



<https://doi.org/10.29326/2304-196X-2025-14-1-90-100>
УДК 619:615.276/.28:546.57



Наночастицы металлов, наночастицы серебра и их влияние на организм человека и животных (обзор литературы)

А. Д. Сумарокова, Л. Н. Стацевич

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ), ул. Добролюбова, 160, г. Новосибирск, 630039, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. В связи с ростом числа заболеваний различной этиологии и развитием антибиотикорезистентности в последние несколько лет возросла значимость такого достижения человечества, как наноматериалы. Сравнительно небольшое количество данных (недостаток данных) о биораспределении, фармакокинетике, а также потенциальной токсичности нанометаллов для организма замедляет разработку более безопасных и эффективных лекарственных средств.

Цель исследования. Анализ и обобщение данных современной научной литературы, посвященной изучению наночастиц металлов и наночастиц серебра, их распределения и влияния на организм человека и животных, а также по применению в сфере биомедицины и ветеринарии.

Материалы и методы. Поиск источников производился в системах eLIBRARY.RU, cyberleninka.ru, scholar.google.ru, www.mdpi.com, www.researchgate.net, www.sciencedirect.com, базе данных PubMed. Использовалась литература, опубликованная за последние 6 лет, и более ранние исследования.

Результаты. Нанозлементы делят на органические, неорганические и гибридные. Одной из наиболее изученных неорганических наноструктур являются наночастицы металлов. Они находят широкое применение как в инженерии, так и в биомедицине (ветеринарии) в качестве бактерицидного и вирулицидного агента, средств для борьбы с раком, а также в сфере диагностики. На территории СНГ популярными нанометаллами являются наночастицы серебра. Известно, что на антибактериальную активность нанообъектов влияют их форма, размер и поверхностный заряд. Сейчас на фармацевтическом рынке существует несколько видов препаратов серебра, представленные в различных формах: коллоидное (катионное), кластерное и нульвалентное (металлическое) серебро. Препараты нульвалентного серебра наименее токсичны по сравнению с остальными. Лекарства на основе наноразмерных частиц можно вводить оральным, ингаляционным и дермальным способами, а также непосредственно в системный кровоток посредством внутрибрюшинной или внутривенной инъекции. Биораспределение металлических наноструктур зависит от типа частиц, их размера, поверхностного заряда, поверхностного покрытия, связи с белками, а также от путей воздействия, дозы и гидрофобности. Фармакокинетика наночастиц серебра не отличается от распределения наночастиц металлов, при этом наноразмерное серебро способно накапливаться в селезенке, печени, почках и легких, что может вызывать потенциальный токсический эффект.

Заключение. Необходимы дальнейшие углубленные исследования биораспределения, совместимости и потенциальной токсичности наночастиц, которые помогут разработать более эффективные и безопасные лекарственные препараты.

Ключевые слова: обзор, виды наночастиц, наночастицы металлов, наносеребро, биораспределение, препараты наносеребра, антибактериальная активность, токсичность

Для цитирования: Сумарокова А. Д., Стацевич Л. Н. Наночастицы металлов, наночастицы серебра и их влияние на организм человека и животных (обзор литературы). *Ветеринария сегодня*. 2025; 14 (1): 90–100. <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2025-14-1-90-100>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для корреспонденции: Сумарокова Анастасия Дмитриевна, аспирант, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, ул. Добролюбова, 160, г. Новосибирск, 630039, Россия, stasaaan@gmail.com

Metal nanoparticles, silver nanoparticles and their impact on human and animal health (review)

Anastasia D. Sumarokova, Lyudmila N. Statsevich

Novosibirsk State Agricultural University, 160 Dobrolyubova str., Novosibirsk 630039, Russia

ABSTRACT

Introduction. Due to increased prevalence of different diseases and antimicrobial resistance development in recent year, such advancements of the humankind as nanomaterials have gained the significance. A relatively small amount of data (lack of data) on biological distribution, pharmacokinetics and potential toxicity of nanometals for the organism hinders the development of safer and more effective drugs.

Objective. Analysis and summary of data published in modern scientific literature on studies of metal nanoparticles and silver nanoparticles, their distribution and impact on human and animal health, as well as their use in biomedicine and veterinary medicine.

Materials and methods Publications were searched for in eLIBRARY.RU, cyberleninka.ru, scholar.google.ru, www.mdpi.com, www.researchgate.net, www.sciencedirect.com, PubMed database. The literature published during last six years and more recent publications have been used.

Results. Nanostructures can be organic, inorganic and hybrid. One of the most studied inorganic materials are metal nanoparticles. They are widely used both in engineering and biomedicine, in particular in veterinary medicine, as bactericidal and virucidal agents, anti-cancer drugs and diagnostic tools. In the CIS members, silver nanoparticles are most commonly used. It is known that shape, size and surface electric charge affect the antibacterial activity of nanostructures. Several types

of silver-based drugs are available at the market now: colloidal, silver cluster and zerovalent silver. Zerovalent silver-based drugs are least toxic. Nanoparticle-based drugs can reach target tissues through local administration such as oral, inhalation, subcutaneous administration, and directly into blood flow by intraperitoneal or intravenous injection. Biodistribution of metal nanostructures depends on particle type, their size, surface, interaction with proteins as well as routes of exposure, doses and hydrophobic properties. Pharmacokinetics of silver nanoparticles does not differ from that of metal nanoparticles, furthermore nanosilver does not accumulate in spleen, liver, kidneys and lungs which is potentially toxic.

Conclusions. Further in-depth studies of nanoparticle biodistribution, compatibility and potential toxicity are needed to facilitate the development of more effective and safe therapeutic drugs.

Keywords: review, nanoparticle types, metal nanoparticles, nanosilver, biodistribution, nanosilver drugs, bactericidal activity, toxicity

For citation: Sumarokova A. D., Statsevich L. N. Metal nanoparticles, silver nanoparticles and their impact on human and animal health (review). *Veterinary Science Today*. 2025; 14 (1): 90–100. <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2025-14-1-90-100>

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interests.

For correspondence: Anastasia D. Sumarokova, Postgraduate Student, Novosibirsk State Agrarian University, 160 Dobrolyubova str., Novosibirsk 630039, Russia, stasaan@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Длительное использование антимикробных препаратов угнетает симбиотическую микрофлору организма, патогенные микроорганизмы развивают устойчивость к антибиотикам, и лекарственные препараты прекращают оказывать терапевтическое действие, вызывая при этом побочные эффекты и осложнения. Новые механизмы устойчивости различных патогенов, увеличивающие их резистентность, снижают эффективность лечения инфекционных заболеваний. Даже распространенные инфекции, такие как пневмония, сепсис и заболевания пищевого происхождения, становятся все труднее лечить, а в некоторых случаях это сделать вообще невозможно из-за снижения эффективности антибактериальных препаратов¹. Растущая глобальная проблема устойчивости к антибиотикам возбудителей инфекций создала острую необходимость снижения использования противомикробных средств и поиска наиболее действенных препаратов, их заменяющих [1].

Область применения наноматериалов быстро расширяется. Использование их для решения биомедицинских и ветеринарных задач, таких как диагностика и лечение различных заболеваний, на сегодняшний день является одним из приоритетных научных направлений. Особый интерес в широком спектре наночастиц (НЧ), предлагаемых для использования в сфере медицины и ветеринарии, представляют наночастицы металлов (НЧМ), что обусловлено их уникальными химическими и биологическими характеристиками, обеспечивающими их многофункциональность [2].

В настоящее время выделяют три основные группы действия наноструктур на биологические объекты:

- 1) модификация (НЧ железа, меди);
- 2) токсичность (НЧ меди, оксида алюминия, серебра, железа, гидроксида железа);
- 3) мутагенность (НЧ кремния, гидроксида никеля, оксида железа, диоксида титана, золота, оксида цинка, оксида меди и серебра) [2].

Наиболее часто используемые металлические НЧ – это серебро, золото, оксид железа, медь и цинк [3]. В ветеринарии данные наноматериалы в основном ис-

пользуются в качестве противовирусных и противомикробных средств [4].

Из наноструктур металлов особый интерес вызывают наночастицы серебра (НЧС). Они известны своим широким спектром антимикробного действия и противораковым эффектом: помогают в заживлении ран и костей, могут повышать иммуногенность вакцин и обладают антидиабетическими свойствами [5].

Хотя нанотехнология считается одной из наиболее передовых, применяемых в различных областях, ее использование в ветеринарии все еще находится на начальной стадии по сравнению с другими родственными дисциплинами. При этом она уже открывает новые возможности в молекулярной биологии, биотехнологии, производит революцию почти во всех дисциплинах ветеринарии и зоотехнии, предоставляя полезные инструменты и материалы, обеспечивающие защиту здоровья животных [6]. Наночастицы все чаще находят применение в ветеринарной практике и диагностике, при производстве вакцин, сельскохозяйственных дезинфицирующих средств, разведении животных, их воспроизводстве и даже в сфере их питания. Замена НЧ широко используемых антибактериальных препаратов напрямую отражается на здоровье населения, так как это сводит к минимуму проблему антибиотикорезистентности как в медицине, так и в ветеринарии, а также проблему остаточного содержания лекарственных средств в молоке и мясе [7].

Препараты на основе нанометаллов, и в частности наносеребра, активно изучаются и применяются в качестве противомикробных, противовирусных, противогрибковых [8] и противоопухолевых средств, а также как анальгетики [9] и биологически активные добавки, направленные на повышение продуктивности, иммунного статуса животных, и даже в качестве синергетиков для антибиотиков [10, 11, 12, 13].

Несмотря на то что нанообъекты уже используются для решения различных биомедицинских и ветеринарных задач, в настоящее время недостаточно данных о биораспределении наноэлементов в организме. При этом понимание закономерностей распределения в организме НЧ с учетом их различного состава и строения имеет первостепенное значение для определения перспектив их дальнейшего биологического и медицинского применения [14].

¹ Всемирная организация здравоохранения. Устойчивость к антибиотикам. <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/antibiotic-resistance>

В работе рассматриваются достижения в области использования наноматериалов за последние 20 лет. Этот обзор призван предоставить ценную информацию для исследователей, интересующихся медицинским и ветеринарным применением НЧМ, а именно НЧС.

Цель работы – проанализировать и обобщить данные современной научной литературы, посвященной изучению НЧМ и НЧС в сфере биомедицины и ветеринарии, а также изучению их распределения и влияния на организм человека и животных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При составлении обзора использовали материалы научных исследований, затрагивающих изучение НЧМ, и в частности НЧС, за последние 20 лет. Были проанализированы опубликованные данные о свойствах НЧМ и НЧС, их влиянии на организм человека и животных, применении в сфере ветеринарии и биомедицины.

Поиск и анализ литературы проводился с использованием интернет-ресурсов: eLIBRARY.RU, cyberleninka.ru, scholar.google.ru, www.mdpi.com, www.researchgate.net, www.sciencedirect.com, базы данных PubMed.

Для анализа выбирались иностранные и отечественные обзорные статьи (57%), сообщающие о НЧ, их видах, синтезе, распределении и воздействии на организм, применении в различных сферах; научно-исследовательские работы (43%), в которых представлены результаты экспериментов по применению НЧМ и НЧС в качестве диагностических, лекарственных средств, биологически активных добавок (БАД) и др. При этом 66% составила литература, опубликованная за последние 6 лет (из них 11,5% – статьи за 2023 г., 7,7% – за 2024 г.), 34% – более ранние исследования.

ВИДЫ НАНОЧАСТИЦ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ И ДИАГНОСТИКЕ

На сегодняшний день разработано множество модификаций НЧ, которые используются в биомедицинской и ветеринарной сферах, их делят на органические, неорганические и гибридные. Большинство органических наноструктур биосовместимы, биоразлагаемы и нетоксичны, в то время как большинство неорганических наноэлементов имеют меньший размер, улучшенную стабильность, контролируемую перестраиваемость, повышенную проницаемость, высокую совместимость лекарств и профиль запуска высвобождения лекарственного средства [15, 16, 17, 18, 19].

Неорганические наноразмерные частицы включают в себя частицы металлов или их оксидов, полупроводниковые НЧ (оксид кремния), к которым относятся квантовые точки, а также производные углерода (графен, фуллерены, углеродные нанотрубки). Органические же нанообъекты представлены структурами на основе липидов и их производных (липосомы, липидные НЧ, мицеллы), а также синтетическими соединениями полимерной природы: линейными (классическими) и ветвящимися (дендримеры, дендроны) [15].

В данном обзоре рассмотрены неорганические наноэлементы, а именно НЧМ. Они представляют собой НЧ в форме сфер, нанокапсул, стержней и прочих разнообразных конфигураций, которые имеют высокую устойчивость и эффективность в различных условиях, а также обладают легко контролируемыми физико-химическими свойствами. К сожалению, НЧМ имеют и недостатки: сложность изготовления (получение

однородных частиц по размеру и заряду) и трудность выведения их из организма [20].

Наиболее часто встречаемыми металлическими наноматериалами, используемыми в биомедицине, являются НЧ золота, серебра, оксида меди, оксида цинка, оксида магния, оксида железа, диоксида титана и алюминия [21, 22, 23, 24, 25].

Наночастицы серебра давно и широко изучаются для применения в различных областях биомедицинской сферы и ветеринарии из-за их антимикробных свойств и антиоксидантной активности [26]. Они активны в отношении грамотрицательных и грамположительных бактерий и используются в перевязочных материалах [27].

Наночастицы золота – еще одна группа металлических НЧ, которые масштабно исследуются и уже нашли широкое применение в медицине и диагностике, например: антибактериальное, при терапии онкологических заболеваний для адресной доставки лекарств и снижения скорости роста опухолей. Кроме того, НЧ золота применяются в спектроскопии и для ряда оптических методов визуализации [28, 29].

И последняя часто изучаемая группа НЧМ – их оксиды. Достаточно давно исследуют применение оксида цинка, ZnO; оксида меди (II), CuO; оксида магния, MgO; оксида титана (IV), TiO₂; оксида алюминия, Al₂O₃; оксида железа (II, III), Fe₃O₄ [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37].

Активное изучение оксида железа связано с его магнитными свойствами. Наночастицы оксида железа применяют для доставки лекарств, при проведении магнитно-резонансной томографии, для диагностики рака и в тканевой инженерии [30]. Оксид олова обладает уникальными электрическими свойствами, которые зависят от размера его НЧ [31]. Триоксид вольфрама используют в качестве сенсора газа [32]. Диоксид титана обладает электропроводностью, поэтому нашел применение в оптической и солнечной энергетике, а также в медицинской, пищевой и микробиологической промышленности в качестве материала для фотокаталитической стерилизации [33, 34]. Наночастицы оксида магния используются для уменьшения загрязнения воздуха и в качестве катализаторов органических реакций [35]. Наночастицы оксида меди нашли применение в различных каталитических областях, включая окисление и фототермию [36]. Также оксиды магния, меди, алюминия и цинка зарекомендовали себя как потенциальные антибактериальные и противогрибковые агенты [37].

НАУЧНЫЙ ИНТЕРЕС К НАНОЧАСТИЦАМ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА, ИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ

В течение последних 20 лет на электронном ресурсе Google Scholar² ежегодно менялся объем выдачи по поисковому запросу “gold nanoparticles in medicine”: с 1360 ссылок в 2003 г. до 61 900 – в 2023 г., при этом наибольшее их количество приходилось на 2022 г. (67 800). По поисковому запросу “silver nanoparticles in medicine” в 2003 г. насчитывалось 904 источника, а в 2023 г. их количество достигло 51 500, наибольшее количество (56 600) было также в 2022 г. (рис. 1).

Количество источников по поисковым запросам “gold nanoparticles in veterinary medicine” и “silver nanoparticles in veterinary medicine” почти в 9 раз меньше (рис. 2). Наименьшее количество англоязычных

² <https://scholar.google.com>

ссылок по данным темам было в 2003 г. (127 и 103 соответственно). Наибольшее же количество источников по запросу “gold nanoparticles in veterinary medicine” приходится на 2023 г. (7570), количество ссылок на тему “silver nanoparticles in veterinary medicine” в этот же год было самым большим за последние 20 лет (7910).

На этом же электронном ресурсе по поисковому запросу «наночастицы золота в медицине» насчитывалось всего 12 русскоязычных источников в 2003 г. и 225 – в 2023 г. (рис. 3). По запросу «наночастицы серебра в медицине» в 2023 г. было обнаружено 395 источников, тогда как в 2003 г. их было всего 20. Самое большое количество источников на тему «наночастицы золота в медицине» приходится на 2018 г. (438), а на тему «наночастицы серебра в медицине» – на 2016 г. (636).

Количество русскоязычных источников по запросам «наночастицы золота в ветеринарии» и «наночастицы серебра в ветеринарии» было в 5–8 раз меньше результатов поисковых запросов относительно НЧ в сфере медицины. При этом в 2005 г. совсем не было обнаружено ссылок для каждого из поисковых запросов (рис. 4).

Наибольшее же количество источников на тему «наночастицы серебра в ветеринарии» было в 2020 г. (136), а на тему «наночастицы золота в ветеринарии» – в 2018 г. (57).

В период с января 2018 г. по декабрь 2023 г. в поисковой системе «Яндекс» было зафиксировано 569 запросов по теме «наночастицы золота в медицине» (рис. 5). Наибольшее количество запросов было в 2022 г. (140). Число обращений по вопросу «наночастицы серебра в медицине» на yandex.ru³ за этот же период равнялось 749. Пик популярности поисковых запросов на данную тему пришелся на 2023 г. (202 запроса).

При этом запросов на темы «наночастицы золота в ветеринарии» и «наночастицы серебра в ветеринарии» на данном ресурсе за последние 5 лет совсем не отмечалось.

На графиках видно (рис. 1–4), что англоязычные ссылки по теме наноструктур в медицине и ветеринарии превышают количество русскоязычных более чем в 100 раз. Также по числу появляющихся за год источников понятно, что интерес к металлическим НЧ в сфере медицины у иностранных коллег снизился только год назад, в отличие от интереса наших коллег, который имеет тенденцию к снижению на протяжении последних пяти лет. При этом данные «Яндекс Вордстата» говорят о ежегодном увеличении интереса ученых России и стран СНГ к НЧ в сфере биомедицины. Наночастицы золота же за последние шесть лет не вызвали стабильного интереса у исследователей (рис. 5).

Установлено, что с каждым годом увеличивается количество зарубежных исследований в области ветеринарии, посвященных металлическим НЧ (рис. 2). Русскоязычные ученые в этой же области не имеют стабильной заинтересованности в изучении НЧ золота и серебра с 2015–2016 гг. (рис. 4).

Разница в 8–9 раз между количеством англоязычных и русскоязычных ссылок на тему использования НЧ в медицине и в ветеринарии может быть связана с тем, что НЧ в ветеринарной практике пока не нашли столь широкого применения, как в медицине. Тем не менее в данной области также проводятся исследования по использованию НЧ для лечения и диагностики заболе-

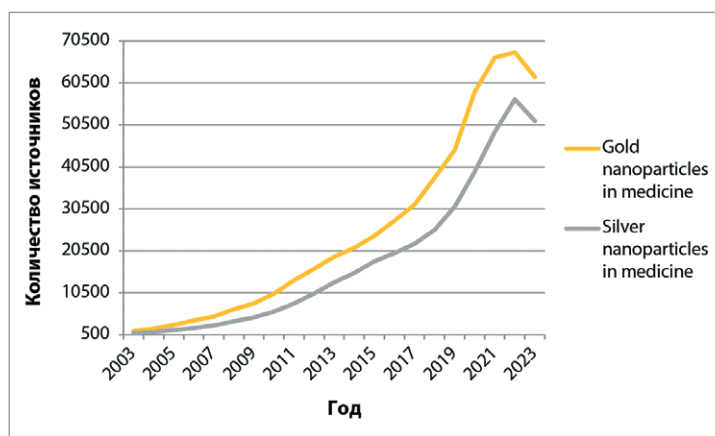


Рис. 1. Количество англоязычных источников по поисковым запросам “gold nanoparticles in medicine” и “silver nanoparticles in medicine” на электронном ресурсе Google Scholar с 2003 по 2023 г.

Fig. 1. Publications in English for “gold nanoparticles in medicine” and “silver nanoparticles in medicine” search queries in Google Scholar from 2003 to 2023

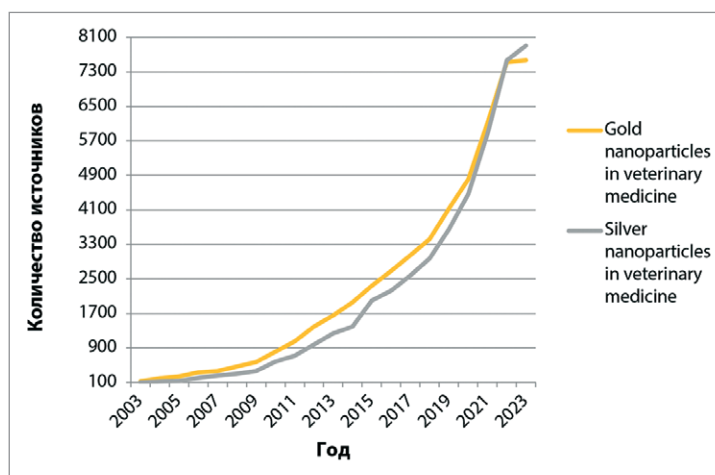


Рис. 2. Количество англоязычных источников по поисковым запросам “gold nanoparticles in veterinary medicine” и “silver nanoparticles in veterinary medicine” на электронном ресурсе Google Scholar с 2003 по 2023 г.

Fig. 2. Publications in English for “gold nanoparticles in veterinary medicine” and “silver nanoparticles in veterinary medicine” search queries in Google Scholar from 2003 to 2023

ваний домашних и сельскохозяйственных животных, птиц. Создаются вакцинные препараты против ряда значимых бактериальных и вирусных болезней, таких как грипп лошадей, вирусная диарея крупного рогатого скота, ньюкаслская болезнь, а также разрабатываются носители на основе НЧ для доставки средств визуализации, антибиотиков, витаминов и лекарственных препаратов, в том числе направленных против опухолевых заболеваний [38].

Таким образом, несмотря на спад интереса российских ученых к изучению применения наноматериалов в медицине и ветеринарии, судя по количеству источников на эту тему, наших соотечественников больше интересуют НЧ и их использование в качестве базы для лекарственных препаратов. И это неудивительно, ведь НЧ давно являются наиболее широко применяемым антибактериальным наноагентом из-за широкого

³ <https://wordstat.yandex.ru>

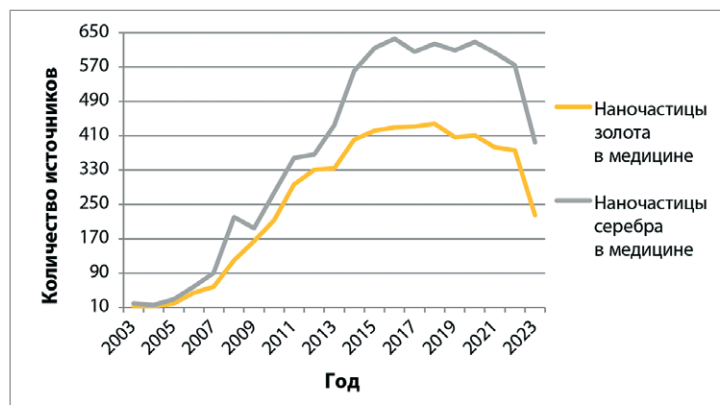


Рис. 3. Количество русскоязычных источников по поисковым запросам «наночастицы золота в медицине» и «наночастицы серебра в медицине» на электронном ресурсе Google Scholar с 2003 по 2023 г.

Fig. 3. Publications in Russian for "gold nanoparticles in medicine" and "silver nanoparticles in medicine" search queries in Google Scholar from 2003 to 2023

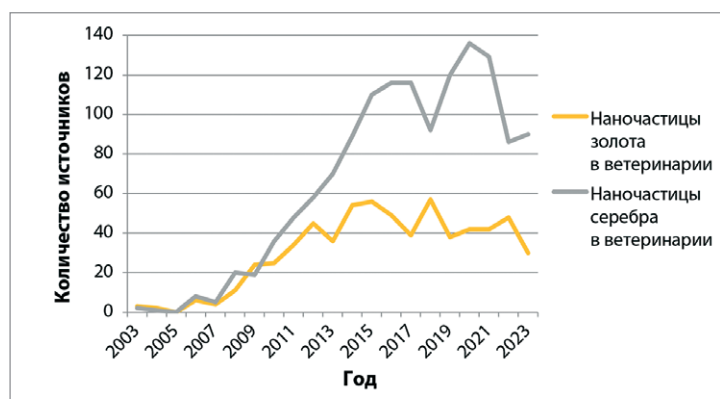


Рис. 4. Количество русскоязычных источников по поисковым запросам «наночастицы золота в ветеринарии» и «наночастицы серебра в ветеринарии» на электронном ресурсе Google Scholar с 2003 по 2023 г.

Fig. 4. Publications in Russian for "gold nanoparticles in veterinary medicine" and "silver nanoparticles in veterinary medicine" search queries in Google Scholar from 2003 to 2023

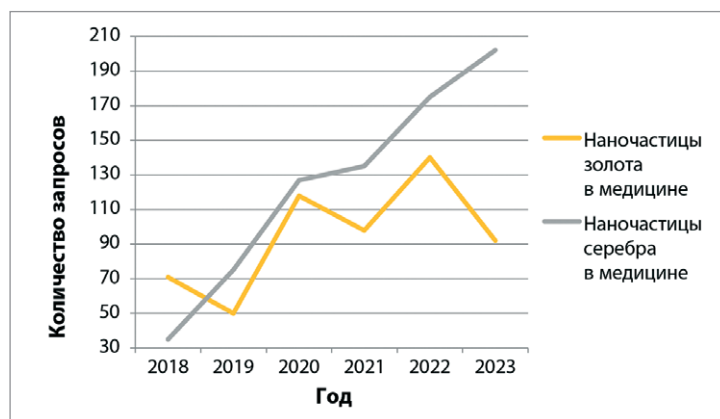


Рис. 5. Количество запросов «наночастицы золота в медицине» и «наночастицы серебра в медицине» на электронном поисковом ресурсе «Яндекс» с 2018 по 2023 г.

Fig. 5. Publications for "gold nanoparticles in medicine" and "silver nanoparticles in medicine" search queries in Yandex from 2003 to 2023

спектра действия против множества бактерий, вирусов и грибов [39].

Первые же сведения об использовании серебра в медицине относятся к XIX веку, когда его применяли для профилактики гонококкового неонатального конъюнктивита у новорожденных, а позднее, в XX веке, серебро использовалось хирургами для местного лечения ожоговых ран и в качестве антисептиков [40, 41, 42].

Уже более ста лет известно серебро в форме коллоидов. В настоящее же время существует множество способов получения более эффективных его форм – наночастиц.

Методы получения НЧС условно можно разделить на две группы: восстановление ионов серебра (Ag^+) и диспергирование макрообъектов до наноразмеров. К первой группе относятся химические методы, ко второй – физические. При этом серебро наноразмерного состояния может иметь различные геометрические формы: сферические, пирамиды, стержни, кубы и др. [43]. Доказано, что форма, а также размер и поверхностный заряд НЧ влияют на их антибактериальную активность [39].

Форма наночастиц. Как показали результаты проведенных в 2016 и 2019 гг. исследований по изучению влияния формы и граней нанобъектов на антибактериальную активность, кристаллические частицы с высокой атомной плотностью и большим количеством граней обладают более высокой активностью против бактерий. Например, треугольные нанопризмы серебра со 111 гранями имеют более высокую атомную плотность и, соответственно, обладают более высокой реакционной способностью по сравнению с НЧ сферической и стержнеобразной форм, имеющими 100 и 110 граней [44, 45]. Pal S. et al. в 2007 г. синтезировали НЧ трех форм: сферической, стержнеобразной и усеченной треугольной, а также изучили их эффективность против кишечной палочки в чашках с раствором и агаром. Исследователи пришли к выводу, что по биоцидной активности усеченные треугольные частицы наносеребра занимают первое место, за ними следуют сферы и, наконец, стержни. Наблюдение с помощью просвечивающей электронной микроскопии за целостностью бактериальной мембраны привело ученых к выводу, что НЧС всех форм способны связываться с поверхностью мембраны и в конечном итоге повреждать ее. Однако нанопластина усеченной треугольной формы имеет наибольшее количество граней, что способствует усилению взаимодействия с основными компонентами клеточной мембраны, увеличивает поверхностное связывание и поглощение бактериальными клетками, приводя к их гибели [39].

Helmlinger J. et al. исследовали влияние формы наноструктур на *Staphylococcus aureus*. Они пришли к выводу, что нанотромбоциты обладают самой высокой токсичностью, за ними следуют наносферы, наностержни и нанокубы [46].

Размер наночастиц. Экспериментальными исследованиями установлено, что антибактериальные свойства НЧ обратно пропорционально зависят от их размера: они увеличиваются с уменьшением размера поверхности частиц. Так, НЧС размером от 1 до 10 нм эффективнее ингибируют развитие бактерий [46, 47, 48]. Это, вероятно, связано с большим накоплением НЧ внутри клеточной мембраны и цитоплазмы микроорганизмов [49, 50]. Также предполагают, что повышенная

антибактериальная активность может быть связана с тем, что более мелкие нанозлементы высвобождают свои токсичные компоненты с более высокой скоростью из-за увеличения поверхностно-объемного отношения при уменьшении размера частиц [47, 51]. Кроме того, недавние исследования показывают, что функционализированные НЧС малого и среднего размера сильно влияют на транспорт электронов в митохондриях, фагоцитоз, аутофагию, целостность и организацию органелл [52].

Поверхностный заряд наночастиц. Противомикробную активность НЧ можно изменять, контролируя их поверхностный заряд. Hu C. et al. было показано, что НЧС с положительным поверхностным зарядом обладают повышенной антибактериальной активностью [53]. Также на антимикробную активность влияет высвобождение ионов Ag^+ с поверхности НЧ. Это происходит в результате окислительного растворения: сначала металлическое серебро окисляется под действием растворенного в среде кислорода, затем образовавшийся основной оксид растворяется в кислой среде. Ионы серебра также обладают высоким сродством к электронодонорным группам, которые можно обнаружить в мембранах и белках. Ионы Ag^+ способны взаимодействовать с ДНК, РНК и пептидами, образуя комплексы, что останавливает деление и размножение бактериальных клеток [39].

ПРЕПАРАТЫ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Можно сказать, что на фоне быстрорастущей резистентности бактерий к антибиотикам серебросодержащие препараты в данный момент переживают свое второе рождение.

В настоящее время на рынке лекарственных средств существует несколько видов препаратов серебра, представленных в разных формах.

Наиболее известны препараты на основе коллоидного (катионного) серебра (Ag^+): это оксид серебра, соли серебра (нитраты, сульфаты, фосфаты), комплексы серебра (цитраты или лактаты), а также свободные аквакатионы серебра. Препараты коллоидного серебра, представленные на рынке: Tinosan SDC (BASF, Германия), «Арголайф» (ООО «Арт Лайф», Россия), сульфат серебра (ОАО «Аурат», Россия) [54].

Также существуют препараты металлического высокодисперсного, или нанодисперсного, серебра – кластерного серебра, основное количество которого находится в малотоксичной металлической форме Ag^0 . Препараты кластерного серебра обладают высокой эффективностью и более низкой токсичностью, чем препараты, в составе которых большее количество катионного серебра [55]. К таким препаратам относятся: «АгБион-2» (ЗАО «Концерн «Наноиндустрия», Россия), «Арговит» (ООО НПЦ «Вектор-Вита», Россия), «Повиаргол» (ИВС РАН, Россия), «Аргоника» (ООО НПЦ «ВекторПро», Россия).

Отдельно выделяют нульвалентное (металлическое) серебро, а именно коллоидное безионное очищенное серебро (Ag^0), например, торговой марки «КНД» (ООО «НПП «Сентоза Факторинг НП», Россия): концентрат коллоидного серебра «КНД-С», концентрат коллоидного серебра и меди «КНД-СМ», концентрат коллоидного серебра «КНД-С-К», косметическое сырье и биологически активная добавка «АРЕГОНА» (КНД-СП) [54].

Как отмечалось выше, препараты с содержанием серебра в высокодисперсной форме обладают суще-

ственно более низкой токсичностью, чем препараты солей серебра. Препараты нульвалентного серебра гораздо менее токсичны, чем средства на основе кластерного серебра. Это связано с практически полным отсутствием катионного Ag в субстанциях нульвалентного серебра.

Также катионное серебро имеет ограниченный состав среды и несовместимость со многими компонентами практических систем (например, с физиологическими растворами), в отличие от кластерного и нульвалентного серебра, которые более совместимы и стабильны [55].

Препараты на основе наносеребра очень перспективны для использования в сферах ветеринарии и зоотехнии. НЧС можно применять в целях биобезопасности на фермах, для фумигации инкубаторов, стерилизации выводковых птичников и клеток. Обнаружено, что НЧС могут улучшить адаптивную иммунную систему птиц [56] и выводимость яиц [57]. В 2023 г. были получены физиологически стабильные, биосовместимые НЧС, которые можно использовать для адресной доставки лекарств в ветеринарной медицине, что может обеспечить повышенную терапевтическую эффективность с минимальными побочными эффектами [58]. В том же году было установлено, что добавление наносеребра в молочный рацион телят положительно влияет на их метаболические показатели. Поэтому возможно его использование с целью профилактики инфекционных заболеваний телят в первый месяц после рождения, что позволит исключить развитие устойчивости к антибиотикам и увеличить производство продукции животноводства [59].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ В ОРГАНИЗМЕ

Распределение в органах и тканях лекарственного вещества, имеющего в составе нанозлементы, существенным образом изменяется, влияя и на фармакодинамические свойства препарата. В связи с этим изучение биораспределения НЧ является важнейшим этапом в исследованиях [60]. Но на сегодняшний день большинство наноматериалов все еще находится на стадии доклинической оценки, и лишь немногие из них одобрены для клинического использования. Преобладающее количество работ посвящено изучению наноматериалов *in vitro*, а публикаций о поведении различных видов нанообъектов на уровне организма сравнительно немного. При этом отсутствие конкретных данных по распределению и накоплению НЧ в органах и тканях организма во многом определяет границы их применения [61].

Для оценки распределения НЧ и их токсичности необходимы фармакокинетические исследования. Всасывание, распределение, метаболизм и выведение – это четыре процесса, составляющие фармакокинетику [63]. Фармакокинетических исследований наночастиц проведено мало, также контроль осуществляется только за наноматериалами^{4,5}, но нет норм и рекомендаций

⁴ О надзоре за продукцией, полученной с использованием нанотехнологий и содержащей наноматериалы: постановление главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 23.07.2007 № 54. <https://docs.cntd.ru/document/902056894>

⁵ Порядок и организация контроля за наноматериалами: методические указания от 17.10.2011 МУ 1.2.2966-11. <https://docs.cntd.ru/document/1200095623>

относительно биораспределения НЧ, что затрудняет оценку этого параметра.

Биораспределение металлических НЧ зависит от типа частиц, их размера, поверхностного заряда, поверхностного покрытия, связи с белками, а также от путей воздействия, дозы и гидрофобности [62, 63].

На скорость и степень всасывания влияют физиологическая среда и характеристики НЧ. Наносоставы преодолевают физиологические и физические барьеры, которые выборочно блокируют транспорт молекул, снижая биодоступность наноматериалов. На клеточное поглощение значительное влияние оказывают размер, поверхностный заряд и форма [64, 65], а способ введения и характеристики НЧ влияют на их всасывание [62].

Наночастицы металлов с отрицательным поверхностным зарядом имеют более высокую скорость абсорбции через желудочно-кишечную мембрану при пероральном введении, скорость также зависит от размера тонкого кишечника. Легочный путь имеет большую площадь контакта, что облегчает всасывание препарата [62].

Основные способы введения лекарств на основе НЧМ – оральный, ингаляционный, дермальный (кожный) и непосредственно в системный кровоток посредством внутрибрюшинной или внутривенной инъекции [63].

Известно, что период полувыведения наноразмерных частиц из крови у грызунов короче, чем у крупных лабораторных животных (кролики, обезьяны), и различается при внутривенном и пероральном воздействии. При пероральном, ингаляционном и дермальном применении абсорбция низкая (< 5%), но она может увеличиваться при меньших размерах, отрицательном заряде и определенном поверхностном покрытии НЧ [63].

Металлические наноматериалы распределяются по всему организму, накапливаясь преимущественно в печени, селезенке и лимфатических узлах вследствие неспецифического поглощения ретикулоэндотелиальными клетками, и могут оставаться в организме в течение ≥ 6 мес. Известно, что наноземельные металлов (≤ 100 нм) способны преодолевать гематоэнцефалический барьер (ГЭБ) благодаря покрытию нейрорепептидами, проницаемыми для ГЭБ. Плацентарный перенос зависит от стадии эмбрионального/плацентарного созревания плода и состава поверхности НЧ и может быть усилен путем покрытия наноматериалов биосовместимыми молекулами (ферритин или полиэтиленгликоль). Почечная и желчевыводящая экскреция нанообъектов обычно низкая из-за постоянного накопления в тканях, но выведение почками может быть увеличено при использовании НЧ меньших размеров и специфических поверхностных покрытий (глутатион) [66].

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ТОКСИЧНОСТЬ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Абсорбированные НЧС распределяются во многих органах и системах организма: в коже, легких, селезенке, пищеварительной, мочевой, нервной, иммунной и репродуктивной системах. При этом наноразмерное серебро в основном накапливается в селезенке, печени, почках и легких. Незначительное отложение наноземельных также наблюдается в зубах и костях [63].

Помимо тканей, подвергающихся непосредственному воздействию, НЧС также транспортируются в различные органы посредством кровообращения.

Частицы наносеребра легко проникают в организм и преодолевают биологические барьеры (ГЭБ и гематотестикулярный) и впоследствии могут оказывать потенциальное цитотоксическое действие. Таким образом, неспецифическое распределение наноматериалов серебра может вызывать кожную, глазную, респираторную, гепатобилиарную, репродуктивную токсичность и нейротоксичность, что ограничивает применение НЧС. Потенциальная цитотоксичность наносеребра зависит от путей введения препарата и свойств/характеристик самих нанообъектов, таких как размер, форма и концентрация (рис. 6) [63].

Однако до сих пор недостаточно изучены специфические механизмы распределения и накопления НЧМ и НЧС в различных тканях и органах, а также их потенциальная токсичность [5, 62].

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ОРГАНИЗМ ЖИВОТНЫХ

Наночастицы серебра могут по-разному влиять на физиологические показатели животных в зависимости от длительности применения и доз препаратов наноразмерного серебра. При этом как у здоровых, так и у больных животных всегда наблюдаются изменения в биохимических и морфологических показателях крови. В основном наносеребро оказывает влияние на эритроциты и тромбоциты, в меньшей степени влияя на моноциты и лейкоциты. Ранее О. А. Зейналовым и соавт. было отмечено умеренное увеличение количества тромбоцитов и снижение уровня лейкоцитов у здоровых мышей, получавших высокие дозы препаратов металлического высокодисперсного серебра [67]. Также Е. М. Цыганковым и соавт. было обнаружено повышение эритроцитарных и тромбоцитарных показателей у ремонтного молодняка птицы при использовании препарата кластерного серебра [68]. В исследовании 2021 г. отмечено достоверное снижение уровня лейкоцитов при применении нанодисперсного серебра для лечения коров с серозной формой мастита, также наблюдали незначительное снижение количества моноцитов и повышение уровня гемоглобина [11]. При использовании же высокодисперсного наносеребра на фоне ньюкаслской болезни у мышей количество моноцитов снижается, среднее содержание гемоглобина в эритроците уменьшается, уровень эритроцитов, гемоглобина и гематокрита увеличивается [69].

Препараты наносеребра особенно привлекательны для ветеринарии в качестве биологически активных добавок с целью повышения продуктивности и иммунного статуса животных [10, 11, 12, 13]. Имеются сообщения о перспективном применении вирицидных средств на основе наносеребра и органического серебра для фармакопрофилактики ньюкаслской болезни и болезни Ауески [69, 70, 71]. Также достоверно известно, что НЧ в составе питьевой воды или диетических добавок оказывают на организм анаболические эффекты – увеличивают прирост массы тела и мышечной массы [72, 73, 74, 75].

Однако, как говорилось выше, НЧС в основном накапливаются в «органах-фильтрах» организма, а также способны проникать через биологические барьеры. При длительном применении серебросодержащих препаратов у животных отмечаются токсические эффекты и снижение когнитивных функций, предположительно, из-за накопления НЧС в головном мозге;

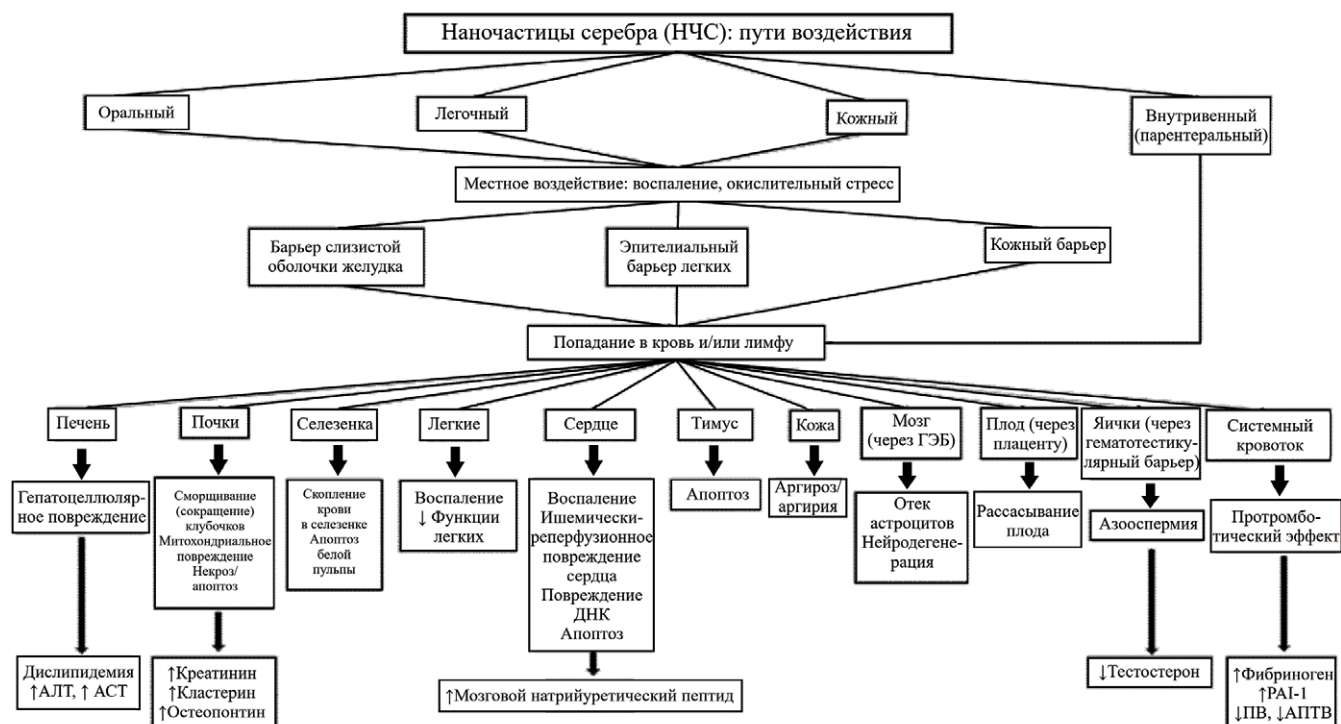


Рис. 6. Схема биораспределения и токсичности наночастиц серебра при различных путях воздействия [63]

Fig. 6. Biodistribution and toxicity of silver nanoparticles for different exposure routes [63]

а использование препаратов серебра в период спаривания, беременности и лактации животных приводит к существенному накоплению НЧС в тканях и органах не только у родителей, но и у потомства [76, 77].

Таким образом, НЧС в дозах, не превышающих 10 мг на 1 кг живой массы в сутки, обладают биотическими эффектами: стимулируют дыхательную функцию крови, увеличивая количество эритроцитов и гемоглобина; повышают защитные силы организма, увеличивая в кровеносном русле число лейкоцитов [67, 68, 78]. Низкие дозы и прием наносеребра в течение не более 30 дней не оказывают существенного влияния на микробиоту пищеварительного тракта, а также повышают продуктивность животных [72, 73, 74, 75]. Использование же серебросодержащих препаратов в высоких концентрациях, а также длительное применение негативно влияет на организм млекопитающих, вплоть до летальных исходов [76, 77, 79].

Поэтому все еще необходимы дальнейшие углубленные исследования биораспределения, совместимости и потенциальной токсичности наночастиц, которые помогут разработать более эффективные БАДы и безопасные лекарственные препараты [5, 60, 62, 63, 66, 79].

ВЫВОДЫ

Согласно проведенному анализу литературных источников, можно сделать выводы.

1. За последние 20 лет в сфере биомедицины, ветеринарии и диагностики стали использовать наноматериалы. Их делят на органические и неорганические НЧ. Последние включают в себя НЧ золота, серебра, оксида меди, оксида цинка, оксида магния, оксида железа, диоксида титана и алюминия.

2. Применение НЧ в ветеринарной практике пока не нашло столь широкого распространения, как в медицине, но с каждым годом продолжает расти.

3. Наибольший интерес у русскоязычных ученых вызывают НЧС, так как они давно зарекомендовали себя в качестве антибактериального наноагента.

4. Существуют физические и химические методы получения НЧС – диспергирование макрообъектов до наноразмеров и восстановление ионов серебра Ag^+ .

5. На антибактериальную активность НЧС влияют их форма, размер и поверхностный заряд.

6. В настоящее время существует три вида препаратов серебра: коллоидное (катионное), кластерное и нульвалентное (металлическое).

7. На биораспределение НЧМ влияет тип частиц, их размер, поверхностные заряд и покрытие, связь с белками, а также путь воздействия и доза.

8. Распределение НЧС не отличается от фармакокинетики НЧМ, при этом наноразмерное серебро чаще всего накапливается в селезенке, печени, почках и легких, что может вызывать потенциальный цитотоксический эффект.

9. Применение наносеребра в низких дозах и сроком менее 30 дней повышает иммунный статус и продуктивность животных, а использование препаратов с содержанием НЧС при длительном применении и/или в высоких концентрациях способствует накоплению серебра в органах и тканях млекопитающих, оказывая токсическое действие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Akdoğan D., Güzel M., Genç Bahçe Y., Aksoy A., Akpınar O. Comparative antimicrobial susceptibility profiles of uropathogenic extended-spectrum β -lactamase producing strains of *Klebsiella pneumonia* and *Escherichia coli* by the CLSI and EUCAST methodologies. *Gazi Medical Journal*. 2021; 32 (1): 88–93. <http://dx.doi.org/10.12996/gmj.2021.16>
- Чернявская Я. В., Денисова Т. П. Механизмы действия наночастиц на организмы. *Проблемы теоретической и экспериментальной химии: тезисы докладов XXXI Российской молодежной научной конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения*

профессора В. М. Жуковского (Екатеринбург, 20–23 апреля 2021 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2021; 120. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/100016>

Chernyavskaya Ya. V., Denisova T. P. Mekhanizmy deistviya nanochastits na organizmy = Mechanisms of nanoparticle action on the organism. *Problemy teoreticheskoi i eksperimental'noi khimii: tezisy dokladov XXXI Rossiiskoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya professora V. M. Zhukovskogo* (Ekatereburg, 20–23 aprelya 2021 g.) = Challenges of theoretical and experimental chemistry: abstracts of XXXI Russian scientific conference for early-career scientists devoted to 90th anniversary of the birth of professor V. M. Zhukovsky (Ekatereburg, 20–23 April, 2021). Ekaterinburg: Ural University Press; 2021; 120. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/100016> (in Russ.)

3. Sadr S., Poorjafari Jafroodi P., Haratizadeh M. J., Ghasemi Z., Borji H., Hajjafari A. Current status of nano-vaccinology in veterinary medicine science. *Veterinary Medicine and Science*. 2023; 9 (5): 2294–2308. <https://doi.org/10.1002/vms3.1221>

4. Liew K. B., Janakiraman A. K., Sundarapandian R., Khalid S. H., Razaq F. A., Ming L. C., et al. A review and revisit of nanoparticles for antimicrobial drug delivery. *Journal of Medicine and Life*. 2022; 15 (3): 328–335. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35449993>

5. Xu L., Wang Y. Y., Huang J., Chen C. Y., Wang Z. X., Xie H. Silver nanoparticles: Synthesis, medical applications and biosafety. *Theranostics*. 2020; 10 (20): 8996–9031. <https://doi.org/10.7150/thno.45413>

6. Woldeamanuel K. M., Kurra F. A., Roba Y. T. A review on nanotechnology and its application in modern veterinary science. *International Journal of Nanomaterials, Nanotechnology and Nanomedicine*. 2021; 7 (1): 026–031. <http://doi.org/10.17352/2455-3492.000041>

7. El-Sayed A., Kamel M. Advanced applications of nanotechnology in veterinary medicine. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020; 27 (16): 19073–19086. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3913-y>

8. Alghuthaymi M. A., Hassan A. A., Kalia A., Sayed El Ahl R. M. H., El Hamaky A. A. M., Oleksak P., et al. Antifungal nano-therapy in veterinary medicine: current status and future prospects. *Journal of Fungi*. 2021; 7 (7):494. <https://doi.org/10.3390/jof7070494>

9. Kovalenko A. A., Tkachev A. V., Tkacheva O. L., Gutty B. V., Prystupa O. I., Kukhtyn M. D., et al. Analgesic effectiveness of new nanosilver drug. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020; 10 (1): 300–306. <https://elibrary.ru/kfuixg>

10. More P. R., Pandit S., Filippis A., Franci G., Mijakovic I., Galdiero M. Silver nanoparticles: bactericidal and mechanistic approach against drug resistant pathogens. *Microorganisms*. 2023; 11 (2):369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>

11. Нефедова Е. В., Шкиль Н. Н. Влияние наночастиц серебра на морфологические, биохимические и иммунологические показатели крови коров, больных серозной формой мастита. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021; (6): 56–59. <https://doi.org/10.31857/S2500262721060107>

Nefedova E. V., Shkil N. N. Effect of silver nanoparticles on morphological, biochemical, and immunological parameters of cow blood with a serous form of mastitis. *Russian Agricultural Sciences*. 2021; 47 (Suppl. 1): S97–S100. <https://doi.org/10.3103/S1068367422010128>

12. Shkil N. N., Nefyodova E. V., Shkil N. A., Nozdrin G. A., Lazareva M. V., Rasputina O. V., Ryumkina I. N. Adjuvant properties of silver and dimethyl sulfoxide nanoparticles in studying antibacterial activity of antibiotics against *E. coli*. *International Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 2020; 4 (5): 119–126. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4286955>

13. Luceri A., Francese R., Lembo D., Ferraris M., Balagna C. Silver nanoparticles: Review of antiviral properties, mechanism of action and applications. *Microorganisms*. 2023; 11 (3):629. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030629>

14. Королев Д. В., Захарова Е. В., Евреинова Н. В., Торопова Я. Г., Печникова Н. А., Сергиенко Е. С., Гареев К. Г. Динамика естественного биораспределения магнитных наночастиц, полученных различными способами, при их однократном введении крысам стока Wistar. *Трансляционная медицина*. 2016; 3 (4): 56–65. <https://elibrary.ru/ymjggt>

Korolev D. V., Zakharova E. V., Evreinova N. V., Toropova Y. G., Pechnikova N. A., Sergienko E. S., Gareev K. G. The dynamics of the natural biodistribution of magnetic nanoparticles synthesized in various ways, when a single infusion to Wistar rats. *Translational Medicine*. 2016; 3 (4): 56–65. <https://elibrary.ru/ymjggt> (in Russ.)

15. Shafiq M., Anjum S., Hano C., Anjum I., Abbasi B. H. An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry. *Foods*. 2020; 9 (2):148. <https://doi.org/10.3390/foods9020148>

16. Hassan S., Prakash G., Bal Öztürk A., Saghazadeh S., Sohail M. F., Seo J., et al. Evolution and clinical translation of drug delivery nanomaterials. *Nano Today*. 2017; 15: 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2017.06.008>

17. Turner C. T., McInnes S. J. P., Voelcker N. H., Cowin A. J. Therapeutic potential of inorganic nanoparticles for the delivery of monoclonal

antibodies. *Journal of Nanomaterials*. 2015; 2015 (1):309602. <https://doi.org/10.1155/2015/309602>

18. Dizaj S. M., Jafari S., Khosroushahi A. Y. A sight on the current nanoparticle-based gene delivery vectors. *Nanoscale Research Letters*. 2014; 9 (1):252. <https://doi.org/10.1186/1556-276x-9-252>

19. Poon C., Gallo J., Joo J., Chang T., Bañobre-López M., Chung E. J. Hybrid, metal oxide-peptide amphiphile micelles for molecular magnetic resonance imaging of atherosclerosis. *Journal of Nanobiotechnology*. 2018; 16 (1):92. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0420-8>

20. Становая А., Терехова М., Абашкин В., Одабаш М., Щербин Д. Наночастицы в биологии и медицине. *Наука и инновации*. 2022; (11): 78–83. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2022-11-78-83>

Stanovaya A., Terekhova M., Abashkin V., Odabashi M., Shcherbin D. Nanoparticles in biology and medicine. *Science and Innovations*. 2022; (11): 78–83. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2022-11-78-83> (in Russ.)

21. Mughal B., Zaidi S. Z. J., Zhang X., Hassan S. U. Biogenic nanoparticles: synthesis, characterisation and applications. *Applied Sciences*. 2021; 11 (6):2598. <https://doi.org/10.3390/app11062598>

22. Игонин А. С. Применение наночастиц металлов в медицине. *Химия и химическое образование XXI века: сборник материалов VI Всероссийской студенческой конференции с международным участием, посвященной 310-летию со дня рождения М. В. Ломоносова* (Санкт-Петербург, 22–26 марта 2021 г.). СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена; 2021; 70–71. <https://elibrary.ru/ckyhst>

Igonin A. S. Primenenie nanochastits metallov v meditsine = Use of metal nanoparticles in medicine. *Khimiya i khimicheskoe obrazovanie XXI veka: sbornik materialov VI Vserossiiskoi studencheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 310-letiyu so dnya rozhdeniya M. V. Lomonosova* (Sankt-Peterburg, 22–26 marta 2021 g.) = Chemistry and education in chemistry in XXI century: proceedings of VI All-Russian Student Conference with international participation devoted to 310th anniversary of the birth of M. V. Lomonosov (Saint Petersburg, 22–26 March, 2021). Saint Petersburg: Herzen University; 2021; 70–71. <https://elibrary.ru/ckyhst> (in Russ.)

23. Капранова К. А. Применение наночастиц металлов в медицине. *Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей III международного научной конференции* (Волгоград, 31 октября 2022 г.). Волгоград: ООО «Актуальность.РФ»; 2022; 4–7. <https://elibrary.ru/gkrurh>

Kapranova K. A. Primenenie nanochastits metallov v meditsine = Application of metal nanoparticles in medicine. *Innovatsionnye tekhnologii, ekonomika i menedzhment v promyshlennosti: sbornik nauchnykh statei III mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Volgograd, 31 oktyabrya 2022 g.) = Innovation technologies, economics and management in industry: proceedings of III International Scientific Conference (Volgograd, 31 October, 2022). Volgograd: LLC "Aktualnost.RF"; 2022; 4–7. <https://elibrary.ru/gkrurh> (in Russ.)

24. Агафонов Д. А. Наночастицы серебра и золота как лекарственные средства. *Актуальные вопросы фармацевтических и естественных наук: сборник статей Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием* (Иркутск, 21–26 сентября 2020 г.). Иркутск: Иркутский государственный медицинский университет; 2020; 162–164. <https://elibrary.ru/jcjbzr>

Agafonov D. A. Nanochastitsy srebra i zlota kak lekarstvennye sredstva = Silver and gold nanoparticles as therapeutic drugs. *Aktual'nye voprosy farmatsevticheskikh i estestvennykh nauk: sbornik statei Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* (Irkutsk, 21–26 sentyabrya 2020 g.) = Topical issues of pharmaceutical and natural sciences: proceedings of All-Russian student scientific and practical conference with international participation (Irkutsk, 21–26 September, 2020). Irkutsk: Irkutsk State Medical University; 2020; 162–164. <https://elibrary.ru/jcjbzr> (in Russ.)

25. Dadfar S. M., Roemhild K., Drude N. I., von Stillfried S., Knüchel R., Kiessling F., Lammers T. Iron oxide nanoparticles: Diagnostic, therapeutic and theranostic applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2019; 138: 302–325. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2019.01.005>

26. Ameen F., AlYahya S., Govarathanan M., AlJahdali N., Al-Enazi N., Al-samhary K., et al. Soil bacteria *Cupriavidus* sp. mediates the extracellular synthesis of antibacterial silver nanoparticles. *Journal of Molecular Structure*. 2020; 1202:127233. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127233>

27. Hooda H., Singh P., Bajpai S. Effect of quercetin impregnated silver nanoparticle on growth of some clinical pathogens. *Materials Today: Proceedings*. 2020; 31 (Pt. 4): 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.530>

28. Kalimuthu K., Cha B. S., Kim S., Park K. S. Eco-friendly synthesis and biomedical applications of gold nanoparticles: A review. *Microchemical Journal*. 2020; 152:104296. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104296>

29. Siddiqi K. S., Husen A. Recent advances in plant-mediated engineered gold nanoparticles and their application in biological system.

Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 2017; 40: 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.012>

30. Liu S., Yu B., Wang S., Shen Y., Cong H. Preparation, surface functionalization and application of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020; 281:102165. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102165>

31. Suman P. H. Electrical properties of tin oxide materials. In: *Tin Oxide Materials: Synthesis, Properties, and Applications*. Ed. by M. O. Orlandi. Elsevier; 2020; 41–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815924-8.00003-7>

32. Nunes D., Pimentel A., Gonçalves A., Pereira S., Branquinho R., Barquinha P., et al. Metal oxide nanostructures for sensor applications. *Semiconductor Science and Technology*. 2019; 34 (4):043001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab011e>

33. Сафина Л. А., Зифирова Ю. С. Анализ применения наноматериалов в медицине. *Новые технологии и материалы легкой промышленности: сборник статей XVI Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для студентов и молодых ученых (Казань, 19–23 мая 2020 г.)*. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет; 2020; 120–124. <https://elibrary.ru/rnanhb>

Safina L. A., Zifirova Yu. S. Analiz primeneniya nanomaterialov v meditsine = Analysis of nanomaterial application in medicine. *Novye tekhnologii i materialy legkoi promyshlennosti: sbornik statei XVI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s elementami nauchnoi shkoly dlya studentov i molodykh uchennykh (Kazan', 19–23 maya 2020 g.)* = New technologies and materials of light industry: Proceedings of XVI All-Russian Scientific and Practical Conference with elements of scientific school for students and early career scientists (Kazan, 19–23 May, 2020). Kazan: Kazan National Research Technological University; 2020; 120–124. <https://elibrary.ru/rnanhb> (in Russ.)

34. Духова Ю. С., Евдокимова А. В. Органо-неорганические наноматериалы на основе оксидов металлов и наноцеллюлозы: получение и свойства. *Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2021; (1): 301–302. <https://elibrary.ru/peopvx>

Dukhova Yu. S., Evdokimova A. V. Organo-neorganicheskie nanomaterialy na osnove oksidov metallov i nanotsellyulozy: polucheniye i svoystva = Organic/inorganic nanomaterials based on metal oxides and nanocellulose: production and properties. *Molodye uchentye – razvitiyu Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy (POISK)*. 2021; (1): 301–302. <https://elibrary.ru/peopvx> (in Russ.)

35. Javadi S. M. Applications of ZnO and MgO nanoparticles in reducing Zinc pollution level in rubber manufacturing processes: A review. *Current Biochemical Engineering*. 2020; 6 (2): 103–107. <https://doi.org/10.2174/2212711906666200224105931>

36. Poreddy R., Engelbrekt C., Riisager A. Copper oxide as efficient catalyst for oxidative dehydrogenation of alcohols with air. *Catalysis Science & Technology*. 2015; 5 (4): 2467–2477. <https://doi.org/10.1039/c4cy01622j>

37. Мацакова Е. Г., Симакова Д. И. Наночастицы, проявляющие антибактериальные эффекты: свойства, получение, механизм действия, применение. *Российские нанотехнологии*. 2020; 15 (2): 238–243. <https://doi.org/10.1134/S1992722320020156>

Matsakova E. G., Simakova D. I. Nanoparticles manifesting antibacterial effects: properties, production, mechanism of action, and applications. *Nanotechnologies in Russia*. 2020; 15 (2): 236–240. <https://doi.org/10.1134/S1995078020020159>

38. Мартынова Е. У., Козлов Е. Н., Муха Д. В. Наночастицы: перспективы использования в медицине и ветеринарии. *Успехи современной биологии*. 2012; 132 (5): 435–447. <https://elibrary.ru/pgxdwz>

Martynova E. U., Kozlov E. N., Mukha D. V. Nanoparticles: potentialities of their use in medicine and veterinary. *Uspehi sovremennoy biologii*. 2012; 132 (5): 435–447. <https://elibrary.ru/pgxdwz> (in Russ.)

39. Tang S., Zheng J. Antibacterial activity of silver nanoparticles: structural effects. *Advanced Healthcare Materials*. 2018; 7 (13):e1701503. <https://doi.org/10.1002/adhm.201701503>

40. Doitsh G., Galloway N. L., Geng X., Yang Z., Monroe K. M., Zepe-da O., et al. Cell death by pyroptosis drives CD4-T-cell depletion in HIV-1 infection. *Nature*. 2014; 505 (7484): 509–514. <https://doi.org/10.1038/nature12940>

41. Rai M., Deshmukh S. D., Ingle A. P., Gupta I. R., Galdiero M., Galdiero S. Metal nanoparticles: The protective nanoshield against virus infection. *Critical Reviews in Microbiology*. 2016; 42 (1): 46–56. <https://doi.org/10.3109/1040841x.2013.879849>

42. Lin Q., Lim J. Y. C., Xue K., Yew P. Y. M., Ow C., Chee P. L., Loh X. J. Sanitizing agents for virus inactivation and disinfection. *View*. 2020; 1 (2):e16. <https://doi.org/10.1002/viw2.16>

43. Khodashenas B., Ghorbani H. R. Synthesis of silver nanoparticles with different shapes. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019; 12 (8): 1823–1838. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.014>

44. Rai M., Kon K., Gade A., Ingle A., Nagaonkar D., Paralikar P., da Silva S. S. Antibiotic resistance: Can nanoparticles tackle the problem? In: *Antibiotic Resistance: Mechanisms and New Antimicrobial Approaches*. Eds. K. Kon,

M. Rai. Academic Press; 2016; Chapter 6: 121–143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803642-6.00006-X>

45. Jan T., Azmat S., Mansoor Q., Waqas H. M., Adil M., Ilyas S. Z., et al. Superior antibacterial activity of ZnO-CuO nanocomposite synthesized by a chemical Co-precipitation approach. *Microbial Pathogenesis*. 2019; 134:103579. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103579>

46. Helmlinger J., Sengstock C., Groß-Heitfeld C., Mayer C., Schildhauer T. A., Köller M., Epple M. Silver nanoparticles with different size and shape: equal cytotoxicity, but different antibacterial effects. *RSC Advances*. 2016; 6 (22): 18490–18501. <https://doi.org/10.1039/c5ra27836h>

47. Dong Y., Zhu H., Shen Y., Zhang W., Zhang L. Antibacterial activity of silver nanoparticles of different particle size against *Vibrio natriegens*. *PLoS ONE*. 2019; 14 (9):e0222322. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222322>

48. Pal S., Tak Y. K., Song J. M. Does the antibacterial activity of silver nanoparticles depend on the shape of the nanoparticle? A study of the gram-negative bacterium *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2007; 73 (6): 1712–1720. <https://doi.org/10.1128/aem.02218-06>

49. Jones N., Ray B., Ranjit K. T., Manna A. C. Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*. 2008; 279 (1): 71–76. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.01012.x>

50. Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus N. H. M., Ann L. C., Bak-hori S. K. M., et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*. 2015; 7 (3): 219–242. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>

51. Liu J., Wang Y., Ma J., Peng Y., Wang A. A review on bidirectional analogies between the photocatalysis and antibacterial properties of ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019; 783: 898–918. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.330>

52. Roelofs D., Makama S., de Boer T. E., Vooijs R., van Gestel C. A. M., van den Brink N. W. Surface coating and particle size are main factors explaining the transcriptome-wide responses of the earthworm *Lumbricus rubellus* to silver nanoparticles. *Environmental Science: Nano*. 2020; 7 (4): 1179–1193. <https://doi.org/10.1039/c9en01144g>

53. Hu C., Wang L.-L., Lin Y.-Q., Liang H.-M., Zhou S.-Y., Zheng F., et al. Nanoparticles for the treatment of oral biofilms: current state, mechanisms, influencing factors, and prospects. *Advanced Healthcare Materials*. 2019; 8 (24):e1901301. <https://doi.org/10.1002/adhm.201901301>

54. Кошелев К. К. Серебросодержащие препараты: анализ преимуществ и недостатков. *Сырье и упаковка*. 2012; (8). <https://cosmetic-industry.com/serebrosoderzhashhie-preparaty-analiz-preimushhestv-i-nedostatkov.html>

Koshelev K. K. Silver-containing preparation: analysis of advantages and disadvantages. *Raw Materials & Packaging*. 2012; (8). <https://cosmetic-industry.com/serebrosoderzhashhie-preparaty-analiz-preimushhestv-i-nedostatkov.html> (in Russ.)

55. Шумакова А. А., Смирнова В. В., Тананова О. Н., Трушина Э. Н., Кравченко Л. В., Аксенов И. В. и др. Токсиколого-гигиеническая характеристика наночастиц серебра, вводимых в желудочно-кишечный тракт крыс. *Вопросы питания*. 2011; 80 (6): 9–18. https://www.voprosy-pitaniya.ru/ru/articles_diet/68.html?SSr=300134b42314ffffff27c_07e-70c030e1e35-3b9d

Shumakova A. A., Smirnova V. V., Tananova O. N., Trushina E. N., Kravchenko L. V., Aksenov I. V., et al. Toxicological sanitary characterization of silver nanoparticles introduced in gastrointestinal tract of rats. *Problems of Nutrition*. 2011; 80 (6): 9–18. https://www.voprosy-pitaniya.ru/ru/articles_diet/68.html?SSr=300134b42314ffffff27c_07e-70c030e1e35-3b9d (in Russ.)

56. Adegbeye M. J., Elghandour M. M. Y., Reddy P. R. K., Alqaisi O., Oloketuyi S., Salem A. Z. M., Asaniyan E. K. Potential of silver nanoparticles for veterinary applications in livestock performance and health. In: *Silver Nanomaterials for Agri-Food Applications*. Ed. by K. A. Abb-Elsalam. Elsevier; 2021; Chapter 27: 657–683. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823528-7.00022-6>

57. Murugan K., Wang L., Anitha J., Dinesh D., Amuthavalli P., Vasanthakumaran M., et al. Insecticidal effect of chitosan reduced silver nanocrystals against filarial vector, *Culex quinquefasciatus* and cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. In: *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture*. Woodhead Publishing; 2021; Chapter 19: 469–486. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820092-6.00019-7>

58. Prasad R. D., Prasad S. R., Shrivastav O. P., Kanthe A. R., Waghmare S. R., Shaikh V. S., et al. Biogenic synthesis of nano-silver and their anti-microbial efficacy. *ES Food & Agroforestry*. 2023; 11:836. <https://doi.org/10.30919/esf836>

59. Shevchenko L., Mitsevsky M., Slobodyanyuk N., Kondratiuk V., Usty-menko I., Ivaniuta A., et al. Metabolic status of calves using nanosilver with milk diet. *Journal of Hygienic Engineering & Design*. 2023; 43:245. <https://keypublishing.org/jhed/wp-content/uploads/2023/08/17.-Abstract-Larya-sa-Shevchenko.pdf>

60. Гельперина С. Э., Швеца В. И. Системы доставки лекарственных веществ на основе полимерных наночастиц. *Биотехнология*. 2009; (3): 8–23. <https://elibrary.ru/ocqgkb>
- Gelperina S. E., Shvets V. I. Drug delivery systems based on polymeric nanoparticles. *Biotechnology in Russia*. 2009; (3): 1–21. <https://elibrary.ru/miegxy>
61. Zhu D., Long Q., Xu Y., Xing J. Evaluating nanoparticles in preclinical research using microfluidic systems. *Micromachines*. 2019; 10 (6):414. <https://doi.org/10.3390/mi10060414>
62. Joseph T. M., Kar Mahapatra D., Esmaeli A., Piszczek L., Hasanin M. S., Kattali M., et al. Nanoparticles: Taking a unique position in medicine. *Nanomaterials*. 2023; 13 (3):574. <https://doi.org/10.3390/nano13030574>
63. Ferdous Z., Nemmar Z. Health impact of silver nanoparticles: a review of the biodistribution and toxicity following various routes of exposure. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21 (7):2375. <https://doi.org/10.3390/ijms21072375>
64. Cho E. C., Zhang Q., Xia Y. The effect of sedimentation and diffusion on cellular uptake of gold nanoparticles. *Nature Nanotechnology*. 2011; 6 (6): 385–391. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.58>
65. Wang H., Chen B., He M., Li X., Chen P., Hu B. Study on uptake of gold nanoparticles by single cells using droplet microfluidic chip-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*. 2019; 200: 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.03.075>
66. Kozics K., Sramkova M., Kopecka K., Begerova P., Manova A., Krivosikova Z., et al. Pharmacokinetics, biodistribution, and biosafety of PEGylated gold nanoparticles *in vivo*. *Nanomaterials*. 2021; 11 (7):1702. <https://doi.org/10.3390/nano11071702>
67. Зейналов О. А., Комбарова С. П., Багров Д. В., Петросян М. А., Толибова Г. Х., Фефанов А. В., Шайтан К. В. О влиянии наночастиц серебра на физиологию живых организмов. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2016; 14 (4): 42–51. <https://doi.org/10.17816/RCF14442-51>
- Zeinalov O. A., Kombarova S. P., Bagrov D. V., Petrosyan M. A., Tolibova G. H., Feofanov A. V., Shaitan K. V. About the influence of silver nanoparticles on living organisms physiology. *Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy*. 2016; 14 (4): 42–51. <https://doi.org/10.17816/RCF14442-51> (in Russ.)
68. Цыганков Е. М., Менькова А. А., Андреев А. И. Гематологические показатели крови ремонтного молодняка птицы под влиянием препарата Аргодез. *Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана*. 2017; 232 (4): 150–154. <https://elibrary.ru/zvrhxl>
- Tsygankov E. M., Men'kova A. A., Andreev A. I. Hematologic parameters of the blood of the reconstructor young bird of the bird under the influence of drug Argodez. *Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2017; 232 (4): 150–154. <https://elibrary.ru/zvrhxl> (in Russ.)
69. Сумарокова А. Д., Стацевич Л. Н., Афонюшкин В. Н., Коптев В. Ю., Черепушкина В. С. Изменение гематологических показателей при использовании препаратов серебра у лабораторных ICR мышей, зараженных вирусом болезни Ньюкасла. *Международный вестник ветеринарии*. 2024; (2): 31–41. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2024.2.31>
- Sumarokova A. D., Statsevich L. N., Afonyushkin V. N., Koptev V. Y., Cherepushkina V. S. Changes in hematological parameters when using nanosilver preparations in laboratory ICR mice infected with the Newcastle disease virus. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2024; (2): 31–41. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2024.2.31> (in Russ.)
70. Сумарокова А. Д., Афонюшкин В. Н., Миронова Т. Е., Черепушкина В. С., Афонюшкин А. В., Стацевич Л. Н., Сильников В. Н. Изучение биологической активности препаратов серебра на организменной модели инфекции болезни Ньюкасла. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024; 54 (7): 96–105. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-10>
- Sumarokova A. D., Afonyushkin V. N., Mironova T. E., Cherepushkina V. S., Afonyushkin A. V., Stasevich L. N., Silnikov V. N. Study of the biological activity of silver preparations on an organismal model of Newcastle disease infection. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024; 54 (7): 96–105. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-10> (in Russ.)
71. Красочко П. А., Борисовцев Д. С., Станкуть А. Э., Красочко И. А., Зуйкевич Т. А. Оценка противовирусных свойств наночастиц серебра в системе *in vitro* и *in vivo*. *Ветеринарный журнал Беларуси*. 2024; (1): 36–40. <https://repo.vsvam.by/handle/123456789/24356>
- Krasochko P. A., Borisovets D. S., Stankut A. E., Krasochko I. A., Zukevich T. A. Evaluation of antiviral properties of silver nanoparticles in *in vitro* and *in vivo* systems. *Veterinarnyi zhurnal Belarusi*. 2024; (1): 36–40. <https://repo.vsvam.by/handle/123456789/24356> (in Russ.)
72. Шамсутдинова И. Р., Дерхо М. А. Особенности биологического действия наночастиц серебра в организме животных. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2016; (1): 202–205. <https://elibrary.ru/vpfdrd>
- Shamsutdinova I. R., Derkho M. A. Peculiarities of biological impact of silver nanoparticles on the animals' body. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2016; (1): 202–205. <https://elibrary.ru/vpfdrd> (in Russ.)
73. Saleh A. A., El-Magd M. A. Beneficial effects of dietary silver nanoparticles and silver nitrate on broiler nutrition. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25 (27): 27031–27038. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2730-7>
74. Zaoqi Y., Belanche A., Ben-Jeddou K., Jiménez M. S., Fondevila G., Fondevila M. Effect of the dietary administration pattern of silver nanoparticles on growth performance, biodiversity of digestive microbiota and tissue retention in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*. 2024; 309:115888. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2024.115888>
75. Elkloub K., Moustafa M. El., Ghazalah A. A., Rehan A. A. A. Effect of dietary nanosilver on broiler performance. *International Journal of Poultry Science*. 2015; 14 (3): 177–182. <https://doi.org/10.3923/ijps.2015.177.182>
76. Antsiferova A. A., Kashkarov P. K., Koval'chuk M. V. Effect of different forms of silver on biological objects. *Nanotechnology Reports*. 2022; 17 (2): 155–164. <https://doi.org/10.1134/S2635167622020021>
77. Зиньковская И., Ивлиева А. Л., Петрицкая Е. Н., Рогаткин Д. А. Неожиданный эффект длительного перорального приема наночастиц серебра на рождаемость у мышей. *Экология человека*. 2020; 27 (10): 23–30. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-10-23-30>
- Zincovskaia I., Ivlieva A. L., Petritskaya E. N., Rogatkin D. A. Unexpected reproductive effect of prolonged oral administration of silver nanoparticles in laboratory mice. *Human Ecology*. 2020; 27 (10): 23–30. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-10-23-30> (in Russ.)
78. Шамсутдинова И. Р., Дерхо М. А. Изменения морфологических показателей крови лабораторных животных при введении наночастиц серебра *per os*. *АПК России*. 2015; 73: 166–170. <https://elibrary.ru/ulfokj>
- Shamsutdinova I. R., Derkho M. A. Changes of blood morphological parameters of laboratory animals when introducing silver nanoparticles *per os*. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015; 73: 166–170. <https://elibrary.ru/ulfokj> (in Russ.)
79. Bakowski M., Kiczorowska B., Samolińska W., Klebaniuk R., Lipiec A. Silver and zinc nanoparticles in animal nutrition – A review. *Annals of Animal Science*. 2018; 18 (4): 879–898. <https://doi.org/10.2478/aoas-2018-0029>

Поступила в редакцию / Received 30.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 01.10.2024

Принята к публикации / Accepted 25.11.2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сумарокова Анастасия Дмитриевна, аспирант ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-5219-728X>, stasaan@gmail.com

Стацевич Людмила Николаевна, канд. биол. наук, доцент ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, г. Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0009-0002-0276-3960>, lydmilastas0@gmail.com

Anastasia D. Sumarokova, Postgraduate Student, Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-5219-728X>, stasaan@gmail.com

Lyudmila N. Statsevich, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-0276-3960>, lydmilastas0@gmail.com

Вклад авторов: Сумарокова А. Д. – работа с литературой, подготовка текста, анализ и обобщение, оформление ключевых результатов исследования в статье; Стацевич Л. Н. – администрирование, редактирование текста, оформление ключевых результатов исследования в статье.

Contribution of the authors: Sumarokova A. D. – literature processing, text preparation, analysis and summarizing, formulation of the study conclusions; Statsevich L. N. – text administration, editing, formulation of the study conclusions.