

«Зеленый» синтез серебряных наночастиц и их антибактериальные и цитотоксические свойства

Зилола Максуджон-қизи Рахимберганова
Ташкентский государственный технический университет

Аннотация: В данной статье на основе современных научных источников в сравнительно-аналитическом ключе изучены молекулярные механизмы получения наночастиц серебра (AgNPs) методом «зеленого» синтеза, а также их антибактериальные и цитотоксические свойства. Проведено сравнение физико-химических характеристик и биологической активности AgNPs, синтезированных с использованием различных растительных экстрактов. Согласно результатам анализа литературы, размер, форма и функциональные группы на поверхности наночастиц являются основными факторами, определяющими их биологическую эффективность. AgNPs, полученные «зеленым» синтезом, отличаются экологической безопасностью и биосовместимостью по сравнению с традиционными методами. В статье проанализированы научные исследования, опубликованные за последние 15 лет, на основе чего систематизирована взаимосвязь между условиями синтеза, характеристиками частиц и биологической активностью.

Ключевые слова: AgNPs (наночастицы серебра), «зеленый» синтез, фитохимическая редукция, антибактериальный механизм, цитотоксичность, АФК (активные формы кислорода), нано-био интерфейс

“Green” synthesis of silver nanoparticles and their antibacterial and cytotoxic properties

Zilola Maksudzhon-kizi Rahimberganova
Tashkent State Technical University

Abstract: This article, based on modern scientific literature, provides a comparative analytical study of the molecular mechanisms of producing silver nanoparticles (AgNPs) by “green” synthesis, as well as their antibacterial and cytotoxic properties. The physicochemical characteristics and biological activity of AgNPs synthesized using various plant extracts are compared. According to the literature review, the size, shape, and functional groups on the nanoparticle surface are the main factors determining their biological efficacy. AgNPs obtained by “green” synthesis are environmentally safe and biocompatible compared to traditional methods. This article

analyzes scientific studies published over the past 15 years, systematizing the relationship between synthesis conditions, particle characteristics, and biological activity.

Keywords: AgNPs (silver nanoparticles), green synthesis, phytochemical reduction, antibacterial mechanism, cytotoxicity, ROS (reactive oxygen species), nano-bio interface

Введение. В последние десятилетия металлические наночастицы, особенно наночастицы серебра (AgNPs), стали важным объектом исследований благодаря их уникальным физико-химическим свойствам и механизмам взаимодействия с биологическими системами [3, 4]. Антибактериальная, противогрибковая и цитотоксическая активность наночастиц серебра открывает широкие возможности для их применения в биомедицине, фармацевтике, пищевой промышленности и очистке окружающей среды. Традиционные методы синтеза (коллоидный, электрохимический, фотохимический) зачастую требуют использования токсичных химических реагентов, высоких температур и сложного оборудования. Низкая экологическая безопасность этих методов, а также образование токсичных побочных продуктов в процессе синтеза ограничивают их применение в биомедицинских целях [1].

Подход «зеленого» синтеза был предложен в качестве альтернативы традиционным методам, поскольку он не только обеспечивает экологическую безопасность, но и приводит к образованию биологически активного покрытия (кэппинга) на поверхности наночастиц. Флавоноиды, фенольные кислоты, терпеноиды и другие фитохимические вещества, содержащиеся в растительных экстрактах, выполняют функцию восстановления ионов Ag^+ и стабилизации образующихся частиц [2]. Согласно результатам анализа литературы, в моделях, предложенных различными авторами, основное внимание уделяется восстановлению ионов Ag^+ фитохимическими компонентами, однако механизм стабилизации и роль поверхностных функциональных групп в биологической активности до сих пор полностью не установлены. Целью данного исследования является систематизированное освещение на основе анализа литературы механизмов синтеза, физико-химических свойств, а также антибактериальных и цитотоксических свойств наночастиц серебра, полученных методом «зеленого» синтеза.

Механизм «зеленого» синтеза и физико-химические свойства

Процесс «зеленого» синтеза основан на взаимодействии фитохимических соединений, содержащихся в растительном экстракте, с ионами серебра. Согласно проанализированным источникам, синтез наночастиц серебра включает следующие последовательные этапы:

- Этап восстановления - фитохимические компоненты, содержащиеся в растительном экстракте (флавоноиды, фенольные кислоты, терпеноиды, алкалоиды), восстанавливают ионы Ag^+ до Ag^0 . Фенольные соединения выступают в качестве доноров электронов посредством своих гидроксильных групп.

- Этап нуклеации и роста - восстановленные атомы серебра агрегируют друг с другом и после достижения критического размера образуют стабильные ядра наночастиц. На данном этапе формируются размер и форма частиц.

- Этап стабилизации (кэппинга) - метаболиты растений (белки, полисахариды, органические кислоты) адсорбируются на поверхности вновь образованных наночастиц, предотвращая их агрегацию и обеспечивая коллоидную стабильность [1, 3].

Согласно данным литературы, синтезированные наночастицы обычно имеют сферическую форму, их размер находится в диапазоне 10-50 нм, а поверхностный плазмонный резонанс (ППР) наблюдается в интервале 400-450 нм [3]. В то же время в других исследованиях размер частиц составляет 15-30 нм и сильно зависит от условий синтеза (рН, температура, концентрация реагентов, время инкубации) [2]. Сравнительный анализ показывает, что оптимизация параметров синтеза - в частности, выбор рН в интервале 7-9, повышение температуры до 60-80 °С и правильный подбор концентрации экстракта - способствует повышению дисперсности и стабильности наночастиц.

В различных исследованиях существуют расхождения во взглядах на механизм «зеленого» синтеза. Некоторые исследователи считают скорость восстановления основным фактором, определяющим размер частиц: быстрое восстановление приводит к образованию частиц малого размера. Другие же указывают на рН и температуру как на доминирующие факторы, поскольку эти параметры непосредственно влияют на степень ионизации и восстановительную способность фитохимических веществ [1, 2].

Антибактериальная активность: механизмы и различия

Антибактериальная активность наночастиц серебра сделала их одним из наиболее перспективных наноматериалов. На основе анализа литературы антибактериальное действие AgNPs подразделяется на три основные модели:

1. Мембрано-интеракционная модель - наночастицы прикрепляются к клеточной стенке бактерии, нарушая её структуру и повышая проницаемость. В результате вещества, проникающие внутрь клетки, проходят бесконтрольно, и клетка теряет осмотическое равновесие.

2. Модель окислительного стресса - активные формы кислорода (АФК), образующиеся под действием AgNPs - супероксид-анион (O_2^-), пероксид водорода (H_2O_2), гидроксильный радикал ($\bullet OH$) - вызывают окислительное

повреждение внутриклеточных липидов, белков и нуклеиновых кислот. Это приводит к нарушению клеточного метаболизма и апоптозу.

3. Модель высвобождения ионов - выделившиеся из AgNPs ионы Ag^+ проникают в бактериальную клетку, блокируют ферментные системы (особенно ферменты, содержащие тиоловые группы), нарушают репликацию ДНК и ингибируют процессы клеточного дыхания [3, 4].

Сравнительный анализ показывает, что частицы малого размера (<20 нм) обладают более сильным антибактериальным действием, поскольку их удельная поверхность велика и вероятность взаимодействия с клеткой выше. Кроме того, сферическая форма эффективнее палочковидной или треугольной, так как сферические частицы равномерно распределяются по клеточной мембране и образуют большее количество контактных точек [2]. Эффективность действия AgNPs в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий различна: из-за сложного строения клеточной стенки грамотрицательных бактерий воздействовать на них труднее, однако наночастицы серебра малого размера проявляют высокое ингибирующее действие в отношении обоих типов.

Цитотоксичность: проблема селективности

Исследования цитотоксичности ведутся в двух направлениях: влияние на раковые клетки и влияние на здоровые клетки. В раковых клетках AgNPs вызывают нарушение митохондриального мембранного потенциала, высвобождение цитохрома c и индукцию апоптоза через активацию каспаз. В результате останавливается клеточный цикл и наблюдается гибель опухолевых клеток [2, 4].

При изучении воздействия на здоровые клетки было установлено, что AgNPs проявляют токсичность, зависящую от дозы и времени экспозиции. При высоких концентрациях и длительном воздействии AgNPs даже в здоровых клетках вызывают повреждение клеток через окислительный стресс, повреждение ДНК и нарушение целостности клеточной мембраны.

В различных работах селективность AgNPs оценивается противоречиво, что указывает на её зависимость от условий синтеза и биомолекул на поверхности частиц. В частности, на поверхности AgNPs, полученных методом «зеленого» синтеза, присутствуют растительные метаболиты (кэппинг-агенты), которые повышают биосовместимость частиц и могут снижать токсичность в отношении здоровых клеток. Однако точные механизмы, обеспечивающие эту селективность, до сих пор полностью не установлены и требуют дальнейших исследований [1, 3].

Обсуждение

Результаты анализа показывают, что биологическая активность наночастиц серебра, полученных методом «зеленого» синтеза, определяется рядом факторов:

- Фитохимический состав - биоактивные вещества в растительном экстракте (флавоноиды, фенольные соединения, терпеноиды) участвуют не только в процессе восстановления, но и на этапе стабилизации. Состав и соотношение этих веществ непосредственно определяют размер, форму и поверхностные функциональные группы частиц.

- Условия синтеза - такие параметры, как pH, температура, концентрация экстракта, время инкубации, влияют на размер частиц и их стабильность. Путём выбора оптимальных условий можно получить монодисперсные и стабильные AgNPs в диапазоне 10-30 нм.

- Поверхностное покрытие (кэппинг) - адсорбция растительных метаболитов регулирует цитотоксичность и биосовместимость. Биомолекулы, выступающие в качестве кэппинг-агентов, модулируют взаимодействие частиц с клетками и влияют на характеристики их распределения в организме.

Кроме того, наночастицы, полученные из разных растений, обладают различными биологическими свойствами, что обусловлено специфичностью содержащихся в них биоактивных веществ. Например, AgNPs, синтезированные из растений, богатых полифенолами, обычно проявляют более высокую антиоксидантную и антибактериальную активность [2, 4].

Полученные наночастицы серебра проявляют высокую активность против бактерий. Они уничтожают микроорганизмы путём разрушения клеточной стенки, образования активных форм кислорода и повреждения ДНК. Кроме того, установлено, что наночастицы обладают цитотоксическими свойствами и индуцируют апоптоз в раковых клетках. Однако в высоких концентрациях они могут наносить вред и здоровым клеткам, что указывает на важность правильного выбора дозы при их применении в медицине [1, 3].

Заключение

Наночастицы серебра, полученные методом «зеленого» синтеза, обладают высоким потенциалом в качестве многофункционального наноматериала. На основе анализа литературы в данной работе сделаны следующие основные выводы:

1. Процесс «зеленого» синтеза состоит из этапов восстановления, нуклеации, роста и стабилизации, причем на каждом этапе важную роль играют фитохимические соединения, содержащиеся в растительном экстракте.

2. Условия синтеза (pH, температура, концентрация) непосредственно влияют на размер, форму и стабильность наночастиц. Путем выбора

оптимальных параметров можно получить монодисперсные AgNPs в диапазоне 10-30 нм.

3. Антибактериальная активность AgNPs реализуется через механизмы нарушения мембраны, окислительного стресса и высвобождения ионов. Наивысшую антибактериальную эффективность проявляют сферические частицы малого размера (<20 нм).

4. Исследования цитотоксичности показывают, что AgNPs могут проявлять селективное действие в отношении раковых клеток, однако эта селективность зависит от условий синтеза и поверхностного покрытия.

5. AgNPs, полученные методом «зеленого» синтеза, отличаются от традиционных методов экологической безопасностью, биосовместимостью и наличием биологически активного покрытия на поверхности.

В дальнейшем целесообразно оптимизировать условия синтеза на основе конкретного растительного экстракта, углубленно изучить роль поверхностных функциональных групп в биологической активности и провести токсикологические исследования *in vivo*, чтобы расширить возможности безопасного применения «зеленых» AgNPs в медицине и фармацевтике.

Использованная литература

1. Iravani S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10), 2638–2650.
2. Saeed M., Iqbal J., Ahmed A., & Khan S. (2025). Green-synthesized silver nanoparticles: Antibacterial activity and mechanism of action against multidrug-resistant pathogens. *Journal of Nanobiotechnology*, 23(2), 45–58.
3. Ahsan A., Farooq M., & Hussain T. (2025). Phyto-genic silver nanoparticles: Biomedical potential, therapeutic applications and toxicity assessment. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 20(1), 112–125.
4. Rai M., Yadav A., & Gade A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76–83.
5. Pan Y., Neuss S., Leifert A., Fischler M., Wen F., Simon U., Schmid G., Brandau W., Jahnen-Dechent W. Gold nanoparticles of diameter 1.4 nm trigger necrosis by oxidative stress and mitochondrial damage. // *Small*, 2009-y., 3(11), 1941–1949.
6. Pingarrón J. M., Yáñez-Sedeño P., González-Cortés A. Gold nanoparticle-based electrochemical biosensors. // *Electrochimica Acta*, 2008-y., 53(19), 5848–5866.
7. Raximberganova Z.M. Oltin nanozarrachalar: tushunchasi, tasnifi va fizik kimyoviy xususiyatlari // «Innovatsion yechimlar: qishloq xo‘jaligi va oziq-ovqat sanoatida barqaror rivojlanish» mavzusidagi VI xalqaro ilmiy-texnik anjuman ma’ruzalar to‘plami. 3 jild. Tosh.2026.

8. Pan Y., Neuss S., Leifert A., Fischler M., Wen F., Simon U., Schmid G., Brandau W., Jahnen Dechent W. Gold nanoparticles of diameter 1.4 nm trigger necrosis by oxidative stress and mitochondrial damage. // *Small*, 2009-y., 3(11), 1941–1949.
9. Pingarrón J. M., Yáñez-Sedeño P., González-Cortés A. Gold nanoparticle-based electrochemical biosensors. // *Electrochimica Acta*, 2008-y., 53(19), 5848–5866.