

- humerus fractures: a pilot study. *International Journal of Telerehabilitation*. 2015;6(2):31-37. <https://doi.org/10.5195/ijt.2014.6158>
37. Steiner B., Elgert L., Saalfeld B., Schwartze J., Borrmann H. P. [et al.]. Health-enabling technologies for telerehabilitation of the shoulder: a feasibility and user acceptance study. *Methods Inf. Med.* 2020;59:e90-e99. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1713685>
38. Sassi M., Villa Corta M., Pisani M. G., Nicodemi G., Schena E. [et al.]. Advanced home-based shoulder rehabilitation: a systematic review of remote monitoring devices and their therapeutic efficacy. *Sensors (Basel)*. 2024;24(9):2936. <https://doi.org/10.3390/s24092936>

Поступила 23.08.2025

Сведения об авторах:

Корецкая Наталья Евгеньевна, врач физической и реабилитационной медицины, заведующая амбулаторным отделением медицинской реабилитации; тел.: +79161273367; e-mail: n.koretskaya@vipmed.ru; <https://orcid.org/0009-0008-3217-3578>

Вонгай Игорь Александрович, врач – ортопед-травматолог Центра амбулаторной хирургии с дневным стационаром; e-mail: i.vongai@vipmed.ru; <https://orcid.org/0009-0004-2558-9314>

Сальников Андрей Станиславович, врач физической и реабилитационной медицины амбулаторного отделения медицинской реабилитации; e-mail: a.salnikov@vipmed.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0000-3801>

Ржевская Елена Васильевна, кандидат медицинских наук, главный врач; e-mail: e.rzhevskaya@vipmed.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2534-0118>

Боева Ольга Игоревна, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры поликлинической медицины, научный консультант врач-терапевт; тел.: +79288117274; e-mail: box0271@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1816-8309>

© Коллектив авторов, 2025

УДК 620.3:615

DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20086>

ISSN – 2073-8137

Использование наночастиц серебра в современной экспериментальной медицине и клинической практике

В. В. Малышко^{1, 2}, И. М. Быков¹, Т. А. Заикин¹, Д. И. Шашков³,
А. В. Моисеев⁴, А. А. Басов^{1, 3}, Е. Е. Есауленко¹, А. П. Сторожук¹

¹ Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Российская Федерация

² Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

³ Кубанский государственный университет, Краснодар, Российская Федерация

⁴ Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Российская Федерация

Using of silver nanoparticles in current experimental medicine and clinical practice

Malysenko V. V.^{1, 2}, Bykov I. M.¹, Zaikin T. A.¹, Shashkov D. I.³,
Moiseev A. V.⁴, Basov A. A.^{1, 3}, Esaulenko E. E.¹, Storozhuk A. P.¹

¹ Kuban State Medical University, Krasnodar, Russian Federation

² Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

³ Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

⁴ Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

Использование наночастиц серебра (AgNPs) в клинической практике и экспериментальной медицине представляет существенный интерес в связи с их выраженными противовирусными, микробицидными, фунгицидными и противоопухолевыми эффектами. Способность AgNPs оказывать различное по интенсивности влияние на биологические объекты определяется их размером (чаще менее 100 нм), формой (сферической, треугольной, стержневой и т. д.), структурой внешних слоев (в зависимости от вида лиганда), зарядом (положительным, отрицательным, практически нейтральным). Показано, что в хирургии, онкологии, стоматологии, травматологии, лабораторной диагностике вос-

требованы нанокластеры диаметром до 30 нм, что позволяет получить более широкое представление о возможностях по использованию подобных инновационных нанотехнологий.

Ключевые слова: наночастицы серебра, антибактериальная активность, экспериментальная медицина, лиганд, синтез наночастиц, цитотоксичность

The use of silver nanoparticles (AgNPs) in clinical practice and experimental medicine is of significant interest due to their pronounced antiviral, microbicidal, fungicidal and antitumor effects. The ability of AgNPs to exert varying intensity effects on biological objects is determined by their size (usually less than 100 nm), shape (spherical, triangular, rod-shaped, etc.), structure of the outer layers (depending on the type of ligand), charge (positive, negative, almost neutral). It has been shown that nanoclusters with a diameter of up to 30 nm are in demand in surgery, oncology, dentistry, traumatology, and laboratory diagnostics, which allows for a broader understanding of the possibilities of using such innovative nanotechnologies.

Keywords: silver nanoparticles, antibacterial activity, experimental medicine, ligand, nanoparticle synthesis, cytotoxicity

Для цитирования: Малышко В. В., Быков И. М., Заикин Т. А., Шашков Д. И., Моисеев А. В., Басов А. А., Есауленко Е. Е., Сторожук А. П. Использование наночастиц серебра в современной экспериментальной медицине и клинической практике. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2025;20(4):407-414. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20086>

For citation: Malysheko V. V., Bykov I. M., Zaikin T. A., Shashkov D. I., Moiseev A. V., Basov A. A., Esaulenko E. E., Storozhuk A. P. Using of silver nanoparticles in current experimental medicine and clinical practice. *Medical News of North Caucasus*. 2025;20(4):407-414. DOI – <https://doi.org/10.14300/mnnc.2025.20086> (In Russ.)

AgNPs – наночастицы серебра
CHSB-AgNPs – наночастицы серебра с цистеамином
CYS-AgNPs – наночастицы серебра с L-цистеином
IC50 – концентрация полумаксимального ингибирования

MIC – минимальная ингибирующая концентрация
TCSB-AgNPs – наночастицы серебра, стабилизированные цитратом

Наночастицы серебра (AgNPs) содержат от 20 до 15 000 атомов серебра, а их диаметр обычно меньше 100 нм. Вследствие довольно большого соотношения поверхности к объему такой наночастицы последние проявляют высокую антимикробную активность даже при небольшом их содержании в биообъекте. Кроме того, они, как правило, характеризуются невысокой себестоимостью и демонстрируют низкую цитотоксичность и крайне слабо выраженный иммунологический ответ [1]. Антибактериальные, противоопухолевые, противовирусные, каталитические свойства и форма наночастиц серебра существенно меняются в зависимости от условий их синтеза и используемых при этом субстанций [2–5], в том числе могут получаться AgNPs треугольной [6, 7], сферической [8–10] или стержневой [11, 12] формы с различной активностью в отношении микроорганизмов и патологических клеток [13, 14], а также существенно отличающейся цитотоксичностью [9, 15].

Целью обзора состояла в анализе основных способов получения AgNPs с оценкой эффективности их применения в экспериментальной медицине и клинической практике, в том числе полученных путем кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления.

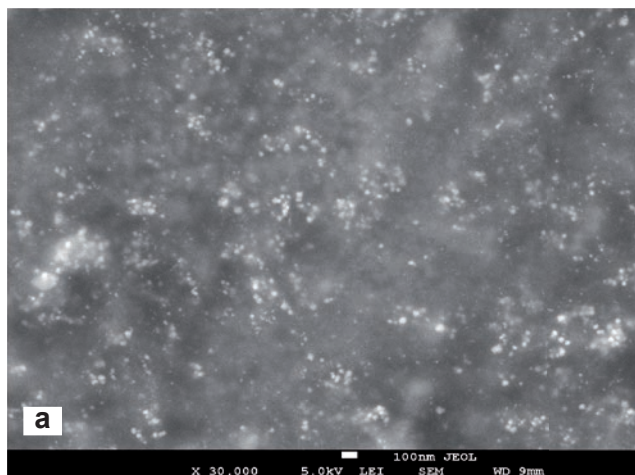
Основные области применения наночастиц серебра в экспериментальной и клинической практике. Применение серебросодержащих наночастиц в медицине имеет достаточно широкий диапазон. Например, AgNPs традиционно используются в хирургии при лечении инфицированных и контаминированных ран [16–19], когда они могут быть задействованы в качестве антисептического агента в составе раневых покрытий или для обработки шовного материала [20]. В частности, были разработаны раневые покрытия на основе AgNPs, модифицированных L-серином с наноцеллюлозой. Обработка ран составами, содержащими такие наночастицы, позволила ускорить их заживление, увеличить количество волосяных фолли-

кулов и снизить интенсивность образования маркеров воспаления [21]. Также наночастицы серебра нередко вносят в гелевые композиции: для примера известна инъекционная гидрогелевая повязка, содержащая AgNPs-дермальный матричный гидрогель, предназначенный для ускорения процесса заживления ран, пораженных метициллин-резистентным золотистым стафилококком. Разработанная повязка продемонстрировала исключительную биосовместимость и устойчивое высвобождение AgNPs, обеспечивающее длительную антимикробную активность [22].

В другом исследовании полилактиновые шовные материалы были покрыты нанокластерами серебра, после чего они использовались для создания межкисеточного анастомоза у мышей, что позволило увеличить образование коллагена и уменьшить как острую, так и хроническую инфильтрацию в зоне оперативного вмешательства [23]. Кроме того, перспективным является применение серебросодержащих наноструктур, полученных путем кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления [24, 25], в составе шовного материала после циклической его заморозки (рис. 1а), что приводит к достоверному росту количества наночастиц и повышению их гомогенности [24], особенно на шелке (рис. 1б).

Активно развивается применение AgNPs в онкологии, где традиционно нанокластеры серебра используются в качестве противоопухолевых агентов. Подобные свойства комбинированных наночастиц на основе серебра и золота были проанализированы на клетках рака молочной железы. Биметаллические наночастицы показали дозозависимый противораковый эффект, при этом наблюдалась гибель онкоцитов, зависящая от интенсивности продукции активных форм кислорода. Такие результаты воздействия биметаллических частиц связаны с их большей генотоксической активностью в отношении опухолевых клеток (на 20–24 %), по сравнению с аналогичным показателем у монометаллических аналогов [26]. В то же время активно идет внедрение наночастиц в качестве элементов сенсоров для диагностики злокачествен-

ных новообразований. В частности, был разработан дуплексный портативный иммуносенсор, использующий нанокластеры серебра и золота в качестве нанометок для усиления сигналов иммунореакции.



Полученная технология имела высокую эффективность, вследствие чего была успешно применена для оценки количества и проверки фенотипа опухолевых клеток в крови пациентов с раком легких [27].

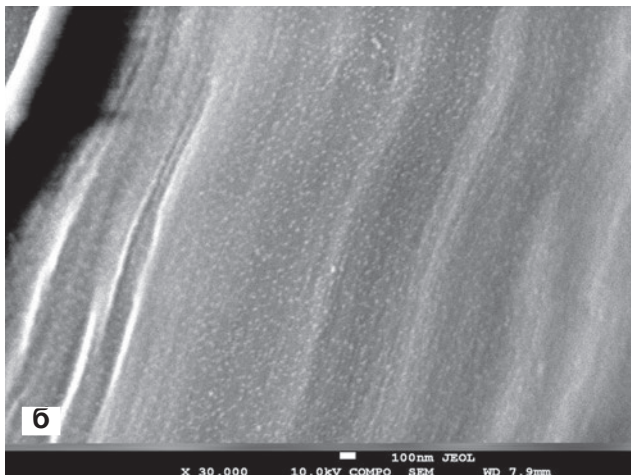


Рис. 1. Микрофотографии наночастиц серебра после циклической заморозки в режиме детектирования отраженных электронов («СОМРО», $\times 30000$): а) на поверхности искусственного перлона; б) на поверхности натурального шелка

AgNPs могут быть задействованы и в процессе лечения переломов костей [28]. В исследовании представлена разработка двух антибактериальных каркасов для регенерации костей путем интеграции наночастиц в гидрогель [29]. При исследовании метаболической активности остеобластов и остеокластов в полученных композициях было выявлено, что регенеративная способность в присутствии наночастиц возрастает, что, по-видимому, связано с усилением пролиферации остеобластов по сравнению с контрольными образцами без нанокластеров. В стоматологии нанокластеры серебра используются в качестве составного элемента композитных материалов [30]. Авторами был предложен модифицированный нанокомпозит, обеспечивающий замедленное высвобождение AgNPs через хелатирующую сеть кремния [31]. В результате чего было доказано, что поверхность титанового импланта, модифицированная данным нанокомпозитом, в большей степени подходит для прикрепления и пролиферации стволовых клеток пульпы зуба человека, а также успешно подавляет рост бактерий и способствует более эффективному остеогенезу.

Основные способы получения наночастиц серебра различного состава и размера. В настоящее время синтетические подходы генерации AgNPs подразделяются на физические, химические и биологические (green synthesis). Физические и химические синтезы, как правило, более трудоемкие и опасные по сравнению с биологическими методами получения AgNPs, обеспечивающими хорошую растворимость и стабильность получаемых нанокластеров [32]. Среди возможных методов получения наночастиц серебра одним из наиболее распространённых и обсуждаемых способов является «green synthesis». Данный подход включает использование биоконпонентов, в основном растительного [33] либо животного [34] происхождения в качестве восстанавливающих лигандов, формирующих в последующем оболочку наночастицы. Размер получаемых наночастиц сильно варьирует, достигая в ряде случаев более чем 200 нм [35], а при некоторых модификациях около 10 нм [36]. Необходимо отметить, что варианты используемых компонентов для «green synthesis» чрезвычайно разнообразны и, вероятно, это связано с наличием в исходном

сырье разных концентраций веществ, обладающих восстановительными свойствами [37], что обуславливает существенные колебания физико-химических характеристик AgNPs в зависимости от особенностей отобранного материала, а в ряде случаев может существенно затруднять применение наночастиц в практических целях. В связи с вышеизложенным, особый интерес представляет синтез AgNPs путем кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления, что предусматривает инкубацию ионов серебра совместно с поливинилпирролидоном, выполняющим роль лиганда, при комплексном воздействии ультразвуковых волн с частотой излучения 1,7 МГц и ультрафиолетового излучения с длиной волны 280–400 нм в течение 60 минут. Данный подход позволяет получать наночастицы преимущественно диаметром менее 6 нм (рис. 2), характеризующиеся хорошей седиментационной и агрегативной устойчивостью, сохраняющие свои свойства при воздействии 1 % растворов NaCl и Na_3PO_4 [24].

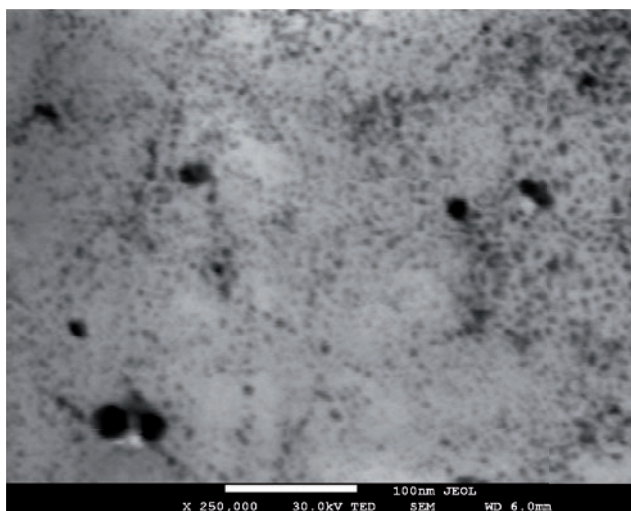


Рис. 2. Электронная микрофотография раствора наночастиц серебра, полученных методом кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления (при увеличении $\times 250000$)

Другой метод получения AgNPs предусматривает использование растворов лигносульфоната натрия и AgNO₃. Реакционная смесь инкубируется при перемешивании в течение 2 ч при 70 °С. При этом pH поддерживается в нейтральном диапазоне путем добавления NaOH. Полученные коллоидные растворы выдерживаются в течение 2 недель при комнатной температуре при периодическом встряхивании для оценки образования AgNPs. Средний размер получаемых наночастиц находится в диапазоне от 10 до 40 нм [38]. Как можно увидеть из описания, несмотря на выраженные антибактериальные свойства и устойчивость полученных нанокластеров к агрегации, метод требует достаточно много времени для получения наноструктур, при этом большинство синтезированных этим путем частиц являются относительно крупными. Также описан способ получения AgNPs, предусматривающий заморозку с последующей обработкой ультразвуком (метод «freeze-thaw-ultrasonication» [39]). В рамках этого метода используется низкотемпературный режим для получения крупных коллоидных агрегатов, которые впоследствии дробятся на более мелкие наночастицы с помощью ультразвукового аппарата.

Сольвотермальный подход получения наночастиц серебра предполагает использование нитрата серебра, полиэтиленгликоля и поливинилпирролидона в условиях нагрева реакционной смеси до 260 °С. Такой способ более дорогостоящий по сравнению с методом химического восстановления и требует тщательного мониторинга реакции из-за особых условий, в которых протекает синтез. В связи с использованием высоких температур и постоянного давления нанокластеры, полученные этим методом, имеют большую размерную дисперсию по сравнению с нанокластерами, полученными методом химического восстановления [40]. Поэтому во многом морфофункциональные свойства AgNPs зависят от конкретных параметров и условий их получения, влияющих как на морфологию, так и на физико-химические и биологические свойства нанокластеров [40, 41]. При этом в одном исследовании наночастицы серебра были получены методом дугового разряда, предусматривающим приложение сильного электрического поля между серебряным и углеродным электродами [42]. В другой работе описано получение AgNPs при помощи многокомпонентного эвтектического растворителя на основе бетаина, глюкозы и этиленгликоля. В зависимости от используемого прекурсора были синтезированы наночастицы диаметром от 50 до 100 нм [45].

Среди физических способов получения наночастиц серебра можно выделить лазерную абляцию, при которой за счет высокотемпературного плазменного шлейфа и высокого давления на поверхности материала происходит образование нанокластеров с детерминированными параметрами в зависимости от свойств материала и условий лазерной обработки. Подобный подход помог создать растворы монодисперсных коллоидных наночастиц. Однако данный метод требует высоких затрат энергии для работы с сыпучими материалами, что значительно повышает стоимость получаемых наноструктур [44]. Еще один физический метод для синтеза наносфер основан на явлении «испарения-конденсации» при атмосферном давлении. По аналогии с предыдущим способом получения наночастиц метод «испарения-конденсации» также потребляет высокие энергетические мощности, требует достаточно большой длительности синтеза и наличия сложного оборудования, что значительно увеличивает эксплуатационные затраты [32]. Вместе с тем полученные этим методом наночастицы серебра сохраняют свои антибактериальные свойства и могут быть применены в биомедицинских устройствах.

Антибактериальная активность наночастиц серебра. Известно, что антибактериальная активность AgNPs связана не только с размером самих нанокластеров, но и зависит от их формы, заряда и структуры внешних слоев. Так, в одном из исследований наночастицы [45], полученные методом «green synthesis» с использованием цианобактерий, были в среднем размером 9,81 нм, а их антибактериальная активность составила: для *S. aureus* 260 мкг/мл, для *S. pyogenes* 60 мкг/мл, для *E. faecalis*, *E. coli*, *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*, *Proteus vulgaris* и *Acinetobacter baumannii* – около 130 мкг/мл, для грибов *C. tropicalis* и *T. rubrum* – 60 и 260 мкг/мл соответственно. Тогда как в другом исследовании более крупные AgNPs размером 12,19 нм [46], также синтезированные с использованием растительного сырья, имели значение минимальной подавляющей концентрации 15,62 мкг/мл в отношении к *S. aureus*. В одной из работ описаны наночастицы серебра со средним размером 17 нм, генерированные с помощью электрической дуги и покрытые углеродной оболочкой, которые имели в отношении *P. aeruginosa* минимальную ингибирующую концентрацию (MIC) 2 мкг/мл [42]. Более того, было определено, что микробицидная активность наночастиц серебра, полученных с использованием одного и того же растительного экстракта, возрастает с уменьшением их размера. Например, были получены растворы наночастиц размером 7, 11, 15 и 19 нм, для которых минимальная подавляющая концентрация составила в отношении *S. aureus* 20; 25; 30 и 40 мкг/мл соответственно [47]. Оценка минимальной подавляющей концентрации в отношении *P. mirabilis*, *K. pneumoniae* и *P. aeruginosa* выявила схожую зависимость с диаметром нанокластеров [47].

В то же время наночастицы серебра, полученные при использовании *Aspergillus hiratsukae*, характеризовались сферической формой и диаметром от 16 до 31 нм, с заметной антимикробной активностью к *S. aureus* и *E. coli* (MIC находилась в диапазоне 250 мкг/мл [48]). Более того, биосинтезированные AgNPs продемонстрировали слабую противогрибковую активность в отношении *Aspergillus brasiliensis* и *Candida albicans* с MIC 500 и 1000 мкг/мл соответственно [48]. В ещё одном исследовании наночастицы серебра, полученные с использованием экстракта *Anadenanthera colubrina*, имели средний размер около 65 нм. Вместе с тем они проявляли противомикробную активность в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий, а клинические изоляты *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Enterobacter cloacae* демонстрировали к ним даже повышенную восприимчивость (значения MIC составляли около 19 мкМ [49]).

Фунгицидная активность наночастиц серебра. Оценка противогрибковой активности наночастиц серебра со средним размером менее 10 нм показала, что после 48 ч инкубации диапазон MIC составлял: для *R. arrhizus* – от менее 8 до 64 мкг/мл, для *A. flavus* – от менее 8 до 64 мкг/мл, для *A. fumigatus* – от 8 до 32 мкг/мл, для *A. niger* – менее 8 мкг/мл и для *F. oxysporum* – 32 мкг/мл [50]. Также известна фунгицидная активность нанокластеров в отношении фитопатогенных грибов (*Fusarium avenaceum* и *Fusarium equiseti* [51]). При этом фунгицидные свойства AgNPs, характеризующихся сопоставимой морфологией (квазисферической формой), могут быть обеспечены не только ионами серебра, но и за счет молекул стабилизирующего агента, адсорбированного на поверхности на-

ночастиц. Прежде всего такой феномен наблюдался для отрицательно заряженных стабилизированных цитратом AgNPs (TCSB-AgNPs) со средним размером 15 нм, тогда как более мелкие AgNPs с цистеамином (CHSB-AgNPs диаметром 12 нм) характеризовались положительным поверхностным зарядом и более высоким профилем высвобождения непосредственно ионов серебра. Результаты исследований показали, что CHSB-AgNPs, особенно в концентрации 10 мг/л, сильно ограничивали рост вегетативного мицелия как при кратковременной, так и при длительной обработке [51]. CHSB-AgNPs повреждали мембраны конидий и проникали в клетки, в то время как TCSB-AgNPs преимущественно откладывались на их поверхности. Фунгистатический (летальный) эффект ионов серебра был продемонстрирован только при 240-часовой обработке для вида *F. equiseti*. Количество спор обоих видов *Fusarium* значительно снижалось независимо от типа используемых соединений серебра, но в целом было обнаружено, что положительно заряженные CHSB-AgNPs оказывали больший фунгицидный эффект, чем отрицательно заряженные TCSB-AgNPs [51].

Кроме того, было доказано, что AgNPs, полученные с использованием экстракта листьев *Hedychium coronarium* демонстрируют выраженный фунгитоксический эффект в отношении *Aspergillus flavus* и *Fusarium oxysporum* [52]. Также было выявлено [53], что наночастицы серебра, характеризующиеся сферической формой со средним размером менее 25 нм и полученные путем химического синтеза в присутствии этиленгликоля и поливинилпирролидона, имели минимальную фунгицидную концентрацию 10 мг/мл в отношении местных изолятов *Penicillium digitatum* и *Penicillium italicum*, а также изолята *Geotrichum citri-aurantii*. В 2024 году на основе водного экстракта *Rhazya stricta* были синтезированы частицы серебра, размер которых варьировал от 21 до 90 нм [54]. При оценке фунгицидного действия этих частиц в отношении *Drechslera halodes*, *Drechslera tetramera*, *Macrophomina phaseolina*, *Alternaria alternata* и *Curvularia australiensis* установлена значительная их способность ингибировать размножение перечисленных видов грибов, в том числе снижать плотность роста с изменением цвета грибной колонии. Более того, нанокластеры серебра, синтезированные с использованием того же растительного сырья и имевшие схожие размеры, достоверно ингибировали рост мицелия *F. incarnatum*, *F. solani*, *F. proliferatum* и *F. verticillioides* ($p < 0,001$) [55].

Противоопухолевая активность наночастиц серебра. Наночастицы серебра диаметром около 20 нм [9], созданные с использованием одного из двух следующих компонентов: цитрата или экстракта сфагнома, достоверно влияли на мезенхимальные стволовые клетки и клетки аденокарциномы легких человека (A549) в концентрациях менее 12 мг/мл. Интересно, что нанокластеры, включающие цитрат, оказывали большее влияние на клетки A549, значительно снижая их рост, в то время как воздействие наночастиц на основе экстракта сфагнома было более выраженным на мезенхимальные стволовые клетки. При этом оба типа наночастиц в концентрации 1 мг/мл не оказывали никакого влияния на данные клеточные линии. Увеличение концентрации AgNPs до 6 мг/мл приводило к заметному уменьшению количества клеток и появлению признаков некроза, таких как набухание, разрушение плазматической мембраны и клеточный лизис. А при концентрации наночастиц 12 мг/мл наблюдались наиболее существенные изменения в структуре клеток со значительным снижением их общего количества.

В 2025 году были синтезированы нанокластеры серебра с использованием экстракта иранского тысячелистника [56]. Данные частицы сферической формы со средним размером 19 нм не демонстрировали никакого гемолитического эффекта в концентрации 1000 мкг/мл, но влияли на клеточную линию меланомы A375 (концентрация полумаксимального ингибирования (IC50) была 12,5 мкг/мл) и на рост клеток инвазивной аденокарциномы протоков молочной железы MCF-7 (IC50 составила от 25 до 50 мкг/мл). Кроме того, эти наночастицы проявляли бактерицидные свойства в отношении *E. coli*, *P. aeruginosa* и *S. aureus*, а также оказывали фунгицидное воздействие на *Candida albicans*.

В дополнение к этому в опубликованной в 2024 году научной работе показано, что AgNPs, размером около 60 нм, полученные путем «green synthesis» с использованием экстрактов различных частей граната, в сочетании с химиотерапевтическим препаратом доксорубицином продемонстрировали значительную эффективность в отношении клеток рака груди и рака шейки матки. Результаты свидетельствуют о синергетическом эффекте при комбинировании этих противоопухолевых компонентов [8]. В другом исследовании была произведена оценка противоопухолевой активности наночастиц размером от 34 до 40 нм, созданных с помощью экстракта листьев *Moringa oleifera*. При оценке индуцированной апоптотической гибели клеток карциномы кишечника Caco-2 путем активации экспрессии гена MLH1 установлено, что антипролиферативное действие наночастиц серебра зависит от их содержания. Выявлена достоверная цитотоксичность у синтезированных наночастиц в концентрации 0,44 мг/мл после обработки в течение 42 часов линии онкоцитов и контрольных (здоровых) клеток. При этом процент гибели раковых клеток статистически значимо отличался в сравнении с контролем ($p < 0,05$) [57].

Цитотоксические эффекты наночастиц серебра. Токсичность AgNPs зависит от их физико-химических свойств, в связи с чем разработка новых способов их модификации, позволяющих снижать либо полностью нивелировать негативные процессы, вызываемые наночастицами в отдельных типах клеток, представляет значительный интерес для медицинской науки. Например, применение AgNPs квазисферической формы размером 18 нм (± 3 нм), синтезированных путем химического восстановления и стабилизированных аминокислотами (наночастицы серебра с L-цистеином – CYS-AgNPs), представляется многообещающим в связи с их особыми электрокинетическими свойствами. В том числе, было изучено влияние поверхностного заряда стабилизированных цистеином нанокластеров на их токсичность по отношению к линиям лимфоцитов В (COLO-720L) и Т (HUT-78). Так, после 24-часовой обработки лимфоцитов CYS-AgNPs наблюдались изменения в морфологии клеток, зависящие от концентрации наночастиц. При этом положительно заряженные CYS-AgNPs заметно снижали жизнеспособность лимфоцитов, а также демонстрировали более высокую генотоксичность и сильнее выраженное разрушение биологических мембран по сравнению с отрицательно заряженными CYS-AgNPs. Кроме того, исследования показали, что хотя оба типа CYS-AgNPs имели одинаковую химическую структуру стабилизирующих слоев, изменение их поверхностного заряда, вызываемое сдвигами pH, достоверно влияло на биологическую активность этих нанокластеров [58].

Заключение. Таким образом, наночастицы серебра все более широко внедряются в экспериментальную медицину и клиническую практику. Они нашли обоснованное применение в хирургии при лечении

инфицированных и контаминированных ран, а также для создания раневых покрытий и шовного материала с повышенными противомикробными свойствами, особенно после его модификации в условиях циклической заморозки. В онкологии AgNPs успешно используют как для подавления роста раковых клеток, так и для фенотипирования онкоцитов и их количественной оценки. В травматологии и стоматологии наночастицы известны как средства, обеспечивающие, помимо противомикробной защиты, еще и усиление остеогенеза. В лабораторной диагностике они служат основой высокочувствительных иммуносенсоров. Также продемонстрировано, что биологическая активность AgNPs связана не только с их непосредственным размером, но и зависит от формы, заряда и структуры внешних слоев нанокластеров. Тем не менее необходимо отметить, что при сопоставимых морфологических показателях наночастиц функциональная активность последних возрастает по

мере уменьшения их размера, достигая пика при значении менее 10 нм [47].

Среди основных способов получения AgNPs по сравнению с физическими и химическими путями их синтеза более эффективны биологические подходы генерации наночастиц, обеспечивающие хорошую растворимость, стабильность и безопасность получаемых нанокластеров [32]. Также стоит подчеркнуть целесообразность синтеза наноструктур путем кавитационно-диффузионного фотохимического восстановления, разработанного при поддержке ГЗ Минобрнауки России FZEN-2023-0006 и позволяющего создавать наносоединения с высокой седиментационной и агрегативной устойчивостью, имеющих преимущественно диаметр менее 6 нм [24], то есть наиболее востребованных в различных областях современного здравоохранения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература/References

1. Yin I. X., Zhang J., Zhao I. S., Mei M. L., Li Q., Chu C. H. The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. *Int. J. Nanomedicine*. 2020;15:2555-2562. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>
2. Hegde S., Balasubramanian B., Paul R., Jayalakshmi M., Nizam A. [et al.]. Navigating green synthesized metal-based nanoparticles as anti-inflammatory agent – comprehensive review. *Int. J. Pharm.* 2025;670:125105. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.125105>
3. Dzhimak S. S., Sokolov M. E., Basov A. A., Fedosov S. R., Malyshko V. V. [et al.]. Optimization of physicochemical conditions to produce silver nanoparticles and estimation of the biological effects of colloids synthesized. *Nanotechnologies in Russia*. 2016;11:835-841. <https://doi.org/10.1134/S1995078016060082>
4. Pushankina P., Baryshev M., Petriev I. Synthesis and study of palladium mono-and bimetallic (with Ag and Pt) nanoparticles in catalytic and membrane hydrogen processes. *Nanomaterials*. 2022;12(23):4178. <https://doi.org/10.3390/nano12234178>
5. Kopytov G. F., Shashkov D. I., Basov A. A., Malyshko V. V., Sokolov M. E. [et al.]. The Influence of ultraviolet radiation intensity on the formation of silver nanoparticles by cavitation-diffusion photochemical reduction. *Russ. Phys. J.* 2024;67:156-161. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03102-7>
6. Queiroz L. G., Faustino L. A., de Oliveira P. F. M., Pompeo M., Cordoba de Torresi S. I. Transformative nanobioplasmonic effects: toxicological implications of plasmonic silver nanoparticles in aquatic biological models. *Sci. Total. Environ.* 2024;954:176592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176592>
7. Samad M., Akhtar W., Muneer A., Fatima I., Manzoor M. [et al.]. Characterization, anti-microbial, anti-oxidant and growth promoting effects of biogenically synthesized silver nanoparticles derived from *Dicliptera bupleuroides* Nees. *Microsc. Res. Tech.* 2024;87(11):2580-2589. <https://doi.org/10.1002/jemt.24630>
8. Ghobadi M., Salehi S., Ardestani M.T.S., Mousavi-Khatat M., Shakeran Z. [et al.]. Amine-functionalized mesoporous silica nanoparticles decorated by silver nanoparticles for delivery of doxorubicin in breast and cervical cancer cells. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 2024;201:114349. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2024.114349>
9. Iskuzhina L., Batasheva S., Kryuchkova M., Rozhin A., Zolotykh M. [et al.]. Advances in the toxicity assessment of silver nanoparticles derived from a sphagnum fallax extract for monolayers and spheroids. *Biomolecules*. 2024;14(6):611. <https://doi.org/10.3390/biom14060611>
10. Dzhimak S. S., Malyshko V. V., Goryachko A. I., Sokolov M. E., Basov A. A. [et al.]. Sorption activity of silver nanoparticles. *Russian Physics Journal*. 2019;62:314-322. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01714-y>
11. Akhter N., Batool M., Yaqoob A., Shahid M., Muhammad F. [et al.]. Potential biological application of silver nanoparticles synthesized from *Citrus paradisi* leaves. *Sci. Rep.* 2024;14(1):29028. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79514-9>
12. Ibrahim N. H., Taha G. M., Hagaggi N. S. A., Moghazy M. A. Green synthesis of silver nanoparticles and its environmental sensor ability to some heavy metals. *BMC Chem.* 2024;18(1):7. <https://doi.org/10.1186/s13065-023-01105-y>
13. Fripiat T., Art T., Delguste C. Silver nanoparticles as antimicrobial agents in veterinary medicine: current applications and future perspectives. *Nanomaterials*. 2025;15(3):202. <https://doi.org/10.3390/nano15030202>
14. Aguilar-Garay R., Lara-Ortiz L. F., Campos-Lopez M., Gonzalez-Rodriguez D. E., Gamboa-Lugo M. M. [et al.]. A comprehensive review of silver and gold nanoparticles as effective antibacterial agents. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2024;17(9):1134. <https://doi.org/10.3390/ph17091134>
15. Park J. J., Faustman E. M. Silver nanoparticle (AgNP), neurotoxicity, and putative adverse outcome pathway (AOP): a review. *Neurotoxicology*. 2025;108:11-27. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2025.02.001>
16. Basov A. A., Fedosov S. R., Malyshko V. V., Elkina A. A., Lyasota O. M., Dzhimak S. S. Evaluation of effectiveness of a new treatment method for healing infected wounds: an animal model. *Journal of Wound Care*. 2021;30(4):312-322. <https://doi.org/10.12968/jowc.2021.30.4.312>
17. Быков И. М., Ермакова Г. А., Попов К. А., Попова М. А., Завгородняя А. Г., Устинова Е. С. Влияние комбинированной гепатопротекторной терапии серосодержащими препаратами на состояние окислительного гомеостаза в крови больных алкогольным гепатитом: рандомизированное проспективное исследование. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2024;31(6):15-27. [Bykov I. M., Ermakova G. A., Popov K. A., Popova M. A., Zavgorodnyaya A. G., Ustinova E. S. Effect of combination hepatoprotective therapy with sulfur-containing drugs on oxidative homeostasis in the blood of patients with alcoholic hepatitis: a randomized prospective study. *Kubanskii nauchnyi meditsinskii vestnik*. – *Kuban Scientific Medical Bulletin*. 2024;31(6):15-27. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2024-31-6-15-27>
18. Bykov I. M., Basov A. A., Malyshko V. V., Dzhimak S. S., Fedosov S. R., Moiseev A. V. Dynamics of the pro-oxidant/antioxidant system parameters in wound discharge and plasma in experimental purulent wound during its technological liquid phase treatment. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2017;163(2):268-271. <https://doi.org/10.1007/s10517-017-3781-3>
19. Малышко В. В., Басов А. А., Дорохова А. А., Млисева А. В., Дьяков О. В. [и др.]. Динамика показателей прооксидантно антиоксидантной системы в крови и экссудате при лечении гнойных ран отрицательным

- давлением и наночастицами серебра. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2023;18(2):172-177. [Malyshko V. V., Basov A. A., Dorohova A. A., Moiseev A. V., Dyakov O. V. [et al.]. Dynamics of indicators of the prooxidant-antioxidant system in the blood and exudate under the treatment of purulent wounds with negative pressure and silver nanoparticles. *Meditsinskii vestnik Severnogo Kavkaza. – Medical News of North Caucasus*. 2023;18(2):172-177. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.14300/mnnc.2023.18038>
20. Dzhimak S. S., Malyshko V. V., Goryachko A. I., Sokolov M. E., Moiseev A. V., Basov A. A. Adsorption of silver nanoparticles on mono- and polyfilament fibers. *Nanotechnologies in Russia*. 2019;14:48-54. <https://doi.org/10.1134/S199507801901004X>
 21. Lu W., Chen H., Liu T., Hu J., Zhu L. [et al.]. Serine-modified silver nanoparticle porous spray membrane: a novel approach to wound infection prevention and inflammation reduction. *Int. J. Pharm.* 2025;670:125120. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.125120>
 22. Chen S., Yao J., Huo S., Xu C., Yang R. [et al.]. Designing injectable dermal matrix hydrogel combined with silver nanoparticles for methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* infected wounds healing. *Nano Converg.* 2024;11(1):41. <https://doi.org/10.1186/s40580-024-00447-0>
 23. Pandey V., Gupta A., Choudhary I. S., Imran M., Mudavath S. L. [et al.]. Impact of dual-coated silver nanoparticle and antibiotic sutures on wound healing in inflammatory mouse models. *J. Indian Assoc. Pediatr. Surg.* 2024;29(6):612-616. https://doi.org/10.4103/ijaps.jiaps_99_24
 24. Basov A., Dzhimak S., Sokolov M., Malyshko V., Moiseev A. [et al.]. Changes in number and antibacterial activity of silver nanoparticles on the surface of suture materials during cyclic freezing. *Nanomaterials*. 2022;12(7):1164. <https://doi.org/10.3390/nano12071164>
 25. Kopytov G. F., Malyshko V. V., Basov A. A., Moiseev A. V., Vlasov R. V. [et al.]. Cyclic freezing effect on silver nanoparticle adsorption on polished collagen fiber. *Russ. Phys. J.* 2023;65:1328-1332. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02770-1>
 26. Martinez-Sanmiguel J. J., Zarate-Trivino D., Garcia-Garcia M. P., Garcia-Martin J. M., Mayoral A. [et al.]. Antitumor activity of bimetallic silver/gold nanoparticles against MCF-7 breast cancer cells. *RSC Adv.* 2024;14(53):39102-39111. <https://doi.org/10.1039/d4ra06227b>
 27. Dai Y., He J., Zhou Y., Yu Y., Hui H. [et al.]. Constructing a highly sensitive duplex immunoassay using AuNPs and AgNPs as nanolabels for investigating the epithelial-mesenchymal transition occurring on circulating tumor cells with lung cancer patients. *Biosens. Bioelectron.* 2025;270:116947. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116947>
 28. Sabry G. M., Sultan N., Abouelkher M. T., Farouk Sousse E. Osteogenic potential of silver nanoparticles in critical sized mandibular bone defects: an experimental study in white albino rats. *Odontology*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s10266-024-01049-2>
 29. Abdelmoneim D., Coates D., Porter G., Schmidlin P., Li K. C. [et al.]. In vitro and in vivo investigation of antibacterial silver nanoparticles functionalized bone grafting substitutes. *J. Biomed. Mater. Res. A*. 2024;112(12):2042-2054. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37757>
 30. Sycinska-Dziarnowska M., Ziabka M., Cholewa-Kowalska K., Spagnuolo G., Park H. S. [et al.]. Microstructural and surface texture evaluation of orthodontic microimplants covered with bioactive layers enriched with silver nanoparticles. *J. Funct. Biomater.* 2024;15(12):371. <https://doi.org/10.3390/fb15120371>
 31. Farmani M., Mirahmadi-Zare S. Z., Masaeli E., Tabatabaei F., Houreh A. B. Macroporous coating of silver-doped hydroxyapatite/silica nanocomposite on dental implants by EDTA intermediate to improve osteogenesis, antibacterial, and corrosion behavior. *Biomed. Mater.* 2025;20(2). <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ad971d>
 32. Lee S. H., Jun B. H. Silver nanoparticles: synthesis and application for nanomedicine. *Int. J. Mol. Sci.* 2019;20(4):865. <https://doi.org/10.3390/ijms20040865>
 33. Sathiyaraj M., Elumalai D., Rajendran V., Hemavathi M., Ashok K. [et al.]. Biosynthesis, characterization, and multifaceted applications of *Elytraria acaulis* synthesized silver and gold nanoparticles: anticancer, antibacterial, larvicidal, and photocatalytic activities. *J. Photochem. Photobiol. B*. 2025;263:113102. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2025.113102>
 34. Li X., Pang L., Duan J., Huang N., Chen X. [et al.]. Eco-friendly antibacterial electrospinning nanofibrous film containing nano-silver green-synthesized by natural glycoprotein for infected wound healing. *J. Colloid Interface Sci.* 2025;683(Pt 1):256-268. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.12.019>
 35. Tural B., Ertae E., Batebay H., Tural S. The Impact of *Pistacia khinjuk* plant gender on silver nanoparticle synthesis: are extracts of root obtained from female plants preferentially used? *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2025;746:151257. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2024.151257>
 36. Zareyan F., Khajehsharifi H. Study of *Opuntia humifusa*: phytochemical analysis of aqueous fruit extract and green synthesis of Ag(2)O nanoparticles. *Nat. Prod. Res.* 2025;39(3):460-467. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2272031>
 37. Bahari N., Hashim N., Abdan K., Akim A. M., Maringgal B., Al-Shdifat L. Green-synthesized silver and zinc oxide nanoparticles from stingless bee honey: Morphological characterisation, antimicrobial action, and cytotoxic assessment. *Chemosphere*. 2025;370:143961. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143961>
 38. Marinas I. C., Ignat L., Mauruša I. E., Gaboreanu M. D., Adina C. [et al.]. Insights into the physico-chemical and biological characterization of sodium lignosulfonate – silver nanosystems designed for wound management. *Heliyon*. 2024;10(4):e26047. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26047>
 39. Cheng J., Zhang Z., Zhang L., Miao J., Chen Y. [et al.]. Size-controllable colloidal Ag nano-aggregates with long-time SERS detection window for on-line high-throughput detection. *Talanta*. 2023;257:124358. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.124358>
 40. Marinescu L., Ficaï D., Ficaï A., Oprea O., Nicoara A. I. [et al.]. Comparative antimicrobial activity of silver nanoparticles obtained by wet chemical reduction and solvothermal methods. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;23(11):5982. <https://doi.org/10.3390/ijms23115982>
 41. Быков И. М., Малышко В. В., Шапков Д. И., Моисеев А. В., Басов А. А. [и др.]. Зависимость размера и количества наночастиц серебра от концентрации лиганда в реакционной системе. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2024;19(2):169-173. [Bykov I. M., Malyshko V. V., Shashkov D. I., Moiseev A. V., Basov A. A. [et al.]. Dependence of the size and number of silver nanoparticles on the ligand concentration in the reaction system. *Meditsinskii vestnik Severnogo Kavkaza. – Medical News of North Caucasus*. 2024;19(2):169-173. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.14300/mnnc.2024.19038>
 42. Elwakil B. H., Eldrieny A. M., Almotairy A. R. Z., El-Khatib M. Potent biological activity of newly fabricated silver nanoparticles coated by a carbon shell synthesized by electrical arc. *Sci. Rep.* 2024;14(1):5324. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54648-y>
 43. Diugosz O., ĩebracka A., Sochocka M., Franz D., Ochnik M. [et al.]. Selective and complementary antimicrobial and antiviral activity of silver, copper, and selenium nanoparticle suspensions in deep eutectic solvent. *Environ. Res.* 2025;264(Pt 1):120351. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120351>
 44. Park J. E., Nam H., Hwang J. S., Kim S., Kim S. J. [et al.]. Label-Free Exosome Analysis by Surface-Enhanced Raman Scattering Spectroscopy with Laser-Ablated Silver Nanoparticle Substrate. *Adv. Healthc. Mater.* 2024;13(32):e2402038. <https://doi.org/10.1002/adhm.202402038>
 45. Bishoyi A. K., Mandhata C. P., Sahoo C. R., Samal P., Dubey D. [et al.]. Biogenic synthesis and characterization of silver nanoparticles with cyanobacterium *oscillatoria*

- salina using against MDR pathogenic bacteria and their antiproliferative and toxicity study. *Cell. Biochem. Funct.* 2025;43(1):e70043. <https://doi.org/10.1002/cbf.70043>
46. Sathyanarayanan H., Vaiyapuri M., Kumar R., Gnanadesigan M. Standardization of silver nanoparticle synthesis: photocatalytic application (immobilized with chitosan complex) with textile dyes and antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* using banana pseudo stem. *Chemosphere.* 2024;364:143246. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143246>
47. Mehmood A., Zahir S., Rauf Khan M. A., Ahmad K. S., Abasi F. [et al.]. Optimization and bio-fabrication of phyto-mediated silver nanoparticles (Ag-NPs) for antibacterial potential. *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2024;42(15):8063-8072. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2242960>
48. Saied E., Abdel-Maksoud M. A., Alfuraydi A. A., Kiani B. H., Bassyouni M. [et al.]. Endophytic *Aspergillus hiratsukae* mediated biosynthesis of silver nanoparticles and their antimicrobial and photocatalytic activities. *Front. Microbiol.* 2024;15:1345423. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1345423>
49. Deonas A. N., Souza L. M. D. S., Andrade G. J. S., Germiniani-Cardozo J., Dahmer D. [et al.]. Green synthesis of silver nanoparticle from *Anadenanthera colubrina* extract and its antimicrobial action against ESKAPEE group bacteria. *Antibiotics (Basel).* 2024;13(8):777. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13080777>
50. Chatterjee K., Taneja J., Khullar S., Pandey A. K. Antifungal activity of silver nanoparticles on fungal isolates from patients of suspected mucormycosis. *Int. Microbiol.* 2023;26(1):143-147. <https://doi.org/10.1007/s10123-022-00280-7>
51. Matras E., Gorczyca A., Przemieniecki S. W., Ozwieja M. Surface properties-dependent antifungal activity of silver nanoparticles. *Sci. Rep.* 2022;12(1):18046. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22659-2>
52. Sahu S. K., Kushwaha A., Pradhan U., Majhi P., Shukla A. K., Ghorai T. K. Sustainable green synthesis of Hedychium coronarium leaf extract-stabilized silver nanoparticles and their applications: colorimetric sensing of Sn(2+) and Hg(2+) and antifungal and antimicrobial properties. *Nanoscale Adv.* 2024;6(21):5361-74. <https://doi.org/10.1039/d4na00443d>
53. Baigorria C. G., Cerioni L., Debes M.A., Ledesma A. E., Alastuey P. [et al.]. Antifungal action of metallic nanoparticles against fungicide-resistant pathogens causing main postharvest lemon diseases. *J. Fungi (Basel).* 2024;10(11):782. <https://doi.org/10.3390/jof10110782>
54. Al-Sahli S. A., Al-Otibi F., Alharbi R.I., Amina M., Al Musesayeb N. M. Silver nanoparticles improve the fungicidal properties of *Rhazya stricta* Decne aqueous extract against plant pathogens. *Sci. Rep.* 2024;14(1):1297. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51855-5>
55. Al-Otibi F. The Antifungal Activities of Silver Nano-Aggregates Biosynthesized from the Aqueous Extract and the Alkaline Aqueous Fraction of *Rhazya stricta* against Some Fusarium Species. *Nanomaterials (Basel).* 2023;14(1):88. <https://doi.org/10.3390/nano14010088>
56. Chahardoli A., Qalekhani F., Hajmomeni P., Shokoohinia Y., Fattahi A. Enhanced hemocompatibility, antimicrobial and anti-inflammatory properties of biomolecules stabilized AgNPs with cytotoxic effects on cancer cells. *Sci. Rep.* 2025;15(1):1186. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82349-z>
57. Khajeh H., Fazeli-Nasab B., Pourshahdad A., Mirzaei A. R., Ghorbanpour M. Green-synthesized silver nanoparticles induced apoptotic cell death in CACO2 cancer cells by activating MLH1 gene expression. *Sci. Rep.* 2024;14(1):29601. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80809-0>
58. Ozwieja M., Barbasz A., Wasilewska M., Smolec P., Duraczyska D. [et al.]. Surface Charge-modulated toxicity of cysteine-stabilized silver nanoparticles. *Molecules.* 2024;29(15):3629. <https://doi.org/10.3390/molecules29153629>

Поступила 04.04.2025

Сведения об авторах:

Малышко Вадим Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры оперативной хирургии и топографической анатомии; тел.: +79528187872; e-mail: intro-3@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2262-4549>

Быков Илья Михайлович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальной и клинической биохимии; тел.: +79182125530; e-mail: ilya.bh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1787-0040>

Заикин Тимофей Анатольевич, ассистент; тел.: +79673036332; e-mail: zaikin_timofey@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-2005-9346>

Шашков Денис Игоревич, научный сотрудник кафедры радиопизики и нанотехнологий; тел.: +79054957639; e-mail: son_sunytch79@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-5221-0076>

Моисеев Аркадий Викторович, начальник управления науки и инноваций; тел.: +78612215874, e-mail: moiseew_a@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7605-6826>

Басов Александр Александрович, доктор медицинских наук, профессор кафедры фундаментальной и клинической биохимии; тел.: +79183551302; e-mail: son_sunytch@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2262-4549>

Есауленко Елена Евгеньевна, доктор биологических наук, профессор; тел.: +79184353523; e-mail: esaulenkoe@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9386-8049>

Сторожук Александр Петрович, доктор медицинских наук, профессор; тел.: +79182125530; e-mail: IlyaMB@ksma.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1843-6518>