

Научная статья
УДК 678.026.3: 667.6
doi: 10.17223/7783494/3/4

Исследование антибактериальных свойств лакокрасочных защитных покрытий, содержащих биоцидные наночастицы неспецифического действия против высокопатогенных штаммов бактерий

Анна Олеговна Прокопчук¹, Ольга Владимировна Бакина², Марат Израильевич Лернер³,
Елизавета Владимировна Пикушак⁴, Александр Юрьевич Алексеев⁵, Анна Сергеевна Скорупо⁶,
Елена Сергеевна Евплонова⁷, Николай Васильевич Яковлев⁸, Александр Борисович Ворожцов⁹

^{1,2,3,4,9} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
^{5,6} *Федеральный исследовательский центр фундаментальной и трансляционной медицины, Новосибирск, Россия*
^{7,8} *АО «Объединение “Ярославствие краски”»*
¹ *bio_1979@mail.ru*
² *ayalekseev@frcfm.ru*
³ *ntc2@yarkraski.ru*

Аннотация. Нанотехнологии все чаще привлекаются в качестве современных методов борьбы с патогенными угрозами в сфере здравоохранения. Наночастицы оксидов некоторых металлов способны оказывать антибактериальное действие, в то же время оставаясь безопасными для клеток и тканей организма человека. В данной работе проводили исследование антибактериальных свойств лакокрасочных защитных покрытий, содержащих бicomпонентные наночастицы ZnO-Ag, относительно высокопатогенных штаммов бактерий. В результате проведенных испытаний на поверхности лакокрасочного материала и лакокрасочного состава, включающих наночастицы ZnO-Ag, наблюдалась полная инактивация высокопатогенных штаммов бактерий. Таким образом, исследуемые покрытия обладают антибактериальными свойствами согласно Р 4.2.3.676-20 и могут быть использованы как средства неспецифической защиты от угрозы распространения патогенных организмов.

Ключевые слова: наночастицы ZnO-Ag, антибактериальные покрытия, лакокрасочные материалы и составы, антибактериальная активность, биологическая безопасность

Благодарности: исследования поддержаны Министерством науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-11-2021-036 от 25.06.2021.

Для цитирования: Прокопчук А.О., Бакина О.В., Лернер М.И., Пикушак Е.В., Алексеев А.Ю., Скорупо А.С., Евплонова Е.С., Яковлев Н.В., Ворожцов А.Б. Исследование антибактериальных свойств лакокрасочных защитных покрытий, содержащих биоцидные наночастицы неспецифического действия против высокопатогенных штаммов бактерий // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 3. С. 35–41. doi: 10.17223/7783494/3/4

Original article
doi: 10.17223/7783494/3/4

The study of the antibacterial properties of protective paint coatings based on the biocide nanoparticles with non-specific effect on highly pathogenic bacterial strains

Anna O. Prokopchuk¹, Olga V. Bakina², Marat I. Lerner³, Elizaveta V. Pikushchak⁴,
Alexander Yu. Alekseev⁵, Anna S. Skorupo⁶, Elena S. Evplonova⁷, Nikolai V. Yakovlev⁸,
Alexander B. Vorozhtsov⁹

^{1,2,3,4,9} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
^{5,6} *Federal Research Center for Basic and Translational Medicine, Novosibirsk, Russian Federation*
^{7,8} *JSC “Association “Yaroslavskie kraski”, Yaroslavl, Russian Federation*
¹ *bio_1979@mail.ru*
² *ayalekseev@frcfm.ru*
³ *ntc2@yarkraski.ru*

Abstract. Nanotechnologies are increasingly being used as modern methods of combating pathogenic microorganisms in the healthcare sector. Nanoparticles of some metal oxides can have an antibacterial effect, while at the same time remaining safe for cells and tissues of the human body. In this work, we conducted a study of the antibacterial properties of paint and varnish protective coatings created on the basis of a concentrate of ZnO-Ag nanoparticles of relatively highly pathogenic strains of bacteria. As a

result, complete inactivation of highly pathogenic strains of bacteria was observed on the surface of the paint and varnish material and paint and varnish composition, including a concentrate of ZnO-Ag nanoparticles. Thus, the coatings under study have antibacterial properties in accordance with R 4.2.3.676-20 and can be used as a means of non-specific protection against the threat of the spread of pathogenic organisms.

Keywords: ZnO-Ag nanoparticles, antibacterial coatings, paintwork materials and compositions, antibacterial activity, biosafety

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No 075-11-2021-036 of June 25, 2021.

For citation: Prokopchuk, A.O., Bakina, O.V., Lerner, M.I., Pikushchak, E.V., Alekseev, A.Yu., Skorupo, A.S., Evplonova, E.S., Yakovlev, N.V. & Vorozhtsov, A.B. (2023) The study of the antibacterial properties of protective paint coatings based on the biocide nanoparticles with non-specific effect on highly pathogenic bacterial strains. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 3. pp. 35–41. doi: 10.17223/7783494/3/4 (In Russian).

Введение

Устойчивость к противомикробным препаратам официально признана серьезной проблемой Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), которая так же призывает к принятию серьезных мер по обеспечению сохранности существующих антибактериальных средств, разработке новых антибактериальных средств и снижению заболеваемости инфекциями [1]. Разработка новых антибиотиков развивается по стратегии более узкой специализации к таргетному патогенному организму. Однако зачастую такие антибиотики за короткое время становятся неэффективными, а патогенные организмы, против которых они созданы, еще более неуязвимыми за счет способности к изменению метаболизма [2–5]. Кроме того, разработка новых антибиотиков – длительный и дорогостоящий процесс. За последние 30 лет было разработано лишь несколько новых классов антибиотиков, и вероятность появления нового класса в ближайшее время невелика [6]. Следовательно, кроме антибиотиков в классическом понимании следует использовать и другие меры борьбы, такие как предотвращение контаминации и распространения устойчивых бактерий в окружающей среде, а поиск антибактериальных средств представляет чрезвычайную важность не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения.

Использование неспецифических средств для борьбы с распространением патогенных организмов является эффективным методом сдерживания распространения инфекций, так как не вызывает устойчивости в силу более грубого механизма воздействия на клетки бактерий. К таким относятся дезинфицирующие средства, поверхности и покрытия с антибактериальными свойствами. Большой недостаток средств дезинфекции состоит в их токсическом действии основных реагентов на организм человека. Развитие нанотехнологий позволило получить новые материалы с новыми свойствами, например, в процессе изучения наночастиц (НЧ) металлов и оксидов металлов

были открыты их антибактериальные свойства наравне с отсутствием токсичности в определенных концентрациях. Уникальные свойства НЧ обусловлены их высоким отношением поверхности к объему, малыми размерами и возможностью модификации, что позволяет использовать нанокomпозиты в различных отраслях. Оксиды металлов Cu, Fe, Al, Ti являются перспективными в отношении разработок противомикробных средств как обладающие неспецифическими биоцидными свойствами [7–12], которые обеспечиваются в основном за счет способности к образованию активных форм кислорода (АФК), что приводит к повреждению оболочек бактерий [7, 13]. Наиболее активным генератором АФК является оксид цинка ZnO – полупроводник *n*-типа, химически стабилен, обладает улучшенными фотоэлектронными свойствами, биоцидностью, низкой токсичностью и невысокой стоимостью [14]. Модификация ZnO наночастицами серебра (НЧ Ag) усиливает антибактериальный эффект за счет биоцидных свойств самого Ag [15–17]. Создание материалов на основе биоцидных НЧ ZnO-Ag позволяет получать новые материалы с антибактериальными свойствами. Данная работа посвящена исследованию антибактериальных свойств лакокрасочных защитных покрытий на основе биоцидных наночастиц ZnO-Ag.

Материалы и методы

Создание и изучение покрытий. Синтез НЧ ZnO-Ag осуществляли совместным электрическим взрывом двух свитых проволок серебра и цинка. Метод одноступенчатый, экологически безопасный, с производительностью около 200 г НЧ в час. На основе полученных НЧ подготавливали водный концентрат, содержащий 30% масс. НЧ, как описано в патенте (патент № 2763930). Далее концентрат вводили в основу для лакокрасочного материала (ЛКМ) и лакокрасочного состава (ЛКС). Массовая доля НЧ в единице объема ЛКМ/ЛКС составляла 0,5%. Размер и форму НЧ проводили методом просвечивающей

электронной микроскопии с помощью электронного микроскопа JEM 100 CX II (JEOL, Япония). Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) на CuK α -излучении с использованием базы данных Crystal Impact. Размер агломератов НЧ определяли методом седиментации частиц под действием центробежных сил на дисковой центрифуге CPS DC 24000 (США).

Определение антибактериальных свойств покрытий. Для нанесения на испытываемую поверхность использовали свежие суточные культуры патогенных бактерий (*Escherichia coli* ATCC 25922, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Haemophilus influenzae* ATCC 10211, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 13883, *Acinetobacter baumannii*), выращенных в жидких рекомендованных питательных средах (мясопептонный бульон (МПБ) и

мясопептонный агар (МПА); шоколадный бульон и шоколадный агар) при рекомендованной температуре. Инокулом (содержание клеток 9,0-9,3 lg КОЕ/мл) наносили на поверхность покрытий ЛКМ/ЛКС, подсушивали в течение 20 мин, чашки накрывали и инкубировали еще 40 мин. Затем экстрагировали нанесенные ранее бактерии в 1 мл физраствора 30 с. Отбирали с поверхности дозатором и переносили в пробирку объемом 1,5 мл, сухим стерильным ватным тампоном с наконечником собирали остатки жидкости, наконечник тампона помещали в те же пробирки, палочку аппликатора отрывали. 10-кратные разведения жидкости наносили на плотную рекомендованную питательную среду для определения количества (титра) микроорганизмов. Пример результата выросших колоний представлен на рис. 1, 2.



Рис. 1. Видимые колонии бактерий штамма *Acinetobacter baumannii* в эксперименте. НК – ЛКМ с НЧ ZnO-Ag; КНК – контроль ЛКМ без НЧ; -1, -2, -3, -4 – степень десятикратного разведения

Fig. 1. Visible colonies of bacteria of the *Acinetobacter baumannii* strain in the experiment. НК – paintwork materials with ZnO-Ag NPs. КНК – control of paintwork materials without NPs; -1, -2, -3, -4 – degree of tenfold dilution

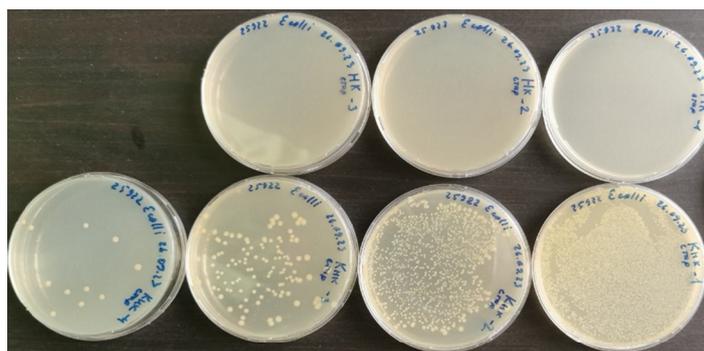


Рис. 2. Видимые колонии бактерий штамма *Escherichia coli* ATCC 25922 в эксперименте. НК – ЛКМ с НЧ ZnO-Ag; КНК – контроль ЛКМ без НЧ; -1, -2, -3, -4 – степень десятикратного разведения

Fig. 2. Visible colonies of bacteria the *Escherichia coli* strain ATCC 25922 in the experiment. НК – paintwork materials with ZnO-Ag NPs. КНК – control of paintwork materials without NPs; -1, -2, -3, -4 – degree of tenfold dilution

Через сутки подсчитывали число колоний, полученные данные обрабатывались методами вариационной статистики [18].

Результаты и обсуждение

Ранее с помощью электронной микроскопии был исследован концентрат биоцидных НЧ. По данным

ПЭМ, НЧ ZnO-Ag в составе концентрата имеют преимущественно ограниченную форму размером до 100 нм и морфологию «янус»-наночастиц (двухкомпонентных) с четкой границей раздела фаз внутри частицы. Темные мелкие округлые участки представлены Ag, светлые, более крупные фрагменты угловатой формы – ZnO. По данным рентгенофазового анализа в НЧ, содержащих 12 ат.% и более Ag присутствуют только фазы ZnO (JCPDS № 96-900-4179) и Ag (JCPDS № 65-2871), прочие примеси отсутствовали (рис. 3) [19]. Для совмещения НЧ и акриловой основы и устранения пыления порошковых НЧ был подготовлен водный концентрат, содержащий 30%

масс НЧ. Далее полученные НЧ в виде концентрата были введены в основы для ЛКМ и ЛКС при высокоскоростном перемешивании при помощи дисольвера. Содержание НЧ в образцах составило 0,5% масс.

После введения концентрата НЧ в основы ЛКМ и ЛКС подвергли электронно-микроскопическому исследованию в масштабе сотни микрометров, что позволило установить в образцах покрытий относительно однородное распределение наночастиц (рис. 4, А). Следует отметить, что определенное при помощи СЭМ количественное распределение элементов Zn и Ag практически соответствует их введеному содержанию (рис. 4, Б).

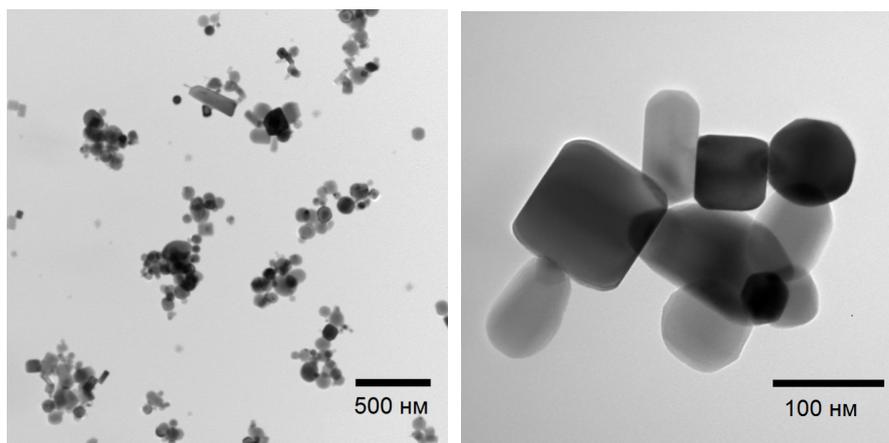


Рис. 3. ПЭМ-изображения частиц ZnO-Ag при различном увеличении

Fig. 3. PEM-images of ZnO-Ag particles at different magnifications

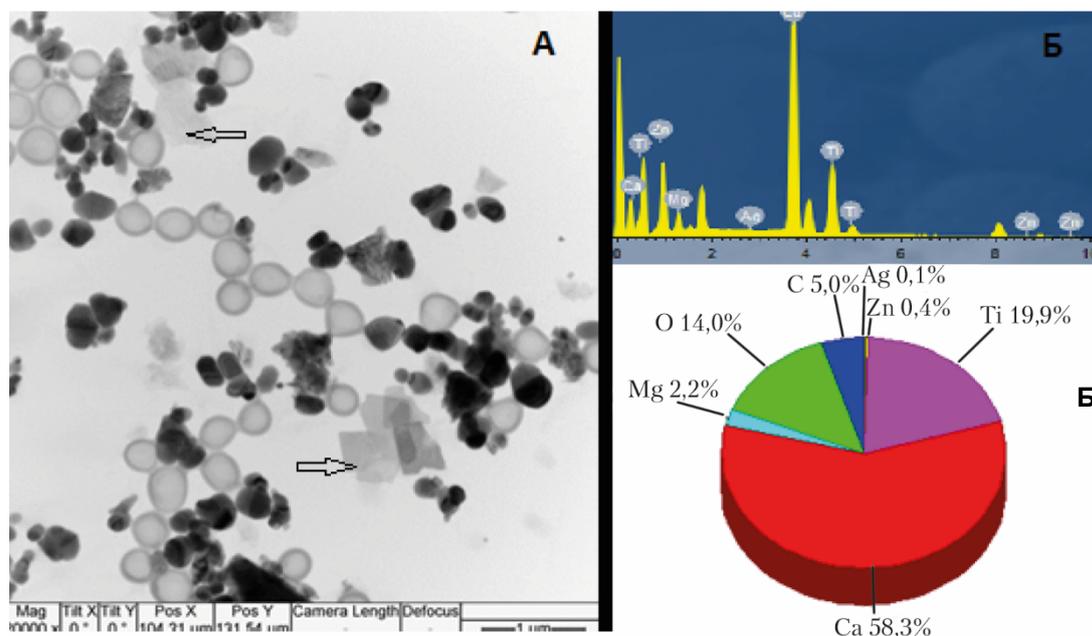


Рис. 4. ПЭМ-изображения образца ЛКМ. Стрелками отмечены НЧ (А), спектр и количественный элементный анализ (вес.%) слоя ЛКМ

Fig. 4. PEM-images of a paintwork material sample, arrows indicate NP (A), spectrum and quantitative elemental analysis (wt.%) of the paintwork layer

Исследование антибактериальных свойств покрытий ЛКМ и ЛКС проводилось в соответствии с Р 4.2.3.676-20 «Методы лабораторных исследований и испытаний дезинфекционных средств для оценки их эффективности и безопасности» на наиболее распространенных штаммах бактерий разных групп патогенности. В группу исследования входили: кишечная палочка *Escherichia coli* ATCC 25922, сальмонелла (вызывают расстройство ЖКТ) *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, синегнойная палочка (распространенная внутрибольничная инфекция) *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, золотистый стафилококк (вызывает широкий спектр заболеваний от кожных поражений до пневмонии) *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, гемофильная палочка (возбудитель бактериальной пневмонии) *Haemophilus influenzae* ATCC 10211, клебсиелла пневмония (является частой причиной внутрибольничных инфекций) *Klebsiella pneumoniae* ATCC 13883, ацинетобактер (вызывает внебольничный бронхит и трахеобронхит) *Acinetobacter baumannii*. Сравнение образцов ЛКМ и ЛКС с контрольными образцами (основа без введения концентрата ZnO-Ag) показало значительные отличия. После экспозиции 1 ч количество бактерий в образцах ЛКМ и ЛКС варьировало от 4,09 lg

КОЕ/мл до 5,89 lg КОЕ/мл, тогда как образцы ЛКМ и ЛКС показали 100% антибактериальную активность.

Антибактериальные свойства серебра известны еще с древних времён. Современные исследования доказывают, что Ag в виде ионов или НЧ усиливает активность уже известных антимикробных препаратов, а также веществ с уже установленными антимикробными свойствами [20]. НЧ Ag в составе исследуемых нами покрытий аналогично усиливает действие НЧ ZnO, что было доказано в исследованиях полученных ранее НЧ ZnO-Ag [19]. В частности, О. Бакиной и др. (2022), было показано, что присутствие НЧ Ag положительно влияет на фотокаталитическую активность и антибактериальные и еще ряд свойств ZnO-Ag.

Таким образом, в нашем исследовании лакокрасочных защитных покрытий на основе биоцидных НЧ установлено, что введение НЧ ZnO-Ag в состав ЛКМ и ЛКС придаёт им антибактериальные свойства. Наблюдается полное отсутствие роста патогенных микроорганизмов, в том числе при нанесении максимально возможной концентрации патогенных бактерий при экспозиции в 1 ч. Тогда как на поверхности контрольных образцов ЛКМ и ЛКС без НЧ сохраняются жизнеспособные патогенные бактерии в высоких концентрациях.

Список источников

1. World Health Organization, Global Action Plan on Antimicrobial Resistance. 2015. URL: <https://www.who.int/antimicrobial-resistance/global-action-plan/en/>
2. Andersson D.I., Balaban N.Q., Baquero F., Courvalin P. et al. Antibiotic resistance: turning evolutionary principles into clinical reality // FEMS Microbiology Reviews. 2020. Vol. 44 (2). P. 171–188. doi: 10.1093/femsre/fuaa001
3. Qian M., Xu D., Wang J., Zaeim D., Han J., Qu D. Isolation, antimicrobial resistance and virulence characterization of Salmonella spp. from fresh foods in retail markets in Hangzhou, China // PLoS One. 2023. Vol. 18 (10). Art. № e0292621. doi: 10.1371/journal.pone.0292621
4. Park J.-H., Kim Y.-J., Binn K., Seo K.-H. Spread of multidrug-resistant Escherichia coli harboring integron via swine farm waste water treatment plant // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 149. P. 36–42. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.10.071
5. Christaki E., Marcou M., Tofarides A. Antimicrobial resistance in bacteria: mechanisms, evolution, and persistence // Journal of molecular evolution. 2020. Vol. 88 (1). P. 26–40. doi: 10.1007/s00239-019-09914-3
6. Coates A.R.M., Halls G., Hu Y.M. Novel classes of antibiotics or more of the same? // British Journal Pharmacology. 2011. Vol. 163. P. 184–194. doi: 10.1111/j.1476-5381.2011.01250.x
7. Dutta R.K., Nenavathu B.P., Gangishetty M.K., Reddy A.V. Studies on antibacterial activity of ZnO nanoparticles by ROS induced lipid peroxidation // Colloids Surfaces B: Biointerfaces. 2012. Vol. 94 (1). P. 143–150. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.01.046
8. Sadiq I.M., Chandrasekaran N., Mukherjee A. Studies of effect of TiO₂ nanoparticles on growth and membrane permeability of Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa and Bacillus subtilis // Current Nanoscience. 2010. Vol. 6. P. 381–387. doi: 10.2174/157341310791658973
9. Kumar A., Pandey A.K., Singh S.S., Shanker R., Dhawan A. Cellular response to metal oxide nanoparticles in bacteria // Journal of Biomedical Nanotechnology. 2011. Vol. 7. P. 102–103. doi: 10.1166/jbn.2011.1222
10. Kumar A., Pandey A.K., Singh S.S., Shanker R., Dhawan A. Engineered ZnO and TiO₂ nanoparticles induce oxidative stress and DNA damage leading to reduced viability of Escherichia coli // Free Radical Biology and Medicine. 2011. Vol. 51. P. 1872–1881. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2011.08.025
11. Ansari M.A., Khan H.M., Khan A.A., Cameotra S.S., Saquib Q., Musarrat J. Interaction of Al₂O₃ nanoparticles with Escherichia coli and their cell envelope biomolecules // Journal of Applied Microbiology. 2014. Vol. 116. P. 772–783. doi: 10.1111/jam.12423
12. Agarwala M., Choudhury B., Yadav R.N.S. Comparative study of antibiofilm activity of copper oxide and iron oxide nanoparticles against multidrug resistant biofilm forming uropathogens // Indian Journal of Microbiology. 2014. Vol. 54. P. 365–368. doi: 10.1007/s12088-014-0462-z
13. Xie Y., He Y., Irwin P.L., Jin T., Shi X. Antibacterial activity and mechanism of action of zinc oxide nanoparticles against Campylobacter jejuni // Applied and Environmental Microbiology. 2011. Vol. 77 (7). P. 2325–2331. doi: 10.1128/AEM.02149-10
14. Ali A., Phull A.R., Zia M. Elemental zinc to zinc nanoparticles: is ZnO NPs crucial for life? Synthesis, toxicological, and environmental concerns // Nanotechnology Reviews. 2018. Vol. 5 (7). P. 413–441. doi: 10.1515/ntrev-2018-0067

15. Sondi I., Salopek-Sondi B. Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on E. coli as a model for Gram-negative bacteria // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 275. P. 177–182.
16. Morones J.R., Elechiguerra J.L., Camacho A., Holt K. et al. The bactericidal effect of silver nanoparticles // *Nanotechnology*. 2005. Vol. 16 (10). P. 2346–2353. doi: 10.1088/0957-4484/16/10/059
17. Jung W.K., Koo H.C., Kim K.W., Shin S. et al. Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in Staphylococcus aureus and Escherichia coli // *Applied and environmental microbiology*. 2008. Vol. 74 (7). P. 2171–2178. doi: 10.1128/AEM.02001-07
18. Закс Л. Статистическое оценивание. М. : Статистика, 1976. 598 с.
19. Бакина О.В., Чжоу В.Р., Иванова Л.Ю., Казанцев С.О. Влияние содержания металлического серебра в наночастицах ZnO-Ag на их фотохимическую и антибактериальную активность // *Журнал неорганической химии*. 2023. Т. 68, № 3. С. 401–410. doi: 10.31857/S0044457X22601249
20. Dove A.S., Dzurny D.I., Dees W.R., Qin N. et al. Silver nanoparticles enhance the efficacy of aminoglycosides against antibiotic-resistant bacteria // *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 13. Art. № 1064095. doi: 10.3389/fmicb.2022.1064095

References

1. World Health Organization. (2015) *Global Action Plan on Antimicrobial Resistance*. [Online]. Available from: <https://www.who.int/antimicrobial-resistance/global-action-plan/en/>
2. Andersson, D.I., Balaban, N.Q., Baquero, F., Courvalin, P., et al. (2020) Antibiotic resistance: turning evolutionary principles into clinical reality. *FEMS Microbiology Reviews*. 44(2). pp. 171–188. doi: 10.1093/femsre/fuaa001
3. Qian, M., Xu, D., Wang, J., Zaeim, D., Han, J. & Qu, D. (2023) Isolation, antimicrobial resistance and virulence characterization of Salmonella spp. from fresh foods in retail markets in Hangzhou, China. *PLoS One*. 18(10). Art. № e0292621. doi: 10.1371/journal.pone.0292621
4. Park, J-H., Kim, Y-J., Binn, K. & Seo, K-H. (2018) Spread of multidrug-resistant Escherichia coli harboring integron via swine farm waste water treatment plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 149. pp. 36–42. doi: 10.1016/j.ecoenv.2017.10.071
5. Christaki, E., Marcou, M. & Tofarides, A. (2020) Antimicrobial resistance in bacteria: mechanisms, evolution, and persistence. *Journal of Molecular Evolution*. 88(1). pp. 26–40. doi: 10.1007/s00239-019-09914-3
6. Coates, A.R.M., Halls, G., Hu, Y.M. (2011) Novel classes of antibiotics or more of the same? *British Journal Pharmacology*. 163. pp. 184–194. doi: 10.1111/j.1476-5381.2011.01250.x
7. Dutta, R.K., Nenavathu, B.P., Gangishetty, M.K. & Reddy, A.V. (2012) Studies on antibacterial activity of ZnO nanoparticles by ROS induced lipid peroxidation. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*. 94(1). pp. 143–150. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.01.046
8. Sadiq, I.M., Chandrasekaran, N. & Mukherjee, A. (2010) Studies of effect of TiO2 nanoparticles on growth and membrane permeability of Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa and Bacillus subtilis. *Current Nanoscience*. 6. pp. 381–387. doi: 10.2174/157341310791658973
9. Kumar, A., Pandey, A.K., Singh, S.S., Shanker, R. & Dhawan, A. (2011) Cellular response to metal oxide nanoparticles in bacteria. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. 7. pp. 102–103. doi: 10.1166/jbn.2011.1222
10. Kumar, A., Pandey, A.K., Singh, S.S., Shanker, R. & Dhawan, A. (2011) Engineered ZnO and TiO2 nanoparticles induce oxidative stress and DNA damage leading to reduced viability of Escherichia coli. *Free Radical Biology and Medicine*. 51. pp. 1872–1881. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2011.08.025
11. Ansari, M.A., Khan, H.M., Khan, A.A., Cameotra, S.S., Saquib, Q. & Musarrat, J. (2014) Interaction of Al2O3 nanoparticles with Escherichia coli and their cell envelope biomolecules. *Journal of Applied Microbiology*. 116. pp. 772–783. doi: 10.1111/jam.12423
12. Agarwala, M., Choudhury, B. & Yadav, R.N.S. (2014) Comparative study of antibiofilm activity of copper oxide and iron oxide nanoparticles against multidrug resistant biofilm forming uropathogens. *Indian Journal of Microbiology*. 54. pp. 365–368. doi: 10.1007/s12088-014-0462-z
13. Xie, Y., He, Y., Irwin, P.L., Jin, T. & Shi, X. (2011) Antibacterial activity and mechanism of action of zinc oxide nanoparticles against Campylobacter jejuni. *Applied and Environmental Microbiology*. 77(7). pp. 2325–2331. doi: 10.1128/AEM.02149-10
14. Ali, A., Phull, A.R. & Zia, M. (2018) Elemental zinc to zinc nanoparticles: is ZnO NPs crucial for life? Synthesis, toxicological, and environmental concerns. *Nanotechnology Reviews*. 5(7). pp. 413–441. doi: 10.1515/ntrev-2018-0067
15. Sondi, I. & Salopek-Sondi, B. (2004) Silver nanoparticles as antimicrobial agent: a case study on E. coli as a model for Gram-negative bacteria. *Journal of Colloid and Interface Science*. 275. pp. 177–182.
16. Morones, J.R., Elechiguerra, J.L., Camacho, A., Holt, K., et al. (2005) The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*. 16(10). pp. 2346–2353. doi: 10.1088/0957-4484/16/10/059
17. Jung, W.K., Koo, H.C., Kim, K.W., Shin, S., et al. (2008) Antibacterial activity and mechanism of action of the silver ion in Staphylococcus aureus and Escherichia coli. *Applied and environmental microbiology*. 74(7). pp. 2171–2178. doi: 10.1128/AEM.02001-07
18. Zaks, L. (1976) *Statisticheskoe ocenivanie* [Statistical estimation]. Moscow : Statistika.
19. Bakina, O.V., Chzhou, V.R., Ivanova, L.Yu. & Kazantsev, S.O. (2023) *Vliyaniye sodержaniya metallichesкого serebra v nanochastitcakh ZnO-Ag na ih fotohimicheskuyu i antibakterialimuyu aktivnost'* [Effect of metallic silver content in ZnO-Ag nanoparticles on their photochemical and antibacterial activity]. *Zhurnal neorganicheskoy khimii – Journal of Inorganic Chemistry*. 68(3). pp. 401–410. doi: 10.31857/S0044457X22601249
20. Dove, A.S., Dzurny, D.I., Dees, W.R., Qin, N., et al. (2023) Silver nanoparticles enhance the efficacy of aminoglycosides against antibiotic-resistant bacteria. *Frontiers in Microbiology*. 13. Art. № 1064095. doi: 10.3389/fmicb.2022.1064095.

Информация об авторах:

Прокопчук Анна Олеговна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: bio_1979@mail.ru

Бакина Ольга Владимировна – доктор технических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ovbakina@ispms.ru

Лернер Марат Израильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lerner@ispms.ru

Пикущак Елизавета Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: pikushchak@gmail.com

Алексеев Александр Юрьевич – кандидат биологических наук, руководитель лаборатории экспериментальной биологии патогенных микроорганизмов НИИ вирусологии ФИЦ ФТМ (Новосибирск, Россия). E-mail: ayalekseev@frcftm.ru

Скорупо Анна Сергеевна – лаборант НИИ вирусологии ФИЦ ФТМ (Новосибирск, Россия). E-mail: skorupo.anna@yandex.ru

Евплонова Елена Сергеевна – начальник Научно-технического центра АО «Объединение “Ярославские краски”» (Ярославль, Россия). E-mail: ntc2@yarkraski.ru

Яковлев Николай Васильевич – генеральный директор АО «Объединение “Ярославские краски”». E-mail: yakovlev@yarkraski.ru

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv1953@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Prokopchuk Anna O., Cand. Sc. (Biology), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bio_1979@mail.ru

Bakina Olga V., Dr. Sc. (Engineering), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ovbakina@ispms.ru

Lerner Marat I., Dr. Sc. (Engineering), chief researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lerner@ispms.ru

Pikushchak Elizaveta V., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: pikushchak@gmail.com

Alekseev Alexander Yu., Cand. Sc. (Biology), Head of the Laboratory of Experimental Biology of Pathogenic Microorganisms, Research Institute of Virology, Federal Research Center for Medical and Technical Medicine (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: ayalekseev@frcftm.ru

Skorupo Anna S., laboratory assistant, Research Institute of Virology, Federal Research Center for Medical and Technical Medicine (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: skorupo.anna@yandex.ru

Evplonova Elena S., Head of the Scientific and Technical Center, JSC “Association “Yaroslavskie kraski” (Yaroslavl, Russian Federation). E-mail: ntc2@yarkraski.ru

Yakovlev Nikolai V., general director, JSC “Association “Yaroslavskie kraski” (Yaroslavl, Russian Federation). E-mail: yakovlev@yarkraski.ru

Vorozhtsov Alexander B., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), professor, head of laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv1953@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 4.10.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 13.11.2023

The article was submitted 4.10.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 13.11.2023