

ПРОФИЛАКТИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Оригинальная статья
<https://doi.org/10.47470/dez023>
© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2026

Оценка цитотоксичности наночастиц оксида железа различной модификации, легированных серебром, на клеточных культурах *in vitro*

Федотова О.С.¹, Тамбовцева Е.А.², Давиденко А.М.², Захарова Ю.А.^{1,3}, Улитко М.В.²

¹ Институт дезинфектологии ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Москва, Россия;

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия;

³ ФГАОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Наночастицы (НЧ) оксида железа (Fe_2O_3), модифицированные серебром и проявляющие антибактериальные свойства, – перспективный материал для разработки новых подходов в дезинфектологии, позволяющий применять инновационные решения в медицине. Различные модификации НЧ, в том числе температурная обработка, приводят к формированию разных кристаллических фаз оксида железа, что также определяет вызываемый ими эффект. Перспективные разработки в медицине не исключают необходимости исследования биобезопасности данных материалов для организма пациента и медицинского персонала.

Целью исследования было изучение цитотоксичности трёх видов НЧ Fe_2O_3 , легированных серебром, на клеточных культурах.

Материалы и методы. Исследование проводилось на клеточных культурах MDCK и Vero, которые подвергали воздействию НЧ, легированных серебром, с последующим ступенчатым отжигом: НЧ Fe_2O_3 S0 – без дополнительной температурной обработки; НЧ Fe_2O_3 S200 – отожжённых при температуре 200°C; НЧ Fe_2O_3 S500 – при температуре 500°C. Оценка цитотоксичности НЧ проводили с помощью морфологического анализа монослоя клеток и МТТ-теста.

Результаты. Наибольшие морфологические изменения проявил образец НЧ Fe_2O_3 S0 в концентрации 200 мкг/мл, который в обоих типах клеток вызывал выраженную деструкцию клеточного монослоя: 3 балла на клетках Vero и 4 балла на клетках MDCK. НЧ Fe_2O_3 S200 и НЧ Fe_2O_3 S500 проявляли значительно меньшую токсичность и оказывали заметное морфологическое воздействие только в концентрации 400 мкг/мл. Показатели МТТ-теста для обеих клеточных линий продемонстрировали низкую или умеренную токсичность исследуемых НЧ в диапазоне концентраций до 200 мкг/мл.

Заключение. Таким образом, температура обжига при синтезе НЧ Fe_2O_3 может быть ключевым фактором токсичности, влияющим на их взаимодействие с клеточными культурами. Расхождения результатов МТТ-теста и морфологии клеток связаны со спецификой тестов и требуют дальнейших научных исследований с подбором протоколов и методов анализа.

Ключевые слова: наночастицы; оксид железа; клеточные культуры; морфологический анализ; МТТ-тест

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для корреспонденции: Федотова Ольга Семеновна, e-mail: fedotova.os@fncg.ru

Для цитирования: Федотова О.С., Тамбовцева Е.А., Давиденко А.М., Захарова Ю.А., Улитко М.В. Оценка цитотоксичности наночастиц оксида железа различной модификации, легированных серебром, на клеточных культурах *in vitro*. Дезинфектология. 2026; 2(2):54–64.
DOI: <https://doi.org/10.47470/dez023> EDN: <https://elibrary.ru/XSHVOI>

Поступила: 07.07.2025 / Принята к печати 24.07.2026 / Опубликовано 10.08.2026

Original Article
DOI: <https://doi.org/10.47470/dez023>
© AUTHORS, 2026

Evaluation of the Cytotoxicity of Silver-Doped Iron Oxide Nanoparticles of Various Modifications on Cell Cultures *In Vitro*

Olga S. Fedotova, E.A. Tambovtseva, A.M. Davidenko, Yu.A. Zakharova, M.V. Ulitko

¹ Institute of Disinfection, F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Moscow, Russia;

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

³ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

ABSTRACT

Introduction. Modifying iron oxide nanoparticles (Fe_2O_3 NPs) with silver enables new developments in medicine. It is also known that different temperature treatments of NPs lead to the formation of different crystalline phases of iron oxide, which ultimately influences cellular processes. The presence of promising developments in the field of medicine does not exclude the need to study the biosafety of these materials for the patient's body and medical personnel. The aim of the study was to investigate the cytotoxicity of three types of Fe_2O_3 NP samples ligated with silver in cell cultures.

Materials and methods. The study was conducted on MDCK and Vero cell cultures, which were exposed to silver-ligated NPs followed by stepwise annealing: Fe_2O_3 S0 NPs – without additional heat treatment; Fe_2O_3 S200 NPs – annealed at 200°C; Fe_2O_3 S500 NPs – at 500°C. The cytotoxicity of the NPs was assessed using monolayer morphological analysis and the MTT assay.

Results. The Fe_2O_3 S0 NP sample at a concentration of 200 $\mu\text{g}/\text{ml}$ exhibited the greatest morphological changes, causing significant destruction of the cell monolayer in both cell types: a score of 3 on Vero cells and a score of 4 on MDCK cells. Fe_2O_3 S200 and Fe_2O_3 S500 NPs exhibited significantly lower toxicity and produced a noticeable morphological effect only at a concentration of 400 $\mu\text{g}/\text{ml}$. The MTT assay results for both cell lines demonstrated low to moderate toxicity of the studied NPs in the concentration range up to 200 $\mu\text{g}/\text{ml}$.

Conclusion. Thus, the firing temperature during the synthesis of Fe_2O_3 nanoparticles may be a key factor in the toxicity of the material, affecting its interaction with cell cultures. The discrepancies in the results of the MTT test and cell morphology are related to the specific nature of the tests and require further scientific research with the selection of protocols and analysis methods.

Keywords: nanoparticles; iron oxide; cell cultures; morphological analysis; MTT assay

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interest. The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For correspondence: Olga S. Fedotova, e-mail: fedotova.os@fncg.ru

For citation: Fedotova O.S., Tambovtseva E.A., Davidenko A.M., Zakharova Yu.A., Ulitko M.V. Evaluation of the cytotoxicity of silver-doped iron oxide nanoparticles of various modifications on cell cultures *in vitro*. Disinfectology. 2026;2(2):54–64. DOI: <https://doi.org/10.47470/dez023> EDN: <https://elibrary.ru/XSHVOI>

Received: 07.07.2025 / Accepted: 24.07.2026 / Published: 10.08.2026

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы новые материалы, созданные на основе нанотехнологий, находят широкое применение в различных областях медицины. Одно из наиболее перспективных направлений — получение и изучение наночастиц оксида железа ($\text{НЧ Fe}_2\text{O}_3$), обладающих рядом уникальных свойств, отличающих эти частицы от макроразмерного аналога. При уменьшении размера частиц увеличивается удельная поверхность, что приводит к усилению каталитической активности [1]. Данное

свойство оказывает влияние на их взаимодействие с биомолекулами живых клеточных систем, в том числе бактериальных клеток и вирусных частиц. Важными отличительными особенностями НЧ являются супермагнитные свойства, которые позволяют управлять ими во внешнем магнитном поле, что открывает перспективы при визуализации процессов, происходящих в клетке [2, 3]. Также при температурной обработке частицы серебра, которые наносят на поверхность Fe_2O_3 , лучше «приживаются»: формируется более равно-

мерное и прочное покрытие [4]. Это критично для проявления синергизма: серебро само по себе обладает каталитической активностью и антибактериальными свойствами, а матрица из Fe_2O_3 даёт магнитные свойства и большую площадь поверхности. Их взаимодействие (электронное, на границе раздела фаз) усиливает общие характеристики композита. Добавление серебра к НЧ приводит к нарушению работы ферментов бактерий, а Fe_2O_3 даёт сильный антибактериальный эффект. Такие материалы перспективны для медицинских покрытий (катетеры, инструментарий, поверхности), фильтров воды или тканей.

Вышеописанные свойства НЧ Fe_2O_3 делают их весьма интересными объектами для разработки и апробации новых подходов в области дезинфектологии. Так, предложен новый подход к разработке защитных медицинских перчаток с антимикробными свойствами [5] на основе наночастиц оксидов металлов, в частности оксида цинка ZnO различной морфологической модификации [6], что открывает широкие перспективы в борьбе с инфекциями, связанными с медицинской помощью (ИСМП). Рост числа устойчивых к современным антибиотикам и дезинфицирующим средствам госпитальных штаммов микроорганизмов диктует необходимость поиска новых антимикробных наполнителей. В первую очередь это касается отделений высокого риска развития ИСМП¹, где применение защитных перчаток с антимикробным эффектом будет наиболее востребованным [7]. При этом важно учитывать не только эффективность противомикробных компонентов, но и потенциальное влияние новых наполнителей на здоровье медицинского персонала, пациентов и окружающую среду.

В число наиболее изученных наноматериалов входят наночастицы Fe_2O_3 , о чём свидетельствуют многочисленные работы, демонстрирующие их эффективность в целевой доставке лекарственных средств, и применение в магнитной гипертермии при лечении злокачественных новообразований [8]. Ряд препаратов на основе НЧ Fe_2O_3 уже прошёл клинические испытания и получил одобрение Управления по контролю за продуктами и лекарствами США [9]. Тем не менее недостаточно изучено взаимодействие НЧ Fe_2O_3 с живыми организмами.

Один из этапов современной оценки токсичности химических веществ – эксперименты на клеточных культурах [10]. Доказано, что цитотоксичность зависит от множества факторов, связанных с самим веществом (размер, форма, концентрация вещества, степень агрегации, наличие или отсутствие покрытия НЧ и др.), и от особенностей используемых биологических моделей [11–13]. На примере клеток эндотелия пупочной вены человека (HUVEC) установлено, что НЧ Fe_2O_3 могут проявлять цитотоксические свойства, индуцируя окислительный стресс с повреждением ДНК и нарушением цикла клеток [14]. В исследованиях на эпителиальных клетках лёгких A549 показано, что токсичность некоторых НЧ Fe_2O_3 (размером менее 100 нм) возрастала относительно микрочастиц (размером более 5 мкм) с уменьшением размеров структур [15]. Определили, что НЧ Fe_2O_3 с хитозановым покрытием проявляли большую токсичность в отношении раковых клеток (гепатоцеллюлярной карциномы HEP G2) без такого покрытия [16]. В то же время приведены данные о том, что НЧ Fe_2O_3 с галлат-модификацией (покрытые галловой кислотой) обладают лучшей биосовместимостью по сравнению со стандартными аналогами [17].

Целью исследования было изучение на клеточных культурах MDCK и Vero цитотоксичности трёх видов НЧ Fe_2O_3 , легированных серебром, и полученных радиационно-химическим методом при различной температурной обработке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования стали три экспериментальных образца НЧ Fe_2O_3 , изученные с использованием клеточных линий MDCK и Vero.

Наночастицы

Модифицированные НЧ Fe_2O_3 синтезированы в Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук в виде водных суспензий НЧ Fe_2O_3 , покрытых серебром, диаметром 20–30 нм и полученных радиационно-химическим методом с последующим ступенчатым отжигом:

- образец НЧ Fe_2O_3 S0, без дополнительной температурной обработки;
- образец НЧ Fe_2O_3 S200, отожжённых при температуре 200°C;
- образец НЧ Fe_2O_3 S500, отожжённых при температуре 500°C.

¹ Брико Н.И., Фельдблюм И.В., Зуева Л.П. и др. Организация и проведение эпидемиологического наблюдения и микробиологического мониторинга в учреждениях родовспоможения: Федеральные клинические рекомендации. М., 2015. 83 с.

Клеточные линии

Для получения более надёжной оценки действия исследуемых образцов НЧ Fe_2O_3 , эксперимент проводили на двух клеточных линиях. Культуры получены из Коллекции банка клеточных культур ФБУН ФНИИВИ «Виром» Роспотребнадзора.

MDCK — гетерогенная эпителиальная клеточная линия, выделена в 1958 г. в США из почки взрослой собаки. Клеточная линия относится к перевиваемым клеточным культурам, морфологически имеет эпителиоподобную полигональную или кубическую форму, и округлые ядра, расположенные в центре. Клетки формируют плотный монослой. Благодаря своим физиологическим особенностям, характерным для клеток эпителиальных тканей, MDCK используют для изучения эпителиальной полярности и трансэпителиального транспорта. MDCK также широко применяют для выделения вирусных патогенов (вируса гриппа А, В, С, энтеровируса Коксаки В-5, реовируса, аденовируса 4-го, 5-го типов, вируса чумы собак и др.).

Клеточная линия Vero выделена в Японии (1962 г.) из почки африканской зелёной марышки. Культура классифицируется как перевиваемая, морфология клеток характеризуется вытянутой веретенообразной формой, с крупным овальным ядром. Присутствуют выраженные межклеточные контакты, в процессе роста клетки образуют плотный монослой. Одним из биологических свойств данной линии является отсутствие экспрессии генов интерферона I, что позволяет использовать Vero для культивирования различных видов вирусов.

Культивирование клеток проводили с использованием питательной среды Игла MEM с солями Эрла (HiMedia, США), обогащённой эмбриональной бычьей сывороткой 10%-й (Biosera), для линий Vero и среды α -MEM и с 7%-й сывороткой — для линии MDCK. Восстановление культур клеток после криоконсервации осуществляли по стандартной методике². Субкультивирование проводили по мере формирования монослоя с коэффициентом рассева согласно паспорту клеточной культуры. Для оценки токсического воздействия НЧ Fe_2O_3 в различных модификациях клетки засеивали в 96-луночные культуральные планшеты (SPL Life Sciences, Республика Корея) из расчёта посадочной дозы 2×10^3 кл/лунку. Планшеты

инкубировали в термостате при температуре 37°C во влажной атмосфере с содержанием 5% CO_2 .

Для оценки цитотоксичности использовали два метода: морфологический анализ клеточного монослоя и МТТ-тест.

Морфологический анализ монослоя клеток

Суспензии (на основе физиологического раствора (0,85 NaCl) НЧ Fe_2O_3 вносили в лунки планшета с клеточным монослоем методом серийных двукратных разведений. В первую лунку добавляли 200 мкл суспензии с исходной концентрацией 400 мкг/мл, после чего в шесть последующих лунок предварительно вносили по 100 мкл питательной среды Игла MEM или α -MEM — в зависимости от клеточной культуры. Из первой лунки отбирали 100 мкл суспензии и последовательно переносили в следующую, тщательно перемешивая на каждом шаге, тем самым уменьшая концентрацию вдвое. Для корректной оценки влияния НЧ на морфологию клеточного монослоя были предусмотрены два контроля. Первый контроль — монослой клеток без НЧ с физиологическим раствором (в том же объёме и при тех же условиях, что и в экспериментальных сериях). Второй контроль был направлен на то, чтобы оценить базовый фон, то есть состояние клеток в условиях, когда на них не действуют ни НЧ, ни дополнительные компоненты среды. Для этого использовали лунки с клеточным монослоем, добавляя питательную среду без сыворотки. Экспозиция клеток составляла 24, 48, 72 ч при стандартных условиях культивирования.

Наблюдение за морфологическими изменениями клеточного монослоя проводили в динамике через 24 ч, 48 ч и 72 ч с момента внесения НЧ Fe_2O_3 . Оценку выполняли с помощью инвертированного микроскопа Primovert (Zeiss, Германия) при увеличении 200×10 . Обязательным условием была оценка состояния клеток в контрольной группе. Учитывали следующие параметры: соответствие клеток их нормальной морфологии (форме, зернистости цитоплазмы и др.), целостность клеточного монослоя, наличие или отсутствие клеточного детрита. Степень изменений, произошедших под влиянием НЧ Fe_2O_3 , оценивали по балльной системе (табл. 1) согласно стандарту ГОСТ ISO 10993–5–2023³.

² Методы культивирования клеток/ под ред. Г.П. Пинаева, М.С. Богдановой. СПб.; 2008. 278 с.

³ ГОСТ ISO 10993–5–2023. Межгосударственный стандарт «Издения медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 5. Исследования на цитотоксичность методами in vitro».

Таблица 1. Качественная морфологическая шкала цитотоксичности**Table 1.** Qualitative morphological scale of cytotoxicity

Уровень, баллы	Реакция	Состояние клеточной культуры
0	Отсутствует	Дискретные интрацитоплазматические гранулы и лизис клеток отсутствуют, снижения роста клеток не наблюдается
1	Незначительная	Не более 20% клеток круглые, свободно прикреплены, не имеют интрацитоплазматических гранул или показывают изменения в морфологии; в наличии отдельные лизированные клетки, заметна только незначительная задержка роста
2	Слабая	Не более 50% клеток закруглены, свободны от интрацитоплазматических гранул, отсутствует обширный лизис клеток; наблюдается не более 50% задержки роста
3	Умеренная	Не более 70% слоев клеток содержат круглые или лизированные клетки, клеточные слои не полностью разрушены, но наблюдается более 50% задержки роста
4	Резкая	Почти полное или полное разрушение клеточных слоев

*Оценка цитотоксичности по показателю
дегидрогеназной активности
с помощью МТТ-теста*

Клетки высевали в 96-луночный культуральный планшет и инкубировали до достижения монослоя (примерно 70% конфлюэнтности), затем в лунки добавляли испытуемые НЧ по 100 мкл в концентрациях от 1×10^{-1} мг/мл до 1×10^{-6} мг/мл, разведённые в питательной среде. В качестве контроля использовали питательную среду, которую добавляли в лунки в том же объёме. Оценку цитотоксичности каждой концентрации выполняли в трёх повторностях.

После окончания инкубации клеток с НЧ Fe_2O_3 в течение 24 ч и удаления питательной среды каждую лунку трижды промывали фосфатным буфером. Затем вносили 100 мкл раствора МТТ в концентрации 1 мг/мл, после чего планшеты инкубировали при стандартных условиях в течение двух часов. После удаления среды образовавшиеся в лунках кристаллы формазана растворяли путём добавления 200 мкл органического растворителя ДМСО в каждую лунку и тщательно суспензировали. Далее проводили измерения оптической плотности полученных растворов с помощью микропланшетного ридера AMR-100 (Allsheng, Китай) при длине волны 570 нм. На основе полученных данных рассчитывали индекс цитотоксичности (IC) по следующей формуле:

$$\text{IC} = \frac{\text{ОПк} - \text{ОП}_0}{\text{ОПк}} \times 100\%,$$

где ОПк — оптическая плотность раствора формазана контрольной группы; ОП₀ — оптическая плотность раствора формазана опытной группы.

Полученные экспериментальные данные также использовали для расчёта концентрации полумаксимального ингибирования (IC_{50}) методом линейной интерполяции. Определяли концентрацию НЧ Fe_2O_3 , приводящую к 50-процентному ингибированию роста клеточной культуры. Статистический анализ данных оптической плотности выполнен с использованием критерия Манна – Уитни. Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Microsoft Excel и Jamovi 2.6.26. Различия считали значимыми при $p < 0,05$. Данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов влияния НЧ Fe_2O_3 , полученных при различной температурной обработке, на клеточной линии Vero показал, что НЧ Fe_2O_3 S0 оказывали наиболее выраженное среди всех тестируемых образцов цитотоксическое воздействие. В диапазоне концентраций 6,25–100 мкг/мл изменения в монослое отсутствовали, морфология клеток не отличалась от группы контроля. В концентрации 200 мкг/мл наблюдали значительное изменение морфологии клеток, в том числе появление округлых клеток и зернистости в цитоплазме, что может свидетельствовать о клеточном стрессе или начальных стадиях апоптоза (3 балла). При этом 30% клеток сохраняли нормальную морфологию. Дальнейшее повышение концентрации до 400 мкг/мл приводило к их полной гибели: всё поле зрения было заполнено клеточным детритом (4 балла).

Образцы НЧ Fe_2O_3 S200 и НЧ Fe_2O_3 S500 оказывали менее выраженное цитотоксическое

воздействие. У НЧ Fe_2O_3 S200 в концентрации 50 мкг/мл и ниже видимое воздействие на клеточную культуру отсутствовало. При повышении концентрации до 100 мкг/мл в поле зрения наблюдали единичные видоизменённые клетки, а при концентрации 200 мкг/мл определяли умеренное воздействие на клеточный монослой в виде нарушения структуры: в 30% встречали повреждённые клетки с уменьшением их размера (2 балла). Дальнейшее увеличение концентрации до 400 мкг/мл приводило к более значительным дегенеративным изменениям — лизису 50% клеток (3 балла). Воздействие НЧ Fe_2O_3 S500 в концентрациях 100 мкг/мл и ниже также не оказывало видимого влияния на клетки Vero, при концентрации 200 мкг/мл наблюдалось незначительное изменение монослоя (1 балл), тогда как концентрация 400 мкг/мл вызывала нарушение целостности монослоя, доля разрушенных клеток не превышала 70% (3 балла).

Исследование влияния трёх типов НЧ Fe_2O_3 (S0, S200 и S500) на морфологию монослоя клеточной линии Vero через 24, 48 и 72 ч после введения суспензии не выявило существенных различий в клетках по мере увеличения экспозиции. Морфологические показатели оставались сопоставимыми с аналогичным вариантом для каждого образца в соответствующей концентрации. Таким образом, в ходе эксперимента установлен дозозависимый эффект, тогда как временная динамика в интервале 24–72 ч отсутствовала.

При оценке влияния НЧ Fe_2O_3 на клеточную линию MDCK в отношении морфологии получены сопоставимые результаты с клеточной линией Vero. Наиболее выраженный цитотоксический эффект проявляли НЧ Fe_2O_3 S0. В диапазоне концентраций 6,25–50 мкг/мл дан-

ного образца отсутствовало видимое влияние на клеточный монослой, тогда как при взаимодействии НЧ Fe_2O_3 S0 с клеточной линией у 80% клеток сохранялась нормальная морфология (1 балл). Повышение концентрации до 200 и 400 мкг/мл приводило к разрушению монослоя от 90 до 100% (4 балла). Образцы Fe_2O_3 S200 и Fe_2O_3 S500 оказывали менее выраженное токсическое воздействие на MDCK, их влияние прослеживалось лишь при концентрации 400 мкг/мл. При этом НЧ Fe_2O_3 S200 в указанной концентрации вызывали умеренное воздействие на клетки: образование рыхлого монослоя с появлением не более 70% лизированных клеток (3 балла). С образцом Fe_2O_3 S500 при концентрации 400 мкг/мл наблюдали дегенеративные изменения структуры клеточного монослоя (не более 50% клеток) и уменьшение размеров клеток (2 балла). Стоит отметить, что временная динамика влияния НЧ Fe_2O_3 в интервале 24–72 ч на клеточную линию MDCK, как и на клетки Vero, отсутствовала. Контрольные лунки с клеточным монослоем оставались без изменений.

Дополнительно цитотоксичность НЧ Fe_2O_3 трёх типов (S0, S200 и S500) была исследована на клеточных линиях MDCK и Vero с использованием МТТ-теста в диапазоне концентраций от 6,25 до 400 мкг/мл с оценкой индекса цитотоксичности (IC_{50}).

Статистический анализ данных, выполненный с использованием критерия Манна–Уитни, показал, что для клеточной линии MDCK статистически значимые различия относительно контрольной группы наблюдались у образцов НЧ Fe_2O_3 S0 при концентрации 200 мкг/мл (опыт: $0,824 \pm 0,082$ ($n = 3$), контроль: $1,419 \pm 0,023$; $p = 0,050$), при концентрации 400 мкг/мл (опыт: $0,205 \pm 0,029$ ($n = 3$), контроль: $1,419 \pm$

Таблица 2. Среднее значение разности оптической плотности наночастиц Fe_2O_3 трёх типов (S0, S200 и S500) при различной температурной обработке на клеточной культуре MDCK ($M \pm SD$)

Table 2. The average value of the difference in the optical density of three types of Fe_2O_3 nanoparticles (S0, S200, and S500) under different temperature treatments on the MDCK cell culture ($M \pm SD$)

Исследуемое вещество	Доза наночастиц, мкг/мл								Контроль
	400	200	100	50	25	12,5	6,25	0	
НЧ Fe_2O_3 S0	$0,205 \pm 0,029^*$	$0,824 \pm 0,082^*$	$1,434 \pm 0,044$	$1,478 \pm 0,007$	$1,514 \pm 0,025$	$1,508 \pm 0,034$	$1,394 \pm 0,028$	$1,274 \pm 0,010$	$1,419 \pm 0,023$
НЧ Fe_2O_3 S200	$1,244 \pm 0,041$	$1,326 \pm 0,001$	$1,349 \pm 0,008$	$1,411 \pm 0,050$	$1,389 \pm 0,004$	$1,327 \pm 0,010$	$1,245 \pm 0,070$	$1,213 \pm 0,033$	$1,327 \pm 0,031$
НЧ Fe_2O_3 S500	$0,561 \pm 0,230^*$	$1,206 \pm 0,097$	$1,304 \pm 0,094$	$1,407 \pm 0,067$	$1,456 \pm 0,029$	$1,283 \pm 0,062$	$1,239 \pm 0,056$	$1,241 \pm 0,014$	$1,348 \pm 0,003$

Примечание. *Статистически значимое отличие от контрольной группы.

0,023; $p < 0,001$) и у НЧ Fe_2O_3 S500 при концентрации 400 мкг/мл (опыт: $0,561 \pm 0,230$ ($n = 3$), контроль: $1,348 \pm 0,003$; $p = 0,050$) (табл. 2).

Наблюдаемая тенденция носила дозозависимый характер: при снижении концентрации НЧ степень подавления показателя уменьшалась, достигая значений, близких к контрольным, при концентрациях 100–0 мкг/мл.

Для образца Fe_2O_3 S200 статистически значимых различий с контрольной группой не выявлено ни при одной из исследуемых концентраций (от 6,25 до 400 мкг/мл), что указывает на отсутствие цитотоксического воздействия данного образца в исследуемом диапазоне.

Значения IC_{50} были рассчитаны методом линейной интерполяции. Для НЧ Fe_2O_3 S0 при 400 мкг/мл составил 220 мкг/мл (до ~14% от контроля), для образцов НЧ Fe_2O_3 S200 ингибирующего эффекта практически нет, сохраняя жизнеспособность на уровне ~80–90% даже при максимальной концентрации $\text{IC}_{50} > 400$ мкг/мл и для НЧ Fe_2O_3 S500 при 400 мкг/мл до ~42%.

Статистически крайне значимые различия относительно контрольной группы наблюдались в показателях оптической плотности для клеточной линии Vero при концентрации 200 мкг/мл для образца НЧ Fe_2O_3 S0 (опыт: $1,018 \pm 0,07$ ($n = 3$), $p < 0,05$; контроль: $0,881 \pm 0,133$) и для всех исследуемых образцов НЧ при концентрации 400 мкг/мл: НЧ Fe_2O_3 S0 (опыт: $0,449 \pm 0,052$ ($n = 3$), контроль: $0,755 \pm 0,006$; $p < 0,001$), у НЧ Fe_2O_3 (опыт: $0,353 \pm 0,004$ ($n = 3$), контроль: $0,811 \pm 0,031$; $p < 0,001$), у НЧ Fe_2O_3 S500 (опыт: $0,330 \pm 0,026$ ($n = 3$), контроль: $0,869 \pm 0,049$; $p < 0,001$) (табл. 3). При более низких концентрациях достоверных отличий от контроля не обнаружено.

Для трёх типов НЧ IC_{50} оказалась выше 400 мкг/мл, при этом в ряде точек относительная жизнеспособность клеток достигала 117%, что

свидетельствует об отсутствии ингибирующего эффекта.

Результаты МТТ-теста для клеточных линий MDCK и Vero продемонстрировали низкую или умеренную токсичность исследуемых НЧ Fe_2O_3 S0, Fe_2O_3 S200 и Fe_2O_3 S500 в диапазоне концентраций до 200 мкг/мл. Также в этом диапазоне концентрации не было выявлено морфологических изменений клеток, они сохраняли нормальную форму, плотность, что подтверждает отсутствие существенного повреждающего воздействия. Для образцов НЧ Fe_2O_3 S200 и Fe_2O_3 S500 вплоть до концентрации 200 мкг/мл морфология клеток оставалась практически идентичной контролю НЧ Fe_2O_3 S0, что согласуется с высокой жизнеспособностью, обнаруженной по результатам МТТ-теста. Однако при более высоких концентрациях 400 мкг/мл наблюдалось расхождение между результатами снижения жизнеспособности в МТТ-тесте (умеренное снижение) и морфологическими данными (4 балла), особенно для образца Fe_2O_3 S0. Так, для НЧ Fe_2O_3 S0 в концентрации 200 мкг/мл жизнеспособность по МТТ-тесту оставалась на уровне 70% клеток, при этом микроскопия демонстрировала появление округлых клеток, зернистости цитоплазмы и признаки стрессовой реакции у значительной части популяции (3 балла). При концентрации 400 мкг/мл по МТТ-тесту показатель свидетельствовал об умеренном снижении, тогда как морфология указывала на 100%-ю гибель клеток и наличие клеточного детрита по всему полю зрения (4 балла).

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленное нами несоответствие результатов, полученных различными методами (морфологический анализ монослоя и МТТ-тест), могло быть связано с несколькими при-

Таблица 3. Среднее значение разности оптической плотности наночастиц Fe_2O_3 трёх типов (S0, S200 и S500) при различной температурной обработке на клеточной культуре Vero ($M \pm SD$)

Table 3. The average value of the difference in the optical density of three types of Fe_2O_3 nanoparticles (S0, S200, and S500) under different temperature treatments on the Vero cell culture ($M \pm SD$)

Исследуемое вещество	Доза наночастиц, мкг/мл								Контроль
	400	200	100	50	25	12,5	6,25	0	
НЧ Fe_2O_3 S0	$0,449 \pm 0,052^*$	$1,018 \pm 0,007^*$	$0,946 \pm 0,010$	$0,915 \pm 0,023$	$0,821 \pm 0,011$	$0,881 \pm 0,057$	$0,845 \pm 0,015$	$0,755 \pm 0,060$	$0,755 \pm 0,006$
НЧ Fe_2O_3 S200	$0,353 \pm 0,004^*$	$0,966 \pm 0,001$	$0,945 \pm 0,013$	$0,881 \pm 0,076$	$0,870 \pm 0,020$	$0,913 \pm 0,016$	$0,880 \pm 0,050$	$0,811 \pm 0,031$	$0,811 \pm 0,031$
НЧ Fe_2O_3 S500	$0,330 \pm 0,026^*$	$0,841 \pm 0,025$	$0,952 \pm 0,014$	$0,877 \pm 0,090$	$0,776 \pm 0,128$	$0,972 \pm 0,029$	$0,896 \pm 0,057$	$0,868 \pm 0,049$	$0,868 \pm 0,049$

Примечание. * — статистически значимое отличие от контрольной группы.

чинами. МТТ-тест отражает метаболическую активность митохондрий, а не структурную целостность клеток, поэтому ранние морфологические изменения в клетке не всегда сопровождаются мгновенным снижением их метаболизма. На оптические измерения прибора могли оказать влияние физические свойства наночастиц, создавая как ложное повышение, так и снижение регистрируемого сигнала. Наблюдавшиеся при этом пики жизнеспособности при средних концентрациях могли быть обусловлены и компенсаторными реакциями клеток, и взаимодействием частиц с реактивом МТТ.

Вместе с тем используемые методики согласованно свидетельствовали о наиболее выраженном токсическом действии НЧ Fe_2O_3 S0 на обе клеточные культуры образца, тогда как НЧ Fe_2O_3 S200 и НЧ Fe_2O_3 S500 оказывали значительно меньшее влияние в сопоставимых концентрациях. Такой профиль токсичности может быть обусловлен различиями в размере, степени агломерации и поверхностных свойствах самих наночастиц в связи с условиями синтеза и температурой обжига. Более плотная и менее реакционноспособная поверхность НЧ Fe_2O_3 НЧ S200 и НЧ Fe_2O_3 S500 могла снижать их взаимодействие с клеточной мембраной и структурами клетки, ответственными за метаболизм.

Несмотря на то, что клеточные линии MDCK и Vero демонстрировали сходные дозозависимые эффекты, в обеих моделях временную зависимость цитотоксического действия определить не удалось: отсутствовали морфологические изменения через 24, 48 и 72 часа в пределах каждой концентрации. Высока вероятность того, что основной процесс повреждения в клетке развивается в первые часы после экспозиции и не усиливается при дальнейшей инкубации. Это обуславливает необходимость дальнейших научных исследований.

Важные ограничения выполненного исследования, оказывающие влияние на полученные результаты, обусловлены свойствами НЧ Fe_2O_3 . Как и все металлы, они плохо диспергируются в жидкости, что может приводить к формированию агломератов, их оседанию на поверхность клеток и формированию локальных зон перегрузки. Морфологические данные в этом контексте стали важным независимым ориентиром, позволяющим выявить сильные разрушения монослоя там, где МТТ-тест давал сглаженные или нерегулярные дозозависимые кривые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования токсического влияния НЧ Fe_2O_3 различной модификации на клеточные культуры (Vero и MDCK) с использованием различных методов оценки (морфологический анализ и МТТ-тест) позволили установить зависимость от концентрации и температурного режима обработки НЧ. Наиболее токсичным оказался образец НЧ Fe_2O_3 S0, который в клетках двух типов вызывал выраженную деструкцию клеточного монослоя при концентрации 200 мкг/мл (3 балла на клетках Vero и 4 балла на MDCK). НЧ Fe_2O_3 S200 и НЧ Fe_2O_3 S500 проявляли значительно меньшую токсичность и оказывали заметное морфологическое воздействие только в концентрации 400 мкг/мл. Результаты МТТ-теста для обеих клеточных линий MDCK и Vero продемонстрировали низкую или умеренную токсичность исследуемых наночастиц в диапазоне концентраций до 200 мкг/мл. Профиль токсичности позволяет предположить, что температура обжига при синтезе НЧ Fe_2O_3 может быть ключевым фактором, влияющим на их взаимодействие с клеточными культурами, поскольку при разных температурах формируются разные кристаллические фазы оксида железа. Например, при нагреве до температуры выше 400°C метастабильная фаза $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит) переходит в более стабильную $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит), а эти фазы имеют разные магнитные и электронные свойства [18]. Поэтому важно, как частица будет взаимодействовать с клеточной мембраной (электростатические силы, адсорбция белков), какие биохимические реакции запустит внутри клетки.

Расхождения в результатах обусловлены тем, что МТТ-тест фиксирует метаболическую активность, а не структурные повреждения клеток, поэтому ранние морфологические изменения могут не отражаться на показателях жизнеспособности. Кроме того, физические свойства наночастиц способны исказить оптические измерения, провоцируя ложные пики сигнала.

В связи с этим для успешного создания материалов на основе наночастиц оксидов металлов необходимы стандартные протоколы оценки их цитотоксичности и эффективности для последующего внедрения в практику здравоохранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kvitck L., Pucek R, Panacek A, Soukupova J. Physicochemical aspects of metal nanoparticle preparation. In: *Engineered Nanomaterials – Health and Safety*. IntechOpen; 2019.

2. Weinstein J.S., Varallyay C.G., Dosa E., Gahramanov S., Hamilton B., Rooney W.D., et al. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: diagnostic magnetic resonance imaging and potential therapeutic applications in neurooncology and central nervous system inflammatory pathologies, a review. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2010; 30(1): 15–35. DOI: <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2009.192> EDN: <https://elibrary.ru/zammqn>
3. Lapusan R., Borlan R., Focsan M. Advancing MRI with magnetic nanoparticles: a comprehensive review of translational research and clinical trials. *Nanoscale Adv.* 2024;6(9):2234–59. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3na01064c> EDN: <https://elibrary.ru/esdral>
4. AlZubaidi A., Pandit V., Jawale V., Gupta M., Late D. Ag-Fe₂O₃ nanohybrids for photocatalytic degradation and antibacterial activity. *Front. Catal.* 2025;5:1655324. DOI: <https://doi.org/10.3389/fctls.2025.1655324> EDN: <https://elibrary.ru/yuijbt>
5. Захарова Ю.А., Новиков В.А., Андреев С.В., Макарова М.А. Защитные перчатки нового поколения: актуальные тенденции технологических решений и перспективы применения (научный обзор). *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.* 2025;102(5):635–46. DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-715> EDN: <https://elibrary.ru/ytnxjp>
6. Istomina L.I., Sakharov K.A., Anosova E.I., Protasova S.G., Ionov A.M., Starikova A.S., et al. New method of synthesizing ZnO/ZnO₂ particles of different morphologies in hydrogen peroxide vapor. *Mater. Chem. Phys.* 2026; 349(Pt. 1):131810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131810>
7. Захарова Ю.А., Фельдблюм И.В. Сравнительная характеристика микрофлоры, выделенной из очагов гнойно-септических инфекций с множественными и единичными случаями. *Эпидемиология и инфекционные болезни.* 2009;(5): 16–21. EDN: <https://elibrary.ru/kywcvf>
8. Montiel Schneider M.G., Martín M.J., Otarola J., Varkarelska E., Simeonov V., Lassalle V., et al. Biomedical applications of iron oxide nanoparticles: current insights progress and perspectives. *Pharmaceutics.* 2022; 14(1): 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010204> EDN: <https://elibrary.ru/rtrtccp>
9. Bobo D., Robinson K.J., Islam J., Thurecht K.J., Corrie S.R. Nanoparticle-based medicines: a review of FDA-approved materials and clinical trials to date. *Pharm. Res.* 2016; 33(10): 2373–87. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11095-016-1958-5> EDN: <https://elibrary.ru/wusrmp>
10. Федотова О.С., Захарова Ю.А., Иващенко И.А. Применение клеточных культур в токсикологических исследованиях (научный обзор). *Дезинфекционное дело.* 2026; (1): 5–21. EDN: <https://elibrary.ru/xfqshx>
11. Пономарев В.О., Демченко Н.С., Ткаченко К.А., Федотова О.С. Исследование цитотоксического воздействия квантовых точек на клеточных культурах роговицы и конъюнктивы человека в аспекте перспектив лечения инфекционного кератита. *Офтальмохирургия.* 2024; (3): 99–106. DOI: <https://doi.org/10.25276/0235-4160-2024-3-99-106> EDN: <https://elibrary.ru/abxizq>
12. Sharma A., Gorey B., Casey A. In vitro comparative cytotoxicity study of aminated polystyrene, zinc oxide and silver nanoparticles on a cervical cancer cell line. *Drug Chem. Toxicol.* 2019; 42(1): 9–23. DOI: <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1424181>
13. Meesaragandla B., Komaragiri Y., Schlüter R., Otto O., Delcea M. The impact of cell culture media on the interaction of biopolymer-functionalized gold nanoparticles with cells: mechanical and toxicological properties. *Sci. Rep.* 2022; 12(1): 16643. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20691-w> EDN: <https://elibrary.ru/jrygxr>
14. Потапович А.И., Сухан Т.О., Антипова О.А., Костюк В.А. Исследование антиоксидантной и противовоспалительной активности комплекса рутин с двухвалентным железом. *Журнал Белорусского государственного университета. Биология.* 2019; (1): 3–12. DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-1-3-12> EDN: <https://elibrary.ru/kfynhg>
15. Rafieepour A., Azari M.R., Peirovi H., Khodaghali F., Jaktaji J.P., Mehrabi Y., et al. Investigation of the effect of magnetite iron oxide particles size on cytotoxicity in A₅₄₉ cell line. *Toxicol. Ind. Health.* 2019; 35(11-12): 703–13. DOI: <https://doi.org/10.1177/0748233719888077>
16. Fahmy H.M., Shekewy S., Elhusseiny F.A., Elmekawy A. Enhanced biocompatibility by evaluating the cytotoxic and genotoxic effects of magnetic iron oxide nanoparticles and chitosan on hepatocellular carcinoma cells (HCC). *Cell Biochem. Biophys.* 2024; 82(2): 1027–42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12013-024-01256-2> EDN: <https://elibrary.ru/sdobvc>
17. Lee J., Lee J.H., Lee S.Y., Park S.A., Kim J.H., Hwang D., et al. Antioxidant iron oxide nanoparticles: their biocompatibility and bioactive properties. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24(21): 15901. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242115901> EDN: <https://elibrary.ru/shmyws>
18. Stagi L., De Toro J.A., Ardu A., Cannas C., Casu A., Lee S.S., et al. Surface effects under visible irradiation and heat treatment on the phase stability of γ-Fe₂O₃ nanoparticles and γ-Fe₂O₃-SiO₂ core-shell nanostructures. *J. Phys. Chem. C.* 2014; 118(5): 2857–66. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp4115833> EDN: <https://elibrary.ru/srfuzj>

REFERENCES

1. Kvitek L., Prucek R., Panacek A., Soukupova J. Physicochemical aspects of metal nanoparticle preparation. In: *Engineered Nanomaterials – Health and Safety*. IntechOpen; 2019.
2. Weinstein J.S., Varallyay C.G., Dosa E., Gahramanov S., Hamilton B., Rooney W.D., et al. Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: diagnostic magnetic resonance imaging and potential therapeutic applications in neurooncology and central nervous

- system inflammatory pathologies, a review. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2010; 30(1): 15–35.
DOI: <https://doi.org/10.1038/jcbfm.2009.192>
EDN: <https://elibrary.ru/zammqn>
3. Lapusan R., Borlan R., Focsan M. Advancing MRI with magnetic nanoparticles: a comprehensive review of translational research and clinical trials. *Nanoscale Adv.* 2024; 6(9): 2234–59.
DOI: <https://doi.org/10.1039/d3na01064c>
EDN: <https://elibrary.ru/esdral>
 4. AlZubaidi A., Pandit V., Jawale V., Gupta M., Late D. Ag-Fe₂O₃ nanohybrids for photocatalytic degradation and antibacterial activity. *Front. Catal.* 2025; 5: 1655324.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fctls.2025.1655324>
EDN: <https://elibrary.ru/yyijbt>
 5. Zakharova Yu.A., Novikov V.A., Andreev S.V., Markarova M.A. Next-generation protective gloves: current trends in technological solutions and application prospects (scientific review). *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii.* 2025; 102(5): 635–46.
DOI: <https://doi.org/10.36233/0372-9311-715>
EDN: <https://elibrary.ru/ytnxjp> (In Russ.)
 6. Istomina L.I., Sakharov K.A., Anosova E.I., Protasova S.G., Ionov A.M., Starikova A.S., et al. New method of synthesizing ZnO/ZnO₂ particles of different morphologies in hydrogen peroxide vapor. *Mater. Chem. Phys.* 2026; 349(Pt. 1): 131810. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131810>
 7. Zakharova Yu.A., Feldblyum I.V. Comparative characteristics of the microflora isolated from pyoseptic infection foci with multiple and sporadic cases. *Epidemiologiya i infeksionnye bolezni.* 2009; (5): 16–21.
EDN: <https://elibrary.ru/kywcvf> (In Russ.)
 8. Montiel Schneider M.G., Martín M.J., Otarola J., Vakarelska E., Simeonov V., Lassalle V., et al. Biomedical applications of iron oxide nanoparticles: current insights progress and perspectives. *Pharmaceutics.* 2022; 14(1): 204. DOI: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14010204> EDN: <https://elibrary.ru/rrtccp>
 9. Bobo D., Robinson K.J., Islam J., Thurecht K.J., Corrie S.R. Nanoparticle-based medicines: a review of FDA-approved materials and clinical trials to date. *Pharm. Res.* 2016; 33(10): 2373–87.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11095-016-1958-5>
EDN: <https://elibrary.ru/wusrmp>
 10. Fedotova O.S., Zakharova Yu.A., Ivashenko I.A. The use of cell cultures in toxicology research (scientific review). *Dezinfektsionnoe delo.* 2026; (1): 5–21. EDN: <https://elibrary.ru/xfqshx> (In Russ.)
 11. Ponomarev V.O., Demchenko N.S., Tkachenko K.A., Fedotova O.S. Investigation of the cytotoxic effect of quantum dots on human corneal and conjunctival cell cultures in the aspect of prospects for the treatment of infectious keratitis. *Oftal'mokhirurgiya.* 2024; (3): 99–106. DOI: <https://doi.org/10.25276/0235-4160-2024-3-99-106>
EDN: <https://elibrary.ru/abxizq> (In Russ.)
 12. Sharma A., Gorey B., Casey A. In vitro comparative cytotoxicity study of aminated polystyrene, zinc oxide and silver nanoparticles on a cervical cancer cell line. *Drug Chem. Toxicol.* 2019; 42(1): 9–23.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01480545.2018.1424181>
 13. Meesaragandla B., Komaragiri Y., Schlüter R., Otto O., Delcea M. The impact of cell culture media on the interaction of biopolymer-functionalized gold nanoparticles with cells: mechanical and toxicological properties. *Sci. Rep.* 2022; 12(1): 16643.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20691-w>
EDN: <https://elibrary.ru/jrygxr>
 14. Potapovich A.I., Suhan T.O., Antipova O.A., Kostyuk V.A. Research of antioxidant and anti-inflammatory activity of rutine complex with bivalent iron. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya.* 2019; (1): 3–12.
DOI: <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-1-3-12>
EDN: <https://elibrary.ru/kfynhg> (In Russ.)
 15. Rafiepour A., Azari M.R., Peirovi H., Khodaghali F., Jaktaji J.P., Mehrabi Y., et al. Investigation of the effect of magnetite iron oxide particles size on cytotoxicity in A₅₄₉ cell line. *Toxicol. Ind. Health.* 2019; 35(11-12): 703–13.
DOI: <https://doi.org/10.1177/0748233719888077>
 16. Fahmy H.M., Shekewy S., Elhusseiny F.A., Elmekawy A. Enhanced biocompatibility by evaluating the cytotoxic and genotoxic effects of magnetic iron oxide nanoparticles and chitosan on hepatocellular carcinoma cells (HCC). *Cell Biochem. Biophys.* 2024; 82(2): 1027–42.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12013-024-01256-2>
EDN: <https://elibrary.ru/sdobvc>
 17. Lee J., Lee J.H., Lee S.Y., Park S.A., Kim J.H., Hwang D., et al. Antioxidant iron oxide nanoparticles: their biocompatibility and bioactive properties. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24(21): 15901.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242115901>
EDN: <https://elibrary.ru/shmyws>
 18. Stagi L., De Toro J.A., Ardu A., Cannas C., Casu A., Lee S.S., et al. Surface effects under visible irradiation and heat treatment on the phase stability of γ-Fe₂O₃ nanoparticles and γ-Fe₂O₃-SiO₂ core-shell nanostructures. *J. Phys. Chem. C.* 2014; 118(5): 2857–66.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jp4115833>
EDN: <https://elibrary.ru/srfuzj>
- Информация об авторах**
- Федотова Ольга Семеновна — канд. биол. наук, с. н. с. отдела токсикологии (с лабораторией) Института дезинфектологии ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Москва, Россия
e-mail: fedotova.os@fncg.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1928-8211>
- Тамбовцева Екатерина Романовна — студентка каф. медицинской биохимии и биофизики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
e-mail: e.tambovtseva00@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-5962-2727>
- Давиденко Ангелина Михайловна — студентка каф. медицинской биохимии и биофизики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого

Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
e-mail: davibenkoangelina@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-1263-8018>

Захарова Юлия Александровна — д-р. мед. наук, проф., научный руководитель Института дезинфектологии ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Москва, Россия; профессор каф. эпидемиологии и дезинфектологии ФГАОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования», Москва, Россия
e-mail: zakharova.ya@fncg.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3416-0902>

Улитко Мария Валерьевна — канд. биол. наук, в. н. с. лаб. клеточных культур ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия
e-mail: mv.ulitko@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3193-2903>

Вклад авторов: *Федотова О.С.* — концепция и дизайн исследования, редактирование; *Тамбовцева Е.А.* — обработка данных, написание текста; *Давиденко А.М.* — обработка данных; *Захарова Ю.А.*, *Улитко М.В.* — редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Information about the authors

Olga S. Fedotova — Cand. Sci. (Biol.), senior researcher, Toxicology Department (with laboratory), Institute of Disinfection, F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Moscow, Russia

e-mail: fedotova.os@fncg.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1928-8211>

Ekaterina R. Tambovtseva — student, Department of medical biochemistry and biophysics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
e-mail: e.tambovtseva00@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-5962-2727>

Angelina M. Davidenko — student, Department of medical biochemistry and biophysics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
e-mail: davibenkoangelina@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-1263-8018>

Yulia A. Zakharova — Dr. Sci. (Med.), Professor, Scientific Director, Institute of Disinfection, F.F. Erisman Federal Scientific Center of Hygiene, Moscow, Russia; Professor, Department of epidemiology and disinfectology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia
e-mail: zakharova_ya@fncg.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3416-0902>

Maria V. Ulitko — Cand. Sci. (Biol.), leading researcher, Cell culture laboratory, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
e-mail: mv.ulitko@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3193-2903>

Contribution: *Fedotova O.S.* — study concept and design, editing; *Tambovtseva E.A.* — data processing, writing; *Davidenko A.M.* — data processing; *Zakharova Yu.A.*, *Ulitko M.V.* — editing. All authors — approved the final version of the article and are responsible for the integrity of all its parts.