

Оценка эффективности различных антимикробных поверхностей как способа борьбы с распространением инфекций в медицинских учреждениях

М. Ю. Чернуха^{1,2,*}, Л. Р. Аветисян^{1,2}, Э. А. Домблидес¹, К. А. Емельяненко²,
А. В. Буглак², А. М. Емельяненко², Л. Б. Бойнович²

¹ ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н. Ф. Гамалеи» Минздрава РФ, Москва

² ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН, Москва

Резюме

Актуальность. Инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи (ИСМП), остаются значимой угрозой для пациентов и систем здравоохранения, причем контактный механизм, с которым связывают до 60–70 % возникновения всех ИСМП, является ведущим. **Цель исследования** – оценить эффективность применения в условиях стационара антимикробных покрытий, разработанных в ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина» РАН. **Материалы и методы.** В рамках клинического исследования в отделении реанимации оценена эффективность четырех типов антимикробных покрытий — нержавеющей стали (К), гладкая медь (М), текстурированная лазером медь (CuT) и композитное покрытие CuO/TiO₂ (А) — на 24 объектах касания в течение 5 месяцев. Проведено систематическое исследование свыше 1440 смывов с использованием культуральных методов и MALDI-TOF. **Результаты и обсуждение.** Текстурированная медь (CuT) продемонстрировала наибольшую эффективность: микробная контаминация на ней была в 26,8 раз ниже, чем на стальных поверхностях, а частота выделения *Staphylococcus aureus* — в 43 раза ниже. Композит CuO/TiO₂, несмотря на более высокую общую микробную нагрузку (в 2,15 раза выше, чем на CuT), показал наименьшую частоту выделения *S. aureus* (1,7 %). Исследуемые покрытия снижали микробную бионагрузку по сравнению с контрольными поверхностями, не требуя изменения протоколов дезинфекции. Использование самоклеющейся медной фольги обеспечивает простоту монтажа, долговечность и экономическую целесообразность. **Заключение.** Проведенное исследование подтверждает, что медные покрытия — особенно текстурированная лазером медь и композит CuO/TiO₂ — являются эффективным барьером, значительно снижающим микробную контаминацию на поверхностях с высоким уровнем касания в госпитальных условиях, где руки медицинского персонала остаются основным фактором передачи ИСМП. Эти антимикробные поверхности не заменяют, но усиливают традиционные меры инфекционного контроля, формируя многоуровневую стратегию профилактики ИСМП в условиях реального стационара.

Ключевые слова: инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи (ИСМП); антимикробные покрытия, медные покрытия, поверхности с высоким уровнем касания, профилактика ИСМП.
Конфликт интересов не заявлен.

Для цитирования: Чернуха М. Ю., Аветисян Л. Р., Домблидес Э. А., и др. Оценка эффективности различных антимикробных поверхностей как способа борьбы с распространением инфекций в медицинских учреждениях. Эпидемиология и Вакцинопрофилактика. 2026;25(4) 92–101. <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2026-25-4-92-101>

Evaluation of the Effectiveness of Various Antimicrobial Surfaces as a Strategy to Combat the Spread of Infections in Healthcare Facilities

Chernukha M.Yu.^{1,2}, Avetisyan L.R.^{1,2}, Domblides E.A.¹, Emelyanenko K.A.², Buglak A.V.², A.M. Emelyanenko², L.B. Boinovich²

¹ Federal State Budgetary Institution "National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N. F. Gamaleya" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia.

* Для переписки: Чернуха Марина Юрьевна — д. м. н., заведующая лабораторией молекулярной эпидемиологии госпитальных инфекций, ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России, 123098, Москва, ул. Гамалеи, д. 18. Тел.: +7 (499) 193-55-94. E-mail: chernukha@gamaleya.org.

** For correspondence: Marina Yu. Chernukha — Doctor of Medicine, Head of the Laboratory of Molecular Epidemiology of Nosocomial Infections, National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N.F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, 18 Gamaleya St., Moscow, 123098, Russia. Tel.: +7 (499) 193-55-94. E-mail: chernukha@gamaleya.org.

² Federal State Budgetary Institution of Science "A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract

Relevance. Healthcare-associated infections (HAIs) remain a significant threat to patients and healthcare systems, with the contact transmission route—accounting for up to 60–70 % of all HAIs—being the predominant mode of spread. **Objective.** To evaluate the effectiveness of antimicrobial coatings developed by the FGBU "A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry" of the Russian Academy of Sciences in a hospital setting. **Materials and Methods.** A clinical study was conducted in an intensive care unit over a 5-month period to assess the efficacy of four types of antimicrobial coatings: stainless steel (C), smooth copper (M), laser-textured copper (CuT), and CuO/TiO₂ composite coating (A) on 24 high-touch surfaces. A total of 1440 surface swabs were analyzed using cultural methods and MALDI-TOF mass spectrometry. **Results and Discussion.** Laser-textured copper (CuT) demonstrated the highest overall antimicrobial efficacy: bacterial contamination levels were 26.8 times lower than on stainless steel surfaces, and the frequency of *Staphylococcus aureus* isolation was 43 times lower. The CuO/TiO₂ composite, despite exhibiting higher overall bacterial load (2.15 times higher than CuT), showed the lowest frequency of *S. aureus* detection (1.7 %). All experimental coatings consistently reduced microbial burden compared to control surfaces without requiring changes to routine disinfection protocols. The use of self-adhesive copper foils enables easy installation, durability, and cost-effectiveness. **Conclusion.** This study confirms that copper-based coatings – particularly laser-textured copper and the CuO/TiO₂ composite—are effective barriers that significantly reduce bacterial contamination on high-touch surfaces in hospital settings, where healthcare workers' hands remain the primary vector for HAI transmission. These passive antimicrobial surfaces do not replace, but significantly enhance, conventional infection control measures, contributing to a multi-layered strategy for HAI prevention in real-world clinical environments.

Keywords: Healthcare-associated infections (HAIs), antimicrobial coatings, copper coatings, high-touch surfaces, HAI prevention. No conflict of interest to declare.

For citation: CChernukha M. Yu., Avetisyan L. R., Domblides E. A., et al. Evaluation of the effectiveness of various antimicrobial surfaces as a strategy to combat the spread of infections in healthcare facilities. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2026;25(4) 92-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.31631/2073-3046-2026-25-4-92-101>

Введение

Инфекции, связанные с оказанием медицинской помощи (ИСМП), продолжают оставаться одной из наиболее острых и масштабных проблем современного здравоохранения. Они представляют собой серьёзную угрозу не только для здоровья и жизни пациентов, выступая существенным фактором заболеваемости и смертности, но и наносят значительный экономический ущерб всей системе медицинской помощи. Согласно Государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году» [1], хотя наблюдается снижение заболеваемости инфекциями, связанными с оказанием медицинской помощи (ИСМП), в 2024 году было зарегистрировано 23326 случаев ИСМП, по сравнению с 2023 г. (27124 сл.) и количество зарегистрированных случаев уменьшилось на 14 %, в целом проблема ИСМП остается значимой. Число случаев ИСМП, без учета случаев COVID-19, за отчетный год увеличилось незначительно на 3,1 % – 19158 случаев (в 2022 г. – 15837 случаев, в 2023 г. – 18556 случаев). При этом по сравнению со среднескользящим уровнем (23290 случаев) за период с 2012 по 2023 г. (без учета 2020 г. и 2021 г.) количество случаев ИСМП в 2024 г. ниже на 17,8 %. Одной из приоритетных задач является профилактика распространения множественно-резистентных внутрибольничных клонов микроорганизмов.

Ключевым следствием ИСМП является значительное увеличение продолжительности госпитализации пациента, что приводит к дополнительной

нагрузке на медицинский персонал и сокращает доступность коек для других больных. Одним из ведущих механизмов передачи ИСМП является контактный. Критически важную роль в механизме передачи ИСМП играют предметы ухода за пациентами и поверхности, с которыми происходит частый контакт [2,3]. Широкий спектр микроорганизмов способен колонизировать и загрязнять такие поверхности с высоким уровнем касания. Среди них присутствуют как грамположительные, так и грамотрицательные бактерии, различные вирусы, дрожжевые грибы и некоторые паразиты, что создаёт постоянный риск контаминации для пациентов и персонала. Во всем мире основной причиной возникновения внутрибольничных инфекций выступают патогены группы ESKAPE. Эта группа включает в себя *Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* и представителей рода *Enterobacter* [4].

Надёжным инструментом для прерывания цепочки передачи и снижения этого риска является строгое соблюдение протоколов тщательной очистки поверхностей и последующей дезинфекции. Несмотря на доказанную эффективность, эти методы ограничены из-за возможного несоблюдения протоколов, сбоев в рабочих процессах и быстрого повторного загрязнения поверхностей. В связи с этим востребованность в поиске новых эффективных универсальных методов профилактики ИСМП возрастает. В последнее время особое

внимание уделяется пассивным антимикробным поверхностям. Пассивные антимикробные поверхности – это поверхности, которые постоянно подавляют или замедляют рост микроорганизмов (бактерий, вирусов, грибов) без необходимости использования дезинфектантов, детергентов или УФ-излучения. Их главное преимущество – непрерывное действие и повышение эффективности рутинных процедур дезинфекции.

Медь является одним из наиболее изученных материалов с подтвержденной антимикробной активностью. Её поверхности эффективно снижают бионагрузку как в лабораторных условиях, так и в лечебных учреждениях, что обуславливает их практическое применение на дверных ручках, поручнях и медицинском оборудовании. Несмотря на преимущества, длительное использование выявило проблемы: возможность токсического воздействия ионов, зависимость эффективности от условий окружающей среды (загрязнение, влажность) и постепенная деградация антимикробных свойств вследствие эксплуатационного износа.

Современные исследования в области поверхностной инженерии направлены на преодоление этих недостатков путем целенаправленной модификации физико-химических свойств и морфологии медных покрытий.

Перспективным направлением является разработка композитных покрытий Cu-TiO_2 , которые сочетают антимикробные свойства меди с фотокаталитической активностью диоксида титана [5–9]. Под воздействием коротковолновой части спектра обычного больничного освещения диоксид титана генерирует реактивные формы кислорода, способные уничтожать микроорганизмы. При этом композиты на основе оксидов титана, допированные различными элементами, имеют фотоактивность в более широкой области видимого спектра.

Несмотря на обнадеживающие лабораторные данные, перенос таких фотоактивных поверхностей в реальные клинические условия остается малоизученным. Существующие исследования часто проводятся в идеализированной среде, что не позволяет в полной мере оценить эффективность покрытий в сложной больничной обстановке. Для устранения этого пробела было проведено настоящее исследование, целью которого стала объективная оценка потенциала таких поверхностей для профилактики ИСМП в условиях реального лечебного учреждения.

Цель

Оценить эффективность применения в условиях стационара антимикробных покрытий, разработанных в ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН.

Материалы и методы

В условиях стационара осуществили клинические испытания антибактериальных свойств покрытий на самоклеящейся медной фольге, включая

композитные покрытия, созданные на базе оксидов меди и титана. На протяжении пяти месяцев изучали микробную загрязненность 24 объектов касания. В роли исследуемых поверхностей касания выступали кнопки лифтов, клавиши электрических выключателей и ручки дверей. Проведено систематическое исследование свыше 1440 смывов с поверхностей касания, где оценивалась антимикробная эффективность различных видов новых покрытий в сравнении с характеристиками стальных или пластиковых поверхностей, традиционно эксплуатируемых в медицинских учреждениях. Поверхности были представлены четырьмя типами: К (контроль) – нержавеющая сталь (для электрических выключателей – АБС-пластик), А – композит оксид меди/оксид титана на текстурированной лазером медной фольге, Т – текстурированная лазером медная фольга, М – медная гладкая фольга.

Забор мазков и материала

Микробную контаминацию исследуемых поверхностей оценивали с помощью стерильных ватных тампонов (ООО «МиниМед», Россия). Питательные среды были получены из Государственного научного центра прикладной микробиологии и биотехнологии (Оболensk, Россия) и включали мясо-пептонный бульон, агар Эндо, агар Сабуро, питательную среду №1 и маннито-солевой агар с добавлением эмульсии яичного желтка. Дефибринированную сыворотку крови крупного рогатого скота приобретали у ООО «Лейтран» (Москва, Россия). Для увлажнения тампонов перед отбором проб использовали деионизированную воду типа I, полученную с помощью системы очистки Arium PRO VF (Sartorius, Германия). Стерильный 0,9 % физиологический раствор хлорида натрия (PanEco, Москва, Россия) использовали в качестве транспортной среды для доставки собранных образцов в микробиологическую лабораторию.

Процедура взятия мазков

Отбор проб проводили стерильными ватными тампонами, увлажненными деионизированной водой I типа. Перед взятием мазка на поверхность наносили 2 мл воды для облегчения сбора микроорганизмов. Для поверхностей малой площади (кнопки лифта, ~8 см²) пробы отбирали со всей доступной площади по стандартной методике. Мазки собирали ежедневно в 14:00. Регулярная дезинфекция, согласно больничному протоколу, проводилась в 8:00, что обеспечивало 6-часовой интервал до отбора проб. Тампоны помещали в стерильные пробирки с 2 мл транспортной среды и доставляли в лабораторию в течение 2 часов.

Обработка мазков и микробиологический посев

Образцы высевали на жидкие и твердые питательные среды. Для обогащения 0,1 мл транспортной среды вносили в 2 мл мясо-пептонного бульона с последующей инкубацией при 37 °C в течение

24 ч. При помутнении бульона проводили высеив на кровяной агар и агар Сабуро. Параллельно по 0,1 мл высевали на селективные твёрдые среды: агар Эндо – для выделения *Enterobacteriales* (37 °C, 24 ч); кровяной агар – для всех видов аэробных микроорганизмов (37 °C, 24 ч); маннито-солевой агар с яичным желтком – для *Staphylococcus aureus* (37 °C, 48 ч); агар Сабуро – для грибов (30 °C, 48–72 ч). После инкубации проводили подсчёт колоний и идентификацию бактерий.

Общее количество аэробных микроорганизмов (ОКАМ) в КОЕ/мл рассчитывали как среднее число колоний, выросших на чашках с учётом объёма посева, после инкубации при 30–37 °C в течение 48–72 часов.

Для проведения сравнительного анализа контаминации поверхностей применяли два взаимодополняющих подхода к оценке. Во-первых, использовали бинарный показатель контаминации для обозначения наличия или отсутствия обнаруживаемых микроорганизмов. Если обнаруживался хотя бы один микроорганизм, образцу присваивалось значение 1; если роста не было обнаружено — значение 0. Во-вторых, для учета различий в степени контаминации использовали логарифмический подход к количественной оценке. Для образцов, в которых был обнаружен микробный рост, уровень контаминации выражали как десятичный логарифм ОКАМ.

Идентификацию микроорганизмов проводили с помощью матричной лазерной десорбции/ионизации – времяпролетной масс-спектрометрии (MALDI-TOF MS). Анализ выполняли на масс-спектрометре Bruker Ultraflex Xtreme Biotyper (Bruker Daltonics, Германия), оснащённом программным обеспечением flexControl версии 3.4. Полученные спектры интерпретировали путем сравнения со справочной библиотекой MBT Compass версии 4.1.100 (Bruker Daltonics, Германия).

Статистический анализ данных по контаминации проводили с помощью программного обеспечения STATISTICA версии 10 (StatSoft, Россия). Различия между обработанными (покрытыми) и контрольными поверхностями оценивали с помощью U-критерия Манна–Уитни для количественных переменных и критерия хи-квадрат Пирсона для категориальных данных. Значение $p \leq 0,05$ считалось статистически значимым.

Результаты

В ходе исследования со всех поверхностей было выделено 49 видов бактерий. Контрольные поверхности показывали наибольшее разнообразие (36 видов). Медные имели наименьшее разнообразие – 14 видов, текстурированные – 15, композитные – 17 вида. Контрольные поверхности имели самую высокую частоту положительного посева – 64,63 %, что подтверждает их уязвимость к загрязнению. Текстурированные поверхности характеризовались наименьшей частотой

контаминированных проб – 22,67 %. Доля положительных смывов с медных поверхностей и поверхностей с композитом составила соответственно 28 % и 29 %.

На всех поверхностях преобладали *Staphylococcus epidermidis*, *Micrococcus luteus*, *Staphylococcus aureus*. Сравнительный анализ показал, что частота встречаемости данных микроорганизмов на опытных поверхностях была значительно ниже, чем на контрольной (рис. 1).

Было обнаружено, что по накопленному общему числу микробов на всех протестированных поверхностях касания (кнопки лифта + ручки + выключатели), количество детектированных бактериальных клеток К/М/Т/А соотносится как 26,8/1,61/1/2,15. То есть, на текстурированных медных покрытиях накапливается в 26,8 раза меньше бактериальных клеток, чем на стальных поверхностях. Вместе с тем, на композитных покрытиях общее микробное число оказывается в 2,15 раза больше, чем на текстурированной медной фольге ($p < 0,05$). Основная причина выявленных различий в общем микробном числе, возможно, связана с более гидрофильной (смачиваемой) поверхностью, обусловленной фотоактивностью TiO_2 , что облегчает прикрепление бактерий, нивелируя преимущества гидрофобной текстурированной меди. Постоянный контакт с кожей рук персонала приводит к загрязнению поверхности жировыми компонентами, что, в свою очередь, может влиять на способность бактерий к адгезии (прикреплению и накоплению). При этом важно отметить, что токсичность покрытий в отношении конкретных патогенных штаммов может не коррелировать с общим снижением микробной нагрузки. Покрытие, на котором в целом скапливается меньше бактерий, может иметь разную степень подавления роста, например, *S. aureus*.

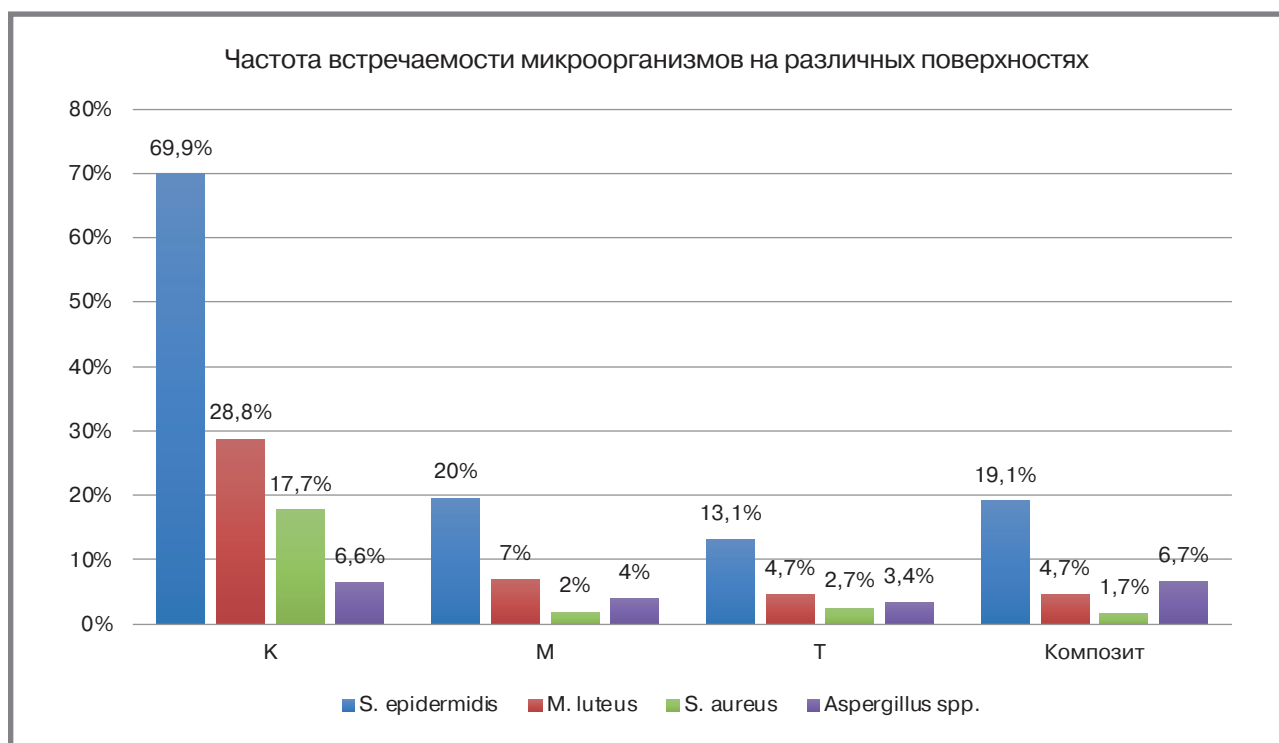
Анализ случаев выявления одного из наиболее эпидемически значимых возбудителей госпитальных инфекций *S. aureus* на всех видах поверхностей касания показал, что антибактериальные свойства лучше всего проявляются для текстурированных и композитных поверхностей: число обнаруженных бактериальных клеток *S. aureus* на различных поверхностях К/М/Т/А соотносится, как 43/2/1/1,4.

Среди изолятов, выделенных с исследуемых поверхностей, доминировал *Staphylococcus epidermidis* – комменсальный микроорганизм, обладающий, однако, значительным клиническим потенциалом в качестве возбудителя нозокомиальных инфекций, особенно у иммунокомпрометированных пациентов. Именно этот вид был наиболее частым маркером контаминации для всех типов покрытий.

Наибольшей эффективностью в подавлении *S. epidermidis* характеризовались текстурированные медные поверхности. Количественная оценка показала выраженные различия в уровне

Рисунок 1. Частота встречаемости доминирующих микроорганизмов на различных поверхностях (К (контроль) – нержавеющая сталь, А – композит оксид меди/оксид титана на текстурированной лазером медной фольге, Т – текстурированная лазером медная фольга, М – медная гладкая фольга)

Figure 1. Frequency of occurrence of dominant microorganisms on different surfaces (K (control) – stainless steel, A – copper oxide/titanium oxide composite on laser-textured copper foil, T – laser-textured copper foil, M – smooth copper foil)



микробной обсеменённости: соотношение колониеобразующих единиц на покрытиях К/М/Т/А составило 31 / 1,8 / 1 / 2,1 ($p < 0,05$).

Среди изолятов, относившихся к родам грибов, контаминирующих исследуемые поверхности, доминировали представители рода *Aspergillus spp.*, входившие также в число наиболее распространённых микроорганизмов в общей микробной картине. Этот род представляет особый интерес в контексте больницы среды, учитывая его установленную этиологическую роль в развитии оппортунистических инфекций, что определяет эпидемиологическую и клиническую значимость контроля его присутствия в госпитальной среде.

Наибольшей ингибирующей активностью в отношении *Aspergillus spp.* отличались текстурированные и композитные покрытия. Количественный анализ выявил чёткую градацию в способности поверхностей сдерживать рост грибов: соотношение КОЕ на покрытиях К/М/Т/А составило 2,4/2,3/1/1,7. Таким образом, текстурированная медь (Т) продемонстрировала наивысший ингибирующий эффект, принятый за базовую единицу, в то время как на стандартных стальных (К) и гладких медных (М) поверхностях концентрация грибов была более чем вдвое выше.

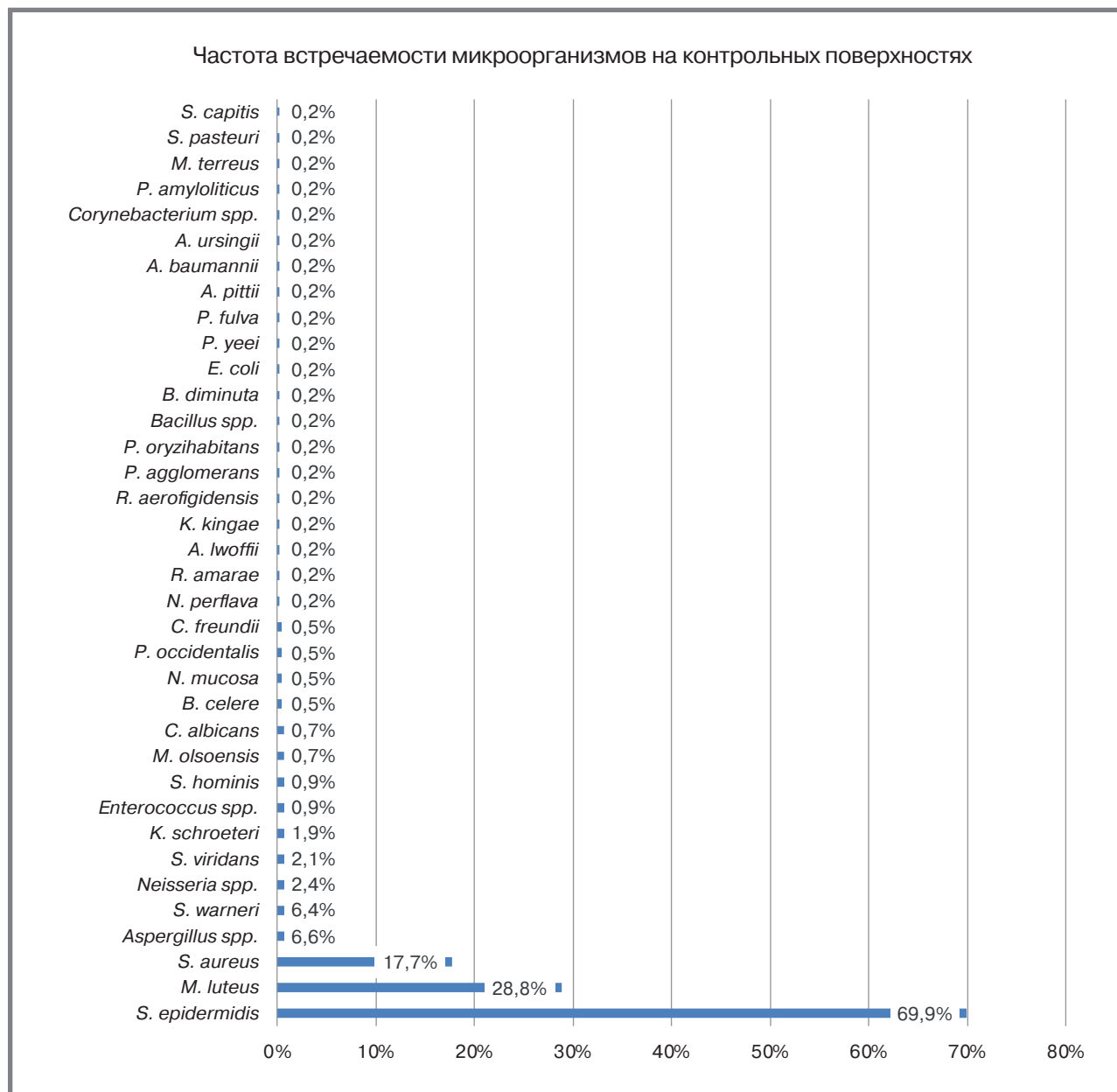
Среди других видов, представляющих эпидемиологическую значимость, на контрольных стальных покрытиях были идентифицированы представители

рода *Acinetobacter* – грамотрицательные неферментирующие бактерии (НГФБ), роль которых в этиологии внутрибольничных инфекций (ВБИ) неуклонно возрастает (рис. 2). В ходе исследования масс-спектрометрическим методом были определены следующие виды: *Acinetobacter baumannii* (0,2 %), *Acinetobacter pittii* (0,2 %), *Acinetobacter ursingii* (0,2 %) и *Acinetobacter lwoffii* (0,2 %). При этом на опытных покрытиях *Acinetobacter spp.* был обнаружен в 1 % случаев на текстурированных поверхностях (*A. lwoffii*) (рис. 4) и в 0,3 % случаев на композитных (рис. 5).

Среди прочих клинически значимых представителей НГФБ следует отметить *Burkholderia gladioli*, которая была изолирована исключительно с композитных покрытий с частотой 0,3 %. В спектре выделенной микрофлоры также были представлены различные виды рода *Pseudomonas*. *Pseudomonas fulva* детектировалась на поверхностях контрольной, медной и текстурированной групп с частотой встречаемости 0,2 %, 0,3 % и 0,7 % соответственно. Помимо этого, на стальных покрытиях идентифицирован *Pseudomonas oryzae* (0,2 %), на текстурированных – *Pseudomonas putida* (0,3 %), а на композитных – *Pseudomonas fluorescens* (0,3 %).

Escherichia coli была идентифицирована в 0,2 % случаев на стальных покрытиях контрольной группы и в 0,3 % случаев на текстурированных поверхностях. Важно отметить, что все перечисленные виды

Рисунок 2. Частота встречаемости микроорганизмов на контрольных поверхностях
Figure 2. Frequency of occurrence of microorganisms on control surfaces



микроорганизмов имели единичный характер выделения, а их количественное представительство не достигало уровня статистической значимости.

Обсуждение

Известно, что руки медицинского персонала – важнейший фактор риска контактной передачи возбудителей ИСМП, с которым связывают до 60–70 % возникновения всех ИСМП. Микрофлора кожи рук может характеризоваться наличием резидентной (нормальной) микрофлоры – это микроорганизмы, постоянно живущие и размножающиеся на коже, транзитной микрофлоры – это неколонизирующая микрофлора, приобретённая медицинским персоналом в процессе работы в результате контакта с инфицированными объектами окружающей

среды, а также патогенной и условно-патогенной микрофлоры. Исследование показало, что на всех исследуемых поверхностях преобладали представители родов *Staphylococcus* (*S. epidermidis*, *S. aureus*) и *Micrococcus* (*M. luteus*), что закономерно отражает их статус основных компонентов резидентной микробиоты кожи человека – главного источника контаминации контактных поверхностей в условиях медицинского стационара.

Проведенное исследование показало, что на текстурированных медных покрытиях накапливается в 26,8 раза меньше бактериальных клеток различных микроорганизмов, чем на стальных поверхностях. Перед началом работы предполагалось, что композитные покрытия, состоящие из оксида меди и оксида титана, будут обладать большей

Рисунок 3. Частота встречаемости микроорганизмов на медных поверхностях
Figure 3. Frequency of occurrence of microorganisms on copper surfaces

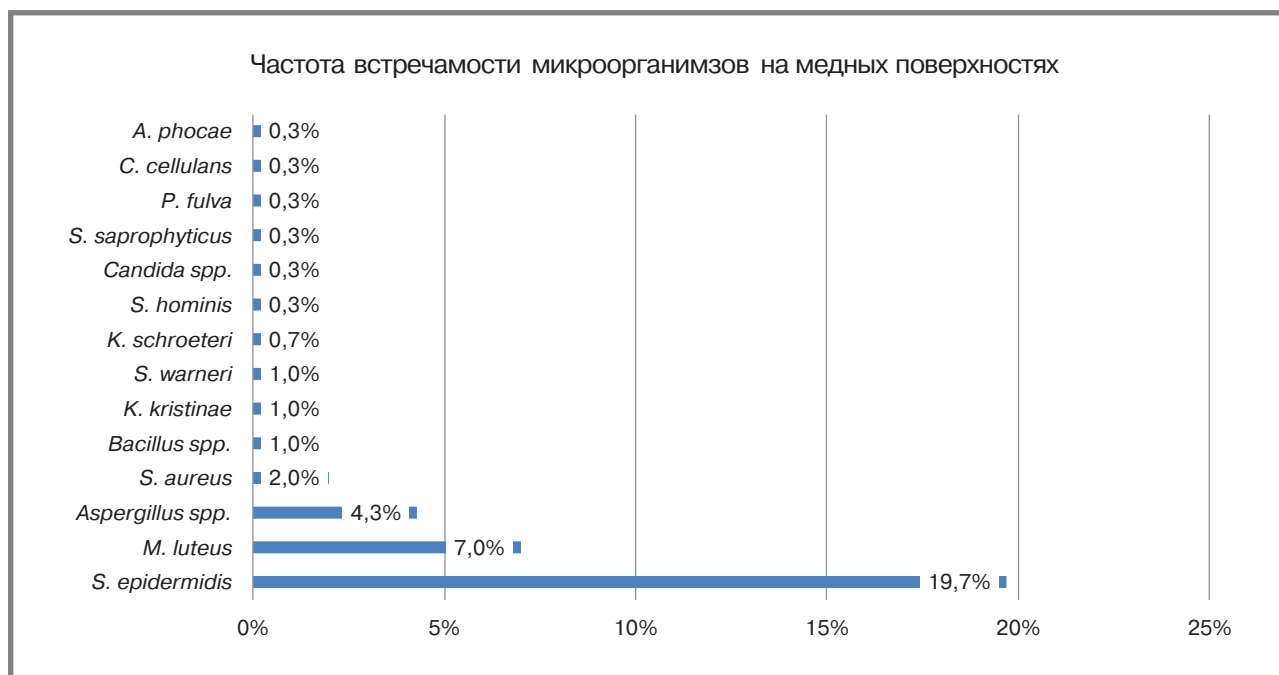


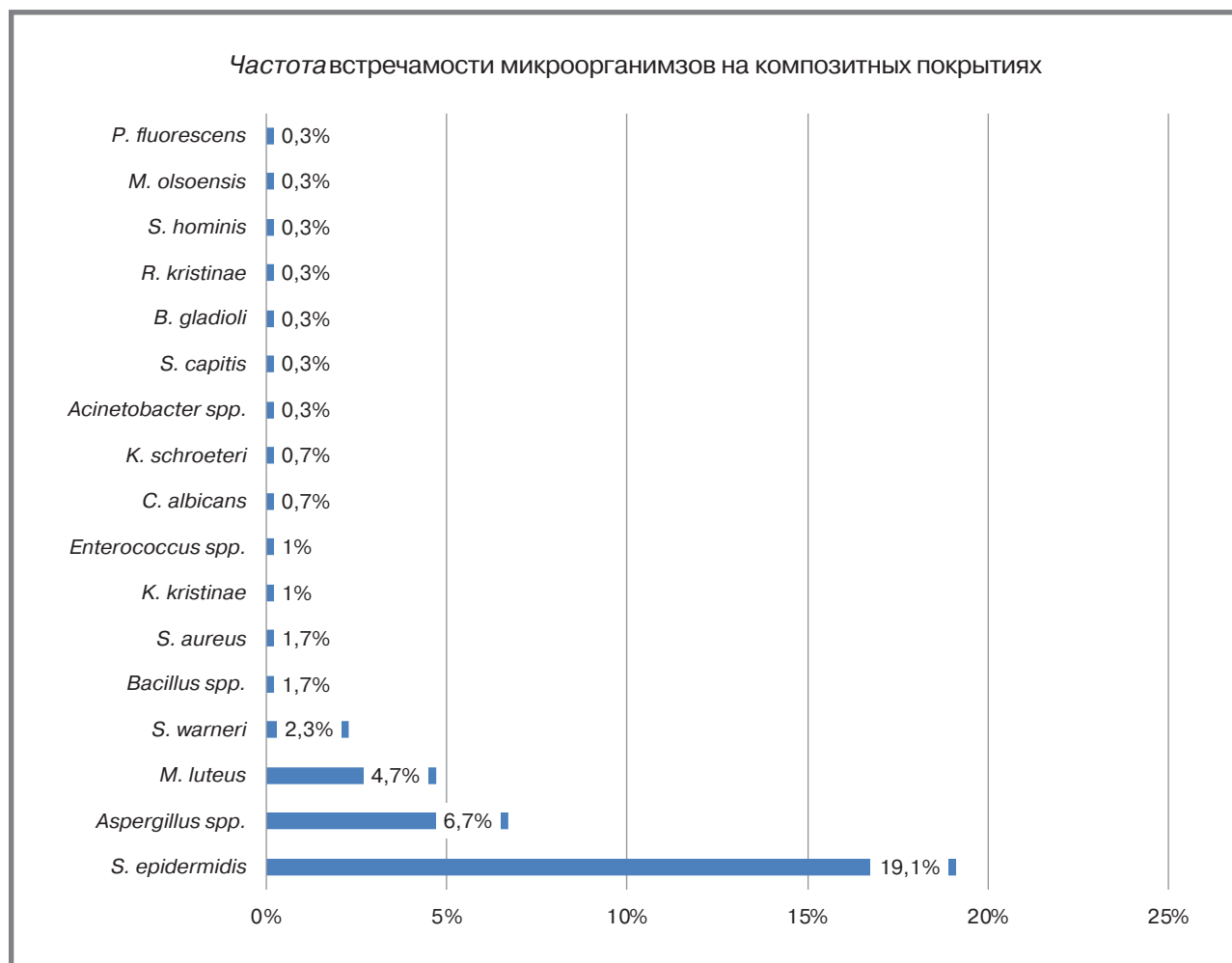
Рисунок 4. Частота встречаемости микроорганизмов на текстурированных поверхностях
Figure 4. Frequency of occurrence of microorganisms on textured surfaces



антибактериальной активностью благодаря ожидаемому синергетическому эффекту от сочетания нескольких механизмов: токсического действия ионов меди, механо-бактерицидных свойств текстурированной поверхности и фотокаталитической активности оксида титана, вызывающей окислительный стресс у микроорганизмов. Однако результаты исследования в условиях реального ОРИТ

показали, что эффективность, продемонстрированная в лаборатории, не всегда сохраняется в клинической практике. Здесь поверхности подвергаются частым контактам, воздействию чистящих средств и механическому износу. Мониторинг выявил неоднозначные свойства композитных покрытий. С одной стороны, они демонстрировали более высокий уровень общей микробной

Рисунок 5. Частота встречаемости микроорганизмов на композитных покрытиях
Figure 5. Frequency of occurrence of microorganisms on composite coatings



контаминации по сравнению с текстурированными медными поверхностями. С другой стороны, именно на композитных покрытиях была зафиксирована минимальная частота встречаемости клинически значимого патогена – *S. aureus*, составившая всего 1,7 %. Этот показатель оказался существенно ниже, чем на всех других типах исследуемых поверхностей.

Выявленная эффективность покрытий CuO/TiO_2 по отношению к *S. aureus* (крайне низкая доля – 1,7 %) на фоне относительно высокой общей контаминации (по сравнению с текстурированной), основу которой составляет *S. epidermidis*, одним из возможных объяснений может быть различие в биологических свойствах этих видов стафилококков. *S. aureus* демонстрирует высокую чувствительность к синергичному окислительному стрессу, индуцируемому ионами меди и компонентами композита. В то же время, *S. epidermidis* благодаря эффективным системам биоплёнокообразования (экспрессия *ica*-оперона, продукция PIA) [10] может проявить некоторую устойчивость к окислительному стрессу. Кроме того, физико-химические свойства поверхности композита, вероятно,

дополнительно способствуют адгезии *S. epidermidis*. Таким образом, композит сильнее подавляет клинически значимый патоген (*S. aureus*), чем менее вирулентный *S. epidermidis*. С практической точки зрения это формирует клинически обоснованный компромисс: риск контаминации опасным *S. aureus* сводится к минимуму, а сохранившаяся аутохтонная микробиота (*S. epidermidis*) в целом легче контролируется рутинными протоколами дезинфекции.

Несмотря на высокую эффективность медных покрытий в подавлении бактериальной контаминации, их действие против грибов рода *Aspergillus spp.* оказалось существенно менее выраженным. Покрытие CuT+A и вовсе продемонстрировало частоту контаминации, сопоставимую с контролем. Этот результат имеет глубокое биологическое обоснование. Во-первых, фундаментальное отличие заключается в строении клетки: прочная, многослойная хитиновая стенка грибов, особенно конидий (спор), служит надёжным барьером, затрудняющим проникновение ионов меди и эффективно нейтрализующим окислительный стресс за счёт мощной антиоксидантной системы (каталаз, супероксиддисмутаза, глутатиона). Во-вторых,

наноразмерные текстурированные «лезвия» поверхности CuT, эффективно повреждающие гибкие бактериальные мембраны, могут быть недостаточны для механического разрушения жёсткой грибковой стенки. Наконец, в случае композитного покрытия CuT+A частицы диоксида титана могли экранировать («закрыть») активную текстурированную медную основу, что привело к потере её остаточной противогрибковой активности. Таким образом, одним из возможных объяснений наблюдаемой разницы может быть различная устойчивость грибов к воздействию исследуемых покрытий, что подчёркивает сложность создания универсального антимикробного покрытия и указывает на необходимость разработки комбинированных стратегий, направленных на преодоление специфических защитных механизмов разных групп микроорганизмов.

Тем не менее исследуемые покрытия стабильно снижают микробную обсеменённость (КОЕ) по сравнению с обычными поверхностями, что уменьшает бионагрузку и риск перекрёстного инфицирования. Эти покрытия работают как постоянный пассивный барьер, усиливая, но не заменяя, обычную уборку и гигиену рук. С клинической точки зрения текстурированные и композитные покрытия эффективно ограничивают рост бактерий на интенсивно используемых поверхностях в ОРИТ, что потенциально может способствовать снижению риска передачи патогенов. С практической стороны, их долговечность и сопоставимая или более высокая эффективность, чем у необработанной меди, подтверждают возможность внедрения. Они легко интегрируются в текущую инфраструктуру ОРИТ без изменения рутинных процедур, что делает их полезным дополнением к системе инфекционного контроля.

Необходимо отметить, что тонкая медная фольга, как основа для покрытий (Cu, CuT, CuT+A), с целью снижения микробной нагрузки позволяет защитить сложнопрофильные поверхности с интенсивным

касанием. Их монтаж с помощью самоклеящихся плёнок упрощает замену и повышает экономическую целесообразность.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что медные покрытия – особенно текстурированная лазером медь (CuT) и композит CuO/TiO₂ – являются эффективным барьером, значительно снижающим микробную контаминацию на поверхностях с высоким уровнем касания в госпитальных условиях, где руки медицинского персонала остаются основным фактором передачи ИСМП. Несмотря на ожидаемый синергетический эффект, композитное покрытие CuT+A продемонстрировало более высокую общую микробную бионагрузку, чем текстурированная лазером медь, однако обладает лучшей способностью подавлять клинически значимый патоген *S. aureus*. Антифунгальная активность всех покрытий оказалась ограниченной из-за устойчивости *Aspergillus spp.* к ионам меди и механическому повреждению, обусловленным прочным хитин-глюкановым комплексом клеточной стенкой и антиоксидантными системами.

Ключевым преимуществом является технологическая практичность: тонкая самоклеящаяся медная фольга легко может монтироваться на сложнопрофильные поверхности, не требует изменения рутинных протоколов дезинфекции, устойчива к износу и экономически целесообразна для масштабного внедрения. Эти покрытия не заменяют профилактические мероприятия, но дополняют их, формируя многоуровневую стратегию инфекционного контроля.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-73-30004, <https://rscf.ru/project/23-73-30004/>).

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2024 году». М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2025. URL: https://rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=30172.
2. Collins A.S. Preventing Health Care–Associated Infections // Patient Safety and Quality: An Evidence-Based Handbook for Nurses / Ed. by R.G. Hughes. Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US), 2008. Chapter 41. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2683/>.
3. Tobin E.H., Zahra F. Nosocomial Infections [Updated 2025 Aug 2] // StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559312/>.
4. Woh PY., Zhang X. The burden of ESKAPE pathogen-related hospital-acquired infections: clinical and financial perspective from a systematic review // J. Hosp. Infect. 2025. Vol. 162. P. 377–385. DOI: 10.1016/j.jhin.2025.06.006.
5. Mathew S., Ganguly P., Rhatigan S. et al. Cu-Doped TiO₂: Visible Light Assisted Photocatalytic Antimicrobial Activity // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, № 11. P. 2067. DOI: 10.3390/app8112067.
6. Sreedhar M., Reddy I.N., Bera P. et al. Cu/TiO₂ Thin Films Prepared by Reactive RF Magnetron Sputtering // Applied Physics A. 2015. Vol. 120, № 2. P. 765–773. DOI: 10.1007/s00339-015-9254-5.
7. Fuentes S., Tapia A., Pozo P. Synthesis, Characterization, and Antibacterial Activity Evaluation of Cu@TiO₂ Nanocomposites // Materials Letters. 2021. Vol. 296. P. 129885. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129885.
8. Metryka O., Wasilkowski D., Nowak A. et al. Impact of an Engineered Copper-Titanium Dioxide Nanocomposite and Parent Substrates on the Bacteria Viability, Antioxidant Enzymes and Fatty Acid Profiling // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21, № 23. P. 9089. DOI: 10.3390/ijms21239089.
9. Poudineh M., Valian M., Jassim A.Y. et al. Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications (Antibacterial, Antibiofilm, Anticancer and Effects on Hospital-Acquired Pneumonia Infection) of Copper Titanium Oxide Nanostructures // RSC Advances. 2025. Vol. 15, № 7. P. 5124–5134. DOI: 10.1039/d4ra08476d.
10. Cheung O. Staphylococcus epidermidis — key to understanding biofilms, commensalism, and more // J. Bacteriol. 2025. Vol. 207. P. e00165-25. DOI: 10.1128/jb.00165-25.

References

1. State Report «On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2024». Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, 2025. URL: https://rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=30172. (In Russ.).
2. Collins A.S. Preventing Health Care–Associated Infections // Patient Safety and Quality: An Evidence-Based Handbook for Nurses / Ed. by R.G. Hughes. Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality (US), 2008. Chapter 41. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK2683/>.
3. Tobin E.H., Zahra F. Nosocomial Infections [Updated 2025 Aug 2] // StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559312/>.
4. Woh P.Y., Zhang X. The burden of ESKAPE pathogen-related hospital-acquired infections: clinical and financial perspective from a systematic review // J. Hosp. Infect. 2025. Vol. 162. P. 377–385. DOI: 10.1016/j.jhin.2025.06.006.
5. Mathew S., Ganguly P., Rhatigan S. et al. Cu-Doped TiO₂: Visible Light Assisted Photocatalytic Antimicrobial Activity // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, № 11. P. 2067. DOI: 10.3390/app8112067.
6. Sreedhar M., Reddy I.N., Bera P. et al. Cu/TiO₂ Thin Films Prepared by Reactive RF Magnetron Sputtering // Applied Physics A. 2015. Vol. 120, № 2. P. 765–773. DOI: 10.1007/s00339-015-9254-5.
7. Fuentes S., Tapia A., Pozo P. Synthesis, Characterization, and Antibacterial Activity Evaluation of Cu@TiO₂ Nanocomposites // Materials Letters. 2021. Vol. 296. P. 129885. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.129885.
8. Metryka O., Wasilkowski D., Nowak A. et al. Impact of an Engineered Copper-Titanium Dioxide Nanocomposite and Parent Substrates on the Bacteria Viability, Antioxidant Enzymes and Fatty Acid Profiling // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21, № 23. P. 9089. DOI: 10.3390/ijms21239089.
9. Poudineh M., Valian M., Jassim A.Y. et al. Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications (Antibacterial, Antibiofilm, Anticancer and Effects on Hospital-Acquired Pneumonia Infection) of Copper Titanium Oxide Nanostructures // RSC Advances. 2025. Vol. 15, № 7. P. 5124–5134. DOI: 10.1039/d4ra08476d.
10. Cheung O. Staphylococcus epidermidis — key to understanding biofilms, commensalism, and more // J. Bacteriol. 2025. Vol. 207. P. e00165-25. DOI: 10.1128/jb.00165-25.

Об авторах

- **Чернуха Марина Юрьевна** — д. м. н., заведующая лабораторией молекулярной эпидемиологии госпитальных инфекций, ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России, Москва, Россия; тел.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: chernukha@gamaleya.org; <https://orcid.org/0000-0002-2349-8556>.
- **Аветисян Лусине Ремуальдовна** — д. м. н., заведующая лабораторией эпидемиологии оппортунистических инфекций, ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярной эпидемиологии госпитальных инфекций, ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России, Москва, Россия; тел.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: lusavr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9053-2515>.
- **Домблидес Эдвард Артурович** — младший научный сотрудник лаборатории молекулярной эпидемиологии госпитальных инфекций, ФГБУ «Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени почетного академика Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России, Москва, Россия; тел.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: domblides@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-7835-8891>.
- **Емельяненко Кирилл Александрович** — к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории поверхностных сил, ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН, Москва, Россия; тел.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: emelyanenko.kirill@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7943-5944>.
- **Буглак Андрей Владимирович** — к. м. н., научный сотрудник лаборатории поверхностных сил, ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН, Москва, Россия; тел.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: avb_phyche@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7820-5723>.
- **Емельяненко Александр Михайлович** — д. ф.-м. н., член-корр. РАН, главный научный сотрудник лаборатории поверхностных сил, ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН, Москва, Россия; тел.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: ame@phyche.ac.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4398-9958>.
- **Бойнович Людмила Борисовна** — д. ф.-м. н., академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории поверхностных сил, ФГБУН «Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина» РАН, Москва, Россия; тел.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: boinovich@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1423-695X>.

Поступила: 19.02.2026. Принята к печати: 27.04.2026.

Контент доступен под лицензией CC BY 4.0.

About the Authors

- **Marina Yu. Chernukha** — Dr. Sci. (Med.), Head of the Laboratory of Molecular Epidemiology of Nosocomial Infections, National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N.F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia; tel.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: chernukha@gamaleya.org; <https://orcid.org/0000-0002-2349-8556>.
- **Lusine R. Avetisyan** — Dr. Sci. (Med.), Head of the Laboratory of Epidemiology of Opportunistic Infections, Leading Researcher of the Laboratory of Molecular Epidemiology of Nosocomial Infections, National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N.F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia; tel.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: lusavr@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9053-2515>.
- **Edward A. Domblides** — Junior Researcher, Laboratory of Molecular Epidemiology of Nosocomial Infections, National Research Centre for Epidemiology and Microbiology named after Honorary Academician N.F. Gamaleya of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia; tel.: +7 (499) 193-55-94; e-mail: domblides@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-7835-8891>.
- **Kirill A. Emelyanenko** — PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Laboratory of Surface Forces, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tel.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: emelyanenko.kirill@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7943-5944>.
- **Andrey V. Buglak** — PhD in Medicine, Researcher, Laboratory of Surface Forces, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tel.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: avb_phyche@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7820-5723>.
- **Alexandre M. Emelyanenko** — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Corresponding Member of RAS, Leading Researcher, Laboratory of Surface Forces, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tel.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: ame@phyche.ac.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4398-9958>.
- **Ludmila B. Boinovich** — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Academician of RAS, Leading Researcher, Laboratory of Surface Forces, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tel.: +7 (495) 955-46-25; e-mail: boinovich@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1423-695X>.

Received: 19.02.2026. Accepted: 27.04.2026.

Creative Commons Attribution CC BY 4.0.