans*, *Candida glabrata*).

Синергический эффект синтезированных зеленым методом с помощью *A. baumannii* AgNPs был оценен в комбинации с несколькими антибиотиками, при этом антибактериальная эффективность протестирована против множества штаммов, включая бактерии с панрезистентностью, множественной лекарственной устойчивостью (*K. pneumoniae*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *P. mirabilis*, *Serratia marcescens*, *Enterobacter cloacae*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Morganella morganii*, *Achromobacter* sp., *Sphingomonas* sp., *Pantoea* sp.) [40]. Значения МИК AgNPs варьировались от 8 до 64 мкг/мл, а значения МБК — от 16 до 128 мкг/мл. Синергические исследования показали, что совместное применение AgNPs с антибиотиками приводило либо к синергическому, либо к частично синергическому эффекту, при этом значения МИК AgNPs снижались до четырех раз. Авторы предположили, что двойная обработка AgNPs и антибиотиками может положительно повлиять на сродство связывания с их мишенями, тем самым улучшая их проникновение и общую эффективность в борьбе с бактериальной резистентностью. Они также подчеркнули, что использование двух различных антибактериальных агентов будет препятствовать механизмам развития резистентности бактерий, затрудняя одновременное формирование механизма устойчивости бактерий к обоим веществам. Было также отмечено, что такой комбинированный подход может снизить концентрации, необходимые для эффективного лечения.

Антикандидозная активность AgNPs, синтезированных с помощью *Rothia endophytica* [33], оценивалась против *C. albicans*. Показано, что воздействие AgNPs привело к значительному высвобождению сахара из культивируемых *C. albicans* (более чем в 2 раза) и в четыре раза большему высвобождению белка по сравнению с контрольными группами.

AgNPs, синтезированные с использованием нативного штамма *Bacillus* sp. AW1-2, продемонстрировали их фунгицидную активность против гриба *Colletotrichum falcatum* [9], в результате чего при самой высокой исследованной концентрации (20 мкг/мл) AgNPs показали приблизительно 80% ингибирования как в жидкой, так и в твердой среде.

Синтезированные с использованием морских бактерий *Planococcus maritimus* MBP-2 в качестве восстанавливающего и стабилизирующего агента AgNPs были оценены на предмет их противогрибковой активности, а также проведены антибактериальные и цитотоксические анализы [61]. AgNPs обладали антибактериальной активностью против некоторых грамотрицательных и грамположительных бактерий, таких как *S. aureus*, *B. cereus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, а также противогрибковыми свойствами против *A. niger*, *A. flavus*, *Penicillium commune* и *Penicillium digitatum*, и цитотоксическим эффектом на клеточные линии лимфомы Далтона. Эти AgNPs проявили минимальную антибактериальную активность, за исключением *P. aeruginosa* (11 мм), но они подавляли рост грибов рода *Aspergillus* сильнее, чем *Penicillium*.

Наночастицы AgNPs, синтезированные зеленым методом с помощью *Shigella flexneri* 29508, продемонстрировали мощную антиоксидантную и противогрибковую активность против *A. niger*, *A. flavus*, *P. commune* и *P. digitatum*. В модели диффузии в агаре наночастицы AgNPs показали значительно более сильную активность против видов *Aspergillus* (до 14,33 мм), чем против видов *Penicillium* (до 8,66 мм). Против двух штаммов грибов (*A. niger* и *C. albicans*) AgNPs продемонстрировали МИК 10 и 5 мкг/мл, соответственно. Были также определены минимальные фунгицидные концентрации (МФК), которые составили 25 и 40 мкг/мл, соответственно [23].

Описан экологически чистый подход к синтезу сферических AgNPs со средним размером 16 нм с использованием внеклеточных компонентов *Streptomyces albobogiseolus*. Биосинтезированные AgNPs подавляли рост патогенных микроорганизмов,

вызывающих пищевые инфекции (*B. cereus*, *E. coli* и *S. aureus*), и потенциально могут применяться в качестве антимикробного средства для уничтожения патогенных микроорганизмов [68].

С применением *Acinetobacter calcoaceticus* LRVP54 синтезировали монодисперсные сферические AgNPs в течение 24 ч размером 8-12 нм с использованием 0,7 мМ нитрата серебра при 70°C. Было установлено, что эти AgNPs более эффективны против грамотрицательных микроорганизмов по сравнению с грамположительными, а также показали наибольший синергизм с ванкомицином в дисковом диффузионном тесте. Для *Enterobacter aerogenes* наблюдалось 3,8-кратное увеличение площади зоны ингибирования после добавления AgNPs к ванкомицину. При воздействии антибиотиков на AgNPs наблюдалось снижение МИК и минимальной бактерицидной концентрации. Интересно, что мультирезистентный штамм *A. baumannii* значительно повысил свою чувствительность в присутствии AgNPs и стал восприимчив к антибиотикам, за исключением цефалоспоринов. Аналогично, ванкомицин-резистентный штамм *S. mutans* также оказался восприимчивым к антибиотикотерапии при добавлении AgNPs. Эти биогенные AgNPs продемонстрировали значительную синергическую активность в отношении антибиотиков класса β -лактамов [80].

Инкапсулин бактерии *Thermotoga maritima* EncTm был использован для синтеза AgNPs с заданными размерами частиц. Эти AgNPs демонстрировали однородную форму и распределение по размерам, а также долговременную стабильность. Антимикробная активность синтезированных AgNPs, покрытых белком или не имеющих оболочки, превосходит активность AgNPs, покрытых нитратом серебра и цитратом натрия против *E. coli*, *S. typhimurium*, *S. flexneri*, *P. aeruginosa*, *B. subtilis* [38].

В табл. 3 суммированы сведения о бактериях, используемых для зеленого синтеза AgNPs, и тест-штаммах, применяемых для оценки антибактериальной активности полученных наночастиц.

Таблица 3. Микроорганизмы, используемые для синтеза серебряных наночастиц, и тест-штаммы для оценки антибактериальной активности синтезированных серебряных наночастиц

Table 3. Microorganisms used for the biosynthesis of silver nanoparticles and test strains employed for the evaluation of the antibacterial activity of the synthesized silver nanoparticles

Микробные клетки для синтеза	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
<i>P. aeruginosa</i> PA75	MRSA, <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i>	[91]
<i>L. acidophilus</i>	<i>P. aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> , <i>P. mirabilis</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>E. aerogenes</i>	[12]
<i>P. aeruginosa</i>	<i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>A. baumannii</i>	[1]
<i>A. variabilis</i>	<i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>E. coli</i> , <i>B. cereus</i> , <i>C. albicans</i> , <i>C. glabrata</i>	[5]
<i>A. baumannii</i>	<i>K. pneumoniae</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>P. mirabilis</i> , <i>S. marcescens</i> , <i>E. cloacae</i> , <i>S. maltophilia</i> , <i>M. morganii</i> , <i>Achromobacter</i> sp., <i>Sphingomonas</i> sp., <i>Pantoea</i> sp.	[40]

Таблица 3. Продолжение

Table 3. (Contd.)

Микробные клетки для синтеза	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
<i>R. endophytica</i>	<i>C. albicans</i>	[33]
<i>Bacillus</i> sp. AW1-2	<i>C. falcatum</i>	[9]
<i>P. maritimus</i> MBP-2	<i>S. aureus</i> , <i>B. cereus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumonia</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>P. commune</i> , <i>P. digitatum</i>	[61]
<i>S. flexneri</i> 29508	<i>A. niger</i> , <i>A. flavus</i> , <i>P. commune</i> , <i>P. digitatum</i>	[23]
<i>S. albogriseolus</i>	<i>B. cereus</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	[68]
<i>A. calcoaceticus</i>	<i>E. aerogenes</i> , <i>A. baumannii</i> , <i>S. mutans</i>	[80]
<i>T. maritima</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>S. flexneri</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. subtilis</i>	[38]

ЗЕЛЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРИБОВ

Бактерицидные свойства AgNPs зависят от их среднего диаметра (токсичность возрастает с уменьшением диаметра), для уменьшения которого разработан метод их биосинтеза с использованием зеленой химии: AgNO₃, добавленный в бесклеточную культуральную среду пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, позволил получить наночастицы размером 11–25 нм. Однако при выращивании дрожжей в умеренном статическом магнитном поле наночастицы AgNPs, полученные из бесклеточной культуральной среды, были значительно меньше (2–12 нм), чем наночастицы, полученные без магнитного поля. Последние наночастицы обладали высокой степенью кристалличности, стабильностью и почти однородной формой. Антибактериальная активность AgNPs, полученных в статических магнитных полях, была выше, чем у наночастиц из контрольных культур. Статические магнитные поля демонстрируют многообещающую способность генерировать биоцидные наночастицы с помощью этого нового подхода зеленой химии. Наночастицы продемонстрировали антибактериальную активность как против грамположительных бактерий *S. aureus*, так и против грамотрицательных бактерий *E. coli* [50].

Эндофитные грибы являются потенциальным источником для синтеза AgNPs, что показано при получении функционализированных и биосовместимых AgNPs с использованием клеточных экстрактов эндофитного *Fusarium oxysporum* NFW16. AgNPs показали МИК 100 мкг/мл против MRSA, а также синергический эффект с ванкомицином и ципрофлоксацином против MRSA (25%), *P. aeruginosa* (50%) и *E. coli* (50%), выделенных из гноя. Более того, AgNPs, импрегнированные в хлопковую повязку, показали *in vitro* антибактериальный потенциал против клинически патогенных бактерий Американской коллекции типовых культур и бактерий, ассоциированных с кожей [44].

AgNPs со средним размером 18 нм синтезированы из внеклеточных экстрактов гриба *Aspergillus templicola* OR480102. Показано, что они ингибировали пролиферацию как грамположительных, так и грамотрицательных бактериальных патогенов. В частности, значения МИК для AgNPs составили 2,5, 5, 10 и 20 мкг/мл для *S. typhimurium*, *B. subtilis*, *S. aureus* и *E. coli*, соответственно. Экстракт гриба или AgNO₃ сами по себе не смогли ингибировать пролиферацию ни одного из протестированных штаммов бактерий. Кроме того, использование AgNP, полученных из фильтрата *A. templicola* OR480102, демонстрирует значительный потенциал в качестве нового терапевтического подхода против клеток рака молочной железы MCF-7, способствуя апоптозу и снижая миграцию клеток [2].

Экстракты эндофитных грибов *Neocosmospora solani* использовали для зеленого синтеза AgNPs со средним размером 362 нм и сферической морфологией, которые проявили антимикробную активность против патогенных для человека бактерий *S. typhi*, *B. subtilis*, *E. coli* и *S. aureus*. Антибактериальная эффективность AgNPs зависела от дозы: увеличение концентрации от 20 до 60 мкл приводило к увеличению зон ингибирования. Более того, в работе показан дозозависимый противораковый потенциал AgNPs против линии клеток рака легких человека A549, снижая жизнеспособность клеток до 5% при обработке самой высокой концентрацией 100 мкг/мл [57].

Эндофитные грибы *Coniothyrium chaingmaiense* применяли для синтеза AgNPs, которые имели сферическую форму и средний размер 66 нм и оценивали их антимикробную активность и дозозависимую эффективность против *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *S. typhi* и *K. pneumoniae* с соответствующими зонами ингибирования при самой высокой исследованной концентрации 10 мг/мл. Была выявлена повышенная эффективность антибиотиков (ампициллина и гентамицина) при сочетании с AgNPs, достигая максимальной зоны ингибирования при тестировании

против *E. coli*. Аналогичным образом, AgNPs продемонстрировали дозозависимую противогрибковую активность против *C. albicans*, *Aspergillus brasiliensis* и *A. flavus*, при максимальной дозе 10 мг/мл [26].

Проведен синтез AgNPs с помощью различных грибов: *A. flavus*, *Penicillium chrysogenum* и *A. niger*, в результате получены частицы размером от 80 до 100 нм, которые обладали асимметричной морфологией. Установлено, что AgNPs проявляли активность в отношении фитопатогенных грибов, таких как *F. oxysporum*, *Rhizopus stolonifer*, *Mucor mucedo*, *Penicillium citrinum* и *Aspergillus terreus* [6].

Гриб *Trichoderma harzianum* использовали для синтеза AgNPs приблизительно размера 85 нм, имеющих как неправильную, так и сферическую морфологию. Они оказывали ингибирующее действие на *Fusarium verticillioides*, одного из основных патогенов, вызывающих гниль початков и стеблей кукурузы, в зависимости от времени инкубации и используемой концентрации. AgNPs достигли своего наилучшего фунгицидного эффекта при концентрации 80 мкг/мл, а также ингибировали спорообразование и нарушали целостность клеток [45].

Проведены сравнительные исследования AgNPs, синтезированные зеленым методом из трех различных штаммов грибов: *Pleurotus ostreatus*, *Agaricus bisporus* и *Agaricus campestris*, и показана их активность в подавлении заражения какао-бобов грибами *A. flavus* и *A. ochraceus*. Полученные AgNPs имели различные размеры: 9–52 нм, 10–176 нм и 15–45 нм для *A. campestris*, *A. bisporus* и *P. ostreatus*, соответственно [59].

Из двух разных штаммов эндофитных грибов (*Fusarium proliferatum* и *F. oxysporum*) синтезировали сферические AgNPs размером от 3 до 27 нм, и оценили их антимикробную активность. AgNPs продемонстрировали дозозависимую фунгицидную активность против фитопатогенных грибов *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *Alternaria alternata*, *Curvularia lunata*

и *F. oxysporum*, достигнув степени ингибирования до 90% при их максимальной концентрации 75 мкг/мл. Также показано, что концентрация 150 мг/л AgNPs успешно предотвратила заражение, вызванное *F. oxysporum*, в условиях теплицы, подчеркивая новую и экологически чистую альтернативу для лечения болезней растений, вызываемых грибами [46].

Для получения монодисперсных AgNPs был использован экологически чистый простой биосинтетический метод с применением бесклеточного экстракта гриба *C. albicans*. Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали образование нанокристаллов серебра со средним размером 30 нм. Взаимодействие AgNPs с белками было изучено с помощью ИК-спектроскопии и термogravиметрического анализа. Образование AgNPs также было подтверждено появлением полосы поверхностного плазмона при 450 нм соответственно. Антимикробная активность синтезированных AgNPs была исследована в отношении *S. aureus* и *E. coli*. Было установлено, что грамотрицательная бактерия *E. coli* более восприимчива к наночастицам серебра, чем грамположительная бактерия *S. aureus* [7].

Фосфаторастворяющий гриб *Bipolaris tetramera* KF934408 был использован для внеклеточного синтеза металлических наночастиц путем окислительно-восстановительной реакции. Полученные AgNPs были охарактеризованы с помощью динамического рассеяния света и просвечивающей электронной микроскопии. AgNPs имели неправильную форму и размер от 55 нм до 74 нм. Наночастицы были оценены на предмет их антибактериальной и противогрибковой эффективности. Результаты показали эффективную антимикробную активность AgNPs против *B. cereus*, *S. aureus*, *E. aeruginosa* и *Trichoderma* sp. [36].

В табл. 4 суммированы сведения о грибах, используемых для зеленого синтеза AgNPs, и тест-штаммах, применяемых для оценки антибактериальной активности полученных наночастиц.

Таблица 4. Грибы, использованные для биосинтеза серебряных наночастиц, и тест-штаммы для оценки антибактериальной активности синтезированных серебряных наночастиц

Table 4. Fungi used for the biosynthesis of silver nanoparticles and test strains employed for the evaluation of the antibacterial activity of the synthesized silver nanoparticles

Грибы для синтеза	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
<i>S. cerevisiae</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	[50]
<i>F. oxysporum</i> NFW16	MRSA, <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. coli</i>	[44]
<i>A. tempicola</i> OR480102	<i>S. typhimurium</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	[2]
<i>N. solani</i>	<i>S. typhi</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>	[57]
<i>C. chaingmaiense</i>	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>S. typhi</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>C. albicans</i> , <i>A. brasiliensis</i> , <i>A. flavus</i>	[26]

Таблица 4. Продолжение

Table 4. (Contd.)

Грибы для синтеза	Микробные клетки, в отношении которых проверялась активность наночастиц	Ссылки
<i>A. flavus</i> , <i>P. chrysogenum</i> , <i>A. niger</i>	<i>F. oxysporum</i> , <i>R. stolonifer</i> , <i>M. mucedo</i> , <i>P. citrinum</i> , <i>A. terreus</i>	[6]
<i>T. harzianum</i>	<i>F. verticillioides</i>	[45]
<i>P. ostreatus</i> , <i>A. bisporus</i> , <i>A. campestris</i>	<i>A. flavus</i> , <i>A. ochraceus</i>	[59]
<i>F. proliferatum</i> , <i>F. oxysporum</i>	<i>A. fumigatus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. alternata</i> , <i>C. lunata</i> , <i>F. oxysporum</i>	[46]
<i>Candida albicans</i>	<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>	[7]
<i>Bipolaris tetramera</i> KF934408	<i>B. cereus</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. aeruginosa</i> , <i>Trichoderma</i> sp.	[36]

ЗЕЛЕННЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

Хитозан — аминополисахарид, состоящий из β -(1→4)-связанных остатков D-глюкозамина, а также N-ацетил-D-глюкозамина. Как правило, хитозан выделяют из хитина, входящего в состав панцирей ракообразных, но также может быть выделен из хитина иного происхождения (хитин из грибов, моллюсков, насекомых и др.). Разработан метод получения стабилизированных и плотно диспергированных хитозан-AgNPs с использованием экологически чистого подхода, основанного на электрохимическом окислении/комплексобразовании с последующим восстановлением УФ-излучением. Образование наночастиц было подтверждено появлением поверхностного плазмонного поглощения в области 420 нм. Наночастицы были охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, элементного анализа, атомно-абсорбционной спектроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и УФ-видимой спектрофотометрии. Полученные наночастицы были однородными и сферическими со средним размером 2–16 нм. Наночастицы продемонстрировали относительно высокую антибактериальную активность против бактерий *Bacillus thuringiensis* и *P. aeruginosa* по сравнению с хитозаном, причем антибактериальная активность возрастала с увеличением концентрации наночастиц. Полученные результаты показали, что приготовленные AgNPs могут быть модифицированы и использованы в различных биомедицинских приложениях [67].

Бактериальная целлюлоза является продуктом жизнедеятельности некоторых видов бактерий и, в отличие от растительной целлюлозы, характеризуется высокой чистотой, прочностью и эластичностью. Бактериальная целлюлоза, импрегнированная синтезированными зеленым методом AgNPs, оценивалась

в качестве антимикробной мембраны для лечения ран. Синтезированные зеленым методом AgNPs с использованием экстракта листьев *Moringa oleifera* представляли собой Ag₂O и металлическое серебро в наноразмерном масштабе со средним размером от 24 до 40 нм. Синтезированные зеленым методом наночастицы, внедренные как в бактериальную целлюлозу, так и в диски из фильтровальной бумаги, показали превосходную антибактериальную активность против *S. aureus* и *P. aeruginosa*. Авторы не обнаружили значительных различий между способностью бактериальной целлюлозы и фильтровальной бумаги удерживать наночастицы, и не было выявлено взаимодействия между бактериальной целлюлозой и импрегнированными наночастицами, что было подтверждено анализом ИК-спектров с преобразованием Фурье. Исследование с помощью сканирующей электронной микроскопии показало значительное искажение морфологии бактериальных клеток под воздействием синтезированных экологически чистым методом AgNPs [73].

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, растительные, бактериальные и грибковые AgNPs демонстрируют сильную и многофункциональную антимикробную активность против бактерий, грибов и биопленок, по эффективности превосходя традиционные методы лечения или усиливая их эффект. В то время как бактериальные AgNPs обеспечивают регулируемый размер и форму, что способствует более целенаправленной антимикробной активности, грибковые AgNPs часто предпочтительнее из-за простоты крупномасштабного производства и более высокого выхода метаболитов, что может повысить стабильность и эффективность. Особую ценность представляют исследования, демонстрирующие синергетический эффект наночастиц с антибиотиками. Однако не все антибиотики обладают таким синергетическим эффектом [84]. Данный взаимодополняющий потенциал подчеркивает

преимущества обоих подходов: бактериальный синтез отличается высокой контролируемостью и воспроизводимостью, тогда как грибковый синтез является более перспективным для масштабного получения наночастиц с антимикробными свойствами.

Растущая устойчивость к антибиотикам и антиоксидантам представляет собой актуальную проблему здравоохранения, требующую новых терапевтических и профилактических решений. Появление бактерий с множественной лекарственной устойчивостью является глобальной клинической проблемой, распространенной во всем мире. Помимо усилий, направленных на выявление новых низкомолекулярных противомикробных препаратов, большой интерес вызывает использование наночастиц в качестве покрытий для медицинских устройств, перевязочных материалов и потребительской упаковки благодаря их противомикробным свойствам. Большой выбор доступных методов синтеза наночастиц приводит к широкому спектру химических и физических свойств, которые могут влиять на антибактериальную эффективность. Контролируя размер и состав

частиц, можно исследовать целый ряд физических и химических свойств металлических наночастиц, которые могут способствовать их противомикробной эффективности, открывая тем самым новые возможности для разработки антибактериальных препаратов [65]. Учитывая ограниченный прогресс в разработке новых антимикробных препаратов, крайне важно исследовать инновационные стратегии для решения данной проблемы. Кроме того, все больше внимания уделяется экологически чистому синтезу наночастиц с мощными лечебными свойствами, особенно тех, которые нацелены на вирулентность, для борьбы с ростом множественной лекарственной устойчивости. Подавляющее большинство исследований сходятся во мнении, что потенциал AgNPs заключается в предотвращении роста и гибели вредных бактерий, вызывающих многие распространенные заболевания человека [85]. В работе представлены основные сведения о зеленом синтезе AgNPs и оценке их антибактериальной активности с перспективой использования в качестве основы для разработки новых противоинфекционных стратегий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Abeer Mohammed A.B., Abd Elhamid M.M., Khalil M.K.M., Ali A.S., Abbas R.N. The potential activity of biosynthesized silver nanoparticles of *Pseudomonas aeruginosa* as an antibacterial agent against multidrug-resistant isolates from intensive care unit and anticancer agent. *Environ. Sci. Eur.*, 2022, vol. 34, P. 109. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00684-2>.
2. Abdel-Kareem M.M., Ali M.M.A., Hesham A.E.-L., Abdel-Raheem H.E.F., Obiedallah M. Mycosynthesis of silver nanoparticles by *Aspergillus tempicola* OR480102: A multifaceted approach for antibacterial, anticancer, and scratch assay applications. *BMC Biotechnol.*, 2025, vol. 25, P. 46. <https://doi.org/10.1186/s12896-025-00982-6>.
3. Adil S.F., Assal M.E., Khan M., Al-Warthan A., Siddiquia M.R.H., Liz-Marzán L. Biogenic synthesis of metallic nanoparticles and prospects toward green chemistry. *Dalton Trans.* 2015, vol. 44, no. 21, P. 9709–9717. <https://doi.org/10.1039/c4dt03222e>.
4. Afonso I.S., Cardoso B., Nobrega G., Minas G., Ribeiro J.E., Lima R.A. Green synthesis of nanoparticles from olive oil waste for environmental and health applications: A review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2024, vol. 12, P. 114022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114022>.
5. Ahamad I., Aziz N., Zaki A., Fatma T. Synthesis and characterization of silver nanoparticles using *Anabaena variabilis* as a potential antimicrobial agent. *J. Appl. Phycol.* 2021, vol. 33, 829–841. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02323-w>.
6. Ahmad N., Malik M.A., Wani A.H., Bhat M.Y. Biogenic silver nanoparticles from fungal sources: Synthesis, characterization, and antifungal potential. *Microb. Pathog.*, 2024, vol. 193, P. 106742. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.106742>.
7. Ahmad T., Wani I.A., Manzoor N., Ahmed J., Asiri A.M. Biosynthesis, structural characterization and antimicrobial activity of gold and silver nanoparticles. *Colloids Surf. B.* 2013, vol. 107, P. 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.02.004>.
8. Ahmed K.B.R., Nagy A.M., Brown R.P., Zhang Q., Malghan S.G., Goering P.L. Silver nanoparticles: Significance of physicochemical properties and assay interference on the interpretation of *in vitro* cytotoxicity studies. *Toxicol. Vit.*, 2017, vol. 38, P. 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2016.10.012>.
9. Ajaz S., Ahmed T., Shahid M., Noman M., Shah A.A., Mehmood M.A., et al. Bioinspired green synthesis of silver nanoparticles by using a native *Bacillus* sp. strain AW1-2: Characterization and antifungal activity against *Colletotrichum Falcatum* Went. *Enzym. Microb. Technol.*, 2021, vol. 144, P. 109745. <https://doi.org/10.1016/j.enzmtec.2021.109745>.
10. Akhil T., Bhavana V., Ann Maria C.G., Nidhin M. Role of biosynthesized silver nanoparticles in environmental remediation: A Review. *Nanotechnol. Environ. Eng.*, 2023, vol. 8, P. 829–843. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:260028395>.

11. Aldujaily A.H., Hassoon K.F., Hatem A.A., Abbas M. The effect of biosynthesized silver nanoparticles on *Pseudomonas aeruginosa*-infected dogs wounds. *PLoS ONE*. 2025, vol. 20, no. 3, P. e0313166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313166>.
12. Algburi A., Mubarak R.M., Mubarak T.H., Fathi-karkan S., Rahdar A., Romanholo Ferreira L.F. *Lactobacillus acidophilus* and mixed probiotic-mediated synthesis of silver nanoparticles: Antibacterial efficacy against multidrug-resistant otopathogens. *BioNanoSci.*, 2025, vol. 15, P. 419. <https://doi.org/10.1007/s12668-025-02021-2>.
13. Alowaiesh B.F., Alhaithloul H.A.S., Saad A.M., Hassanin A.A. Green biogenic of silver nanoparticles using polyphenolic extract of olive leaf wastes with focus on their anticancer and antimicrobial activities. *Plants*. 2023, vol. 12, P. 1410. <https://doi.org/10.3390/plants12061410>.
14. Antimicrobial resistance surveillance in Europe 2023 - 2021 data. Stockholm: European Centre for Disease Prevention and Control and World Health Organization; 2023.
15. Ayub A., Wani A.K., Malik S.M., Ayub M., Singh R., Chopra C., et al. Green nanoscience for healthcare: Advancing biomedical innovation through eco-synthesized nanoparticle. *Biotechnol. Rep.*, 2025, vol. 47, P. e00913. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2025.e00913>.
16. Baharara J., Ramezani T., Hosseini N., Mousavi M. Silver nanoparticles synthesized coating with *Zataria multiflora* leaves extract induced apoptosis in HeLa cells through p53 activation. *Iran J. Pharm. Res.*, 2018, vol. 17, no. 2, P. 627–639.
17. Bapat R.A., Chaubal T.V., Joshi C.P., Bapat P.R., Choudhury H., Pandey M., et al. An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry. *Mater. Sci. Eng. C*. 2018, vol. 91, P. 881–898. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.069>.
18. Behzad F., Naghib S.M., Kouhbanani M.A.J., Tabatabaei S.N., Zare Y., Rhee K.Y. An overview of the plant-mediated green synthesis of noble metal nanoparticles for antibacterial applications. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2021, vol. 94, P. 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.12.005>.
19. Cardoso B., Nobrega G., Afonso I.S., Ribeiro J.E., Lima R.A. Sustainable green synthesis of metallic nanoparticle using plants and microorganisms: A review of biosynthesis methods, mechanisms, toxicity, and applications. *J. Environ. Chem. Eng.* 2025, vol. 13, no. 3, P. 116921. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116921>.
20. Cassini A., Högberg L.D., Plachouras D., Quattrocchi A., Hoxha A., Simonsen G.S., et al. Burden of AMR Collaborative Group. Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: a population-level modelling analysis. *Lancet Infect. Dis.* 2019, vol. 19, no. 1, P. 56–66. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(18\)30605-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(18)30605-4).
21. Catalano A., Iacopetta D., Ceramella J., Scumaci D., Giuzio F., Saturnino C., et al. Multidrug Resistance (MDR): a widespread phenomenon in pharmacological therapies. *Molecules*. 2022, vol. 27, P. 616. <https://doi.org/10.3390/molecules27030616>.
22. Centers for Disease Control and Prevention (CDCP). 2019. Antibiotic resistant threats in the United States 2019. <https://www.cdc.gov/drugresistance/pdf/threats-report/2019-ar-threats-report-508.pdf>. Доступ 4 февраля 2026.
23. Chatterjee N., Pal S., Dhar P. Green silver nanoparticles from bacteria- antioxidant, cytotoxic and antifungal activities. *Next Nanotechnol.*, 2024, vol. 6, P. 100089. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2024.100089>.
24. Chouhan S., Guleria S. Green synthesis of AgNPs using *Cannabis sativa* leaf extract: Characterization, antibacterial, anti-yeast and α -amylase inhibitory activity. *Mater. Sci. Energy Technol.*, 2020, vol. 3, P. 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.05.004>.
25. Chumakov D.S., Pylaev T.E., Avdeeva E.S., Dykman L.A., Khlebtsov N.G., Bogatyrev V.A. Anticancer properties of gold nanoparticles biosynthesized by reducing of chloroaurate ions with *Dunaliella salina* aqueous extract. *Proc SPIE*. 2020, vol. 11457, P. 1145715. <https://doi.org/10.1117/12.2564630>.
26. Dadayya M., Thippeswamy M.G., Shivaiah N., Siddaraju T.R., Jayaramaiah P., Veeranna S.H., et al. Pharmacological properties of biomimetic synthesized silver nanoparticles from endophytic fungus *Coniothyrium chaingmaense*: KUMBDBT-25. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, P. 606. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76475-x>.
27. Das S.S., Alkahtani S., Bharadwaj P., Ansari M.T., ALKahtani M.D.F., Pang Z., et al. Molecular insights and novel approaches for targeting tumor metastasis. *Int J Pharm.*, 2020, vol. 585, P. 119556. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119556>.
28. Devanesan S., AlSalhi M.S., Balaji R.V., Ranjitsingh A.J.A., Ahamed A., Alfuraydi A.A., et al. Antimicrobial and cytotoxicity effects of synthesized silver nanoparticles from *Punica granatum* peel extract. *Nanoscale Res. Lett.*, 2018, vol. 13, P. 315. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2731-y>.
29. Devanesan S., Ponmurugan K., AlSalhi M.S., Al-Dhabi N.A. Cytotoxic and antimicrobial efficacy of silver nanoparticles synthesized using a traditional phytoproduct, asafoetida Gum. *Int. J. Nanomed.*, 2020, vol. 15, P. 4351–4362. <https://doi.org/10.2147/IJN.S258319>.

30. Ding P., Gao Y., Wang J., Xiang H., Zhang C., Wang L., et al. Progress and challenges of multidrug resistance proteins in diseases. *Am. J. Cancer Res.* 2022, vol. 12, P. 4483–4501.
31. Dousari A.S., Hosseinasab S.S., Akbarizadeh M.R., Naderifar M., Mahdavi A., Satarzadeh N. A review on immunoglobulin Y (IgY) conjugated with metal nanoparticles and biomedical uses. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2023, vol. 46, no. 11, P. 1533–1538. <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02909-x>.
32. Duan H., Wang D., Li Y. Green chemistry for nanoparticle synthesis. *Chem. Soc. Rev.* 2015, vol. 44, no. 16, P. 5778–5792. <https://doi.org/10.1039/c4cs00363b>.
33. Elbahnasawy M.A., Shehabeldine A.M., Khattab A.M., Amin B.H., Hashem A.H. Green biosynthesis of silver nanoparticles using novel endophytic *Rothia endophytica*: characterization and anticandidal activity. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, 2021, vol. 62, P. 102401. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2021.102401>.
34. El-Sheekh M.M., El-Kassas H.Y. Algal production of nano-silver and gold: Their antimicrobial and cytotoxic activities: A review. *J. Genet. Eng Biotechnol.*, 2016, vol. 14, P. 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.09.008>.
35. El-Sherbiny I.M., El-Shibiny A., Salih E. Photo-induced green synthesis and antimicrobial efficacy of poly (ϵ -caprolactone)/curcumin/grape leaf extract-silver hybrid nanoparticles. *J. Photochem. Photobiol. B.* 2016, vol. 160, P. 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.04.029>.
36. Fatima F., Bajpai P., Pathak N., Singh S., Priya S., Verma S.R. Antimicrobial and immunomodulatory efficacy of extracellularly synthesized silver and gold nanoparticles by a novel phosphate solubilizing fungus *Bipolaris tetramera*. *BMC Microbiol.*, 2015, vol. 15, P. 52. <https://doi.org/10.1186/s12866-015-0391-y>.
37. Ferdous J., Manun A.A., Mizanur Rahman M., Rana R., Huda N., Huq A., et al. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles from *Nigella sativa* L seeds and It's against human pathogenic bacteria and fungi. *The Microbe.* 2024, vol. 4, P. 100111. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100111>.
38. Giessen T.W., Silver P.A. Converting a natural protein compartment into a nanofactory for the size-constrained synthesis of antimicrobial silver nanoparticles. *ACS Synth. Biol.*, 2016, vol. 5, P. 1497–1504. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00117>.
39. Guliy O.I., Evstigneeva S.S., Karavaeva O.A. Antimicrobial Resistance and Current Methods for its Detection. *Front. Biosci. (Elite Ed)*. 2023, vol. 15, no. 9, P. 19. <https://doi.org/10.31083/j.fbe1503019>.
40. Haji S.H., Ali F.A., Aka S.T.H. Synergistic antibacterial activity of silver nanoparticles biosynthesized by carbapenem-resistant Gram-negative *Bacilli*. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, P. 15254. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19698-0>.
41. Hosseinasab S.S., Naderifar M., Akbarizadeh M.R., Rahimzadeh M., Soltaninejad S., Makarem Z., et al. The use of phages for the biosynthesis of metal nanoparticles and their biological applications: A review. *J. Cell Mol. Med.* 2024, vol. 28, no. 11, P. e18383. <https://doi.org/10.1111/jcmm.18383>.
42. Hulkoti N.I., Taranath T.C. Biosynthesis of nanoparticles using microbes—A review. *Colloids Surf. B.* 2014, vol. 121, P. 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.05.027>.
43. Huq M.A., Ashrafudoulla M., Rahman M.M., Balusamy S.R., Akter S. Green Synthesis and Potential Antibacterial Applications of Bioactive Silver Nanoparticles: A Review. *Polymers.* 2022, vol. 14, P. 742. <https://doi.org/10.3390/polym14040742>.
44. Ilahi N., Haleem A., Iqbal S., Fatima N., Sajjad W., Sideeq A., Ahmed S. Biosynthesis of silver nanoparticles using endophytic *Fusarium oxysporum* strain NFW16 and their *in vitro* antibacterial potential. *Microsc. Res. Tech.*, 2022, vol. 85, no. 4, P. 1568–1579. <https://doi.org/10.1002/jemt.24018>.
45. Ishfaq S., Liang X., Ding Y., Zhang J., Zhang F., Anjum A., Guo W. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals the antifungal effects of Myco-silver nanoparticles against toxigenic *Fusarium verticillioides* J. *Environ. Manag.*, 2025, vol. 390, P. 126360. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126360>.
46. Jana S., Das D., Bhattacharyya S., Raha S. Mycogenic synthesis of silver nanoparticles using endophytic fungi and their characterization, biological activities, including *in-silico* studies with special reference to *Fusarium* wilt of tomato. *Fungal Biol.*, 2025, vol. 129, P. 101610. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2025.101610>.
47. Jiang B., Duan D., Gao L., Zhou M., Fan K., Tang Y., et al. Standardized assays for determining the catalytic activity and kinetics of peroxidase-like nanozymes. *Nat. Protoc.* 2018, vol. 13, P. 1506–1520. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0001-1>.
48. Kaliyamurthi S., Selvaraj G., Cakmak Z.E., Cakmak T. Production and characterization of spherical thermostable silver nanoparticles from *Spirulina platensis* (Cyanophyceae). *Phycologia.* 2016, vol. 55, P. 568–576. <https://doi.org/10.2216/15-98.1>.
49. Khairnar S.V., Das A., Oupický D., Sadykov M., Romanova S. Strategies to overcome antibiotic resistance: Silver nanoparticles and vancomycin in pathogen eradication. *RSC Pharm.*, 2025, vol. 2, P. 455–479. <https://doi.org/10.1039/D4PM00314D>.

50. Kthiri A., Hamimed S., Othmani A., Landoulsi A., O'Sullivan S., Sheehan D. Novel static magnetic field effects on green chemistry biosynthesis of silver nanoparticles in *Saccharomyces cerevisiae*. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, P. 20078. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99487-3>.
51. Liao C., Li Y., Tjong S.C. Bactericidal and cytotoxic properties of silver nanoparticles. *Int. J. Mol. Sci.*, 2019, vol. 20, no. 2. P. 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>.
52. Loshchinina E.A., Vetchinkina E.P., Kupryashina M.A. Diversity of biogenic nanoparticles obtained by the fungi-mediated synthesis: A review. *Biomimetics*. 2023, vol. 8, no. 1, P. 1. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010001>.
53. Masurkar S.A., Chaudhari P.R., Shidore V.B., Kamble S.P. Rapid biosynthesis of silver nanoparticles using *Cymbopogon Citratus* (Lemongrass) and its antimicrobial activity. *Nano-Micro Lett.*, 2011, vol. 3, P. 189–194. <https://doi.org/10.1007/BF0353671>.
54. Nabikhan A., Kandasamy K., Raj A., Alikunhi N.M. Synthesis of antimicrobial silver nanoparticles by callus and leaf extracts from saltmarsh plant, *Sesuvium portulacastrum* L. *Colloids Surf. B*. 2010, vol. 79, no. 2, P. 488–493. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.05.018>.
55. Nahar K., Yang D.C., Rupa E.J., Khatun M.K., Al-Reza S.M. Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles from *Clerodendrum viscosum* leaf extract and its antibacterial potential. *Nanomed. Res. J.*, 2020, vol. 5, P. 276–287. <https://doi.org/10.22034/nmrj.2020.03.008>.
56. Negm S., Moustafa M., Sayed M., Alamri S., Alghamdii H., Shati A., et al. Antimicrobial activities of silver nanoparticles of extra virgin olive oil and sunflower oil against human pathogenic microbes. *Pak. J. Pharm Sci.*, 2020, vol. 33, no. 5 (Suppl.), P. 2285–2291.
57. Nongthombam K.S., Kannaiah S., Raju P., Govindan L., Mutum S.S., Pandey R.R. Biogenic production of silver nanoparticles using *Neocosmospora solani* endophytic fungal extract: Their *in vitro* antibacterial and anticancer properties. *J. Inorg. Organomet. Polym.*, 2025, vol. 35, P. 1603–1614. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03226-w>.
58. Oh J.-W., Han D.-W. Virus-based nanomaterials and nanostructures. *Nanomaterials*. 2020, vol. 10, no. 3, P. 567. <https://doi.org/10.3390/nano10030567>.
59. Oluranti O.O., Ogundedeji B.A., Orisajo S.B. Comparative impacts of Myco-synthesized nanoparticles against strains of *Aspergillus* spp. causing biodeterioration of stored cocoa beans in Nigeria. *Discov. Nano*. 2024, vol. 19, P. 207. <https://doi.org/10.1186/s11671-024-04113-6>.
60. Owrang M., Gholami A. Green-synthesized silver nanoparticles from *Zataria multiflora* as a promising strategy to target quorum sensing and biofilms in *Pseudomonas aeruginosa*. *Heliyon*. 2024, vol. 10, no. 19, P. e38395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38395>.
61. Pallath N., Francis B., Devanesan S., Asemi N., AlSalhi M.S., Natarajan S. Synthesis of silver nanoparticles from marine bacteria and evaluation of antimicrobial, antifungal and cytotoxic effects. *J. King Saud Univ. Sci.*, 2024, vol. 36, P. 103073. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.103073>.
62. Pareek V., Gupta R., Panwar J. Do physico-chemical properties of silver nanoparticles decide their interaction with biological media and bactericidal action? A review. *Mater. Sci. Eng. C*. 2018, vol. 90, P. 739–749. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.093>.
63. Pirkovi'c A., Lazi'c V., Spremo-Potparevi'c B., Živkovi'c L., Topalovi'c D., Kuzman S., et al. Comparative analysis of Ag NPs functionalized with olive leaf extract and oleuropein and toxicity in human trophoblast cells and peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2023, vol. 38, P. 169–181. <https://doi.org/10.1093/mutage/gead013>.
64. Polivanova O.B., Cherednichenko M.Y., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. *In vitro* antibacterial effect of silver nanoparticles synthesized using *Agastache foeniculum* plant and callus extracts. *AIMS Agriculture and Food*. 2021, vol. 6, P. 631–643. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021037>.
65. Ratti M., Naddeo J.J., Gripenburg J.C., O'Malley S.M., Bubb D.M., Klein E.A. Production of metal nanoparticles by pulsed laser-ablation in liquids: A tool for studying the antibacterial properties of nanoparticles. *J. Vis. Exp.*, 2017, vol. 124, P. 55416. <https://doi.org/10.3791/55416>.
66. Rehman F.U., Jiang H., Selke M., Wang X. Mammalian cells: a unique scaffold for *in situ* biosynthesis of metallic nanomaterials and biomedical applications. *J. Mater. Chem. B*, 2018, vol. 6, no. 41, P. 6501–6514. <https://doi.org/10.1039/C8TB01955J>.
67. Reicha F.M., Sarhan A., Abdel-Hamid M.I., El-Sherbiny I.M. Preparation of silver nanoparticles in the presence of chitosan by electrochemical method. *Carbohydr. Polym.*, 2012, vol. 89, P. 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.03.002>.
68. Samundeeswari A., Dhas S.P., Nirmala J., John S.P., Mukherjee A., Chandrasekaran N. Biosynthesis of silver nanoparticles using actinobacterium *Streptomyces albogriseolus* and its antibacterial activity. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 2012, vol. 59, no. 6, P. 503–507. <https://doi.org/10.1002/bab.1054>.
69. Satarzadeh N., Shakibaie M., Adeli-Sardou M., Jabari-Morouei F., Forootanfar H., Sadeghi-Dousari A. Facile microwave-assisted biosynthesis of arsenic nanoparticles and evaluation their antioxidant properties and cytotoxic effects: a preliminary *in vitro* study. *J. Clust. Sci.* 2023, vol. 34, P. 1831–1839. <https://doi.org/10.1007/s10876-022-02356-w>.

70. Satarzadeh N., Sadeghi Dousari A., Amirheidari B., Shakibaie M., Ramezani Sarbandi A., Forootanfar H. An insight into biofabrication of selenium nanostructures and their biomedical application. *3 Biotech* 2023, vol. 13, no. 3, P. 79. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03476-4>.
71. Sathishkumar G., Gobinath C., Karpagam K., Hemamalini V., Premkumar K., Sivaramakrishnan S. Phyto-synthesis of silver nanoscale particles using *Morinda citrifolia* L. and its inhibitory activity against human pathogens. *Colloids Surf. B* 2012, vol. 95, P. 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.03.001>.
72. Sellami H., Khan S.A., Ahmad I., Alarfaj A.A., Hirad A.H., Al-Sabri A.E. Green synthesis of silver nanoparticles using *Olea europaea* leaf extract for their enhanced antibacterial, antioxidant, cytotoxic and biocompatibility applications. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, P. 12562. <https://doi.org/10.3390/ijms22212562>.
73. Shaaban M.T., Zayed M., Salama H.S. Antibacterial potential of bacterial cellulose impregnated with green synthesized silver nanoparticle against *S. aureus* and *P. aeruginosa*. *Curr. Microbiol.*, 2023, vol. 80, P. 75. <https://doi.org/10.1007/s00284-023-03182-7>.
74. Shantkriti S., Pradeep M., Unish K.K., Viji Das M.S., Nidhin S., Gudan K., et al. Bioynthesis of silver nanoparticles using *Dunaliella salina* and its antibacterial applications. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, 2023, vol. 13, P. 100377. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100377>.
75. Shanmugam N., Rajkamal P., Cholan S., et al. Biosynthesis of silver nanoparticles from the marine seaweed *Sargassum wightii* and their antibacterial activity against some human pathogens. *Appl. Nanosci.* 2014, vol. 4, no. 7, P. 881–888. <https://doi.org/10.1007/s13204-013-0271-4>.
76. Sharma A., Sharma S., Sharma K., Chetri S.P.K., Vashishtha A., Singh P., et al. Algae as crucial organisms in advancing nanotechnology: a systematic review. *J. Appl. Phycol.*, 2016, vol. 28, P. 1759–1774. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0715-1>.
77. Singh R., Shedbalkar U.U., Wadhvani S.A., Chopade B.A. Bacteriogenic silver nanoparticles: Synthesis, mechanism, and applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2015, vol. 99, P. 4579–4593. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6622-1>.
78. Sinha S.N., Paul D., Halder N., Sengupta D., Patra S.K. Green synthesis of silver nanoparticles using fresh water green alga *Pithophora oedogonia* (Mont.) Wittrock and evaluation of their antibacterial activity. *Appl. Nanosci.*, 2015, vol. 5, P. 703–709. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0366-6>.
79. Singh S., Angurana R., Kaur H., Katoch V., Dhanjal D.S., Aguilar-Marcelino L., et al. *Nanoencapsulation of fertilizers: Delivery and applications*. In: *Nanofertilizer Delivery, Effects and Application Methods*. Ed.: Abd-Elsalam KA. Elsevier. 2024, P. 97–110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13332-9.00011-3>.
80. Singh R., Wagh .P, Wadhvani S., Gaidhani S., Kumbhar A., Bellare J., Chopade B.A. Synthesis, optimization, and characterization of silver nanoparticles from *Acinetobacter calcoaceticus* and their enhanced antibacterial activity when combined with antibiotics. *Int J Nanomedicine*. 2013, vol. 8, P. 4277–4290. <https://doi.org/10.2147/IJN.S48913>.
81. Soshnikova V., Kim Y.J., Singh P., Huo Y., Markus J., Ahn S., et al. Cardamom fruits as a green resource for facile synthesis of gold and silver nanoparticles and their biological applications. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.*, 2018, vol. 46, no. 1, P. 108–117. <https://doi.org/10.1080/21691401.2017.1296849>.
82. Sreelekha E., George B., Shyam A., Sajina N., Mathew B. A comparative study on the synthesis, characterization, and antioxidant activity of green and chemically synthesized silver nanoparticles. *BioNanoSci.*, 2021, vol 11, P. 489–496. <https://doi.org/10.1007/s12668-021-00824-7>.
83. Sumitha S., Vasanthi S., Shalini S., Chinni S.V., Gopinath S.C.B., Anbu P. et al. Phyto-mediated photo catalysed green synthesis of silver nanoparticles using *Durio Zibethinus* seed extract: Antimicrobial and cytotoxic activity and photocatalytic applications. *Molecules*. 2018, vol. 23, P. 3311. <https://doi.org/10.3390/molecules23123311>.
84. Tăbăran A.F., Matea C. T., Mocan T., et al. Silver nanoparticles for the therapy of Tuberculosis. *Int. J. Nanomed.*, 2020, vol. 15, P. 2231–2258. <https://doi.org/10.2147/IJN.S241183>.
85. Vidyasagar, Patel R.R., Singh S.K., Singh M. Green synthesis of silver nanoparticles: methods, biological applications, delivery and toxicity. *Mater. Adv.*, 2023, vol. 4, P. 1831–1849. <https://doi.org/10.1039/d2ma01105k>.
86. Vijayan S.R., Santhiyagu P., Singamuthu M., Ahila N. K., Jayaraman R., et al. Synthesis and characterization of silver and gold nanoparticles using aqueous extract of seaweed, *Turbinaria conoides*, and their antimicrofouling activity. *Sci. World J.*, 2014, vol. 2014, P. 38272. <https://doi.org/10.1155/2014/938272>.
87. Vorobyova V., Vasyliov G., Uschapovskiy D., Lyudmyla K., Skiba M. Green synthesis, characterization of silver nanoparticles for biomedical application and environmental remediation. *J. Microbiol. Methods*, 2022, vol. 193, P. 106384. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106384>.
88. Wijnhoven S.W.P., Peijnenburg W.J.G.M., Herberts C.A., Hagens W.I., Oomen A.G., Heugens E.H.W. et al. Nano-silver: A review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology*. 2009, vol. 3, P. 109–138. <https://doi.org/10.1080/17435390902725914>.

89. Yassin M.T., Mostafa A.A.-F., Al-Askar A.A., Al-Otibi F.O. Facile green synthesis of silver nanoparticles using aqueous leaf extract of *Origanum majorana* with potential bioactivity against multidrug resistant bacterial strains. *Crystals*. 2022, vol. 12, no. 5, P. 603. <https://doi.org/10.3390/cryst12050603>.
90. Yazdani M., Rostamzadeh P., Rahbar M., Alam M., Abbasi K., Tahmasebi E., et al. The potential application of green-synthesized metal nanoparticles in dentistry: A comprehensive review. *Bioinorg. Chem. Appl.*, 2022, vol. 2022, P. 2311910. <https://doi.org/10.1155/2022/2311910>.
91. Xia F., Tao X., Wang H., Shui J., Min C., Xia Y., et al. Biosynthesis of silver nanoparticles using the biofilm supernatant of *Pseudomonas aeruginosa* PA75 and evaluation of their antibacterial, antibiofilm, and antitumor activities. *Int. J. Nanomed.*, 2023, vol. 18, P. 2485–2502. <https://doi.org/10.2147/IJN.S410314>.
92. Zhang H., Chen S., Jia X., Huang Y., Ji R., Zhao L. Comparison of the phytotoxicity between chemically and green synthesized silver nanoparticles. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 752, P. 142264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142264>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гулий Ольга Ивановна — доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов — обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук» (ИБФРМ РАН), Саратов, Российская Федерация
E-mail: guliy_olga@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0541-0020>

Караваева Ольга Александровна — кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов — обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук» (ИБФРМ РАН), Саратов, Российская Федерация
E-mail: helga1121@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0665-1846>

Дыкман Лев Абрамович — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории иммунохимии, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов — обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук» (ИБФРМ РАН), Саратов, Российская Федерация
E-mail: dykman_l@ibppm.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2440-6761>

Поступила в редакцию 16.02.2026

После доработки 15.03.2026

Принята к публикации 03.04.2026

ABOUT THE AUTHORS

Guliy, Olga I. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms—Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russian Federation
E-mail: guliy_olga@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0541-0020>

Karavaeva, Olga A. — Ph.D. (Biological Sciences), Research Scientist, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms—Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russian Federation
E-mail: helga1121@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0665-1846>

Dykman, Lev A. — Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher at the Immunochemistry Laboratory, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms—Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russian Federation
E-mail: dykman_l@ibppm.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2440-6761>

Received February 16, 2026

Revised March 15, 2026

Accepted April 03, 2026