

Землянова М.А.^{1,2}, Степанков М.С.¹

Физико-химические свойства наночастиц оксида вольфрама (VI) как детерминанты их токсичности и гигиенической опасности для здоровья человека (аналитический обзор литературы)

¹ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь, Россия;²ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614068, Пермь, Россия

РЕЗЮМЕ

Уникальные физико-химические свойства наночастиц оксида вольфрама (VI) (HЧ WO_3) обуславливают их широкое внедрение в различные технологии и отрасли промышленности. Доказано, что именно эти характеристики модифицируют проникающую способность и токсичность наноматериалов относительно их микроразмерных аналогов. Поэтому актуальна разработка соответствующих мер профилактики рисков для здоровья населения и работников при производстве и потреблении продукции, содержащей HЧ WO_3 , что требует систематизации знаний о механизмах токсических процессов, инициируемых HЧ оксида вольфрама при их поступлении в организм.

В настоящем обзоре отражены ключевые направления формирования и реализации цитотоксического потенциала HЧ WO_3 на клеточно-молекулярном и органно-тканевом уровнях. Предметом обзора стали результаты оригинальных исследований и данные, представленные в паспортах безопасности за последние 20 лет (59 из первоначально отобранных 185 публикаций баз данных eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar).

Систематизация данных подтвердила, что токсический потенциал HЧ WO_3 детерминирован их ультрадисперсностью, развитой удельной поверхностью, низкой растворимостью, гидрофобностью и высоким поверхностным зарядом, препятствующим агрегации. Установлено, что данные свойства обеспечивают высокую проникающую способность HЧ через клеточные мембраны, инициацию продукции свободных радикалов и прямое повреждение макромолекул. Опосредованное через нарушение экспрессии генов и белков повреждение клеточных структур приводит к их гибели по механизму апоптоза или некроза. Доказано, что развитие молекулярно-клеточных эффектов трансформируется в системные морфофункциональные нарушения: дистрофические и некротические изменения в печени, а также выраженный воспалительный процесс в тканях лёгких.

Заключение. Систематизация данных выявила дефицит сравнительных исследований токсичности HЧ WO_3 in vivo и отсутствие изолированных эпидемиологических данных. Самостоятельные гигиенические нормативы для наноразмерной формы WO_3 в Российской Федерации и других странах не установлены. Полученные результаты служат научно обоснованным фундаментом для разработки гигиенических регламентов и адресных мер профилактики, направленных на минимизацию рисков для здоровья работников и населения при производстве и потреблении продукции, содержащей HЧ оксида вольфрама.

Ключевые слова: наночастицы; оксид вольфрама; физико-химические свойства; токсичность; гигиеническая опасность для здоровья; население; работники; обзор

Для цитирования: Землянова М.А., Степанков М.С. Физико-химические свойства наночастиц оксида вольфрама (VI) как детерминанты их токсичности и гигиенической опасности для здоровья человека (аналитический обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2026; 105(7): 786–792. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-7-786-792> <https://elibrary.ru/tlvvie>

Для корреспонденции: Землянова Марина Александровна, e-mail: zem@fcrisk.ru

Вклад авторов: Землянова М.А. — постановка задачи, дизайн исследования, написание текста; Степанков М.С. — сбор и анализ литературных данных, написание текста. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счёт федерального бюджета.

Поступила: 28.04.2026 / Поступила после доработки: 28.05.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 14.08.2026

Marina A. Zemlyanova^{1,2}, Mark S. Stepankov¹

Physico-chemical properties of tungsten (VI) oxide nanoparticles as determinants of toxicity and hygienic hazard for the health of the population and workers (analytical literature review)

¹Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation;²Perm State National Research University, Perm, 614068, Russian Federation

ABSTRACT

The unique physicochemical properties of tungsten (VI) oxide nanoparticles (WO_3 NPs) determine their widespread use in human economic activities. It has been proven that these characteristics modify the penetration ability and toxicity of nanomaterials relative to their micro-sized analogues. This fact determines the relevance of developing measures to prevent risks to the health of the population and workers during the production and consumption of products, which requires systematization of knowledge about the mechanisms of toxic processes initiated by WO_3 NPs at various levels of the management of living things when they enter the body.

This review reflects the key physicochemical properties of WO_3 NPs that determine the toxicity of nanomaterials and their connection with adverse effects at the cellular-molecular and organ-tissue levels. The subject of the review was the results of original studies and data presented in safety data sheets over the past 20 years (59 of the initially selected 185 publications in the eLIBRARY.RU, PubMed, Google Scholar databases).

Systematization of data confirm the toxic WO_3 NPs potential to be determined by their small size, developed specific surface area, low solubility, hydrophobicity and high surface charge, which prevents agglomeration. These properties were established to ensure high NPs penetration through cell membranes, initiation of the production of free radicals and direct damage to macromolecules. Damage to cellular structures, mediated through disruption of gene and protein expression, leads to their death (apoptosis/necrosis). The development of molecular cellular effects has been proven to be transformed into systemic morphofunctional disorders: dystrophic and necrotic changes in the liver, as well as a pronounced inflammatory process in the lung tissues.

Conclusion. Systematization of data revealed a lack of comparative studies of the toxicity of WO_3 NPs and their micro-sized analogues under various routes and modes of exposure “in vivo”. Determining the critical determinants of toxicity and clarifying the pathogenetic mechanisms of action of tungsten oxide nanoparticles are a necessary condition for assessing the actual exposure load. The results obtained serve as the foundation for the development of scientifically based hygiene regulations and targeted preventive measures aimed at minimizing risks to the health in workers and the population during the production and consumption of products.

Keywords: nanoparticles; tungsten oxide; physicochemical properties; toxicity; hygienic health hazard; population; workers; review

For citation: Zemlyanova M.A., Stepankov M.S. Physico-chemical properties of tungsten (VI) oxide nanoparticles as determinants of toxicity and hygienic hazard of the substance for the health of the population and workers (analytical literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2026; 105(7): 786–792. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-7-786-792> <https://elibrary.ru/tlvvie> (In Russ.)

For correspondence: Marina A. Zemlyanova, e-mail: zem@fcrisk.ru

Contributions: Zemlyanova M.A. — setting the problem, study design, writing of the text; Stepankov M.S. — collection and analysis of literature data, writing of the text. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: April 28, 2026 / Revised: May 28, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: August 14, 2026

Наноматериалы представляют собой передовые структуры, характеризующиеся наличием частиц с размерами в нанодиапазоне хотя бы в одном измерении. Столь малые размеры обуславливают появление квантовых эффектов, придающих материалам с наночастицами (НЧ) в составе уникальные механические, оптические, термодинамические, электрические и прочие свойства, не характерные для микроразмерных аналогов [1]. Благодаря этому замена микроструктурных материалов на наноразмерные аналоги имеет ключевое значение для повышения качества продукции и эффективности технологических процессов в различных отраслях экономики, что приводит к активному расширению спектра применения НЧ, в том числе в отраслях, развитие которых критически важно для обеспечения национальной безопасности и поддержания стратегических направлений технологического суверенитета [2–4].

Активное и повсеместное внедрение наноматериалов не только формирует широкие технологические перспективы, но и приводит к сопутствующей экспозиции населения и работников в процессе производства и потребления продукции, содержащей НЧ оксида вольфрама, создавая труднопрогнозируемые риски для здоровья, сопряжённые с токсическим воздействием НЧ. Согласно результатам исследований, в том числе проведённых в ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», уникальные физико-химические свойства НЧ модифицируют их токсикокинетику и характер взаимодействия с биологическими объектами [5–9]. Это обуславливает большую, относительно микрочастиц (МЧ) химических аналогов, степень бионакопления и более выраженные патологические изменения на клеточно-молекулярном и органно-тканевом уровнях.

Среди востребованных наноматериалов особое место занимают НЧ оксида вольфрама (VI) (WO_3), обладающие уникальными электрическими, оптическими и электрохромными характеристиками [10]. Данные свойства определяют их широкое применение в производстве устройств для преобразования и хранения энергии, передачи информации, стёкол с заданной светопропускающей способностью, фотодетекторов. Развитая удельная площадь поверхности в сочетании с высокой фотокаталитической активностью позволяют эффективно использовать НЧ WO_3 в газовой сенсорике, технологиях очистки сточных вод и в каталитических реакциях. Особую значимость представляют биомедицинские перспективы использования НЧ WO_3 : способность к генерации активных форм кислорода (АФК) и поглощению излучения в инфракрасном диапазоне позволяет рассматривать их как перспективные агенты для терапии новообразований, адресной доставки лекарственных веществ и создания антибактериальных препаратов нового поколения.

Широкое внедрение в производство в сочетании с потенциальной токсичностью наночастиц диктует необходи-

мость разработки эффективных мер профилактики с целью минимизации рисков для здоровья населения и работников. Реализация данной задачи невозможна без систематизации накопленных данных о механизмах токсического действия, инициируемых на клеточно-молекулярном и органно-тканевом уровнях при различных путях поступления НЧ WO_3 в организм.

Актуальность аналитического обзора по данной проблеме существенно возрастает вследствие выраженного дефицита прямых эпидемиологических исследований, оценивающих изолированное влияние экспозиции НЧ WO_3 на здоровье человека. В доступных базах данных практически отсутствуют долгосрочные исследования нарушений здоровья, ассоциированных исключительно с НЧ WO_3 , поскольку в реальных условиях экспозиции наночастицы практически всегда выступают компонентом полидисперсного и многокомпонентного аэрозоля. Дифференцировать изолированный вклад именно наноразмерной фракции WO_3 на популяционном уровне не представляется возможным.

Самостоятельные гигиенические нормативы (ПДК и ОБУВ) для НЧ WO_3 как в Российской Федерации (СанПиН 1.2.3685–21), так и в международной практике (ВОЗ, ЮНЕП, IPCS и др.) не установлены. Контроль воздушной среды осуществляется по нормативам для микроразмерных химических аналогов (в Российской Федерации ПДК_{м.р.} в воздухе рабочей зоны для вольфрама оксида составляет 6 мг/м³, в атмосферном воздухе ПДК_{с.с.} — 0,15 мг/м³). При данном подходе ультрадисперсный характер наноматериала не выявляется, что приводит к недооценке реальной гигиенической опасности при определении рисков для здоровья.

Цель исследования — систематизация и аналитический обзор данных о ключевых молекулярно-клеточных и системных органно-тканевых проявлениях токсичности наночастиц оксида вольфрама (VI) с учётом их физико-химических детерминант как основы для оценки гигиенической опасности для здоровья человека.

В обзоре систематизированы данные о ключевых физико-химических детерминантах токсичности НЧ, обуславливающих развитие патологических эффектов на различных уровнях — клеточно-молекулярном и органно-тканевом. Поиск профильной литературы проводился в базах данных eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar среди публикаций на русском и английском языках за период 2004–2026 гг. Поискковые запросы включали комбинации ключевых слов: *tungsten oxide nanoparticles; solubility; surface charge; adsorption capacity; agglomeration; hydrophobicity; free radical generation; interaction with DNA/proteins/membranes; cytotoxicity; toxicity*. Критерии включения: результаты оригинальных исследований и данные паспортов безопасности (MSDS). Критерии исключения: исследования *in silico*, работы без верификации физико-химических характеристик используемых НЧ WO_3 , а также дублирующиеся данные. Из 185 идентифицирован-

ных источников после анализа релевантности заголовков и аннотаций для итогового анализа отобрано 49 публикаций.

Токсический потенциал и биологическая активность наноматериалов детерминированы их физико-химическими характеристиками. К ключевым параметрам, определяющим реакционную способность НЧ WO_3 , относятся: дисперсность (размер), удельная площадь поверхности, растворимость в воде и биосредах, поверхностный заряд, адсорбционная ёмкость, агрегативная устойчивость, гидрофобность и способность к генерации свободных радикалов. Установлено, что уменьшение размера частиц ведёт к экспоненциальному росту их числа в единице массы и увеличению удельной площади поверхности, что повышает химическую активность и риск развития патологических эффектов. Согласно изученным данным, размер синтезируемых НЧ WO_3 варьирует в широком диапазоне (от 4 до 100 нм), а показатели удельной площади поверхности достигают 1,6–65 м²/г [11–13].

Растворимость в воде и биологических средах выступает важным детерминантом токсичности наночастиц. При попадании в жидкую фазу растворимые НЧ диссоциируют с образованием ионного раствора, токсичность которого определяется преимущественно его химическим составом. Биологические эффекты слабо-растворимых и нерастворимых НЧ, сохраняющих твердофазную структуру в течение длительного времени, зависят не только от химической природы материала, но и от характеристик их поверхности. Согласно имеющимся данным, НЧ WO_3 характеризуются крайне низкой растворимостью в водной среде [11, 14–17]. Динамика растворимости вольфрамсодержащих НЧ изучена в средах, имитирующих лёгочный сурфактант и интерстициальную жидкость, а также в питательной среде для культивирования клеток эпителия бронхов [18]. Установлено, что через четыре часа экспозиции доля растворённой фракции составляет 25%, достигая 100% к 48 ч. В изотоническом растворе хлорида натрия (рН 7,4) процесс протекает менее интенсивно: растворимость не превышает 60% за аналогичный период. Анализ механизмов деградации частиц показал, что скорость уменьшения металлического ядра превышает скорость растворения всей частицы. Это подтверждается увеличением толщины оксидной плёнки (с 8,6 до 18,2 нм) на фоне сокращения диаметра ядра (с 86 до 46,6 нм) в интервале 0–48 ч.

Поверхностный заряд является фундаментальным физико-химическим параметром, определяющим характер взаимодействия НЧ с биологическими структурами (мембранами, белками, нуклеиновыми кислотами) и их агрегативную устойчивость. Согласно проанализированным данным, для НЧ WO_3 наиболее характерен отрицательный заряд поверхности. В нейтральной водной среде (рН 7,0) значения дзета-потенциала частиц, полученных различными методами синтеза, варьируют в диапазоне от минус 30,02 до минус 19,5 мВ [19], что согласуется с результатами других исследований (от минус 43,7 до минус 6 мВ) [20–23]. Электроотрицательность сохраняется и при модификации поверхности: так, при нанесении поливинилпирролидинового покрытия дзета-потенциал составил минус 7 мВ [24]. При инкубации НЧ WO_3 в модифицированной среде Игла (DMEM) также верифицирован отрицательный заряд (минус 30 мВ) [25], что указывает на стабильность данного параметра в условиях, имитирующих культивирование клеток. Несмотря на превалирование данных об электроотрицательности, в ряде работ отмечен положительный поверхностный заряд НЧ WO_3 . Так, в исследовании [26] значение дзета-потенциала наноматериала в водной среде составило плюс 31,53 мВ. Отмечено, что модификация поверхности положительно заряженных НЧ WO_3 поливинилпирролидоном приводит к двукратному росту показателя — до плюс 70 мВ [27].

Установлено, что характер поверхностного заряда НЧ WO_3 зависит от рН среды. Согласно результатам исследований, значение дзета-потенциала снижается с увеличением водородного показателя: от плюс 6 мВ (при рН 2,0) до минус 30 мВ (при рН 10,0) с достижением изоэлектрической точки

при рН 2,5 [28]. Несмотря на вариативность данных о значении заряда, установленные величины дзета-потенциала (как положительные, так и отрицательные) свидетельствуют о наличии выраженного электростатического отталкивания между частицами. Это обеспечивает высокую устойчивость нанодисперсной фазы НЧ WO_3 , препятствует формированию крупных агрегатов и, следовательно, способствует сохранению высокой реакционной способности и токсичности по сравнению с микроразмерными аналогами.

Установлено, что водородный показатель среды является одним из определяющих факторов агрегации наночастиц. Согласно результатам исследований [28], при увеличении рН в растворах на основе деионизированной воды наблюдается снижение скорости агрегации и уменьшение гидродинамического диаметра агрегатов НЧ WO_3 . В кислой среде (рН 2,0) вблизи изоэлектрической точки данные показатели достигают максимальных значений (~ 4,5 нм/с и 5000 нм соответственно) вследствие минимизации сил электростатического отталкивания. В нейтральных условиях (рН 7,0) скорость агрегации снижается до 0,5 нм/с, а гидродинамический диаметр — до 1000 нм. Следовательно, усиление электростатического отталкивания при удалении от точки нулевого заряда способствует стабилизации нанодисперсной фазы.

Ряд исследований подтверждает выраженную склонность НЧ WO_3 к агрегации в водной среде. Установлено, что при внесении в водную среду НЧ WO_3 , имеющих в нативном состоянии размер 40–100 нм, гидродинамический диаметр увеличивается в 2–5,5 раза — до 86–546 нм [13, 22, 23]. В некоторых случаях при исходном размере 50–100 нм показатель сохраняется на уровне 100 нм, что свидетельствует об относительной стабильности отдельных образцов [29]. Особое значение имеет тот факт, что в культуральных средах процессы агрегации протекают интенсивнее, чем в дистиллированной воде. Так, частицы диаметром 25–52 нм формируют крупные агрегаты, размер которых достигает 5000 нм [30]. Тем не менее сохранение размера агрегатов в пределах 100–1000 нм в водных растворах подтверждает наличие электростатического отталкивания, препятствующего активному притягиванию НЧ.

Гидрофобность наноматериалов является ключевым фактором, определяющим интенсивность их взаимодействия с клеточными мембранами. Считается, что выраженные гидрофобные свойства способствуют адгезии НЧ на клеточной поверхности и облегчают их последующую интернализацию. Согласно проанализированным данным, вольфрамсодержащие НЧ могут обладать различной степенью гидрофобности в зависимости от модификации поверхности. Установлено, что включение НЧ WO_3 в состав силиконовых покрытий обеспечивает их сверхгидрофобность: угол смачивания поверхности достигает 158° [31]. Аналогичная тенденция к росту гидрофобности отмечена для галлазитовых нанотрубок, покрытых WO_3 (угол смачивания 92,6°), а также для композитов на основе эпоксидной смолы и 3-меркаптопропилтриметоксисилана, для которых добавление НЧ привело к увеличению показателя с 79 до 144° [32, 33]. С другой стороны, в ряде исследований зафиксирована способность НЧ WO_3 повышать гидрофильность поверхностей. Так, нанесение покрытия из НЧ на стекло приводит к выраженному снижению угла смачивания поверхности с 35 до 5° [34]. Вариативность данных свойств, вероятно, детерминирована исходным химическим составом поверхности и способами её модификации. В литературе сведения о влиянии факторов среды на гидрофобность (гидрофильность) НЧ WO_3 ограничены и более детально представлены для микроразмерного химического аналога. Установлено, что вольфрамсодержащее покрытие на стальной подложке при комнатной температуре обладает гидрофильностью (угол смачивания 66°), однако при увеличении температуры до плюс 200–400 °С проявляются гидрофобные свойства (угол смачивания достигает 122°), при температуре плюс

600–800 °C отмечено возвращение к гидрофильному состоянию (угол смачивания уменьшается до 7°) [35].

Адгезионная способность наночастиц является ещё одним значимым фактором, определяющим их взаимодействие с клеточными мембранами и последующее внутриклеточное поступление. Согласно проанализированным данным, установлена высокая степень адгезии НЧ WO₃ к оцинкованной стали [36]; алмазоподобного углеродного покрытия с внедрёнными НЧ WO₃ к металлической подложке [37]; чернил, содержащих НЧ WO₃ и поливиниловый спирт, к стеклу с покрытием из оксида индия-олова [38].

Высокая адсорбционная ёмкость НЧ, достигающая 100% сорбции для отдельных катионов и органических молекул, обеспечивает их функцию как переносчиков токсичных веществ внутрь клетки, потенцируя сочетанный негативный эффект. Установлено, что НЧ WO₃ эффективно адсорбируют органические красители. Так, степень адсорбции метиленового синего в кислой (рН 4,5–5,4) и нейтральной (рН 7,4) средах достигает 92% за 160 мин [19, 20, 39]. В составе нанокомпозита с альгинатом кальция эффективность извлечения метилового фиолетового достигает 100% (при концентрации сорбента 1,6 г/дм³). Процесс адекватно описывается моделью Ленгмюра с максимальной адсорбционной способностью 86 мг/г [40]. Интенсивность сорбции находится в прямой зависимости от дисперсности материала: при уменьшении размера НЧ WO₃ с 73 до 7–11 нм показатель адсорбции возрастает десятикратно – с 10 до 90% и более [41]. Высокая адсорбционная активность НЧ WO₃ подтверждена в отношении ионов металлов (наиболее часто упоминаются свинец, кадмий, медь, железо, никель, хром и ртуть). Например, в экспериментах с ионами кадмия (Cd²⁺) установлено, что при экспозиции 150 мг наноматериала в нейтральных растворах с концентрацией 2–10 мг/дм³ адсорбционное равновесие достигается через 35 мин (при температуре плюс 25 °C), обеспечивая извлечение до 68% ионов металла. Модификация (функционализация) НЧ WO₃ углеродными точками существенно интенсифицирует процесс: время достижения равновесия сокращается до 20 мин [42]. Высокая сорбционная активность НЧ WO₃ подтверждается также данными об их способности связывать фосфаты [43]. При экспозиции наноматериала в сточных водах эффективность адсорбции за 40 мин достигает 75%, при этом адсорбционная ёмкость составляет 38 мг/г. Следовательно, выраженная адсорбционная способность НЧ WO₃ создаёт условия для концентрирования на их поверхности и последующего внутриклеточного транспорта веществ органической и неорганической природы. Данный механизм («эффект троянского коня») способствует росту токсической нагрузки на организм и может приводить к синергизму негативных эффектов при сочетании воздействии.

Триггерным механизмом токсического действия рассматриваемых НЧ является инициация избыточной генерации свободных радикалов как на поверхности клеточных мембран, так и во внутриклеточном пространстве, что ведёт к развитию декомпенсированного окислительного стресса. Вследствие высокой реакционной способности наночастиц данный процесс протекает значительно интенсивнее, чем при воздействии микроразмерных аналогов. Проокислительная активность НЧ WO₃ верифицирована *in vitro* на различных биологических моделях, в том числе на бактериальных, растительных и животных клетках. При экспозиции первичных мезенхимальных стволовых клеток человека (hMSc), линий аденокарциномы лёгкого (A549), остеосаркомы (MNNG/HOS) и меланомы кожи зафиксировано дозозависимое увеличение уровня внутриклеточных АФК, достигающее четырёхкратных значений относительно контроля [25, 44, 45]. Эксперименты на бактериальных моделях (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*) подтверждают, что в результате электростатического притяжения НЧ WO₃ взаимодействуют с клеточной стенкой, инициируя избыточную продукцию супероксид-аниона, гидроксильного ра-

дикала, пероксида водорода и синглетного кислорода [39]. Развитие окислительного стресса отмечено в растительных клетках (полученных от *Ocimum basilicum*), где экспозиция НЧ WO₃ (50–300 мг/дм³) в течение 48 ч вызывала разнонаправленное изменение содержания антиоксидантных ферментов: активность супероксиддисмутазы и каталазы возрастала (в 2,5 раза относительно контроля), в то время как активность пероксидазы снижалась в 2,2 раза [29]. Характер изменения активности аскорбатпероксидазы имел дозозависимый нелинейный характер. При воздействии НЧ в концентрациях 50–100 мг/дм³ значение данного показателя увеличивалось, но при концентрациях 200–300 мг/дм³ снижалось. Предположительно, это свидетельствует об ингибировании антиоксидантных процессов при увеличении концентрации наноматериала.

Вероятно, благодаря усилению генерации свободных радикалов НЧ WO₃ способны нарушать целостность клеточных мембран, что способствует их внутриклеточной интернализации. Данный эффект подтверждён результатами исследований на модели эпителия верхних дыхательных путей человека: при воздействии вольфрамсодержащих наночастиц зафиксировано снижение трансэпителиальной электрической проводимости до 27% от фонового уровня, что указывает на снижение целостности эпителиального барьера [46]. При инкубации фибробластов кожи и клеток линии A549 установлено, что НЧ WO₃ в течение 24 ч покрывают значительную площадь мембран, нарушают их целостность и проникают в цитоплазму [25, 30].

Интернализированные НЧ вступают в прямое взаимодействие с внутриклеточными органеллами и макромолекулами, вызывая нарушение их функций и структуры. НЧ WO₃ конъюгируют с ДНК человека в течение 30 мин экспозиции [47]. Предположительно, данный процесс обусловлен формированием связей с фосфатными группами и электростатическим взаимодействием. В дальнейшем это инициирует окислительное повреждение молекул ДНК, что подтверждается значимым повышением уровня 8-оксо-2'-дезоксигуанизина (маркера окислительной модификации ДНК) в культурах гепатоцитов крыс и клетках линии A549 [25, 48]. В экспериментах *in vivo* при острой и подострой пероральной экспозиции крыс (1000 мг/кг) также доказан генотоксический эффект: выявлены разрывы ДНК в лимфоцитах и гепатоцитах, а также рост числа микроядер и хромосомных aberrаций в полихроматофильных эритроцитах [49].

Генотоксический потенциал НЧ WO₃ подтверждён на бактериальных и растительных моделях. Экспозиция изолированной плазмидной ДНК *E. coli* в течение 24 ч инициирует одноцепочечные разрывы, что верифицируется ростом доли релаксированной формы нуклеиновой кислоты относительно сверхспирализованной [50]. Последующая трансформация данных плазмид в клетки *E. coli* ведёт к резкому снижению выживаемости бактерий (менее 20%) и возникновению мутаций по типу трансверсий. В тестах на *Allium cepa* установлено, что рассматриваемые НЧ вызывают дозозависимое угнетение митотического индекса и развитие выраженных хромосомных aberrаций [51]. Зафиксированы такие аномалии, как анафазно-телофазные мосты, отставание и слипание хромосом. Патогенез данных нарушений может быть обусловлен ингибированием репликации и полимеризации ДНК, нарушением процессов спирализации хроматина, а также деструкцией микротрубочек и веретена деления.

Взаимодействие НЧ WO₃ с белковыми макромолекулами изучено фрагментарно. Установлено, что экспозиция эритроцитов человека в суспензии НЧ (12,5 мг/см³) в течение двух часов инициирует гемолиз [52]. Предполагается, что триггером разрушения клеток служит формирование «белковой короны» (protein corona) при контакте наночастиц с белками крови и мембранными протеинами. Данный процесс ведёт к конформационным изменениям структуры белков и нарушению целостности эритроцитарных мембран.

Деструкция ДНК и белков под влиянием HfO_2 неизбежно вызывает нарушение экспрессии генов и развитие глубокого дисметаболизма. Установлено, что воздействие наночастиц на первичные и иммортализованные клеточные линии человека приводит к разнонаправленной модуляции экспрессии целевых генов и белков, регулирующих гомеостаз АФК, антиоксидантный ответ, воспалительные реакции, а также процессы апоптоза, некроза, аутофагии и пролиферации [25, 44, 45]. Специфический эффект зафиксирован на модели *Streptococcus agalactiae*: экспозиция HfO_2 вызывает репрессию генов, ответственных за синтез белков антибиотикорезистентности (например, к тетрациклину и эритромицину) [26].

Каскад молекулярных нарушений закономерно трансформируется в выраженные цитотоксические эффекты. Экспозиция HfO_2 инициирует воспалительный ответ, подавление пролиферации и деструкцию цитоскелета, а также кариопикноз в форме дефрагментации и протрузий ядерной мембраны [44, 46]. Финальным этапом цитотоксического действия является гибель клеток, имеющая дозо- и экспозиционно-зависимый характер [44]. Согласно результатам МТТ-теста (активность дегидрогеназ), жизнеспособность линий hMSc и MNNG/HOS снижалась до уровня менее 50%, в то время как оценка по выходу лактатдегидрогеназы и окрашиванию пропидия йодидом верифицировала практически полную гибель популяций. Примечательно, что первичные клетки (hMSc) демонстрировали более высокую резистентность к воздействию HfO_2 по сравнению с опухолевыми линиями. Аналогичная летальность (выживаемость 23–73%) зафиксирована для фибробластов, гепатоцитов и клеток аденокарцином различного генеза [25, 30, 48, 53–55]. Повышение уровней эффекторных каспаз позволяет предположить, что гибель клеток при воздействии HfO_2 реализуется преимущественно по механизму апоптоза [30, 44]. Выраженная цитотоксичность данных наночастиц подтверждена в отношении широкого спектра грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов. Установлено подавление жизнеспособности (вплоть до 100%) и формирование зон ингибирования роста диаметром до 20 мм для штаммов *S. aureus*, *E. coli*, *P. aeruginosa*, *B. subtilis* и *S. agalactiae* [26, 39, 55–57].

За счёт ультрадисперсности, высокого дзета-потенциала и развитой удельной поверхности наноразмерная форма WO_3 обладает кратно большей проникающей способностью через гистогематические барьеры, детерминирует системную биоаккумуляцию и выраженное цитотоксическое, гепато- и пульмонотоксическое действие в дозах, при которых микроразмерный аналог не вызывает статистически значимых морфофункциональных нарушений в органах-мишенях. Эксперименты на крысах подтверждают значимый рост концентрации вольфрама в крови при пероральной экспозиции Hf (500 и 1000 мг/кг) [23, 49]. С системным кровотоком частицы распределяются в организме, депонируясь преимущественно в печени, почках, селезёнке, сердце, лёгких и головном мозге.

На системном уровне верифицировано развитие окислительного стресса (рост уровня малонового диальдегида на фоне угнетения каталазы и глутатиона), воспалительной реакции (лейкоцитоз) и синдрома цитолиза (повышение активности АЛТ и АСТ). В системе крови отмечают ингибирование эритропоэза (снижение уровня гемоглобина, эритроцитов и гематокрита) и развитие тромбоцитопении. Патоморфологическим субстратом гепатотоксического эффекта служат выявленные при гистологическом исследовании очаги некроза паренхимы печени [49]. Примечательно, что воздействие микроразмерного аналога в аналогичных дозах не вызывает статистически значимых изменений, что подтверждает специфичность токсического действия наноразмерной формы оксида вольфрама [23, 49]. Гепатотоксичность наноразмерного WO_3 подтверждена при курсовой внутрибрюшинной экспозиции мышей (наностержни,

10–20 мг/кг в течение 14 сут) [58]. В гомогенатах печени верифицировано развитие окислительного стресса, характеризующегося ростом уровней АФК и малонового диальдегида на фоне компенсаторного увеличения содержания глутатиона и активности супероксиддисмутазы. Инициация воспалительного ответа подтверждена повышением концентрации провоспалительных цитокинов и медиаторов: фактора некроза опухоли α (TNF- α), интерферона- γ (IFN- γ), интерлейкина-4 (IL-4), а также активацией ядерного фактора транскрипции NF- κ B. Результатом данных процессов становится повреждение паренхимы печени по типу синдрома цитолиза (гиперферментемия АЛТ и АСТ). Патоморфологическая картина характеризуется пикнозом ядер гепатоцитов и развитием гидропической дистрофии паренхиматозной ткани.

При ингаляционном пути поступления HfO_2 проявляют выраженную пульмонотоксичность. Установлено накопление наночастиц в бронхиальном дереве, альвеолах и альвеолярном интерстиции лёгких (на модели золотистых хомячков) при экспозиции в концентрациях 5–10 мг/м³ (четверо суток по 4 ч/сут) [59]. Анализ бронхоальвеолярного лаважа выявил признаки деструкции аэрогематического барьера и синдрома цитолиза (повышение активности лактатдегидрогеназы и щелочной фосфатазы). Развитие экссудативной фазы воспаления подтверждалось ростом концентрации общего белка, выбросом провоспалительного цитокина TNF- α , а также нейтрофильно-лимфоцитарной инфильтрацией. Патоморфологическая картина соответствовала начальной стадии воспалительного процесса с характерной гиперплазией лимфоидной ткани лёгких.

Заключение

Масштабное внедрение наночастиц оксида вольфрама в различные отрасли экономики формирует труднопрогнозируемые риски для здоровья населения и работников производств. Систематизация данных подтверждает наличие у HfO_2 уникальных физико-химических детерминант (ультрадисперсность, высокая сорбционная ёмкость и реакционная способность), которые радикально отличают их от макроструктурных аналогов. Данные свойства обеспечивают эффективную интернализацию частиц, их прямое и опосредованное (через окислительный стресс) повреждающее действие на макромолекулы, что ведёт к дестабилизации экспрессии генов и белков, регулирующих клеточный гомеостаз.

Патологические изменения на клеточном уровне, в том числе воспалительная реакция, деструкция цитоскелета и органоидов, обуславливают высокую цитотоксичность рассматриваемых наночастиц и инициируют гибель клеток по механизму апоптоза. Развитие молекулярно-клеточного повреждения трансформируется в системные морфофункциональные нарушения в органах-мишенях. Установлена выраженная тропность HfO_2 к тканям лёгких и печени, где токсическое действие Hf манифестирует в форме воспалительных, дистрофических и некротических процессов.

Обобщая результаты систематизации имеющихся данных, можно констатировать недостаточную изученность токсикокINETИКИ и патогенеза эффектов HfO_2 при различных режимах экспозиции *in vivo* в сравнении с микроразмерными аналогами. Эпидемиологические данные о влиянии изолированных фракций наноразмерной формы WO_3 на здоровье человека практически отсутствуют. Существующие гигиенические нормативы для HfO_2 в Российской Федерации и зарубежных странах не установлены. Дальнейшие исследования в этом направлении необходимы для формирования научно обоснованной базы гигиенического нормирования и разработки адресных мер профилактики, направленных на минимизацию рисков для здоровья работников и населения при производстве и потреблении продукции, содержащей HfO_2 .

Литература

(п.п. 1, 3–6, 8, 10–59 см. References)

2. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации. *Вестник Российской академии наук*. 2023; 93(10): 907–16. <https://doi.org/10.31857/S0869587323100055> <https://elibrary.ru/xlhbrs>
 7. Землянова М.А., Степанков М.С. Сравнительная оценка цитотоксичности медь- и цинксодержащих наночастиц как факторов риска здоровью при изолированной и комбинированной экспозиции *in vivo*. *Анализ риска здоровью*. 2025; (4): 123–32. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.12> <https://elibrary.ru/itfobm>
 9. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Степанков М.С., Пустовалова О.В., Николаева А.Е. Экспериментальное исследование механизма действия и сравнительная оценка токсичности цинксодержащих нано- и микро-частиц при подострой ингаляционной экспозиции. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(10): 1349–55. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1349-1355> <https://elibrary.ru/veuyayh>
-
- ### References
1. Adekoya J.A., Ogunniran K.O., Siyanbola T.O., Dare E.O., Revaprasadu N. Band structure, morphology, functionality, and size-dependent properties of metal nanoparticles. In: Bristow A.D., Seehra M.S., eds. *Noble and Precious Metals – Properties, Nanoscale Effects and Applications*. IntechOpen; 2018: 15–42. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72761>
 2. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossijskoi akademii nauk*. 2023; 93(10): 907–16. <https://doi.org/10.31857/S0869587323100055> <https://elibrary.ru/xlhbrs> (in Russian)
 3. Alexe G.G., Carp G.B., Tiganescu T.V., Buruiana D.L. Enhancing the performance of materials in ballistic protection using coatings – a review. *Technologies*. 2026; 14(1): 13. <https://doi.org/10.3390/technologies14010013> <https://elibrary.ru/bkflyi>
 4. Thiruvengadathan R., Wang A. Nanoenergetic materials: from materials to applications. *Nanomaterials (Basel)*. 2024; 14(19): 1574. <https://doi.org/10.3390/nano14191574> <https://elibrary.ru/armbqq>
 5. Boyadzhiev A., Wu D., Avramescu M.L., Williams A., Rasmussen P., Halappanavar S. Toxicity of metal oxide nanoparticles: looking through the lens of toxicogenomics. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25(1): 529. <https://doi.org/10.3390/ijms25010529> <https://elibrary.ru/nvpevq>
 6. Awashra M., Mlynarz P. The toxicity of nanoparticles and their interaction with cells: an in vitro metabolomic perspective. *Nanoscale Adv.* 2023; 5(10): 2674–723. <https://doi.org/10.1039/d2na00534d> <https://elibrary.ru/aipggg>
 7. Zemlyanova M.A., Stepankov M.S. Cytotoxicity of copper- and zinc-containing nanoparticles as health risk factor upon isolated and combined exposure *in vivo*: comparative assessment. *Analiz riska zdorov'yu*. 2025; (4): 123–32. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2025.4.12> <https://elibrary.ru/itfobm> (in Russian)
 8. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Stepankov M.S., Pustovalova O.V., Nikolaeva A.E. Comparative assessment of the cumulative properties of zinc oxide nanoparticles and microparticles upon oral exposure in an *in vivo* experiment. *Nanobiotechnol. Rep.* 2025; 20(6): 916–26. <https://doi.org/10.1134/S2635167625601883> <https://elibrary.ru/jzscle>
 9. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Stepankov M.S., Pustovalova O.V., Nikolaeva A.E. Experimental study of the mechanism of action and comparative assessment of the toxicity of zinc-containing nano- and microparticles under subacute inhalation exposure. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 104(10): 1349–55. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-10-1349-1355> <https://elibrary.ru/veuyayh> (in Russian)
 10. Ishfaq A.N., Uddin N., Rahman S., Mahmud Md. A brief review on applications of tungsten oxide nanoparticles. *J. Med. Nanomater. Chem.* 2025; 7(2): 216–35.
 11. US Research Nanomaterials. Tungsten Oxide Nanopowder. WO₃ Nanoparticles (WO₃, 99.9%, 60nm, Tetragonal). Available at: <https://us-nano.com/inc/sdetail/859>
 12. Supothina S., Seeharaj P., Yoriya S., Sriyudthsak M. Synthesis of tungsten oxide nanoparticles by acid precipitation method. *Ceram. Int.* 2007; 33(6): 931–6. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.02.007> <https://elibrary.ru/ybkyrb>
 13. Hasegawa G., Shimomura K., Ishihara Y. Differential genotoxicity of chemical properties and particle size of rare metal and metal oxide nanoparticles. *J. Appl. Toxicol.* 2012; 32(1): 72–80. <https://doi.org/10.1002/jat.1719>
 14. Nanografi Advanced Materials. Tungsten Oxide (WO₃) Nanopowder/Nanoparticles. Available at: <https://shop.nanografi.com/nanoparticles/tungsten-oxide-wo3-nanopowder-nanoparticles-purity-99-99-size-55-nm-tetragonal/>
 15. Getnano. Tungsten oxide nanopowder nanoparticles 20–30 nm 99.99% yellow (WO₃-113). Available at: <https://getnanomaterials.com/tungsten-oxide-nanopowder-nanoparticles-20-30-nm-99-99-yellow-wo3-113/>
 16. American Elements. Tungsten (VI) oxide nanoparticles-nanopowder. Available at: <https://americanelements.com/tungsten-vi-oxide-nanoparticles-nanopowder-1314-35-8>
 17. Tungsten(VI) oxide nanopowder, < 100 nm particle size (TEM). Merck. Available at: <https://www.sigmaaldrich.com/RU/en/product/aldrich/550086?srsltid=AfmBOooDZQmxGvdqyUubPPp21VOONHLERqQMdoVQwNK6FJVRHj60lv6>
 18. Sobrido M.S., Elodie B., Angeletti B., Malar V., George I., Chaurand P., et al. Oxidative transformation of Tungsten (W) nanoparticles potentially released in aqueous and biological media in case of Tokamak (nuclear fusion) Lost of Vacuum Accident (LOVA). *Comptes Rendus. Géoscience*. 2020; 352(8): 539–58. <https://doi.org/10.5802/crgeos.41> <https://elibrary.ru/cfudoq>
 19. Aliannezhadi M., Abbaspoor M., Shariatmadar Tehrani F., Jamali M. High photocatalytic WO₃ nanoparticles synthesized using Sol-gel method at different stirring times. *Opt. Quantum Electron.* 2023; 55(3): 250. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04540-8> <https://elibrary.ru/zjftzt>
 20. Santhosh M.V., Devaky K.S., Jayaraj M.K. Hydrothermal synthesis of WO₃ nanoparticles: Characterization and sonocatalytic study. *Mater. Today Proc.* 2020; 25(2): 183–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.418> <https://elibrary.ru/ccjmwm>
 21. Jwaziri A.K., Khaled P., Kiani S.J., Yaghouti H., Babaei R., Salavatiha Z., et al. Exploring the antiviral potential of tungsten oxide nanoparticles against herpes simplex virus type 1: a promising alternative to acyclovir. *IET Nanobiotechnol.* 2026; 2026(1): 6697780. <https://doi.org/10.1049/nbt2/6697780> <https://elibrary.ru/zmbur>
 22. Ruby A., Felicia Florence J., Asia Thabassom H. Green synthesis of tungsten trioxide nanoparticles using Selenicereus undatus peel extract and their characterization. *J. Environ. Nanotechnol.* 2025; 14(1): 415–24. <https://doi.org/10.13074/jent.2025.03.2441148> <https://elibrary.ru/axdfuv>
 23. Chinde S., Dumala N., Rahman M.F., Kamal S.S.K., Kumari S.I., Mahboob M., et al. Toxicological assessment of tungsten oxide nanoparticles in rats after acute oral exposure. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2017; 24(15): 13576–93. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8892-x> <https://elibrary.ru/ygdjqa>
 24. Silingardi F., Bonvicini F., Cassani M.C., Mazzaro R., Rubini K., Gentilomi G.A., et al. Hydroxyapatite decorated with tungsten oxide nanoparticles: new composite materials against bacterial growth. *J. Funct. Biomater.* 2022; 13(3): 88. <https://doi.org/10.3390/jfb13030088> <https://elibrary.ru/eyjbyl>
 25. Yu H.H., Chen Y.C., Su H.P., Chen L., Chen H.H., Lin K.A., et al. Comparative pulmonary toxicity assessment of tungsten trioxide and tungsten trioxide hydrate nanoparticles. *Sci. Total Environ.* 2023; 855: 158885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158885> <https://elibrary.ru/rxfhij>
 26. Salehi A., Rahimi M.K., Bagheri F. The antibacterial efficacy and effect of tungsten nanoparticles (WO₃) on the expression of tetracycline and erythromycin-resistance genes in *Streptococcus agalactiae* isolated from pregnant women. *GMS Hyg. Infect. Control.* 2025; 20: Doc40. <https://doi.org/10.3205/dgkh000569>
 27. Kim M.S., Yoon J.H., Kim H.M., Lee D.J., Hirose T., Takeda Y., et al. Amplifying photochromic response in tungsten oxide films with titanium oxide and polyvinylpyrrolidone. *Nanomaterials (Basel)*. 2024; 14(13): 1121. <https://doi.org/10.3390/nano14131121> <https://elibrary.ru/rwueim>
 28. Simelane S., Ngila J.C., Dlamini L.N. The effect of humic acid on the stability and aggregation kinetics of WO₃ nanoparticles. *Part. Sci. Technol.* 2017; 35(6): 632–42. <https://doi.org/10.1080/02726351.2017.1302536>
 29. Feizi S., Nasab M.K., Amini M., Movafeghi A., Gallego P.P., Barreal M.E. Tungsten oxide nanoparticles trigger a light-independence stress response and metabolic reprogramming from phenylpropanoids to benzoates in *Ocimum basilicum* suspension cultures. *Plant Stress.* 2026; 20: 101324. <https://doi.org/10.1016/j.jstress.2026.101324>
 30. Carpen L.G., Acasandrei M.A., Acasente T., Matei E., Lungu I., Dinescu G. *In vitro* analysis of the cytotoxic effect of two different sizes ITER-like tungsten nanoparticles on human dermal fibroblasts. *Heliyon*. 2023; 9(3): e13849. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13849> <https://elibrary.ru/ctnolv>
 31. Piri F., Merajoddin M., Piri S., Mokarian Z. Synthesis WO₃ nanoparticle via the electrochemical method and study its super-hydrophobicity properties. *Asian J. Nanosci. Mater.* 2021; 4: 240–5. <https://doi.org/10.26655/AJNANOMAT.2021.3.6>
 32. Xiao Y., Jiang N., Liao M., Pi X., Zhang Z., Peng C., et al. Hydrophobic modification of halloysite nanotubes loaded with a small amount of tungsten oxide for efficient oxidative desulfurization. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2024; 16(46): 63470–81. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c12095> <https://elibrary.ru/nvnsuk>
 33. Xavier J.R. Superior surface protection, mechanical and hydrophobic properties of silanized tungsten carbide nanoparticles encapsulated epoxy nanocomposite coated steel structures in marine environment. *Silicon.* 2022; 14(17): 11147–61. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01842-0> <https://elibrary.ru/mheiva>
 34. Park E.J., Dollinger A., Kim I.H., Seo H.O., Gantefoer G., Kim Y.D. Fabrication of a transparent and super-hydrophilic window by depositing WO₃ nanoparticles via magnetron sputtering onto a glass. *Surf. Interfaces.* 2017; 8: 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.surfint.2017.04.005> <https://elibrary.ru/svphlr>
 35. Said A., Al Abdulgader H., Alsaed D., Dmrosh Q.A., Baroud T.N., Saleh T.A. Hydrophobic tungsten oxide-based mesh modified with hexadecanoic branches for efficient oil/water separation. *J. Water Process Eng.* 2022; 49: 102931. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102931> <https://elibrary.ru/ujsmud>
 36. Salman T.A., Raheem H.M. Electrophoresis deposition of tungsten oxide nanoparticles for corrosion inhibition. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020; 1664(1): 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012053> <https://elibrary.ru/wbjnpz>
 37. Kolawole F.O., Varella L.B., Kolawole S.K., Ramirez M.A., Tschitschin A.P. Deposition and characterization of tungsten oxide (WO₃) nanoparticles incorporated diamond-like carbon coatings using pulsed-DC PECVD. *Mater. Lett.* 2021; 282: 128645. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128645> <https://elibrary.ru/qbbpiz>
 38. Jeong C.Y., Watanabe H., Tajima K. Adhesive electrochromic WO₃ thin films fabricated using a WO₃ nanoparticle-based ink. *Electrochim. Acta.* 2021; 389: 138764. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138764> <https://elibrary.ru/egolwk>

39. Thanakkasaranee S., Kasi G., Kadiravan S., Arumugam A., Al-Ghanim K.A., Riaz M.N., et al. Synthesis of tungsten oxide nanoflakes and their antibacterial and photocatalytic properties. *Fermentation*. 2023; 9(1): 54. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010054> <https://elibrary.ru/kbvyes>
40. Parveen N., Alnahdi K.M., Alsulaim G.M., Ansari S.A. Sustainable synthesis and environmental application of calcium Alginate/Tungsten oxide nanocomposites for dye removal. *J. Ind. Eng. Chem.* 2025; 150: 837–49. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.06.049> <https://elibrary.ru/yqquci>
41. Hidayat D., Purwanto A., Wang W.N., Okuyama K. Preparation of size-controlled tungsten oxide nanoparticles and evaluation of their adsorption performance. *Mater. Res. Bull.* 2010; 45(2): 165–73. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2009.09.025> <https://elibrary.ru/nasadf>
42. Smrithi S.P., Kottam N., Arpitha V., Narula A., Anilkumar G.N., Subramanian K.R.V. Tungsten oxide modified with carbon nanodots: Integrating adsorptive and photocatalytic functionalities for water remediation. *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*. 2020; 5(1): 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2020.02.005> <https://elibrary.ru/uxlirc>
43. El-Baz A., Mokhtar M., Abdo A. Effect of magnetite oxide nanoparticles and tungsten oxide nanoparticles on phosphate removal from aqueous solutions. *J. Ecol. Eng.* 2023; 24(3): 287–303. <https://doi.org/10.12911/22998993/158563> <https://elibrary.ru/zzeibw>
44. Popov A.L., Han B., Ermakov A.M., Savintseva I.V., Ermakova O.N., Popova N.R., et al. PVP-stabilized tungsten oxide nanoparticles: pH sensitive anti-cancer platform with high cytotoxicity. *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.* 2020; 108: 110494. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110494> <https://elibrary.ru/ovnvjd>
45. El Fawal G., Omar A.M., Abu-Serie M.M. Nanofibers based on zein protein loaded with tungsten oxide for cancer therapy: fabrication, characterization and *in vitro* evaluation. *Sci. Rep.* 2023; 13(1): 22216. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49190-2> <https://elibrary.ru/qnnhfh>
46. George I., Uboldi C., Bernard E., Sobrido M.S., Dine S., Hagège A., et al. Toxicological assessment of ITER-like tungsten nanoparticles using an *in vitro* 3D human airway epithelium model. *Nanomaterials (Basel)*. 2019; 9(10): 1374. <https://doi.org/10.3390/nano9101374> <https://elibrary.ru/kznzsp>
47. Kumar V.B., Sawian C.E., Mohanta D., Baruah S., Islam N.S. Physical and biophysical characteristics of nanoscale tungsten oxide particles and their interaction with human genomic DNA. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2011; 11(6): 4659–66. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.4122>
48. Turkez H., Sonmez E., Turkez O., Mokhtar Y.I., Stefano A.D., Turgut G. The risk evaluation of tungsten oxide nanoparticles in cultured rat liver cells for its safe applications in nanotechnology. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2014; 57(4): 532–41. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132014005000021>
49. Chinde S., Grover P. Toxicological assessment of nano and micron-sized tungsten oxide after 28 days repeated oral administration to Wistar rats. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* 2017; 819: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2017.05.003> <https://elibrary.ru/ktqjyl>
50. Thongkumkoon P., Sangwijit K., Chaiwong C., Thongtem S., Singjai P., Yu L.D. Direct nanomaterial-DNA contact effects on DNA and mutation induction. *Toxicol. Lett.* 2014; 226(1): 90–7. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.01.036>
51. Liman R., Bağış B., Ali M.M., Acikbas Y., Cigerci İ.H. Cytotoxic and genotoxic assessment of tungsten oxide nanoparticles in *Allium cepa* cells by Allium ana-telophase and comet assays. *J. Appl. Genet.* 2021; 62(1): 85–92. <https://doi.org/10.1007/s13353-020-00608-x> <https://elibrary.ru/sjltgf>
52. Popov A.L., Savintseva I.V., Popova N.R., Shekunova T.O., Ivanova O.S., Shcherbakov A.B., et al. PVP-stabilized tungsten oxide nanoparticles (WO₃) nanoparticles cause hemolysis of human erythrocytes in a dose-dependent manner. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2019; 10(2): 199–205. <https://elibrary.ru/lhpbfi>
53. Jakhmola A., Anton N., Anton H., Messaddeq N., Hallouard F., Klymchenko A., et al. Poly-ε-caprolactone tungsten oxide nanoparticles as a contrast agent for X-ray computed tomography. *Biomaterials*. 2014; 35(9): 2981–6. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.12.032>
54. Ivask A., Titma T., Visnapuu M., Vija H., Kakinen A., Sihtmae M., et al. Toxicity of 11 metal oxide nanoparticles to three mammalian cell types *in vitro*. *Curr. Top. Med. Chem.* 2015; 15(18): 1914–29. <https://doi.org/10.2174/1568026615666150506150109>
55. Popov A.L., Zhlobak N.M., Balko O.I., Balko O.B., Shcherbakov A.B., Popova N.R., et al. Photo-induced toxicity of tungsten oxide photochromic nanoparticles. *J. Photochem. Photobiol. B*. 2018; 178: 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.11.021> <https://elibrary.ru/xpjeil>
56. Ismail A.S., Tawfik S.M., Mady A.H., Lee Y.I. Preparation, properties, and microbial impact of tungsten (VI) oxide and zinc (II) oxide nanoparticles enriched polyethylene sebacate nanocomposites. *Polymers (Basel)*. 2021; 13(5): 718. <https://doi.org/10.3390/polym13050718> <https://elibrary.ru/yqwjwm>
57. Kettrakul P., Dulwarakorn T., Srisukkho N., Subannajui K. Low-potential arc plasma solar-powered synthesis of WO₃ nanoparticles. *ACS Omega*. 2025; 10(44): 53201–11. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07835> <https://elibrary.ru/ofqwem>
58. Mao L., Zheng L., You H., Ullah M.W., Cheng H., Guo Q., et al. A comparison of hepatotoxicity induced by different lengths of tungsten trioxide nanorods and the protective effects of melatonin in BALB/c mice. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2021; 28(30): 40793–807. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13558-6> <https://elibrary.ru/jvwzzh>
59. Prajapati M.V., Adebolu O.O., Morrow B.M., Cerreta J.M. Original Research: Evaluation of pulmonary response to inhaled tungsten (IV) oxide nanoparticles in golden Syrian hamsters. *Exp. Biol. Med. (Maywood)*. 2017; 242(1): 29–44. <https://doi.org/10.1177/1535370216665173>

Сведения об авторах

Землянова Марина Александровна, доктор мед. наук, профессор, зав. отд. биохимических и цитогенетических методов диагностики ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь, Россия; ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», 614068, Пермь, Россия. E-mail: zem@fcrisk.ru

Степанков Марк Сергеевич, мл. науч. сотр. лаб. биохимической и наносенсорной диагностики отд. биохимических и цитогенетических методов диагностики ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 614045, Пермь, Россия. E-mail: stepankov@fcrisk.ru

About the authors

Marina A. Zemlyanova, DSc (Medicine), professor, head, Biochemical and cytogenetic diagnostic techniques department, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation; Perm State National Research University, Perm, 614068, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8013-9613> E-mail: zem@fcrisk.ru

Mark S. Stepankov, junior researcher, Laboratory of biochemical and nanosensor diagnostics, Department of biochemical and cytogenetic diagnostic methods, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7226-7682> E-mail: stepankov@fcrisk.ru