DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.55>

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕПАРАТОВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В МЕДИЦИНСКОЙ ПРАКТИКЕ

Обзор

Мельникова В.М.¹, Менсутов Э.С.^{2,*}, Юнусова Э.Э.³, Скоробогатая А.Д.⁴^{1,2,3,4} Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ruuss.2024[at]bk.ru)

Аннотация

Актуальность. Растущая резистентность микроорганизмов к традиционным антибиотикам представляет серьезную угрозу для глобального здравоохранения, стимулируя поиск новых эффективных антимикробных агентов. Наночастицы серебра (НЧС), благодаря своему широкому спектру действия, включая активность против мультирезистентных штаммов, рассматриваются в качестве перспективной альтернативы, что обуславливает актуальность исследований в данной области.

Обсуждение. НЧС демонстрируют выраженную антимикробную активность против широкого спектра патогенов, включая резистентные к антибиотикам штаммы. Многочисленные механизмы действия включают нарушение целостности мембран, генерацию активных форм кислорода (АФК) и взаимодействие с ДНК. Отмечена потенциальная токсичность НЧС при определенных условиях. Перспективные направления исследований включают разработку систем контролируемого высвобождения и целенаправленной доставки, а также использование биосовместимых покрытий.

Выводы. Применение препаратов на основе НЧС представляет собой перспективное направление в борьбе с антибиотикорезистентностью. Дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию лекарственных форм и минимизацию побочных эффектов, необходимы для успешного внедрения НЧС в клиническую практику.

Ключевые слова: наночастицы серебра, антимикробная активность, антибиотикорезистентность, фармакодинамика, фармакокинетика.

PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF SILVER NANOPARTICLE DRUGS IN MEDICAL PRACTICE

Review article

Melnikova V.M.¹, Mensutov E.S.^{2,*}, Yunusova E.E.³, Skorobogataya A.D.⁴^{1,2,3,4} Order of the Red Banner of Labor S.I. Georgievsky Medical Institute V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation

* Corresponding author (ruuss.2024[at]bk.ru)

Abstract

Relevance. The growing resistance of microorganisms to conventional antibiotics poses a serious threat to global health, stimulating the search for new effective antimicrobial agents. Silver nanoparticles (SNPs), due to their broad spectrum of action, including activity against multidrug-resistant strains, are seen as a promising alternative, which determines the relevance of research in this area.

Discussion. SNPs exhibit pronounced antimicrobial activity against a wide range of pathogens, including antibiotic resistant strains. Multiple mechanisms of action include disruption of membrane integrity, generation of reactive oxygen species (ROS) and interaction with DNA. Potential toxicity of SNPs under certain conditions has been noted. Promising areas of research include the development of controlled release and targeted delivery systems and the use of biocompatible coatings.

Conclusions. The use of drugs based on SNPs represents a promising direction in the fight against antibiotic resistance. Further studies aimed at optimising dosage forms and minimising side effects are necessary for successful introduction of SNPs into clinical practice.

Keywords: silver nanoparticles, antimicrobial activity, antibiotic resistance, pharmacodynamics, pharmacokinetics.

Введение

Устойчивость к антимикробным препаратам (АМП) представляет собой одну из наиболее серьезных угроз для глобального здравоохранения в XXI веке [1], [2]. Эта проблема, признанная Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) одной из десяти главных угроз здоровью населения [3], обретает все более угрожающие масштабы, подрывая эффективность существующих методов лечения инфекционных заболеваний. Рост резистентных штаммов патогенных микроорганизмов, включая бактерии, вирусы, грибки и паразиты, приводит к увеличению заболеваемости, смертности, продолжительности госпитализации и, как следствие, к значительным экономическим потерям [4]. Особенно остро стоит вопрос развития устойчивости к антибиотикам, которые на протяжении десятилетий являлись краеугольным камнем борьбы с бактериальными инфекциями.

Одним из ключевых факторов, способствующих развитию и распространению антибиотикорезистентности, является широкое и зачастую нерациональное использование антибиотиков в различных областях: медицине, ветеринарии и сельском хозяйстве [5]. Несоблюдение рекомендаций по дозировке и длительности курса антибиотикотерапии, самолечение и использование антибиотиков в качестве стимуляторов роста у животных создают селективное давление, благоприятствующее выживанию и размножению резистентных штаммов. Кроме того,

горизонтальный перенос генов резистентности между бактериями, как внутри одного вида, так и между разными видами, ускоряет распространение устойчивости [6].

Еще одним фактором, осложняющим борьбу с инфекционными заболеваниями, является способность бактерий формировать биопленки — сложные многоклеточные сообщества, прикрепленные к поверхности и заключенные в матрикс из внеклеточных полимерных веществ [7]. Биопленки обеспечивают бактериям защиту от воздействия антибиотиков и факторов иммунной системы хозяина, что делает инфекции, связанные с биопленками, чрезвычайно трудноизлечимыми. Современные методы лечения зачастую оказываются неэффективными в отношении бактерий, находящихся в составе биопленок, что требует поиска новых подходов к терапии таких инфекций.

В свете растущей угрозы антимикробной резистентности, разработка новых антимикробных ЛП с альтернативными механизмами действия является приоритетной задачей современной медицины и фармакологии [8], [9]. Идеальный антимикробный препарат должен обладать широким спектром активности против различных патогенов, включая резистентные штаммы, низкой токсичностью для организма человека, благоприятным фармакокинетическим профилем и минимальным потенциалом развития резистентности. Одним из перспективных направлений в этой области является разработка и применение препаратов на основе наночастиц серебра (НЧС), которые обладают выраженной антимикробной активностью *in vitro* и *in vivo* против широкого спектра микроорганизмов, включая мультирезистентные штаммы [10], [11]. НЧС представляют собой динамично развивающийся класс антимикробных препаратов, обладающих значительным потенциалом в решении данной проблемы.

Данный обзор представляет собой всесторонний анализ фармакологических аспектов применения препаратов на основе НЧС, критически оценивает результаты актуальных исследований и определяет перспективные направления для будущих разработок, фокусируясь на сравнительном анализе фармакокинетики НЧС и препаратов, содержащих ионное серебро.

Целью исследования является комплексный анализ перспектив применения препаратов наночастиц серебра (НЧС) в медицинской практике, с акцентом на их антимикробном потенциале и возможности преодоления антибиотикорезистентности. Исследование направлено на оценку эффективности, безопасности и механизмов действия НЧС, а также их места в современной терапии инфекционных заболеваний.

Материалы и методы: в ходе работы с использованием баз данных PubMed, Scopus, Web of Science и Google Scholar проведен систематический обзор литературы по применению НЧС в медицине. Отбор публикаций, опубликованных преимущественно за последние 5 лет, осуществлялся с учетом их актуальности и научной значимости, с фокусом на антимикробную активность, фармакокинетику, токсичность и клиническое применение НЧС.

Общая характеристика препаратов НЧС

НЧС представляют собой перспективный класс антимикробных агентов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами, которые обуславливают их широкий спектр активности против различных патогенов. Высокая удельная поверхность НЧС обеспечивает максимальный контакт с микроорганизмами, а повышенная реакционная способность, в сочетании со способностью генерировать активные формы кислорода (АФК), приводит к мощному антимикробному эффекту [1], [2]. Этот эффект распространяется на бактерии, вирусы и грибки, включая штаммы, устойчивые к традиционным антибиотикам [3], [4], что делает НЧС особенно ценными в условиях растущей антибиотикорезистентности.

Механизм действия НЧС многогранен и включает несколько ключевых аспектов. Во-первых, НЧС способны нарушать целостность клеточных мембран микроорганизмов, что приводит к их гибели [5]. Во-вторых, генерация АФК, таких как супероксид-анион, пероксид водорода и гидроксильный радикал, вызывает окислительный стресс в клетках патогенов, повреждая их ДНК, белки и липиды [6]. В-третьих, НЧС могут взаимодействовать непосредственно с ДНК микроорганизмов, ингибируя репликацию и транскрипцию [7]. Наконец, НЧС способны модулировать клеточные сигнальные пути, нарушая нормальное функционирование микроорганизмов [8]. Многочисленные исследования *in vitro* и *in vivo* подтверждают высокую эффективность НЧС против широкого спектра патогенов, что открывает перспективы для их применения в различных областях медицины [9].

Несмотря на многообещающие результаты лабораторных исследований, внедрение НЧС в клиническую практику сталкивается с рядом трудностей. Одним из основных вызовов является обеспечение терапевтической концентрации НЧС в очаге инфекции. Это связано с тем, что НЧС могут быстро связываться с белками плазмы крови и другими компонентами биологических жидкостей, что снижает их биодоступность и эффективность. Кроме того, существует потенциальный риск токсичности НЧС для клеток организма-хозяина, особенно при высоких концентрациях [10]. Несмотря на то, что серебро традиционно считается относительно безопасным металлом, наночастицы серебра обладают специфическими свойствами, которые могут оказывать негативное воздействие на клетки человека. Еще одной проблемой является возможность развития резистентности микроорганизмов к серебру, хотя этот процесс менее выражен, чем в случае традиционных антибиотиков.

Для преодоления этих ограничений активно ведутся исследования по разработке инновационных лекарственных форм на основе НЧС. Особое внимание уделяется созданию систем контролируемого высвобождения НЧС, которые позволяют поддерживать терапевтическую концентрацию препарата в очаге инфекции в течение длительного времени. Также разрабатываются стратегии повышения биодоступности НЧС, например, путем использования различных носителей, таких как липосомы, полимеры и наногели. Важным направлением исследований является целенаправленная доставка НЧС к очагу инфекции с минимальной системной токсичностью. Для этого используются различные методы, включая конъюгацию НЧС с антителами, аптамерами и другими лигандами, которые специфически связываются с клетками-мишенями. Разработка таких инновационных лекарственных форм позволит реализовать весь потенциал НЧС.

Фармакокинетическая характеристика препаратов НЧС

Всасывание ионного серебра в системный кровоток происходит преимущественно через желудочно-кишечный тракт, легкие и кожу [1]. Степень всасывания зависит от различных факторов, включая путь введения, концентрацию серебра, а также физико-химические свойства лекарственной формы. НЧС, в свою очередь, демонстрируют более сложный механизм всасывания, который зависит от размера, формы, заряда поверхности и функционализации наночастиц [2]. Меньший размер НЧС, как правило, способствует их проникновению через биологические барьеры, включая клеточные мембраны [3]. Покрытие НЧС различными лигандами может влиять на их биодоступность и распределение в организме [4].

После попадания в системный кровоток ионы серебра связываются с белками плазмы, преимущественно с альбумином и глобулинами [5]. Это ограничивает их свободную диффузию в ткани и органы. НЧС, благодаря своим уникальным свойствам, могут демонстрировать иное распределение. Например, они способны аккумулироваться в определенных тканях и органах, таких как печень, селезенка и лимфатические узлы, что может быть полезно для целенаправленной доставки лекарственных средств [6]. Кроме того, НЧС могут проникать через гематоэнцефалический барьер, открывая перспективы для лечения заболеваний центральной нервной системы [7].

Ионное серебро практически не метаболизируется в организме и выводится преимущественно в неизменном виде [8]. Метаболизм НЧС изучен недостаточно полно, однако предполагается, что они могут подвергаться окислению и растворению с образованием ионов серебра [9]. Также возможно взаимодействие НЧС с различными биомолекулами, что может влиять на их метаболические превращения.

Ионное серебро выводится из организма преимущественно с желчью и калом, а также в меньшей степени с мочой [10]. Период полувыведения ионного серебра варьирует в зависимости от пути введения и дозы. НЧС, в зависимости от размера и свойств поверхности, могут выводиться различными путями, включая почечную и гепатобилиарную экскрецию [11]. Размер наночастиц играет критическую роль в их почечной экскреции: частицы меньшего размера (<5 нм) выводятся с мочой более эффективно, чем более крупные частицы, которые могут задерживаться в организме дольше [12]. Функционализация поверхности НЧС полиэтиленгликолем (ПЭГ) может увеличивать их время циркуляции в крови и замедлять выведение из организма [13].

Преимущества НЧС с точки зрения фармакокинетики:

1. Улучшенная биодоступность: Благодаря меньшему размеру и возможности модификации поверхности, НЧС могут демонстрировать повышенную биодоступность по сравнению с ионным серебром.
2. Целенаправленная доставка: НЧС могут быть функционализированы для целенаправленной доставки в определенные ткани и органы, что повышает эффективность терапии и снижает системную токсичность.
3. Удлиненный период полувыведения: Модификация поверхности НЧС, например, ПЭГилированием, позволяет увеличить время их циркуляции в крови и снизить частоту введения препарата.
4. Проникновение через биологические барьеры: НЧС способны проникать через различные биологические барьеры, включая гематоэнцефалический барьер, открывая новые возможности для лечения заболеваний, недоступных для традиционных препаратов серебра.

Фармакодинамические особенности препаратов на основе НЧС

Фармакодинамика препаратов на основе наночастиц серебра (НЧС) представляет собой сложный и многогранный процесс, который принципиально отличается от действия ионного серебра и открывает новые перспективы в борьбе с инфекционными заболеваниями. Ключевым преимуществом НЧС является их многосторонний механизм действия, обеспечивающий высокую антимикробную активность против широкого спектра патогенов, включая бактерии (грамположительные и грамотрицательные), вирусы и грибки [1], [2]. Этот механизм включает несколько взаимосвязанных компонентов:

1. Нарушение целостности клеточной мембраны: НЧС взаимодействуют с липидами и белками клеточной мембраны, вызывая ее дестабилизацию, изменение проницаемости и утечку внутриклеточного содержимого. Исследования, проведенные Dakal et al. (2016), демонстрируют, что НЧС могут вызывать образование пор в мембране, нарушая трансмембранный потенциал и приводя к лизису клетки [4]. Однако механизмы этого взаимодействия до конца не ясны и требуют дальнейших исследований, в частности, для различных видов микроорганизмов. Важно учитывать и специфичность взаимодействия НЧС с мембранами эукариотических клеток для оценки потенциальной токсичности [4], [5].

2. Генерация АФК: НЧС катализируют образование АФК, которые индуцируют оксидативный стресс в микробных клетках, повреждая ДНК, белки и липиды. Kim et al. (2007) в своей работе подтвердили ключевую роль генерации АФК в антимикробной активности НЧС [6]. Однако вопрос о вкладе каждого типа АФК (супероксид, перекись водорода, гидроксил-радикал) остается открытым и требует дальнейших исследований с использованием специфических ингибиторов. Кроме того, важно оценить потенциальный вред от АФК для клеток макроорганизма.

3. Взаимодействие с ДНК: прямое воздействие на генетический материал. In vitro исследования, проведенные Feng et al. (2020), показали, что НЧС могут связываться с ДНК, вызывая ее конденсацию и фрагментацию. Это прямое воздействие на генетический материал микроорганизмов представляет собой мощный механизм антимикробного действия [7]. Однако необходимы дальнейшие исследования для определения специфичности этого взаимодействия и оценки потенциального мутагенного эффекта НЧС.

Токсикологический профиль НЧС: баланс между эффективностью и безопасностью

Вопрос безопасности применения НЧС является одним из ключевых и требует тщательного изучения. В терапевтических концентрациях НЧС, как правило, обладают низкой токсичностью для клеток млекопитающих. Однако при высоких концентрациях или длительном воздействии НЧС могут проявлять цитотоксическое действие, повреждая клеточные мембраны, индуцируя оксидативный стресс и нарушая функции митохондрий [1], [2].

Исследования Wijnhoven et al. (2019) показали, что длительное воздействие высоких доз НЧС может приводить к накоплению серебра в органах и тканях, вызывая потенциальные долгосрочные последствия. Важно отметить, что токсичность НЧС может варьировать в зависимости от их размера, формы, покрытия и способа введения [11]. Поэтому необходима стандартизация методов оценки токсичности НЧС и разработка четких рекомендаций по их безопасному применению. Одним из перспективных направлений является разработка биосовместимых покрытий для НЧС, которые могут снизить их токсичность и улучшить фармакокинетические свойства.

Применение препаратов НЧС в медицине: от теории к практике

Многочисленные исследования *in vitro* и *in vivo* подтверждают эффективность НЧС против различных бактерий, вирусов и грибов (Rai et al., 2009). НЧС успешно применяются в составе мазей, кремов, гелей, растворов и повязок для лечения инфекций кожи, ран, ожогов, а также в стоматологии и отоларингологии [12]. Однако необходимы дальнейшие клинические исследования для оценки эффективности и безопасности НЧС в лечении различных инфекционных заболеваний.

Повязки с НЧС широко используются для профилактики инфекции в ранах и ожогах, демонстрируя хорошие результаты [13]. Однако важно оптимизировать концентрацию НЧС в повязках для достижения максимальной эффективности и минимизации риска токсичности. Кроме этого, покрытие поверхностей медицинских имплантатов и инструментов НЧС является перспективным подходом для предотвращения развития биопленок, в связи с чем необходимы дальнейшие исследования для оценки долгосрочной эффективности и безопасности таких покрытий.

Также НЧС могут быть использованы в качестве носителей для таргетной доставки лекарств, повышая их эффективность и снижая побочные эффекты — это направление находится на ранней стадии развития и требует дальнейших исследований.

Применение НЧС на современном этапе исследований

Несмотря на то, что НЧС изучаются уже несколько десятилетий, их практическое применение продолжает активно развиваться, открывая новые возможности для создания инновационных продуктов и технологий. Данная глава представляет собой развернутый обзор текущего состояния практического применения НЧС с акцентом на статистические данные и перспективные направления развития.

Применение НЧС в медицине, пожалуй, наиболее изученное и перспективное направление. Антимикробные свойства НЧС делают их эффективным инструментом в борьбе с инфекционными заболеваниями, особенно в контексте растущей резистентности к антибиотикам.

НЧС используются для создания покрытий для медицинских имплантатов, катетеров, хирургических инструментов и других устройств [1]. Покрытия на основе НЧС снижают риск инфекций, связанных с использованием медицинских устройств, что подтверждается снижением частоты инфекционных осложнений на 20—30% в некоторых исследованиях [2], [3]. Рынок антимикробных покрытий на основе НЧС оценивается в миллиарды долларов и продолжает расти [4]. НЧС включаются в состав ранозаживляющих повязок, кремов, гелей и мазей, ускоряя процессы регенерации тканей и предотвращая развитие инфекций [5]. Клинические исследования показывают, что применение препаратов с НЧС сокращает время заживления ран на 15—25% [6], [7].

Также НЧС могут служить носителями для целенаправленной доставки лекарственных препаратов, повышая их эффективность и снижая системную токсичность [8]. Например, использование НЧС для доставки противоопухолевых препаратов позволяет увеличить их концентрацию в опухолевой ткани в несколько раз, повышая эффективность терапии и снижая побочные эффекты [9]. Рынок наночастиц для доставки лекарств оценивается в сотни миллионов долларов и имеет высокий потенциал роста [10].

Плазмонные свойства НЧС используются в биосенсорах и диагностических системах для быстрого и чувствительного обнаружения различных биомаркеров и патогенов [11]. Например, на основе НЧС созданы тест-системы для диагностики инфекционных заболеваний, позволяющие получить результат в течение нескольких минут [12].

Перспективы развития и будущие исследования: новые горизонты

Создание инновационных лекарственных форм на основе НЧС, таких как нанокompозиты, липосомальные системы и гидрогели, является ключевым фактором повышения эффективности и безопасности терапии. Эти подходы решают проблемы, связанные с применением немодифицированных НЧС, обеспечивая контролируемое и адресное высвобождение серебра в очаге инфекции. Например, нанокompозиты, объединяющие НЧС с биосовместимыми полимерами (хитозан, альгинат, полилактид), демонстрируют улучшенные механические свойства и контролируемое высвобождение серебра, что делает их идеальными для создания антимикробных покрытий для имплантатов и раневых повязок. Липосомы, служащие биосовместимыми контейнерами для НЧС, защищают их от преждевременной деградации, повышают биодоступность и обеспечивают направленную доставку, которая может быть дополнительно оптимизирована путем модификации поверхности липосом специфическими лигандами [14], [15]. Гидрогели, благодаря своей способности удерживать большое количество воды и лекарственных веществ, обеспечивают пролонгированное высвобождение НЧС, особенно важное при лечении хронических инфекций. Биосовместимые гидрогели на основе природных полимеров, таких как гиалуроновая кислота и коллаген, подходят для создания инъекционных препаратов и раневых покрытий. Дальнейшее развитие нанотехнологий открывает перспективы создания «умных» покрытий для НЧС, реагирующих на изменения в микроокружении, магнитных наночастиц для направленной доставки с помощью магнитного поля и даже нанороботов для высокоточной доставки лекарств [12], [15]. Однако для полной реализации потенциала НЧС необходимы дальнейшие исследования фармакокинетики, фармакодинамики, а также клинические испытания для подтверждения безопасности и эффективности этих инновационных лекарственных форм. Изучение эффективности комбинированного применения НЧС с антибиотиками

и другими антимикробными агентами может привести к созданию новых подходов к лечению инфекционных заболеваний, особенно в случаях мультирезистентности.

Заключение

НЧС представляют собой перспективный класс антимикробных агентов с широким спектром потенциальных применений в медицине. Однако, необходимы дальнейшие исследования для полной оценки их эффективности, безопасности и оптимальных способов применения. Разработка новых лекарственных форм, систем доставки и комбинированных подходов к терапии позволит полностью реализовать потенциал НЧС в борьбе с инфекционными заболеваниями. Ключевым фактором успеха является междисциплинарное сотрудничество ученых, медиков и инженеров для решения сложных задач, связанных с разработкой и внедрением новых препаратов на основе НЧС.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.55.1>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.55.1>

Список литературы / References

1. Удегова Е.С. Антибактериальный эффект наночастиц металлов на антибиотикорезистентные штаммы бактерий / Е.С. Удегова, К.А. Гильдеева, Т.В. Рукусуева [и др.] // Инфекция и иммунитет. — 2021. — № 4.
2. Медушева Е.О. Новое раневое покрытие на полимерной основе для лечения ран / Е.О. Медушева, Ю.С. Фидоровская, М.А. Щедрина [и др.] // Раны и раневые инфекции. Журнал имени профессора Б.М. Костюченка. — 2023. — № 2.
3. Семенов Ф.В. Экспериментальное обоснование использования препаратов, содержащих наночастицы серебра, в местной эмпирической терапии заболеваний лорорганов, вызванных р. *Aeruginosa* и *acinetobacter sp* / Ф.В. Семенов, С.А. Бабичев, О.А. Качанова [и др.] // Российская оториноларингология. — 2013. — № 5(66). — С. 73–79.
4. Rohde M.M. The mechanism of cell death induced by silver nanoparticles is distinct from silver cations / M.M. Rohde, C.M. Snyder, J. Sloop [et al.] // Particle and Fibre Toxicology. — 2021. — Vol. 18, No. 1. — P. 37. — DOI: 10.1186/s12989-021-00430-1.
5. Карпова М.Р. Механизмы бактерицидности наночастиц серебра / М.Р. Карпова, А.В. Коршунов, Т.С. Дульцева [и др.] // Инфекция и иммунитет. — 2012. — № 1-2. — С. 117–124.
6. Yonathan K. The impact of silver nanoparticles on microbial communities and antibiotic resistance determinants in the environment / K. Yonathan, R. Mann, K.R. Mahbub [et al.] // Environmental Pollution. — 2022. — Vol. 293. — P. 118506. — DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118506.
7. Schneider G. The use of antimicrobial-impregnated fabrics in health services: an integrative review / G. Schneider, F.L. Bim, Á.F.L. Sousa [et al.] // Revista Latino-Americana de Enfermagem. — 2021. — Vol. 29. — P. e3416. — DOI: 10.1590/1518-8345.4668.3416.
8. Pineda M.E.B. Nanocomposites: silver nanoparticles and bacteriocins obtained from lactic acid bacteria against multidrug-resistant *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* / M.E.B. Pineda, D.F.V. Sánchez, P.A.C. Caycedo [et al.] // World Journal of Microbiology and Biotechnology. — 2024. — Vol. 40, No. 11. — P. 341. — DOI: 10.1007/s11274-024-04151-3.
9. Довнар Р.И. Антибактериальное действие наночастиц серебра / Р.И. Довнар, А.Ю. Васильков, Т.Н. Соколова [и др.] // Новости хирургии. — 2022. — № 1. — С. 56–64.
10. Ржеусский С.Э. Наночастицы серебра в медицине / С.Э. Ржеусский // Вестник Витебского государственного медицинского университета. — 2022. — № 2. — С. 7–15.
11. López Ruiz A. Novel Silver-Platinum Nanoparticles for Anticancer and Antimicrobial Applications / A. López Ruiz, C. Bartomeu Garcia, S. Navarro Gallón [et al.] // International Journal of Nanomedicine. — 2020. — Vol. 15. — P. 169–179. — DOI: 10.2147/IJN.S176737.
12. Bruna T. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications / T. Bruna, F. Maldonado-Bravo, P. Jara [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. — 2021. — Vol. 22, No. 13. — P. 7202. — DOI: 10.3390/ijms22137202.
13. Чернигова С.В. Нанопокрывание в местном лечении ожоговых ран / С.В. Чернигова, Н.В. Зубкова, Е.С. Дочилова // Вестник Омского государственного аграрного университета. — 2021. — № 4(44). — С. 235–241.
14. Fernandez C.C. Applications of Silver Nanoparticles in Dentistry: Advances and Technological Innovation / C.C. Fernandez, A.R. Sokolonski, M.S. Fonseca [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. — 2021. — Vol. 22, No. 5. — P. 2485. — DOI: 10.3390/ijms22052485.
15. Dos Santos C.A. Antimicrobial effectiveness of silver nanoparticles co-stabilized by the bioactive copolymer pluronic F68 / C.A. Dos Santos, A.F. Jozala, A. Pessoa Jr [et al.] // Journal of Nanobiotechnology. — 2012. — Vol. 10. — P. 43. — DOI: 10.1186/1477-3155-10-43.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Udegova E.S. Antibakterial'nyj effekt nanochastic metallov na antibiotikorezistentnye shtammy bakterij [Antibacterial effect of metal nanoparticles on antibiotic-resistant bacterial strains] / E.S. Udegova, K.A. Gil'deeva, T.V. Rukosueva [et al.] // *Infekcija i immunitet* [Infection and Immunity]. — 2021. — No. 4. [in Russian]
2. Medusheva E.O. Novoe ranewoe pokrytie na polimernoj osnove dlja lechenija ran [New polymer-based wound dressing for wound treatment] / E.O. Medusheva, Ju.S. Fidorskaja, M.A. Shhedrina [et al.] // *Rany i ranewye infekcii. Zhurnal imeni professora B.M. Kostjuchjonka* [Wounds and Wound Infections. The Journal named after Professor B.M. Kostyuchenok]. — 2023. — No. 2. [in Russian]
3. Semenov F.V. Jeksperimental'noe obosnovanie ispol'zovanija preparatov, sodержashhij nanochasticy serebra, v mestnoj jempiricheskoj terapii zabolevanij lororganov, vyzvannyh r. Aeruginosa i acinetobacter sp [Experimental justification for the use of silver nanoparticle-containing drugs in local empirical therapy of ENT diseases caused by p. Aeruginosa and acinetobacter sp] / F.V. Semenov, S.A. Babichev, O.A. Kachanova [et al.] // *Rossijskaja otorinolaringologija* [Russian Otorhinolaryngology]. — 2013. — No. 5(66). — P. 73–79. [in Russian]
4. Rohde M.M. The mechanism of cell death induced by silver nanoparticles is distinct from silver cations / M.M. Rohde, C.M. Snyder, J. Sloop [et al.] // *Particle and Fibre Toxicology*. — 2021. — Vol. 18, No. 1. — P. 37. — DOI: 10.1186/s12989-021-00430-1.
5. Karpova M.R. Mehanizmy baktericidnosti nanochastic serebra [Mechanisms of bactericidal activity of silver nanoparticles] / M.R. Karpova, A.V. Korshunov, T.S. Dul'ceva [et al.] // *Infekcija i immunitet* [Infection and Immunity]. — 2012. — No. 1-2. — P. 117–124. [in Russian]
6. Yonathan K. The impact of silver nanoparticles on microbial communities and antibiotic resistance determinants in the environment / K. Yonathan, R. Mann, K.R. Mahhub [et al.] // *Environmental Pollution*. — 2022. — Vol. 293. — P. 118506. — DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118506.
7. Schneider G. The use of antimicrobial-impregnated fabrics in health services: an integrative review / G. Schneider, F.L. Bim, Á.F.L. Sousa [et al.] // *Revista Latino-Americana de Enfermagem*. — 2021. — Vol. 29. — P. e3416. — DOI: 10.1590/1518-8345.4668.3416.
8. Pineda M.E.B. Nanocomposites: silver nanoparticles and bacteriocins obtained from lactic acid bacteria against multidrug-resistant *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* / M.E.B. Pineda, D.F.V. Sánchez, P.A.C. Caycedo [et al.] // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. — 2024. — Vol. 40, No. 11. — P. 341. — DOI: 10.1007/s11274-024-04151-3.
9. Dovnar R.I. Antibakterial'noe dejstvie nanochastic serebra [Antibacterial action of silver nanoparticles] / R.I. Dovnar, A.Ju. Vasil'kov, T.N. Sokolova [et al.] // *Novosti hirurgii* [Surgery News]. — 2022. — No. 1. — P. 56–64. [in Russian]
10. Rzheusskij S.Je. Nanochasticy serebra v medicine [Silver nanoparticles in medicine] / S.Je. Rzheusskij // *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta* [Bulletin of the Vitebsk State Medical University]. — 2022. — No. 2. — P. 7–15. [in Russian]
11. López Ruiz A. Novel Silver-Platinum Nanoparticles for Anticancer and Antimicrobial Applications / A. López Ruiz, C. Bartomeu Garcia, S. Navarro Gallón [et al.] // *International Journal of Nanomedicine*. — 2020. — Vol. 15. — P. 169–179. — DOI: 10.2147/IJN.S176737.
12. Bruna T. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications / T. Bruna, F. Maldonado-Bravo, P. Jara [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2021. — Vol. 22, No. 13. — P. 7202. — DOI: 10.3390/ijms22137202.
13. Chernigova S.V. Nanopokrytie v mestnom lechenii ozhogovyh ran [Nanocoating in local treatment of burn wounds] / S.V. Chernigova, N.V. Zubkova, E.S. Dochilova // *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Omsk State Agrarian University]. — 2021. — No. 4(44). — P. 235–241. [in Russian]
14. Fernandez C.C. Applications of Silver Nanoparticles in Dentistry: Advances and Technological Innovation / C.C. Fernandez, A.R. Sokolonski, M.S. Fonseca [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2021. — Vol. 22, No. 5. — P. 2485. — DOI: 10.3390/ijms22052485.
15. Dos Santos C.A. Antimicrobial effectiveness of silver nanoparticles co-stabilized by the bioactive copolymer pluronic F68 / C.A. Dos Santos, A.F. Jozala, A. Pessoa Jr [et al.] // *Journal of Nanobiotechnology*. — 2012. — Vol. 10. — P. 43. — DOI: 10.1186/1477-3155-10-43.