



Нанотехнологии – реальная или мнимая угроза биологической безопасности?

И.В. Дармов✉, С.Н. Янов, И.В. Маракулин, Я.А. Кибирев, А.А. Сулопаров

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения
«48 Центральный научно-исследовательский институт (г. Киров)»
Министерства обороны Российской Федерации
610000, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 119
✉ e-mail: 23527@mil.ru

Основные моменты

- Нанотехнологии, обеспечивающие создание материалов размером от 1 до 100 нм, порождают принципиально новый класс угроз биологической безопасности.

- Доступность «зеленого синтеза» (с использованием микроорганизмов и растений) позволяет получать токсичные наночастицы в полевых условиях, а их комбинация с CRISPR-Cas-технологиями создает потенциал для разработки оружия двойного назначения – от средств доставки токсинов до наногенетических поражающих агентов.

Актуальность. В научной литературе отсутствует единая точка зрения на биологические риски нанотехнологий и не дан прогноз их возможного использования противником с учетом современного технологического развития, что требует системного анализа угроз для оборонной сферы.

Цель исследования – на основе анализа литературы оценить потенциальные угрозы биологической безопасности со стороны нанотехнологий и их значимость для задач РХБ защиты.

Источниковая база исследования. Статьи из полнотекстовых англоязычных научных журналов, доступных через сеть Интернет, а также обзоры по военно-прикладным аспектам нанотехнологий.

Метод. Аналитический обзор и систематизация данных с элементами прогностического анализа.

Обсуждение. Установлены основные механизмы токсичности: генерация активных форм кислорода, повреждение мембран и ДНК, апоптоз, нарушения клеточных сигнальных путей. Критическими факторами, определяющими поражающее действие, являются размер, заряд поверхности, форма и химический состав частиц. Выявлено, что технология «зеленого синтеза» (с использованием бактерий, грибов, растений) делает производство наночастиц доступным для террористических и диверсионных групп. Обосновано, что наибольшую опасность представляет комбинация нанотехнологий с CRISPR-Cas-редактированием геномов, позволяющая создавать средства адресной доставки токсинов и генетически модифицирующие агенты. Продemonстрировано, что наночастицы накапливаются в пищевых цепях и объектах окружающей среды, вызывая отдаленные экологические последствия.

Заключение. Нанотехнологии представляют реальную угрозу биологической безопасности, требующую разработки методов индикации наночастиц в биосредах, оценки эффективности существующих средств защиты и создания антидотов. Технологический рывок последних лет способен превратить гипотетические сегодня сценарии в реальность завтрашнего дня.

Практическая значимость работы. Систематизированы данные о доступности технологий синтеза наночастиц и механизмах их токсичности, что позволяет обосновать требования к модернизации средств индикации, индивидуальной защиты и терапии применительно к задачам войск РХБ защиты.

Ключевые слова: нанотехнологии; наночастицы; области применения; свойства; способы синтеза; угрозы биологической безопасности

Для цитирования: Дармов И.В., Янов С.Н., Маракулин И.В., Кибирев Я.А., Сулопаров А.А. Нанотехнологии – реальная или мнимая угроза биологической безопасности? Вестник войск РХБ защиты. 2026;10(1):5–24. EDN:ctiobz.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2026-10-1-5-24>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Дармов И.В., Янов С.Н., Маракулин И.В., Кибирев Я.А., Суслопаров А.А.
Darmov I.V., Yanov S.N., Maraculin I.V., Kibirev Y.A., Susloparov A.A.

Конфликт интересов: И.В. Дармов является членом редколлегии журнала «Вестник войск РХБ защиты» (с 2017 г.). Это не повлияло на процесс рецензирования и окончательное решение.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали. В процессе подготовки рукописи к публикации редакторской группой применялась языковая модель DeepSeek-V3.2 (разработчик – компания Deep Seek) для переработки авторского текста: структурирования материала, приведения его в соответствие с требованиями журнала по объему и логике изложения, а также для лингвистической обработки. Все фактические данные, библиографические ссылки и ключевые выводы были проверены и верифицированы редакторами. Ответственность за содержание статьи несут авторы.

Финансирование: филиал федерального государственного бюджетного учреждения «48 Центральный научно-исследовательский институт (г. Киров)» Министерства обороны Российской Федерации.

Поступила 14.10.2025 г. После доработки 25.02.2026 г. Принята к публикации 27.03.2026 г.

Nanotechnology is a real or imaginary threat to biological safety?

Ilya V. Darmov✉, Sergei N. Yanov, Igor V. Maraculin, Yaroslav A. Kibirev, Aleksey A. Susloparov

Branch of the 48 Central Research Institute (Kirov) of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Oktyabrsky Prospect, 119, Kirov 610000, Russian Federation

✉ e-mail: 23527@mil.ru

Highlights

- Nanotechnologies enabling the creation of materials sized 1100 nm generate a fundamentally new class of biological security threats.

- The accessibility of "green synthesis" (using microorganisms and plants) allows toxic nanoparticles to be produced under field conditions, and their combination with CRISPR-Cas technologies creates potential for developing dual-use weapons – from toxin delivery systems to nanogenetic agents.

Relevance. The scientific literature lacks a unified perspective on the biological risks of nanotechnologies and provides no forecast of their potential adversary use considering current technological development, necessitating a systematic threat analysis for the defense sector.

Purpose of the study is to assess potential biological security threats posed by nanotechnologies and their significance for CBRN defense tasks based on literature analysis.

Study base sources. Articles from full-text English-language scientific journals available via the Internet.

Method. Analytical review and data systematization with elements of predictive analysis.

Discussion. Nanoparticles are classified by dimensionality (0 D to 3 D) and composition (organic, carbon-based, inorganic). Key toxicity mechanisms are established: reactive oxygen species generation, membrane and DNA damage, apoptosis, and disruption of cellular signaling pathways. Critical factors determining harmful effects include particle size, surface charge, shape, and chemical composition. "Green synthesis" technology (using bacteria, fungi, plants) makes nanoparticle production accessible to terrorist and sabotage groups. The greatest danger is posed by combining nanotechnologies with CRISPR-Cas genome editing, enabling targeted toxin delivery systems and genetically modifying agents. Nanoparticles accumulate in food chains and environmental objects, causing long-term ecological consequences.

Conclusion. Nanotechnologies represent a real biological security threat requiring development of nanoparticle detection methods in biological media, assessment of existing protective measures effectiveness, and creation of antidotes. The technological breakthrough of recent years (analogous to unmanned systems development) can transform today's hypothetical scenarios into tomorrow's reality.

Practical significance of the work. This work systematizes data on nanoparticle synthesis accessibility and toxicity mechanisms, substantiating requirements for modernizing detection means, personal protective equipment, and therapeutic approaches relevant to CBRN defense tasks.

Keywords: nanoparticles; nanotechnology; properties; spheres of applications; threats to biological safety; ways of synthesis

For citation: Darmov I.V., Yanov S.N., Maraculin I.V., Kibirev Y.A., Susloparov A.A. Nanotechnology is a real or imaginary threat to biological safety? *Journal of NBC Protection Corps.* 2026;10(1):5–24. EDN:ctiobz.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2026-10-1-5-24>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

Conflict of interest statement: I.V. Darmov (since 2017) are member of the Editorial Board of the *Journal of NBC Protection Corps.* This fact hasn't affected review process and final decision.

AI use: The authors have not resorted to. During the preparation of the manuscript for publication, the editorial team employed the DeepSeek-V3.2 language model (developed by Deep Seek) for substantive revision of the author's original text, including structuring the material, bringing it into compliance with the journal's requirements regarding length and logical flow, as well as for linguistic editing. All factual data, bibliographic references, and key conclusions were reviewed and verified by the editors. The authors bear full responsibility for the content of the article.

Funding: Branch of the 48 Central Research Institute (Kirov) of the Ministry of Defence of the Russian Federation.

Received October 14, 2025. Revised February 25, 2026. Accepted March 27, 2026.

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологии, оперирующие объектами размером от 1 до 100 нм, за последние десятилетия превратились из сугубо фундаментальной дисциплины в мощный технологический драйвер, проникающий во все сферы человеческой деятельности, включая оборону [1–3]. Их составная часть нанобиотехнология, изучающая наноразмерные объекты биологического происхождения (вирусные частицы, субклеточные структуры, функциональные биомолекулы) [3], представляет особый интерес в контексте биологической безопасности, поскольку открывает нашему противнику возможности для конструирования принципиально новых поражающих агентов и средств их доставки.

Цель исследования – на основе анализа данных литературы выявить и систематизировать потенциальные угрозы биологической безопасности, исходящие от нанотехнологий, и определить их значимость для задач, решаемых войсками РХБ защиты.

Источниковая база исследования. Статьи из полнотекстовых англоязычных научных журналов, доступных через сеть Интернет, а также обзоры по военно-прикладным аспектам нанотехнологий.

Метод. Аналитический обзор и систематизация данных с элементами прогностического анализа.

Задачи исследования:

- классифицировать наноматериалы по размерности и составу, выделив наиболее значимые для биобезопасности типы (орга-

нические, углеродные, неорганические наночастицы);

- описать физико-химические свойства наночастиц (квантовые эффекты, большая поверхность, самосборка) и показать их связь с потенциальным поражающим действием;

- проанализировать основные области применения нанотехнологий (медицина, экология, промышленность, сельское хозяйство) с точки зрения двойного назначения и возможных угроз;

- систематизировать данные о токсичности наночастиц – путях проникновения, механизмах поражения, факторах, определяющих токсичность (размер, заряд, форма, состав);

- оценить доступность технологий синтеза для потенциального противника;

- проанализировать гипотетические сценарии использования нанотехнологий в военных целях (наноботы, наногенетическое оружие, нейроинтерфейсы), отделив реальные угрозы от фантастических;

- предложить первоочередные меры защиты.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1. Предмет рассмотрения и классификация наночастиц

Наночастицы определяют как объекты, не выходящие во всех трех измерениях за пределы наномасштаба (от 1 до 100 нм). При этом соотношение длины и ширины частицы не должно быть существенным. В зависимости от числа измерений, выходящих за нанодиа-

пазон, различают четыре класса наноматериалов (рисунок 1) [1, 2].

Эта классификация имеет прямое практическое значение для оценки поражающей способности таких агентов:

- *нуль-мерные (0-D) материалы* (квантовые точки, фуллерены, изолированные наночастицы) – наиболее опасны ввиду высокой проникающей способности через биологические мембраны и фильтры средств индивидуальной защиты;

- *одномерные (1-D) структуры* (нанотрубки, нановолокна) – могут имитировать форму и свойства фибриллярных белков или вирусных структур, затрудняя детекцию;

- *двумерные (2-D) материалы* (наноллисты, нанопленки) – способны создавать покрытия, маскирующие биологические агенты от систем индикации;

- *трехмерные (3-D) структуры* (нанокристаллические материалы, дисперсии наночастиц) – служат контейнерами или носителями для доставки токсинов и патогенов.

Классификация наноматериалов по размерности – основа для прогнозирования сценариев их возможного применения в диверсионных или террористических целях.

В контексте задач РХБ защиты первоочередного внимания заслуживают именно *наночастицы*. Это обусловлено относительной доступностью и отработанностью технологий их синтеза, широким спектром гражданского и двойного применения, а главное – *существенной неопределенностью в оценке их биологического действия* и отсутствием надежных методов индикации в полевых условиях.

Объекты меньше 1 нм корректнее называть «малыми молекулами» или «атомными кла-

стерами», крупнее 100 нм – «объемными частицами» [4]. Именно диапазон от 1 до 100 нм представляет наибольший интерес с точки зрения проникновения через биологические барьеры и штатные фильтрующие элементы средств индивидуальной защиты.

Более значимой для оценки потенциальной опасности представляется *классификация по химическому составу*, выделяющая органические, углеродсодержащие и неорганические наночастицы [1]. Каждый класс обладает специфическими свойствами, определяющими его возможное применение в диверсионных целях и характер поражающего действия.

Органические наночастицы

К этому классу относят структуры, образованные белками, углеводами, липидами, синтетическими полимерами и иными органическими соединениями [5] (рисунок 2).

Типичные представители – дендримеры, липосомы, мицеллы, природные белковые комплексы (например, ферритин):

- преимущественно *нетоксичны* и подвержены биodeградации [1, 5];

- чувствительны к термическому и световому воздействию, что делает их уязвимыми при дегазации/дезинфекции;

- часто имеют полую структуру (липосомы, мицеллы), что позволяет использовать их как контейнеры для направленной доставки токсинов, патогенов или их генетического материала [1, 7];

- образуются за счет нековалентных взаимодействий, что обуславливает их относительную нестойкость и способность организма к самопроизвольному очищению [6].

Возможно их использование для адресной доставки биологических поражающих агентов и трансгенных конструкций. Также они способны замаскировать токсины от распознавания в иммунохроматографических тест-системах.

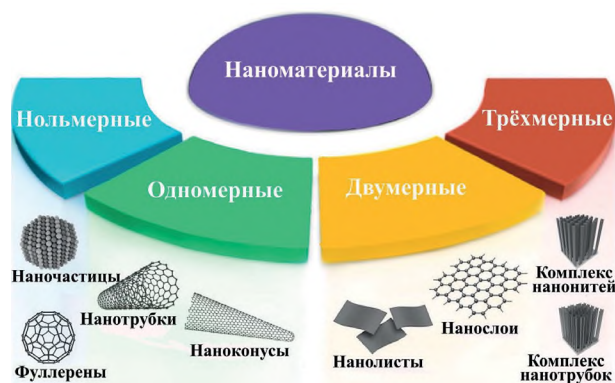


Рисунок 1. Классификация наноматериалов, основанная на соотношении размеров объектов в 3 измерении (рисунок адаптирован авторами из [1])

Figure 1. Nanomaterials classification based on dimensionality (the figure adapted by the authors from [1])

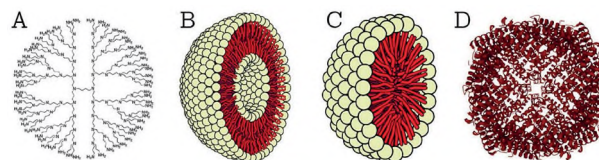


Рисунок 2. Типы органических наночастиц. А – дендримеры; Б – липосомы; В – мицеллы; Г – ферритин (рисунок адаптирован авторами из [1])

Figure 2. Types of organic nanoparticles. A, dendrimers; B, liposomes; B, micelles; Г, ferritin (the figure adapted by the authors from [1])

Углерод-содержащие наночастицы

Частицы этого класса состоят исключительно из атомов углерода. Ключевые представители фуллерены, технический углерод (сажа), углеродные квантовые точки (рисунок 3).

Особенности таких наночастиц, значимых для РХБ защиты:

- фуллерены (C₆₀, C₇₀, C₅₄₀) – полые симметричные структуры, способные захватывать и удерживать атомы или молекулы других веществ [8, 9]. Это создает риск создания инкапсулированных форм отравляющих и высокотоксичных веществ (ОВТВ), устойчивых к дегазации и трудно распознаваемых штатными средствами индикации;

- технический углерод образует прочные агрегаты, напоминающие гроздь [10], что может имитировать споровые формы бактерий при первичной индикации;

- углеродные квантовые точки (менее 10 нм)¹ – разработаны для биомедицинской визуализации [11, 14]. Но с тем же успехом они могут использоваться для скрытой маркировки биологических агентов, делая их невидимыми для штатных средств индикации.

Инкапсуляция ОВТВ снижает вероятность их обнаружения штатными средствами и повышает возможность использования в системах скрытой доставки и маркировки.

Неорганические наночастицы

Этот класс объединяет наночастицы, состоящие из неорганических веществ: металлов, их оксидов, керамических материалов, полупроводников.

Металлические наночастицы – образуются из прекурсоров на основе одного или нескольких металлов [1–3, 16]. Обладают уникальными оптико-электрическими свойствами (поверхностный плазмонный резонанс), определяющими их широкий спектр поглощения в видимой области [17]. Могут служить носителями для адресной доставки, а также использоваться в составе новых типов боеприпасов (например, для поражения радиоэлектронных систем или создания устойчивых аэрозолей).

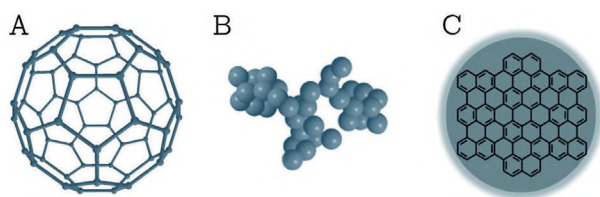


Рисунок 3. Типы углерод-содержащих наночастиц. А – C₆₀ фуллерен; Б – технический углерод; В – квантовые точки (рисунок адаптирован авторами из [1])

Figure 3. Different types of carbon-based nanoparticles. А, C₆₀ fullerene; Б, carbon black nanoparticles; В, carbon quantum dots (the figure adapted by the authors from [1])

¹ Углеродные квантовые точки (carbon quantum dots, CQDs) – это новый класс ультрамалых углеродных наночастиц размером менее 10 нм (обычно 1–5 нм), обладающих уникальными люминесцентными свойствами.

Керамические наночастицы – твердые материалы, получаемые термической обработкой карбонатов, карбидов, фосфатов, оксидов металлов [16, 18]. Высокая термо- и химическая стабильность делают их устойчивыми к дегазации. Аморфность позволяет создавать контейнеры-носители, устойчивые к внешним воздействиям. Высокая нагрузочная емкость позволяет использовать для транспортировки больших количеств ОВТВ или иных агентов [18].

Полупроводниковые наночастицы (квантовые точки) занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Их уникальные свойства обусловлены квантово-размерными эффектами: с уменьшением размера частиц ширина запрещенной зоны изменяется, что приводит к появлению размерно-зависимых оптических и электрофизических характеристик, отсутствующих у объемных полупроводников [17]. Эти особенности открывают возможность их использования в качестве маркеров для мечения биологических агентов или средств доставки, а также в системах дистанционного подрыва или активации.

2. Физико-химические свойства наночастиц как основа их поражающего действия

Уникальные физико-химические свойства наночастиц, отличающие их от микро- и макрочастиц, создают не только новые технологические возможности, но и принципиально новые виды биологических угроз. Ключевыми свойствами, значимыми для РХБ защиты, являются квантовые эффекты, экстремально большая удельная поверхность и способность к самосборке [19].

Квантовые эффекты. При переходе размеров частиц в нанодиапазон (1–100 нм) законы классической физики уступают место законам квантовой механики. Гравитационные силы перестают играть существенную роль, уступая доминирование электромагнитным взаимодействиям. Частицы такой малой массы приобретают волновую природу, а их положение в пространстве описывается вероятностными функциями. Особое зна-

чение для преодоления защитных барьеров имеет эффект туннелирования – способность частиц с низкой энергией проходить через высокоэнергетические барьеры [19].

Квантовые эффекты обуславливают повышенную проникающую способность наночастиц через фильтрующие элементы средств индивидуальной защиты, биологические мембраны и гематоэнцефалический барьер, что делает их потенциально опасными при ингаляционном и перкутанном поступлении.

Экстремально большая поверхность. При уменьшении размера частиц площадь их поверхности возрастает в геометрической прогрессии (при сохранении общей массы). Более половины атомов наночастицы расположены на поверхности, что определяет их высокую реакционную и каталитическую активность, а также наличие большого числа активных центров взаимодействия. Высокая поверхностная активность означает:

- способность наночастиц сорбировать и переносить токсичные вещества, патогены или их компоненты;
- возможность катализировать образование токсичных соединений непосредственно в организме;
- выраженное цитотоксическое действие за счет генерации активных форм кислорода.

Способность к самосборке компонентов наночастиц задает строго определенную структуру, которая самопроизвольно воспроизводится при взаимодействии с внешней средой [20], что позволяет создавать:

- устойчивые аэрозольные композиции с заданными размерами частиц;
- структуры, имитирующие вирусные частицы или иные патогены;
- многослойные «капсулы», устойчивые к дегазации и сохраняющие ОБТВ до момента достижения цели.

Совокупность этих свойств определяет двойственный характер наночастиц: с одной стороны, они являются основой для создания новых лечебных и диагностических средств, с другой – формируют принципиально новый класс потенциальных поражающих агентов, требующих разработки специальных методов индикации и защиты.

3. Области применения наночастиц и возникающие риски

Ниже рассматриваются области применения наночастиц, представляющие наибольший интерес с точки зрения возможного использования в диверсионных или террористических целях, а также с позиции оценки рисков для личного состава войск и населения.

Медицина как источник угроз двойного применения. Технологии, разработанные для терапевтических целей, могут быть использованы для создания средств поражения. Наиболее опасны следующие направления.

Системы доставки. Инкапсуляция терапевтических агентов в наночастицы значительно повышает эффективность лечения, снижая побочные эффекты [21]. Для доставки РНК-препаратов (мРНК, миРНК) используются наночастицы золота и липидно-полиэтиленгликолевые оболочки [22].

Но те же технологии могут быть использованы для доставки ОБТВ, биологических токсинов, патогенов или генетических конструкций непосредственно в клетки-мишени. Инкапсуляция позволяет:

- маскировать агент от иммунной системы;
- обеспечивать его сохранность при хранении и распылении;
- осуществлять направленную доставку к определенным органам и тканям.

Терапия онкозаболеваний. Инкапсуляция противораковых соединений в наночастицы (например, липосомы с платиной) [23] и фотодинамическая терапия с использованием наночастиц золота [24] демонстрируют высокую эффективность избирательного поражения клеток.

Принципы избирательного поражения клеток могут быть применены для создания:

- агентов, избирательно поражающих клетки иммунной системы;
- веществ, вызывающих апоптоз в определенных тканях (нервной, эндокринной, кроветворной);
- сенсibilizаторов, делающих организм уязвимым к последующему облучению или химическому воздействию.

Направленная доставка (таргетирование). Активно изучается способность наночастиц накапливаться в определенных тканях (золото в опухолях [25], оксид цинка – селективное связывание с опухолевыми клетками [26]). Одновременно накопленные знания открывают возможность для адресной доставки поражающих агентов к критически важным органам (ЦНС, эндокринные железы, костный мозг) без поражения других тканей.

Преодоление гематоэнцефалического барьера. Менее 4 % лекарственных средств способны проникать через этот барьер. Инкапсулирование в наночастицы (графен, металлы и их оксиды, углеродные нанотрубки) значительно повышает эффективность доставки [28], что используется при лечении нейродегенеративных заболеваний. В тоже время

открываются возможности и для доставки нейротоксичных агентов непосредственно в ЦНС, минуя естественные защитные барьеры. Наночастицы становятся «троянским конем» для веществ, которые в свободном виде через гематоэнцефалический барьер не проникают (рисунок 4).

Диагностика. Наночастицы успешно используются в качестве контрастирующих агентов для визуализации органов и патологических очагов. Например, наночастицы оксида железа (Fe_3O_4) предложены для магнитно-резонансной томографии [30], а наночастицы золота, благодаря способности накапливаться в опухолях, применяются в диагностических исследованиях [25].

Те же свойства могут быть использованы для маркировки людей (скрытое наблюдение, идентификация) или для создания «маячков», позволяющих отслеживать перемещение носителя. Наночастицы с магнитными свойствами потенциально способны

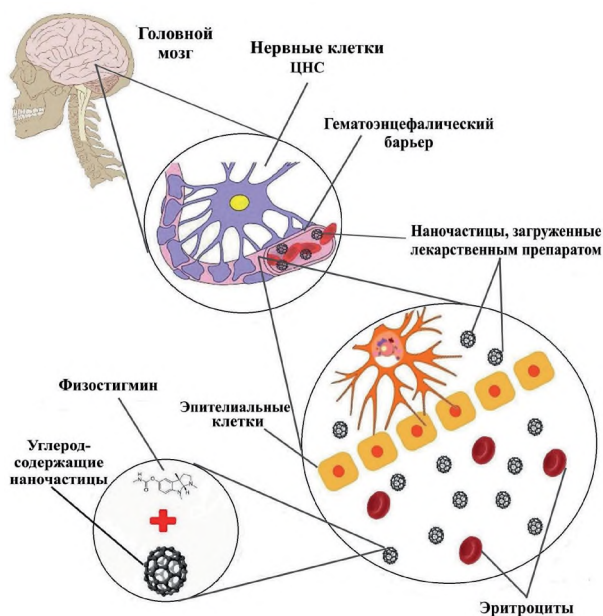


Рисунок 4. Доставка лекарственных средств с помощью наночастиц при лечении нейродегенеративных расстройств; гематоэнцефалический барьер непроницаем для традиционных препаратов, однако лекарственные средства, инкапсулированные в наночастицы, преодолевают этот барьер и достигают центральной нервной системы (рисунок адаптирован авторами из [3])

Figure 4. Nano-based drug delivery in the therapies of neurodegenerative disorders: bloodbrain barrier (BBB) is a noticeable obstacle for conventional medicines; however, drugs encapsulated within nanoparticles efficiently penetrate through the BBB and reach the central nervous system (figure adapted by the authors from [3])

взаимодействовать с внешними магнитными полями, что открывает возможности для дистанционного воздействия.

Антимикробная терапия. Наночастицы серебра и меди, обладающие выраженными антимикробными свойствами, включаются в состав перевязочных материалов и медицинских приборов [31]. Другая сторона технологии – риск контаминации окружающей среды бактерицидными наночастицами, что может нарушить естественные микробиоценозы. Технологии иммобилизации антимикробных агентов на наноносителях могут быть использованы для создания устойчивых покрытий, затрудняющих дегазацию и дезинфекцию.

Экологические риски применения наночастиц для очистки окружающей среды. Наночастицы способны проникать в зоны, недоступные для объемных материалов. Для предотвращения преждевременных реакций их могут покрывать защитными оболочками. Наиболее известный пример, наноразмерное нуль-валентное железо (nZVI), используемое для очистки грунтовых вод от хлорсодержащих растворителей и тяжелых металлов. Технологии нанобиоремедиации, сочетающие использование живых организмов и наноматериалов, позволяют очищать почву и воду от загрязнений с высокой эффективностью [32–34]. Но и здесь есть риски:

- сами наночастицы, применяемые для ремедиации, становятся новым классом загрязнителей, поведение которых в экосистемах изучено недостаточно;
- существует возможность целенаправленной контаминации источников воды или почвы наночастицами, несущими токсичные или патогенные агенты;
- наночастицы с защитными оболочками могут служить моделью для создания средств доставки ОВТБ, устойчивых к воздействию факторов окружающей среды.

Другие примеры: наночастицы оксида марганца удаляют из воды ионы Zn(II) и Co(II) [37]; наночастицы сульфида Fe(II) применяются для очистки почвы от Cr(VI) [38]; созданы нанокмполиты для очистки от вирусов [39].

Избирательное удаление одних ионов и вирусов при сохранении других создает риск селективного давления и формирования устойчивых форм микроорганизмов. Кроме того, сами нанокмполиты могут служить средством скрытой доставки вирусных частиц.

Применение наночастиц в промышленности – источники неконтролируемой контаминации. Создает высокую вероятность

их неконтролируемых или аварийных выбросов в окружающую среду.

Производство биодизеля использует каталитическую активность наночастиц платины для конверсии биомассы в топливо [40]. Но промышленные выбросы наночастиц создают и фоновое загрязнение, затрудняющее индикацию специально примененных агентов.

Пищевая промышленность. Нанотехнологии обеспечивают увеличение сроков годности продуктов за счет защитных покрытий на основе наноматериалов [41, 42]. В состав таких покрытий входят наночастицы Ag, Zn, TiO_2 [43, 44]. Наночастицы металлов и липосомы рассматриваются как средства доставки нутриентов (витаминов, минералов) в продукты, формируя понятие «нанопища» [41]. Технологии инкапсуляции и доставки, отработанные в пищевой и косметической промышленности, могут быть использованы для скрытного введения в продукты питания ОБТВ.

Производство косметических средств. Наночастицы обеспечивают доставку активных ингредиентов в глубокие слои кожи. Хитозановые и липидные наночастицы обладают высокой проникающей способностью [45], наночастицы Au и Ag снижают микробную контаминацию [3], наночастицы TiO_2 в комбинации с Y_2O_3 обеспечивают УФ-защиту с меньшей цитотоксичностью [46]. Но эти же технологии могут быть использованы для введения в организм человека через кожу нерастворимых в жирах ОБТВ, биологических токсинов и трансгенных конструкций.

Применение наноматериалов в сельском хозяйстве. В сельском хозяйстве наноматериалы применяются в двух основных формах: наноудобрения и нанопестициды [47]. Наноудобрения (на основе SiO_2 , ZnO, CuO, Fe, Mg) [48–50] используются в меньших количествах, чем традиционные, обеспечивают направленное высвобождение питательных компонентов, предотвращают утечку в грунтовые воды, усиливают азотфиксацию, фотосинтез, всхожесть, засухоустойчивость. Нанопестициды [51], включая наночастицы CuO с инсектицидной активностью [52] и наночастицы Ag с нематодической [47], рассматриваются как более дешевая альтернатива химическим пестицидам.

Для войск РХБ защиты важно, что наночастицы, попадая в почву и воду, могут накапливаться в сельскохозяйственных культурах и далее – в организме животных и человека, создавая отложенный токсический эффект. Антимикробные и инсектицидные наночастицы способны нарушать

микробиоценозы почвы и кишечника, снижать естественную резистентность. Применение нанопестицидов создает риск селекции устойчивых форм патогенов и вредителей, что в перспективе может потребовать разработки специальных методов индикации и защиты. Технологии направленного высвобождения удобрений могут быть использованы для скрытного внесения токсикантов в агроценозы.

4. Доступность способов получения наночастиц

Известны три группы технологий синтеза наночастиц, принципиально различающиеся по сложности, стоимости и возможности скрытного применения.

Физические технологии («сверху вниз»). Основаны на дроблении, измельчении более крупных частиц до наноразмеров [2, 53]. Методы включают механический помол, лазерное испарение, ионное измельчение, электронный взрыв, ультразвук, дуговой разряд, литографию [53]. Эти технологии требуют сложного дорогостоящего оборудования (лазеры, ускорители, вакуумные установки), энергоемки и малоприспособлены для скрытного применения. Вероятность их использования в диверсионных целях низкая, хотя нельзя исключать аварийные выбросы на промышленных объектах.

Химические технологии («снизу вверх»). Основаны на укрупнении атомов и молекул в наночастицы [2]. На ранних этапах использовались токсичные восстановители, современные методы (осаждение из паровой фазы, золь-гель, со-преципитация, гидротермический синтез) [53, 54] более безопасны, но требуют специализированного лабораторного оборудования и квалифицированного персонала. Такие технологии доступны в условиях хорошо оснащенной химической лаборатории и могут быть реализованы в государственных или полугосударственных структурах. Для диверсионных групп они ограничено доступны, но возможны при наличии специалистов.

Биологические технологии («зеленый синтез»). Разработаны в XXI в. Суть: использование живых организмов (бактерий, грибов, актиномицетов, водорослей) или растительных экстрактов для восстановления ионов металлов в наночастицы (рисунки 5).

Преимущества с точки зрения потенциального противника [55]:

- относительная простота и доступность технологии;
- отсутствие необходимости в сложном дорогостоящем оборудовании;

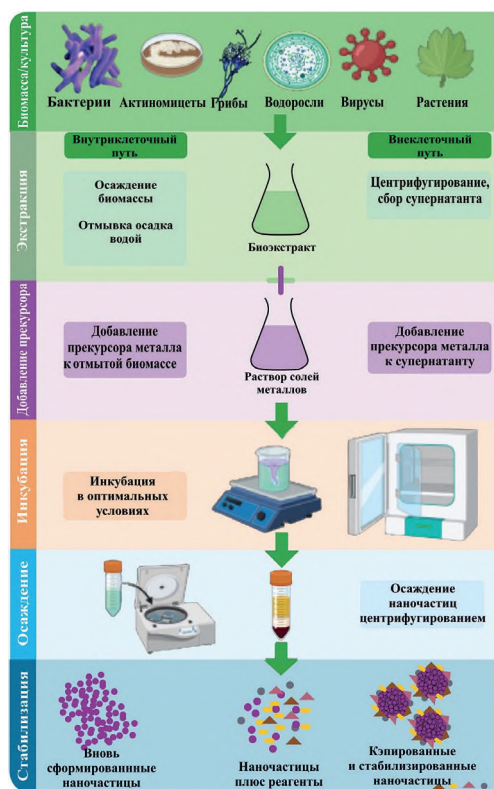


Рисунок 5. Схема «зеленого» синтеза наночастиц (рисунок адаптирован авторами из [16])

Figure 5. Schematic diagram for biosynthesis of nanoparticles (the figure adapted by the authors from [16])

- не требуются токсичные химикаты (легче скрыть от контроля);
- экологическая чистота (сложнее обнаружить несанкционированное производство);
- высокая производительность и возможность масштабирования;
- возможность получения высокостабильных наночастиц;
- быстрота процесса.

Технология представляют наибольшую потенциальную угрозу с точки зрения доступности для террористических и диверсионных групп [55].

Технология может быть реализована в полевых условиях, в подвальных лабораториях, на базе биотехнологических или фармацевтических производств. Растительные экстракты и микробные культуры легкодоступны, их приобретение не вызывает подозрений.

Синтез с использованием микроорганизмов основан на способности широкого круга бактерий (кишечная палочка, энтерококки, десульфовибрио) восстанавливать ионы металлов (Ag, Au) с образованием наночастиц [2, 56–58]. Грибы и актиномицеты имеют преимущество благодаря множеству редуцирующих ферментов на поверхности

клеток, что повышает эффективность синтеза [59–61]. Водоросли позволяют получать наночастицы не только благородных, но и тяжелых металлов, а содержащиеся в экстрактах водорослей полимеры сорбируют ионы металлов, а антиоксиданты стабилизируют растущие частицы [62].

Для РХБ защиты значимо, что широкая распространенность продуцентов (бактерии, грибы, водоросли доступны в любой географической точке) в сочетании с возможностью культивирования в простых условиях (термостаты, подвальные помещения) создают ситуацию, когда легитимное микробиологическое производство практически невозможно отличить от нелегального.

Синтез с использованием растительных экстрактов – наиболее доступная и трудно контролируемая технология. Он основан на взаимодействии растительных экстрактов с солями металлов [63]. Критические параметры: состав и концентрация экстракта, содержание соли, pH, температура, продолжительность реакции. Используемые растения (акация, кофе, диоскорея, фикус, паркия и многие другие [16]) широко распространены, включая лекарственные. Растительное сырье легко приобрести без подозрений, процесс не требует специальных навыков (на уровне приготовления отвара), а полученные препараты не требуют очистки и обладают комплексом свойств, где лечебное действие растения маскирует наличие наночастиц.

Таким образом, в отличие от физических и химических методов, технологии «зеленого синтеза» не требуют сложного оборудования, могут реализовываться в полевых условиях, используют легкодоступные биологические агенты и крайне сложны для выявления и контроля.

5. Токсикология наночастиц – пробелы в знаниях и риски для человека

Несмотря на широкое применение наночастиц в коммерческих продуктах, систематические исследования их токсичности и клинические испытания проведены в ограниченном объеме. Основной массив данных получен на клеточных культурах и низкорганизованных животных (дафнии, аквариумные рыбки) [64–66]. Эти модели лишь частично воспроизводят механизмы действия наночастиц на организм человека. Для РХБ защиты это создает проблему отсутствия надежных данных о пороговых дозах и механизмах поражения, невозможность обоснованного нормирования и разработки методов индикации, риск недооценки отдаленных последствий.

Механизмы проникновения и поражения. Наночастицы способны проникать в организм человека всеми известными путями: ингаляционным, пероральным, через слизистые глаз, через кожу, при внутривенном поступлении (рисунк 6) [64–66]. Это создает множественность уязвимостей и требует комплексной защиты.

Ингаляционный путь – наиболее опасный [64, 65]. Взвешенные в воздухе наночастицы накапливаются в легких, вызывают окислительный стресс и воспаление (острое или хроническое), через капиллярную сеть легких попадают в кровоток и разносятся по всему организму, включая мозг [66].

Системное действие включает транслочкацию из места проникновения в кровяное русло, распределение по органам и тканям, накопление в органах-мишенях, воздействие на ЦНС (преодоление гематоэнцефалического барьера). Основные механизмы токсичности [1, 67–69]:

- генерация активных форм кислорода (окислительный стресс);
- повреждение клеточных мембран;
- нарушение функций митохондрий;
- индукция апоптоза и некроза;
- генотоксические эффекты (повреждение ДНК);
- иммунотоксичность (активация или подавление иммунного ответа).

Белковая корона. При попадании в биологическую среду наночастицы адсорбируют

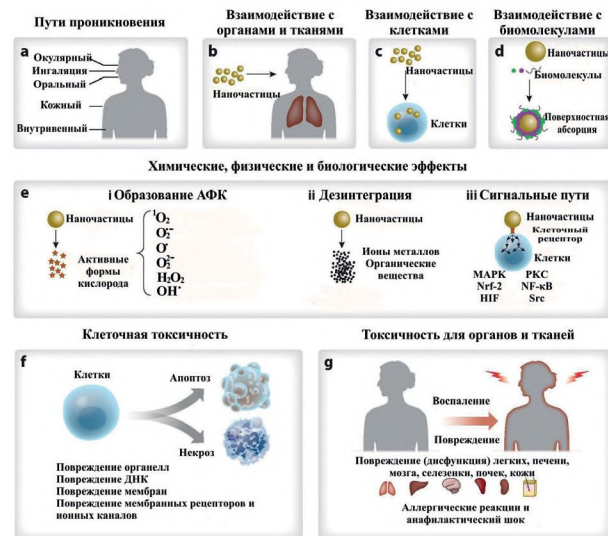


Рисунок 6. Схематическое представление побочного действия (токсичности) наночастиц (рисунок адаптирован авторами из [4])

Figure 6. Schematic representation of nanoparticle adverse effects and nanotoxicity (figure adapted by the authors from [4])

на своей поверхности белки, образуя «корону» [67-70]. Это меняет их химию и может усиливать токсичность через активацию клеточных сигнальных путей, ингибирование ферментов, агрегацию частиц, формирование новых антигенных сайтов.

Окислительный стресс – ключевой механизм поражающего действия наночастиц [71]. Высокая реакционная активность наночастиц генерирует активные формы кислорода (синглетный кислород, супероксид, пероксиды, гидроксильные радикалы), вызывающие деструкцию органелл, ДНК, мембран, ионных каналов, рецепторов.

Высвобождение токсичных ионов. Наночастицы металлов могут разрушаться внутри клеток, освобождая ионы (Ag^+ , Cu^{2+} и др.), которые повреждают ДНК и мембраны, усиливают образование активных форм кислорода [71].

Нарушение сигнальных путей. Активные формы кислорода и ионы металлов воздействуют на NF- κ B, MAPK и другие ключевые регуляторы, что приводит к апоптозу и гибели клеток, повреждению органов, воспалению, системному иммунному ответу.

Токсичность наночастиц определяется четырьмя ключевыми параметрами (таблица 1).

Токсичность наночастиц подтверждена экспериментальными работами [73–80]: углеродные нанотрубки вызывают гибель клеток и нарушают клеточный цикл [77]; оксиды висмута, меди и оксида меди индуцируют окислительный стресс и повреждение ДНК [78, 79]; TiO_2 , SiO_2 , Ag проявляют нейротоксичность, образование активных форм кислорода, повреждение мембран [80].

Критическое противоречие заключается в том, что использование наночастиц в медицине и косметологии растет экспоненциально, несмотря на экспериментальные доказательства их токсичности [81]. Особую тревогу вызывает практически полное отсутствие данных об отдаленных последствиях применения таких средств на людях. Для РХБ защиты это означает отсутствие нормативной базы для оценки рисков, невозможность обоснованного прогнозирования последствий и потенциальную угрозу «отложенного» поражения.

Экологические риски. Изучены значительно слабее, чем токсичность для человека [82]. Из 117 исследований нанотоксичности (2021) лишь 5 посвящены экологии. Пути поступления: производство, применение, утилизация [83], причем основные потери происходят при применении и утилизации (лишь 2 % утечек из производства). На различных

Таблица 1. Факторы, определяющие токсичность наночастиц
Table 1. Factors determining nanoparticle toxicity

Параметр / Parameter	Влияние на токсичность / Effect on toxicity	Пример / Example
Состав / Composition	Определяет базовую химическую активность / Determines baseline chemical activity	Наночастицы дизельного топлива вызывают сосудистую реакцию, чистый углерод – нет [72] / Diesel fuel nanoparticles induce a vascular reaction, pure carbon does not [72]
Размер / Size	Меньший размер – выше проникающая способность и токсичность / Smaller size higher penetration capacity and toxicity	Au 1,4 нм – высокотоксичны, Au 15 нм – нет [73] / Au 1.4 nm highly toxic, Au 15 nm not toxic [73]
Заряд поверхности / Surface charge	Положительный заряд усиливает притяжение к клеткам / Positive charge enhances attraction to cells	Положительно заряженные Au токсичнее отрицательных и нейтральных [74, 75] / Positively charged Au are more toxic than negative and neutral ones [74, 75]
Форма / Shape	Определяет механическое воздействие / Determines mechanical impact	Игольчатые частицы токсичнее сферических (повреждают мембраны) [76] / Needle-shaped particles are more toxic than spherical ones (damage membranes) [76]
Примечание. Таблица составлена авторами по работам [4, 72–76]. Note. The table is compiled by the authors based on [4, 72–76].		

моделях (почва, растения, рыбы, дафнии) [84] подтверждены эффекты: наночастицы металлов проникают в растительные клетки [85, 86]; ZnO и Al ингибируют рост корней; накопление в водных животных вызывает морфологические изменения, отклонения в поведении, повреждение ДНК [87].

Экологическая контаминация создает длительно действующие очаги поражения, а накопление в пищевых цепях представляет риск для войск, использующих местные ресурсы. Отсутствие систем мониторинга создает дополнительную уязвимость для диверсий.

6. Нанотехнологии и биологическое оружие

Идея создания оружия на основе нанотехнологий возникла одновременно с появлением самой nanoотрасли.

«Серая слизь». Наиболее известен сценарий «серой слизи» («Gray Goo») – самовоспроизводящихся наноботов, пожирающих биосферу (рисунок 7).

Автором термина считается пионер нанотехнологии Эрик Дрекслер, описавший этот сценарий в книге «Машины создания» (1989) (цит. по [89]). Согласно оригинальной идее, самовоспроизводящиеся наноботы-ассемблеры, запрограммированные на переработку органической материи, выходят из-под контроля и уничтожают все живое на планете. По мнению других авторов, такая способность может возникнуть спонтанно в

результате мутаций или ошибок программирования [88].

Этот сценарий сыграл важную роль в формировании общественного и научного восприятия наноугроз, заложив основу для понимания принципиально новых рисков: самореplikация, невидимость, избирательность. Однако сегодня он рассматривается как маловероятный из-за колоссальных энергетических и материальных затрат, необходимых для самореplikации. Практический вывод: угроза не в самовоспроизводящихся наноботах, а в направленном применении нанотехнологий для создания средств поражения.

Наногенетическое оружие. Другая деструктивная идея, обсуждаемая в литературе, – создание на стыке геной инженерии, нанотехнологий и робототехники наногенетического оружия [90]. Предполагается, что наноботы способны проникать через кровь в клетки, вносить заданные изменения в геном человека, действовать избирательно – на людей определенной расы или этноса (этническое nanoоружие). Хотя этническое оружие сегодня – гипотетическая угроза, технологии доставки и редактирования генома развиваются стремительно. Комбинация наночастиц (как контейнеров) и CRISPR/Cas-систем (как инструмента редактирования генома человека) создает потенциальную возможность создания генетически модифицирующих агентов. Такие агенты могут быть направлены и на другие функционально зна-

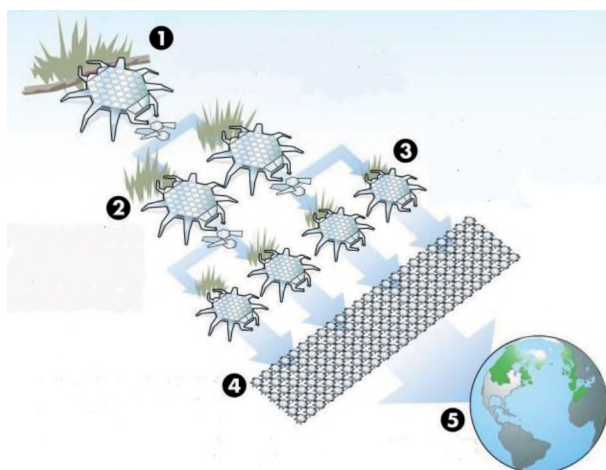


Рисунок 7. «Серая слизь» «ночной кошмар нанотехнологии». 1 – Первый нанобот. Сборщик создается, чтобы превращать органическую материю в другие материалы. 2 – Каждый сборщик запрограммирован на создание новых, идентичных ему наноботов. 3 – Каждый новый сборщик следует тем же самым программам, направленным на потребление и размножение. 4 – Скорость изготовления наноботов растет по экспоненте, обеспечивая производство все большего числа наноботов. 5 – В конце концов наноботы поглощают всю органическую материю на Земле, оставляя позади себя множество наномашин «серую слизь» (рисунок адаптирован авторами из [88])

Figure 7. Gray Goo – the “nightmare scenario” of nanotechnology. 1, the first assembler is created to convert organic matter into other materials; 2, each assembler is programmed to create new units identical to itself; 3, each new unit follows the same programming instructions to consume and multiply; 4, the manufacturing rate becomes exponential, producing greater and greater numbers of assemblers; 5, eventually, the assemblers would strip the Earth of all organic matter, leaving only nanomachines behind – the “gray goo” (the figure adapted by the authors from [88])

чимые гены (иммунный ответ, репродукция, нервная система), что представляет реальную опасность. Поэтому требуется разработка методов индикации таких агентов.

Угрозы на стыке нанотехнологий и биологии. От гипотетических сценариев следует перейти к реальным, уже существующим или ближайшим угрозам:

- наночастицы как контейнеры для доставки (маскировка токсинов и патогенов от иммунной системы, преодоление гистогематических барьеров, устойчивость к деградации);

- наночастицы как усилители токсичности (адъювантные эффекты, синергизм с известными ОБТВ, каталитическое образование токсичных соединений *in situ*);

- наночастицы как маркеры и средства скрытого наблюдения (люминесцентные и магнитные метки для маркировки людей или объектов);

- наночастицы как основа новых типов боеприпасов (аэрозоли с заданным размером частиц, комбинированные поражающие агенты).

Основная угроза исходит не от фантастических самовоспроизводящихся наноботов, а от целенаправленного использования нанотехнологий для совершенствования известных средств поражения и создания новых, более эффективных способов доставки и маскировки поражающих агентов нового типа.

Нейроинтерфейсы и нанороботы. В последние годы в научной литературе и футурологических прогнозах обсуждается возможность создания наноботов для имплантации в мозг человека с целью управления поведением через облачные хранилища [91]. Согласно этой концепции, наноботы, построенные из нитей ДНК, будут постоянно находиться в капиллярах головного мозга и обеспечивать внешнее управление (рисунок 8).

Для корректной оценки этой угрозы необходимо разделить научную основу, техническую реализуемость и потенциальное военное применение. ДНК-нанотехнологии действительно существуют и активно развиваются (из нитей ДНК собирают наноструктуры заданной формы) [92]. Существуют экспериментальные работы по доставке наноструктур в мозг через кровотоки [93]. Разрабатываются интерфейсы «мозг-компьютер», позволяющие считывать активность мозга

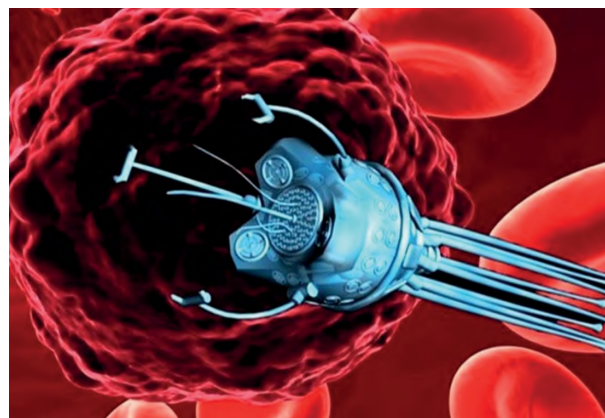


Рисунок 8. Нанобот для имплантации в капилляры головного мозга (рисунок адаптирован авторами из [88])
Figure 8. Nanobots used for a human brain (the figure adapted by the authors from [88])

и в ограниченных пределах стимулировать нейроны [94]. Однако ключевые проблемы остаются нерешенными: энергообеспечение (нанобот в капилляре не имеет источника энергии), селективность (невозможно управлять отдельным нейроном без воздействия на соседние), сложность мозга (поведение человека определяется сложными сетями, а не отдельными нейронами), иммунный ответ (инородные структуры быстро уничтожаются).

Что уже реально:

- наночастицы могут использоваться для доставки веществ в мозг (преодоление гематоэнцефалического барьера);
- разрабатываются нейроинтерфейсы для восстановления утраченных функций;
- ведутся исследования по оптогенетике – управлению нейронами светом (требует генной модификации и имплантации оптоволокна).

Что возможно в среднесрочной перспективе (15-25 лет):

- создание наноструктур, способных регистрировать активность нейронов и передавать сигнал вовне;
- разработка биосовместимых источников энергии;
- целевая доставка в определенные отделы мозга.

Что останется фантастикой в обозримом будущем:

- массовое управление людьми;
- чтение мыслей и намерений человека;
- программирование поведения человека через облако.

Несмотря на низкую реалистичность сценария «управления через облако», войска РХБ защиты должны учитывать реальные тенденции. Развитие нейроинтерфейсов создает потенциальную возможность для создания средств нейрохимического поражения личного состава – веществ, избирательно воздействующих на определенные структуры мозга военнослужащих; технологии доставки в мозг могут быть использованы для адресной доставки нейротоксинов; имплантируемые устройства могут стать средством скрытого наблюдения или дистанционного воздействия; комбинация наночастиц и оптогенетики теоретически позволяет создавать дистанционно управляемых людей и животных.

Обсуждение

Еще недавно идеи создания наногенетического оружия или управления людьми через наноботы рассматривались специалистами как образцы ненаучной фантастики. Однако за последние годы научно-технологический

уровень ведущих стран вырос настолько, что несбыточные прежде проекты начинают обретать реальные черты.

Наиболее наглядный пример – развитие беспилотной авиации в России. За время специальной военной операции этот сегмент прошел путь от редкого использования отдельных образцов до создания принципиально нового вида Вооруженных Сил и обеспечивающего его потребности передового промышленного кластера. То, что еще вчера казалось экспериментальным, сегодня стало массовым и определяющим ход боевых действий. Аналогичный рывок может произойти и в сфере нанобиотехнологий.

Наибольшую тревогу вызывает объединение двух прорывных технологий: системы редактирования генома CRISPR-Cas, позволяющей вносить заданные изменения в геном клетки [92], и наночастиц как средства доставки, обеспечивающих транспорт компонентов CRISPR-Cas непосредственно в клетки-мишени [92, 93]. Этот симбиоз уже сегодня предлагается для терапии онкозаболеваний, коррекции наследственных аномалий, преодоления антибиотикорезистентности бактерий. Но очевидно, что технология имеет двойное назначение и может быть адаптирована противником для разработки принципиально новых видов оружия.

Наночастицы могут быть самостоятельными средствами поражения. Некоторые виды наночастиц сами по себе обладают токсичностью, и это свойство может быть целенаправленно усилено специалистами противника путем модификации состава, размеров, формы и химии поверхности. О потенциальной опасности наночастиц как агентов химического и биологического оружия недавно сообщал Ян Лакота [19].

Наночастицы могут использоваться в качестве платформы для доставки других биологических поражающих агентов – токсинов, ферментов, регуляторных пептидов, гормонов. Методической основой таких разработок могут служить публикации о закономерностях формирования «белковой короны» вокруг металлических наночастиц и способах ее стабилизации [94]. Инкапсуляция в наночастицы позволяет маскировать агент от иммунной системы, обеспечивать его сохранность при хранении и распылении, преодолевать гистогематические барьеры, осуществлять направленную доставку к органам-мишеням.

Вышеизложенное доказывает потенциальную опасность прямого использования нанотехнологий для создания противником биологического и химического оружия.

Спектр угроз широк: от применения самих токсичных наночастиц до использования их как платформы для доставки известных поражающих агентов и создания принципиально новых видов оружия на стыке нанотехнологий, геной инженерии и информационных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ научных данных позволяет сформулировать следующие выводы о реальности угроз биологической безопасности со стороны нанотехнологий и необходимых мерах противодействия:

1. Нанотехнологии представляют собой источник угроз двойного назначения. Классификация наноматериалов по составу и размерности позволяет выделить наиболее опасные типы (металлические наночастицы, углеродные структуры), способные накапливаться в организме и генерировать токсичные эффекты.

2. Токсичность наночастиц доказана экспериментально на клеточных и животных моделях. Установлены основные механизмы поражения: окислительный стресс, повреждение мембран и ДНК, апоптоз. Ключевые факторы токсичности – размер, заряд поверхности, форма и химический состав частиц. При этом перенос этих данных на человека требует осторожности из-за недостаточной изученности долгосрочных эффектов, что является объективным ограничением современной науки.

3. Доступность «зеленого синтеза» создает принципиально новые риски. Технологии получения наночастиц с использованием микроорганизмов и растительных экстрактов позволяют производить их в полевых условиях, что делает нанотехнологии доступными для террористических и диверсионных групп. Это требует пересмотра под-

ходов к контролю за потенциально опасными технологиями.

4. Наибольшую опасность представляет комбинация нанотехнологий с CRISPR-Cas-редактированием геномов. Объединение этих технологий создает потенциал для принципиально новых видов оружия двойного назначения. Наночастицы могут использоваться как самостоятельное средство поражения (токсичные наночастицы), как платформа для доставки токсинов, ферментов, регуляторных пептидов и как компонент наногенетического оружия (доставка CRISPR-Cas).

5. Для научно-исследовательских организаций войск РХБ защиты необходимо первоочередное развитие по следующим направлениям:

- индикация – разработка методов обнаружения наночастиц в биосредах и объектах окружающей среды;
- средства защиты – оценка эффективности существующих фильтров СИЗ против наноразмерных частиц;
- профилактика поражений – изучение возможности кумуляции наночастиц в организме при хроническом воздействии;
- терапия поражений – поиск средств, нейтрализующих токсическое действие (антиоксиданты, хелаторы);
- мониторинг – отслеживание публикаций по двойному применению нанотехнологий в военных целях.

Практическая значимость работы

Работа систематизирует данные о доступности технологий синтеза наночастиц и механизмах их токсичности, что позволяет обосновать требования к модернизации средств индикации, индивидуальной защиты и терапии применительно к задачам войск РХБ защиты.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Исследование выполнено на основе открытых научных публикаций без использования материалов ограниченного доступа. В исследовании также не проводилось собственных экспериментов, что характерно для обзорно-аналитических работ, целью которых является систематизация уже имеющихся знаний. Междисциплинарность исследования потребовала обобщения разнородных данных, что минимизировано за счет единой концептуальной рамки, ориентированной на задачи биологической безопасности. Быстрое развитие нанотехнологий означает, что за время подготовки обзора могли появиться новые данные, что подчеркивает необходимость регулярного обновления подобных аналитических работ. Значительная часть цитируемых экспериментальных исследований выполнена на клеточных культурах или лабораторных животных, что требует осторожности при переносе данных на человека. Долгосрочные эффекты воздействия наночастиц изучены недостаточно – это объективное состояние научного знания, определяющее приоритетные направления будущих исследований. Выявленные ограничения определяют перспективы продолжения работы: экспериментальное изучение токсичности наночастиц на млекопитающих, разработка методов индикации, мониторинг патентной активности по двойному применению, оценка эффективности существующих СИЗ, поиск антидотов. Представленные

ограничения очерчивают контуры проблемного поля. Работу следует рассматривать как первый этап системного анализа проблемы, задающий вектор для дальнейших исследований и практических разработок. / This study is based on an analysis of open scientific publications without the use of restricted-access materials. The study also did not conduct original experiments, which is characteristic of review-analytical works aimed at systematizing existing knowledge. The interdisciplinary nature of the research required the synthesis of heterogeneous data, which was minimized through a unified conceptual framework oriented toward biological security objectives. The rapid development of nanotechnology implies that new data may have emerged during the preparation of this review, underscoring the need for regular updates of such analytical work. A significant portion of the cited research was conducted on cell cultures or laboratory animals, requiring caution when extrapolating data to humans. The long-term effects of nanoparticle exposure remain insufficiently studied – this reflects the current state of scientific knowledge and defines priority directions for future research. Some of the threats considered currently belong to the realm of science fiction. These identified limitations outline the contours of the problem field and determine prospects for further work: experimental study of nanoparticle toxicity in mammals, development of detection methods, monitoring of patent activity related to dual-use applications, assessment of existing personal protective equipment effectiveness, and search for antidotes. This work should be regarded as the first stage of a systematic analysis of the problem, setting the vector for further research and practical developments.

Список источников / References

1. Joudeh N, Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022;20:262. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>
2. Eker F, Duman H, Akdas E, Bolat E, Saritas S, Karav E, et al. A Comprehensive Review of Nanoparticles: From Classification to Application and Toxicity. *Molecules*. 2024;29:3482. <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>
3. Shahcheraghi-N, Golchin-H, Sadri-Z, Tabari-Y, Borhanifar F, Makani S. Nanobiotechnology, an applicable approach for sustainable future. *3 Biotech*. 2022;12:65. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-03108-9>
4. Yang W, Wang L, Mettenbrink E, DeAngelis P, Wilhelm S. Nanoparticle Toxicology. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*. 2021;61:26989. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-032320-110338>
5. Pan K, Zhong Q. Organic nanoparticles in foods: fabrication, characterization, and utilization. *Annu Rev Food Sci Technol*. 2016;7:24566. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033215>
6. Ng KK, Zheng G. Molecular interactions in organic nanoparticles for phototheranostic applications. *Chem Rev*. 2015;115(19):1101242. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00140>
7. Gujrati M, Malamas A, Shin T, Jin E, Sun Y, Lu Z-R. Multifunctional cationic lipid-based nanoparticles facilitate endosomal escape and reduction-triggered cytosolic siRNA release. *Mol Pharm*. 2014;11(8):273444. <https://doi.org/10.1021/mp400787s>
8. Long CM, Nascarella MA, Valberg PA. Carbon black vs black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions. *Environ Pollut*. 2013;181:27186. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009>
9. Kukarmi S, Choudhari S, Chikkamath SS, Kurale RS, Thopate TS, Praveenkuman S, et al. Potential applications of fullerenes in drug delivery and medical advances. *Inorganic Chemistry Communications*. 2025;173:113829. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113829>
10. Yuan X, Zhang X, Sun L, Wei Y, Wei X. Cellular toxicity and immunological effects of carbon-based nanomaterials. *Part Fibre Toxicol*. 2019;16(1):127. <https://doi.org/10.1186/s12989-019-0299-z>
11. Lu K-Q, Quan Q, Zhang N, Xu Y-J. Multifarious roles of carbon quantum dots in heterogeneous photocatalysis. *J Energy Chem*. 2016;25(6):92735. <https://doi.org/10.1016/j.ijechem.2016.09.015>
12. Oh W-K, Yoon H, Jang J. Size control of magnetic carbon nanoparticles for drug delivery. *Biomaterials*. 2010;31(6):13428. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.10.018>
13. Liu M, Zhao F, Zhu D, Duan H, Lv Y, Li L, et al. Ultramicroporous carbon nanoparticles derived from metalorganic framework nanoparticles for high-performance supercapacitors. *Mater Chem Phys*. 2018;211:23441. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.02.030>

14. Chandra S, Das P, Bag S, Laha D, Pramanik P. Synthesis, functionalization and bioimaging applications of highly fluorescent carbon nanoparticles. *Nanoscale*. 2011;3(4):153340.
<https://doi.org/10.1039/c0nr00735h>
15. Mauter MS, Elimelech M. Environmental applications of carbon-based nanomaterials. *Environ Sci Technol*. 2008;42(16):584359.
<https://doi.org/10.1021/es8006904>
16. Altammar KA. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Front Microbiol*. 2023;14:1155622.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>
17. Khan I, Saeed K, Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arab. J Chem*. 2019;12:908931.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
18. Moreno-Vega A-I, Gomez-Quintero T, Nunez-Anita R-E, Acosta-Torres L-S, Castaño V. Polymeric and ceramic nanoparticles in biomedical applications. *J Nanotechnol*. 2012.
<https://doi.org/10.1155/2012/936041>
19. Lakota J. Nanoparticles and Potential Agents of Chemical and Biological Weapons. *Journal of NBC Protection Corps*. 2022;6(4):304-19.
<https://doi.org/10.35825/2587-57-28-2022-6-4-304-319>
20. Kumar N, Kumbhat S. Chapter 8.UNIQUE PROPERTIES. In: *Essentials in Nanoscience and Nanotechnology*. First Ed. John Wiley & Sons. 2016. ISBN 97811190966115
21. Lin Y-X, Wang Y, Blake S, Yu M, Mei L, Wang H, Shi J. RNA nanotechnology-mediated cancer immunotherapy. *Theranostics*. 2020;10(1):281299.
<https://doi.org/10.7150/thno.35568>
22. Islam MA, Rice J, Reesor E, Zope H, Tao W, Lim M, Ding J, Chen Y, Aduluso D, Zetter BR. Adjuvant-pulsed mRNA vaccine nanoparticle for immunoprophylactic and therapeutic tumor suppression in mice. *Biomaterials*. 2021;266:120431.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.120431>
23. Rottenberg S, Disler C, Perego P. The rediscovery of platinum-based cancer therapy. *Nat Rev Cancer*. 2021;21(1):3750.
<https://doi.org/10.1038/s41568-020-00308-y>
24. D'Acunto M, Cioni P, Gabellieri E, Presciuttini G. Exploiting gold nanoparticles for diagnosis and cancer treatments. *Nanotechnology*. 2021;32(19):192001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6528/abeled>
25. Siddique S, Chow JC. Gold nanoparticles for drug delivery and cancer therapy. *Appl Sci*. 2020;10:3824.
<https://doi.org/10.3390/app10113824>
26. Anjum S, Hashim M, Malik SA, Khan, M., Lorenzo JM, Abbasi BH, et al. Recent advances in zinc oxide nanoparticles (ZnO nps) for cancer diagnosis, target drug delivery, and treatment. *Cancers*. 2021;13:4570.
<https://doi.org/10.3390/cancers13184570>
27. Yuan P, Ding X, Yang YY, Xu QH. Metal nanoparticles for diagnosis and therapy of bacterial infection. *Adv Healthc Mater*. 2018;7:1701392.
<https://doi.org/10.1002/adhm.201701392>
28. Furtado D, Björnholm M, Ayton S, Bush AI, Kempe K, Caruso F. Overcoming the bloodbrain barrier: the role of nanomaterials in treating neurological diseases. *Adv Mater*. 2018;30(46):1801362.
<https://doi.org/10.1002/adma.201801362>
29. Marcos-Contreras OA, Greineder CF, Kiseleva RY, Parhiz H, Walsh LR, Zuluaga-Ramirez V, et al. Selective targeting of nanomedicine to infamed cerebral vasculature to enhance the bloodbrain barrier. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2020;117(7):34053414.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1912012117>
30. Nguyen KT, Menon JU, Jadeja PV, Tambe PP, Vu K, Yuan B. Nanomaterials for photo-based diagnostic and therapeutic applications. *Theranostics*. 2013;3:152166.
<https://doi.org/10.7150/thno.5327>
31. Hoseinzadeh E, Makhdoomi P, Taha P, Hossini H, Stelling J, Amjad Kamal M. A review on nano-antimicrobials: metal nanoparticles, methods and mechanisms. *Curr Drug Metab*. 2017;18:120128.
<https://doi.org/10.2174/138920001766616120111146>
32. Luo Z, Zhu J, Yu L, Yin K. Heavy metal remediation by nano zero-valent iron in the presence of microplastics in groundwater: inhibition and induced promotion on aging effects. *Environ Pollut*. 2021;287:117628.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117628>
33. Visentin C, da Silva Trentin AW, Braun AB, Thomé A. Nano scale zero valent iron production methods applied to contaminated sites remediation: an overview of production and environmental aspects. *J Hazard Mater*. 2020;410:124614.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124614>

34. Ken DS, Sinha A. Recent developments in surface modification of nano zero-valent iron (nZVI): remediation, toxicity and environmental impacts. *Environ Nanotechnol Monit Manag*. 2020;24:100344.

<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100344>

35. He Y, Lin H, Luo M, Liu J, Dong Y, Li B. Highly efficient remediation of groundwater contaminated with Cr (VI) and nitrate by using nano-Fe/Pd bimetal-loaded zeolite: process product and interaction mechanism. *Environ Pollut*. 2020;263:114479.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114479>

36. Azeez NA, Dash SS, Gummadi SN, Deepa VS. Nano-remediation of toxic heavy metal contamination: Hexavalent chromium [Cr(VI)]. *Chemosphere*. 2020;129204.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129204>

37. Mahmoud ME, Allam EA, El-Sharkawy RM, Soliman MA, Saad EA, El-Khatib AM. Nano-manganese oxide-functionalized dodecyl amine as a simple and low cost nanosorbent for remediation of Zn^{II}/Co^{II} and their radioactive nuclides ⁶⁵Zn and ⁶⁰Co from water. *Appl Radiat Isot*. 2020;159:108989.

<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108989>

38. Tan H, Wang C, Li H, Peng D, Zeng C, Xu H. Remediation of hexavalent chromium contaminated soil by nano-FeS coated humic acid complex in combination with Cr-resistant microflora. *Chemosphere*. 2020;242:125251.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125251>

39. Al-Attabi R, Rodriguez-Andres J, Schütz JA, Bechelany M, Des Ligneris E, Chen X, et al. Catalytic electrospun nano-composite membranes for virus capture and remediation. *Sep Purif Technol*. 2019;229:115806.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115806>

40. Lam E, Luong JH. Carbon materials as catalyst supports and catalysts in the transformation of biomass to fuels and chemicals. *ACS Catal*. 2014;4:33933410.

<https://doi.org/10.1021/cs5008393>

41. Bhuyan D, Greene GW, Das RK. Prospects and application of nanobiotechnology in food preservation: molecular perspectives. *Crit Rev Biotechnol*. 2019;39(6):759778.

<https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1616668>

42. Rovera C, Ghaani M, Farris S. Nano-inspired oxygen barrier coatings for food packaging applications: an overview. *Trends Food Sci Technol*. 2020;97:210220.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.024>

43. Othman SH, Abd Salam NR, Zainal N, Kadir Basha R, Talib RA. Antimicrobial activity of TiO₂ nanoparticle-coated film for potential food packaging applications. *Int J Photoenergy*. 2014;2014:945930.

<https://doi.org/10.1155/2014/945930>

44. Carbone M, Donia DT, Sabbatella G, Antiochia R. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging. *J King Saud Univ*. 2016;28(4):2739.

<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.004>

45. Ta Q, Ting J, Harwood S, Browning N, Simm A, Ross K, et al. Chitosan nanoparticles for enhancing drugs and cosmetic components penetration through the skin. *Eur J Pharm Sci*. 2021;160:105765.

<https://doi.org/10.1016/j.ejps.2021.105765>

46. Borrás MC, Sluyter R, Barker PJ, Konstantinov K, Bakand S. Y2O3 decorated TiO2 nanoparticles: enhanced UV attenuation and suppressed photocatalytic activity with promise for cosmetic and sunscreen applications. *J Photochem Photobiol B Biol*. 2020;207:111883.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111883>

47. Usman M, Farooq M, Wakeel A, Nawaz A, Cheema SA, Rehman H, et al. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Sci Total Environ*. 2020;721:137778.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>

48. KekeliMA, Wang Q, Rui Y. The Role of Nano-Fertilizers in Sustainable Agriculture: Boosting Crop Yields and Enhancing Quality. *Plants*. 2025;14:554.

<https://doi.org/10.3390/plants14040554>

49. Dimkpa CO, Bindraban PS, Fugice J, Agyin-Birikorang S, Singh U, Hellums D. Composite micronutrient nanoparticles and salts decrease drought stress in soybean. *Agron Sustain Dev*. 2017;37(1):5.

<https://doi.org/10.1007/s13593-016-0412-8>

50. Delfani M, Baradarn Firouzabadi M, Farrokhi N, Makarian H. Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2014;45(4):53040.

<https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>

51. Dikshit PK, Kumar J, Das AK, Sadhu S, Sharma S, Singh S, et al. Green synthesis of metallic nanoparticles: applications and limitations. *Catalysts*. 2021;11(8):902.

<https://doi.org/10.3390/catal11080902>

52. Ayoub HA, Khairy M, Elsaid S, Rashwan FA, Abdel-Hafez HF. Pesticidal activity of nanostructured metal oxides for generation of alternative pesticide formulations. *J Agric Food Chem.* 2018;66(22):54918. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b01600>
53. Baig N, Kammakakam I, Falath W. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Mater Adv.* 2021;2(6):1821-1871. <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
54. Patil N, Bhaskar R, Vyavhare V, Dhadge R, Khair V, Patil Y. Overview on methods of synthesis of nanoparticles. *Int. J Curr Pharm Res.* 2021;13:1116. <https://doi.org/10.22159/ijcpr.2021v13i2.41556>
55. Malhotra SPK, Alghuthaymi MA. Biomolecule-assisted biogenic synthesis of metallic nanoparticles. *Agri-Waste Microb Product Sust Nanomater.* 2022;139163. <https://doi.org/10.1016/B987-0-12-823575-1.00011-1>
56. Harich KK, Nagasamy V, Himangshu B, Anuttam K. Metallic Nanoparticle: A Review. *Biomed J Sci & Tech Res.* 2018;4(2):3765. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2018.04.001011>
57. Slavin YN, Asnis J, Häfeli UO, Bach H. Metal nanoparticles: understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *J Nanobiotechnol.* 2017;15:120. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>
58. Mohd Yusof H, Mohamad R, Zaidan UH, Rahman A. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 2019;10:122. <https://doi.org/10.1186/s40104-019-0368-z>
59. Li G, He D, Qian Y, Guan B, Gao S, Cui Y, et al. Fungus-mediated green synthesis of silver nanoparticles using *Aspergillus terreus*. *Int. J. Mol. Sci.* 2011;13:466476. <https://doi.org/10.3390/ijms13010466>
60. Narayanan KB, Sakthivel N. Biological synthesis of metal nanoparticles by microbes. *Adv Colloid Interf Sci.* 2010;156:113. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.02.001>
61. Al-Dhabi NA, Mohammed Ghilan AK, Arasu MV. Characterization of silver nanomaterials derived from marine *Streptomyces* sp. aldhabi-87 and its in vitro application against multidrug resistant and extended spectrum beta-lactamase clinical pathogens. *Nanomaterials.* 2018;8:279. <https://doi.org/10.3390/nano8050279>
62. Khanna P, Kaur A, Goyal D. Algae-based metallic nanoparticles: Synthesis, characterization and applications. *J Microbiol Methods.* 2019;163:105656. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.105656>
63. Jadoun S, Arif R, Jangid NK, Meena RK. Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. *Environ. Chem Lett.* 2021;19:355374. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
64. Zhang H, Ji Z, Xia T, Meng H, Low-Kam C, et al. Use of metal oxide nanoparticle band gap to develop a predictive paradigm for oxidative stress and acute pulmonary inflammation. *ACS Nano.* 2012;6(5):434968. <https://doi.org/10.1021/nn3010087>
65. Adamcakova-Dodd A, Stebounova LV, Kim JS, Vorrink SU, Ault AP, et al. Toxicity assessment of zinc oxide nanoparticles using sub-acute and sub-chronic murine inhalation models. *Part. Fibre Toxicol.* 2014;11:15. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-15>
66. Maher BA, Ahmed IAM, Karloukovski V, MacLaren DA, Foulds PG, et al. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *PNAS.* 2016;113(39):10797801. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605941113>
67. Deng ZJ, Liang M, Monteiro M, Toth I, Minchin RF. Nanoparticle-induced unfolding of fibrinogen promotes Mac-1 receptor activation and inflammation. *Nat Nanotechnol.* 2011;6(1):3944. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.250>
68. Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science.* 2006;311(5761):622-27. <https://doi.org/10.1126/science.1114397>
69. Dominguez-Medina S, Kisley L, Tauzin LJ, Hoggard A, Shuang B, et al. Adsorption and unfolding of a single protein triggers nanoparticle aggregation. *ACS Nano.* 2016;10(2):210312. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b06439>
70. Cedervall T, Lynch I, Lindman S, Berggård T, Thulin E, et al. Understanding the nanoparticle protein corona using methods to quantify exchange rates and affinities of proteins for nanoparticles. *Proc Natl.* 2007;104(7):205055. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608582104>

71. McShan D, Ray PC, Yu H. Molecular toxicity mechanism of nanosilver. *J Food Drug Anal.* 2014;22(1):116127. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2014.01.010>
72. Mills NL, Miller MR, Lucking AJ, Beveridge J, Flint L, et al. Combustion-derived nanoparticulate induces the adverse vascular effects of diesel exhaust inhalation. *Eur Heart J.* 2011;32(21):266071. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehr195>
73. Pan Y, Neuss S, Leifert A, Fischler M, Wen F, et al. Size-dependent cytotoxicity of gold nanoparticles. *Small.* 2007;3(11):194149. <https://doi.org/10.1002/sml.200700378>
74. Bozich JS, Lohse SE, Torelli MD, Murphy CJ, Hamers RJ, Klaper RD. Surface chemistry, charge and ligand type impact the toxicity of gold nanoparticles to *Daphnia magna*. *Environ Sci Nano.* 2014;1(3):26070. <https://doi.org/10.1039/C4EN00006D>
75. Lee JC, Donahue ND, Mao AS, Karim A, Komarneni M, et al. Exploring maleimide-based nanoparticle surface engineering to control cellular interactions. *ACS Appl Nano Mater.* 2020;3:242129. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b02541>
76. Zhao X, Ng S, Heng BC, Guo J, Ma L, et al. Cytotoxicity of hydroxyapatite nanoparticles is shape and cell dependent. *Arch Toxicol.* 2013;87(6):103752. <https://doi.org/10.1007/s00204-012-0827-1>
77. Eldawud R, Wagner A, Dong C, Stueckle TA, Rojanasakul Y, Dinu CZ. Carbon nanotubes physicochemical properties influence the overall cellular behavior and fate. *NanoImpact.* 2018;9:7284. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2017.10.006>
78. Abudayyak M, Öztaş E, Arici M, Özhan G. Investigation of the toxicity of bismuth oxide nanoparticles in various cell lines. *Chemosphere.* 2017;169:11723. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.018>
79. Fahmy HM, Ebrahim NM, Gaber MH. In-vitro evaluation of copper/copper oxide nanoparticles cytotoxicity and genotoxicity in normal and cancer lung cell lines. *J Trace Elem Med Biol.* 2020;60: 126481. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.12481>
80. Lojk J, Repas J, Veranič P, Bregar VB, Pavlin M. Toxicity mechanisms of selected engineered nanoparticles on human neural cells *in vitro*. *Toxicology.* 2020;432: 152364. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2020.152364>
81. Bayda S, Adeel M, Tuccinardi T, Cordani M, Rizzolio F. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules.* 2019;25(1):112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
82. Kumah EA, Fopa RD, Harati S, Boadu P, Zohoori FV, Pak T. Human and environmental impacts of nanoparticles: a scoping review of the current literature. *BMC Public Health.* 2023;23:1059. <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15958-4>
83. Gottschalka F, Nowack B. The release of engineered nanomaterials to the environment. *J Environ Monitor.* 2011;13:114555. <https://doi.org/10.1039/c0em00547a>
84. Bundschuh M, Filser J, Lüderwald S, McKee MS, Metreveli G, Schau-mann GE, et al. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? *Environ Sci Eur.* 2018;30(1):6. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0132-6>
85. Lin D, Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ Pollut.* 2007;150(2):24350. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.016>
86. Yang L, Watts DJ. Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles. *Toxicol Lett.* 2005;158(2):12232. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2005.03.003>
87. Gökçe D. Influences of nanoparticles on aquatic organisms: current situation of nanoparticles effects in aquatic ecosystems. *Sust Eng Innov.* 2021;3(1):5460. <https://doi.org/10.37868/sei.v3i1.id136>
88. Ali A, Fareed Z, Nadeem SM, Naseem H, Ghouri KFK, Qazi MS, Khan MF. Nanotechnologies: AI Weapons Governing the Military Battle Field. *Foundation University Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2022;3:1-13. <https://doi.org/10.33897/fujeas.v3i1.381>
89. Baber Z. An undifferentiated mass of gray goo? *Nanotechnology and society. Bulletin of Science, Technology & Society.* 2004;24(1):1012. <https://doi.org/10.1177/0270467604263111>
90. Goyal AK, Rath G, Garg T. Nanotechnological approaches for genetic immunization. *DNA and RNA Nanobiotechnologies in Medicine: Diagnosis and Treatment of Diseases.* 2013;67120. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36853-0>

91. Kita R, Dobashi T. Introduction of Nano/Micro science and technology in Biorheology. Nano/Micro Science and Technology in Biorheology. *Principles Methods Applications*. 2015;16.
<https://doi.org/10.1007/978-4-431-54886-7-1>
92. Azeez SS, Hamad RS, Hamad BK, Shekha MS, Bergsten P. Advances in CRISPR-Cas technology and ins applications: revolutionizing precision medicine. *Front Genome Ed*.2024;6:1509924.
<https://doi.org/10.3389/fgeed.2024.1509924>
93. Fagbemi OA, Essuah M, Ugwu DS, Ajibola AB, Julius SO, Onyeyili IN, Ojo-omoniye DS. Nanobiotechnology-driven innovations for tackling antimicrobial resistance. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 2025;21(02):300-28.
<https://doi.org/10.30574/wjbphs.2025.21.2.0093>
94. Hajipour MJ, Safavi-Sohi R, Sharifi S, Mahmoud N, Ashkarran AA, Mahmoudi M. An Overview of Nanoparticle Protein Corona Literature. *Small*. 2023;19:2301838.
<https://doi.org/10.1002/smll.202301838>
95. Пальцев МА, Гинцбург АЛ, Белушкина НН. Биологическая безопасность. Глоссарий. М.: Издательский дом «Русский врач», 2006, 448 с.
Paltsev MA, Ginzburg AL, Belushkina NN. *The biological safety. Glossarium*. M.: Publishing House «Russian Doctor», 2006, 448 p. (In Russ.).

Вклад авторов / Author's contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: **И.В. Дармов** – формирование концепции статьи, написание текста рукописи, окончательное утверждение рукописи для публикации; **С.Н. Янов** – критический пересмотр и коррекция текста рукописи; **И.В. Маракулин, Я.А. Кибирев, А.А. Суслопаров** – сбор и анализ данных научной литературы, переработка текста рукописи. / All authors confirm that they meet the International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE) criteria for authorship. The most significant contributions were as follows: **I.V. Darmov** – formation of the concept of the article, drafting the manuscript, final approval of the manuscript for publication; **S.N. Yanov** – critical revision and correction of the text of the manuscript; **I.V. Maraculin, Y.A. Kibirev, A.A. Susloparov** – collection and analysis of scientific literature data, revision the manuscript.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе. / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах / Authors

Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «48 Центральный научно-исследовательский институт (г. Киров)» Министерства обороны Российской Федерации, 610000, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 119.

Дармов Илья Владимирович. Главный научный сотрудник научно- исследовательского управления, д-р мед. наук, проф.

Янов Сергей Николаевич. Старший научный сотрудник, д-р биол. наук, проф.

Маракулин Игорь Вадимович. Ведущий научный сотрудник, д-р мед. наук, ст. науч. сотр.

Кибирев Ярослав Александрович. Начальник научно-исследовательского отдела, канд. биол. наук.

Суслопаров Алексей Александрович. Начальник научно-исследовательского управления, канд. мед. наук.

Контактная информация для всех авторов: 23527@mil.ru

Контактное лицо: Дармов Илья Владимирович; 23527@mil.ru

Branch of the 48 Central Scientific Research Institute (Kirov) of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Oktyabrsky Prospect, 119, Kirov 610000, Russian Federation.

Ilya V. Darmov. Chief Researcher of the Department, Dr. Sci. (Med.), Professor.

Sergey N. Yanov. Senior Researcher of the Research Department, Dr. Sci. (Biol.), Professor.

Igor V. Maraculin. Leading Researcher of the Research Department, Dr. Sci. (Med.), Senior Researcher.

Yaroslav A. Kibirev. Chief of the Research Department, Cand. Sci. (Biol.).

Aleksey A. Susloparov. Chief of the Department, Cand. Sci. (Med.).

Contact information for all authors: 23527@mil.ru

Contact person: Ilya V. Darmov, 23527@mil.ru