

## 20 Исследование фотокаталитической антимикробной активности нанокompозитов на основе $\text{TiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ при воздействии светодиодного излучения (405 nm) на стафилококки

© А.В. Светлакова<sup>1</sup>, М. Sanchez Mendez<sup>3</sup>, Е.С. Тучина<sup>1</sup>, А.Н. Ходан<sup>2</sup>, М. Traore<sup>3</sup>, R. Azouani<sup>4</sup>,  
А. Капаев<sup>3</sup>, В.В. Тучин<sup>1,5,6</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии и. А.Н. Фрумкина РАН 119071 Москва, Россия

<sup>3</sup> Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, CNRS, Université Sorbonne Paris 8 Nord, F-93430 Villetaneuse, France

<sup>4</sup> EBInnov, École de Biologie Industrielle, F-95000 Cergy, France

<sup>5</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

<sup>6</sup> Институт проблем точной механики и управления РАН, 410028 Саратов, Россия

e-mail: anna5vetlakova@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г.

В окончательной редакции 29.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Исследована фотокаталитическая активность нанокompозитов на основе  $\theta$ -модификации оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с различным содержанием  $\text{TiO}_2$  для гетерогенного фотокатализа и биодеструкции патогенных микроорганизмов при воздействии светодиодного излучения с длиной волны 405 nm. Установлено, что все исследованные нанокompозиты обладают фотокаталитической активностью. Максимальна антибактериальная эффективность композитов с содержанием  $\text{TiO}_2$  8 wt.% (снижение CFU *Staphylococcus aureus* 209 P до 86%), что позволяет рекомендовать этот наноматериал в качестве перспективного антимикробного покрытия.

**Ключевые слова:** фотокаталитическое воздействие,  $\theta$ -модификация  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , СИД излучение (405 nm), антибактериальная эффективность, *Staphylococcus aureus* 209 P.

DOI: 10.21883/OS.2021.06.50984.9k-21

### Введение

Нецелевое применение антибиотиков, принявшее угрожающие масштабы в ходе пандемии COVID-19, признается мировым медицинским сообществом и может иметь комплексное долгосрочное влияние на устойчивость бактериальных возбудителей инфекционных заболеваний к противомикробным препаратам [1]. Различные современные наноматериалы обеспечивают реализацию совершенно иных антибактериальных механизмов, при этом лишая бактериальные клетки возможности сформировать резистентность к ним [2].

Одним из таких методов является фотодинамическое (ФДАВ) или фотокаталитическое антимикробное воздействие (ФКАВ) [3–9]. Метод ФДАВ основан на способности различных эндогенных или экзогенных красителей (фотосенсибилизаторов) под действием света продуцировать в биологической среде свободные радикалы (активные формы кислорода, АФК — ROS), которые вызывают перекисное окисление липидов, повреждение мембран, нарушение структуры ДНК и органелл микроорганизмов [3,4]. Метод ФКАВ ассоциирован с

переходом под действием света валентного электрона в зону проводимости фотокаталитического материала, в результате чего также образуются АФК, преимущественно гидроксильные радикалы ( $\bullet\text{OH}$ ), в водной среде играющие роль дырок и приводящие к окислению биологических молекул [5–10]. В антибактериальной терапии все чаще применяется фотокатализ с использованием оксидов металлов, поэтому поиск новых перспективных нанокompозитов (NC) является актуальной проблемой современной науки.

Оксид алюминия существует в нескольких модификациях, самыми распространенными из которых являются  $\alpha$ -,  $\gamma$ - и  $\theta$ -модификации, которые отличаются друг от друга плотностью и шириной запрещенной зоны [11–19]. В фотокатализе чаще всего используется  $\theta$ -модификация [7,11,13], тогда как свойства и эффективность применения других модификаций  $\text{Al}_2\text{O}_3$  изучены недостаточно.  $\text{TiO}_2$ , напротив, применяется во многих отраслях промышленности и в медицине, и его фотокаталитические свойства достаточно хорошо изучены [10,20–28]. Сравнение антибактериальной активности

чистой  $\theta$ -фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и NC с различным количеством нанодисперсного  $\text{TiO}_2$  позволит определить оптимальный состав и морфологию композитов для их дальнейшего применения.

## Материалы и методы

### Нанокompозиты

Композиты  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  со средней концентрацией одиночных наночастиц  $\text{TiO}_2$  соответственно 8 (NC-1), 16 (NC-2) и 24 wt.% (NC-3) были изготовлены по методике, описанной ранее [29,30]. На первом этапе при комнатной температуре во влажной атмосфере выращивались образцы исходных монокристаллических 3D наноструктур, состоящих из оксигидроксидов алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3.6\text{H}_2\text{O}$ ), путем окисления алюминия на поверхности жидкометаллического слоя ртути, нанесённого на пластины металлического алюминия высокой чистоты. Затем все полученные образцы проходили термическую обработку в воздушной среде при  $1150^\circ\text{C}$  в течение 4 h для достижения необходимого структурно-фазового состояния  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  [31,32]. На втором этапе формировались нанокompозиты  $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . С этой целью использовался золь-гель реактор со сверхбыстрым микромиксером при  $20^\circ\text{C}$  для синтеза наночастиц титана-оксоалкокси (ТОА) с заданным размером  $5.2 \pm 0.5$  nm. Реактивная среда содержала тетраизопророксид титана (ТТИП)  $C_{\text{Ti}} = 0.146$  M и воду, соответствующую степени гидролиза  $H = C_w/C_{\text{Ti}} = 2.2$ . Фотокатализаторы получали путём повторяющихся циклов „коллоидная пропитка–сушка“ 3D-матриц  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ , что позволило контролировать на каждом цикле общую осаждённую массу наночастиц  $\text{TiO}_2$ . На завершающем этапе NC проходили термическую обработку при  $550^\circ\text{C}$  в течение 4 h с целью кристаллизации доменов анатаза  $\text{TiO}_2$ . Ранее нами было показано, что одиночные наночастицы  $\text{TiO}_2$  размером 5 nm, осаждённые на поверхность оксида алюминия, начинают кристаллизоваться в фазе анатаза при повышении температуры до  $550^\circ\text{C}$ , в то время как фаза рутила появляется только при температурах около  $1100^\circ\text{C}$  [33]. Не исключено присутствие в образцах некоторого количества наночастиц аморфного  $\text{TiO}_2$ . Отмечено, что прочные ковалентные связи образуются на стадии пропитки между гидроксильными центрами диоксида титана и оксида алюминия. В соответствии с нашими более ранними результатами [29,30] удельная площадь материала  $115\text{m}^2/\text{g}$  не зависит от степени импрегнирования наночастицами. Массу осаждённых наночастиц  $\text{TiO}_2$  измеряли методом разложения сульфата аммония  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  до  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , для сравнения использовался не импрегнированный оксидом титана образец  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

### Бактериальная культура и методика фотовоздействия

Объектом исследования служил музейный штамм *S. aureus* 209 P, полученный из коллекции культур ГИСК им. Л.А. Тарасевича (Москва, Россия). Использовали 24-h культуры, выращенные на универсальной питательной среде ГРМ-агар (Оболенск, Россия) при  $37^\circ\text{C}$ .

Экспериментальная установка на основе непрерывного светоизлучающего диода (СИД) с длиной волны 405 nm и полушириной линии излучения 10 nm была использована в качестве источника излучения. Плотность мощности на объекте устанавливалась, равной  $17\text{mW}/\text{cm}^2$ , а экспозиция составляла 5, 10, 15 и 30 min (плотность дозы облучения 5.1, 10.2, 15.3,  $30.6\text{J}/\text{cm}^2$  соответственно).

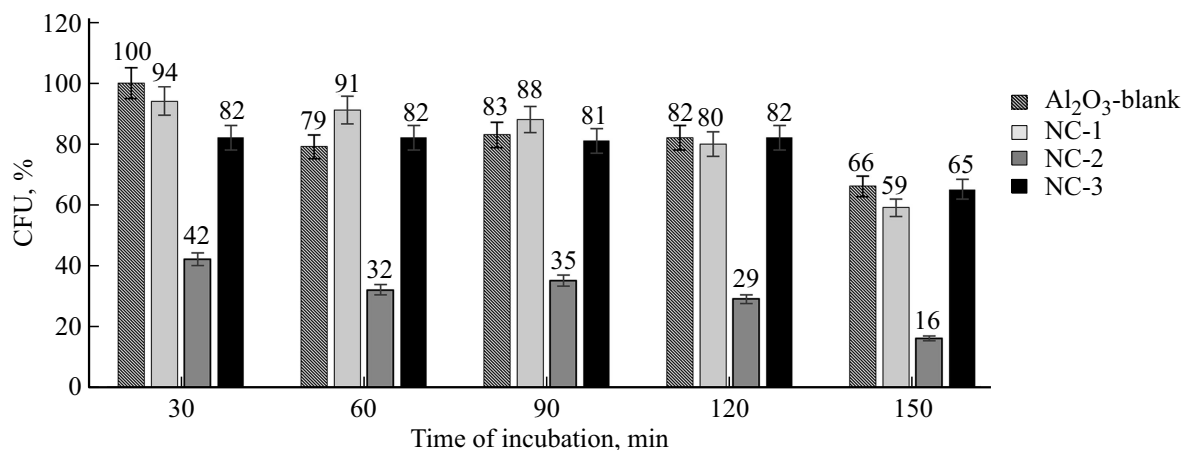
Схема проведения эксперимента, описанная ранее [19], была адаптирована для работы с нанокompозитами. Суспензию бактерий объёмом 1 ml добавляли в лунку полистирольного планшета со средним диаметром 10 mm, в которую уже были помещены исследуемые материалы в виде пластинок диаметром 8 mm и толщиной 2 mm. Полученную смесь оставляли в темноте на 30 min. Затем суспензию облучали в течение 5, 10, 15 или 30 min. После воздействия света культуру объёмом 0.2 ml распределяли по чашкам Петри с плотной питательной средой.

Учёт результатов осуществляли путём подсчета колониеобразующих единиц (КОЕ-CFU) через 24–48 h после инкубации при  $37^\circ\text{C}$ . В качестве контроля принимали значения колониеобразующей способности бактерий, не подвергавшихся облучению и не обработанных нанокompозитами. Эксперимент проводился в десятикратной повторности.

## Результаты и обсуждение

На первом этапе тестировали токсичность NC в темноте в зависимости от длительности инкубации (рис. 1). Установлено, что взаимодействие образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , не содержащих  $\text{TiO}_2$  с бактериальными клетками в течение 30-120 min, приводит к незначительному уменьшению числа CFU (не более чем на 17%). Пролонгированная до 150 min инкубация суспензии *S. aureus* 209 P в присутствии данного образца вызывала немногим более выраженное (до 34%) сокращение численности данных микроорганизмов.

Сходная динамика изменения численности бактерий отмечена при использовании образцов, содержащих 8 и 24 wt.%  $\text{TiO}_2$ . Самым ярким токсическим эффектом в отношении культуры *S. aureus* 209 P обладал образец NC, содержащий 16 wt.%  $\text{TiO}_2$ : снижение числа CFU при инкубации в течение 30 min достигало 58%, при инкубации в течение 180 min — 84%.



**Рис. 1.** Изменение численности (CFU) *S. aureus* 209 P в присутствии нанокompозитов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в зависимости от длительности инкубации (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-blank — нанокompозиты, содержащие  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; NC-1 — нанокompозиты, содержащие  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8 wt.% наночастиц TiO<sub>2</sub>; NC-2 — нанокompозиты, содержащие  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 16 wt.% наночастиц TiO<sub>2</sub>; NC-3 — нанокompозиты, содержащие  $\theta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 24 wt.% наночастиц TiO<sub>2</sub>).

Для достоверной оценки фотокаталитической активности NC требовалось проверить чувствительность исследуемых микроорганизмов к действию только СИД излучения (405 nm). Было показано, что сокращение числа CFU *S. aureus* 209 P после 15 min облучения составляет 25%, после 30 min — 31%. Чувствительность бактериальной культуры к действию СИД 405 nm связана с наличием в клетках стафилококков эндогенных порфиринов [3,34,35], имеющих максимум поглощения в фиолетовой части видимого спектра (400–415 nm). Фиолетовое излучение с плотностью мощности около 100 mW/cm<sup>2</sup> обеспечивает бактерицидное действие [35], в то время как излучение с плотностью мощности 30–70 mW/cm<sup>2</sup> обеспечивает уровень подавления численности бактерий не более чем на 30%, что отмечено и в предыдущих наших работах [20,21,28]. Снижение плотности мощности излучения позволяет селективно воздействовать на клетки-мишени, связанные с NC, активируя фотокаталитические процессы и не оказывая существенного прямого светового повреждающего эффекта на микроорганизмы.

В ходе исследования фотокаталитических свойств NC установлено, что они обладают высокой антибактериальной активностью в отношении *S. aureus* 209 P (рис. 2).

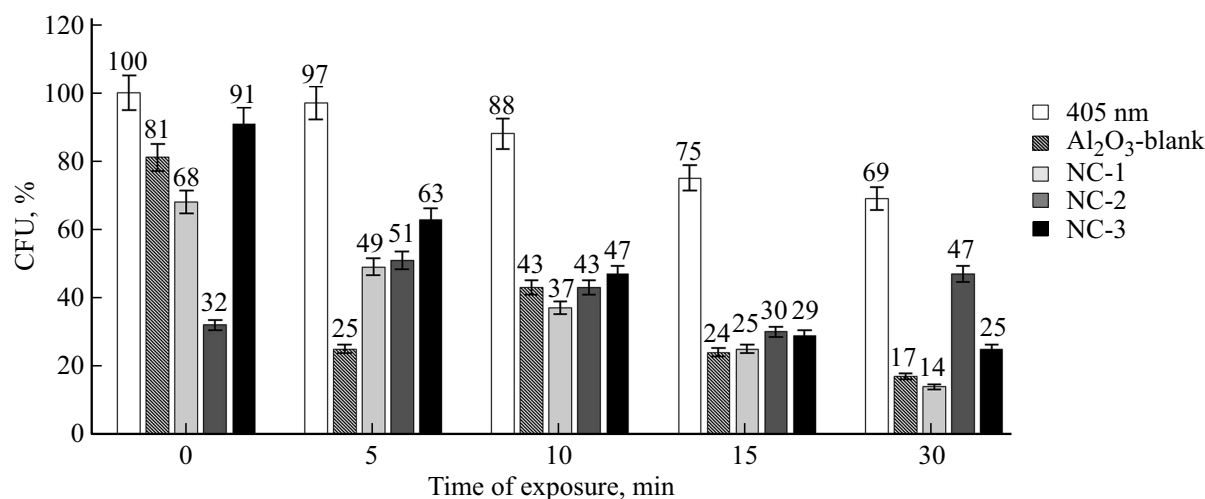
Фотокаталитическая активность образцов также зависела от присутствия TiO<sub>2</sub>. Облучение в течение 30 min в сочетании воздействием NC Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не содержащих TiO<sub>2</sub>, обуславливало снижение численности на 83%, тогда как при содержании TiO<sub>2</sub> 16 и 24 wt.% подавление роста бактерий достигло 53% и 75%. Наибольшее подавление роста бактериальных популяций (на 86%) показано для образца NC, содержащего 8 wt.% TiO<sub>2</sub>. Во всех случаях сокращение числа CFU *S. aureus* 209 P носило зависимый от дозы излучения характер.

Несмотря на то, что фотокаталитические свойства Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> мало изучены, у данного материала выявлен

ряд преимуществ перед другими оксидами металлов. Чистый Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладает низкой цитотоксичностью по сравнению с такими материалами как CeO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и ZnO. Так, при сравнении темновой токсичности на клетках человека было выявлено, что ZnO является наиболее токсичным, тогда как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> оказался нетоксичным даже при длительном воздействии [11]. Однако при проверке композитов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZnO было выявлено, что такие NC обладают повышенной токсичностью по сравнению с каждым образцом по отдельности [12].

Исследования показывают, что чистые наночастицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладают также невысокой фотокаталитической активностью при облучении. Так, при изучении наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и ZnO на 7 штаммах микроорганизмов было показано, что из предложенных образцов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладал наименьшей антибактериальной активностью [13].

Для повышения фотокаталитической активности Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> легируют другими материалами, что помогает добиться оптимальной ширины запрещенной зоны и минимизировать потери рекомбинации фотоиндуцированных зарядов. Одними из наиболее фотокаталитически активных являются композиты Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>. Несмотря на то, что оптимальное соотношение данных оксидов в образцах пока не установлено, многие исследования четко доказывают повышение фотокаталитической активности [14,29,30]. Так, при исследовании антимикробной фотокаталитической активности композитов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> отмечена биодеструкция микроорганизмов *Escherichia coli*, а также высокая продукция АФК [15] по сравнению с монообразцами. Помимо диоксида титана Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> допируют и другими элементами, такими как серебро, никель, кремний, азот. Рядом исследователей показана антимикробная фотокаталитическая активность таких материалов в отношении некоторых энтеропатогенных бактерий и вирусов [16–19].



**Рис. 2.** Изменение численности (CFU, %) *S. aureus* 209P при фотокаталитическом действии нанокompозитов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (405 nm — светодиодное фиолетовое излучение;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-blank}$  — светодиодное фиолетовое излучение и нанокompозиты, содержащие  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; NC-1 — светодиодное фиолетовое излучение и нанокompозиты, содержащие  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и 8 wt.% наночастиц  $\text{TiO}_2$ ; NC-2 — светодиодное фиолетовое излучение и нанокompозиты, содержащие  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и 16 wt.% наночастиц  $\text{TiO}_2$ ; NC-3 — светодиодное фиолетовое излучение и нанокompозиты, содержащие  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  и 24 wt.% наночастиц  $\text{TiO}_2$ ).

Наше исследование показало, что  $\theta$ -модификация  $\text{Al}_2\text{O}_3$  является перспективным материалом для антимикробного фотокаталического воздействия. Чистые NC  $\text{Al}_2\text{O}_3$  обладали низкой темновой токсичностью и достаточно высокой фотокаталитической активностью, что делает их пригодными для целевой деструкции микроорганизмов под действием света.

В ряде исследований показано, что легирование наночастиц  $\text{TiO}_2$  различными металлами и их оксидами, допирование наноматериалов водородом или азотом смещает спектр их поглощения в сторону видимой области [21,22,36–38]. Это позволяет активировать фотокаталитические процессы, используя не УФ излучение, негативно влияющее на все живые клетки, а излучение длиной волны 390–470 nm, в таком случае действующее селективно только в системе „бактериальная клетка–наночастица“.

Другими факторами, вносящими вклад в каталитическую способность наночастиц, являются размер, ширина запрещенной зоны и диффузия света в материале [38–40]. В нашем исследовании самыми фотоактивными оказались композиты с наименьшим содержанием наночастиц  $\text{TiO}_2$  (8 wt.%). Присутствие 5-nm наночастиц  $\text{TiO}_2$  в форме анатаза среди разветвленной сети  $\sim 140\text{-nm}$  проволок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  позволяет увеличить общую реакционную способность материала за счет рассеяния света. Можно предположить, что такая концентрация наночастиц  $\text{TiO}_2$  способствует этому процессу. Кроме того, излишняя концентрация наночастиц  $\text{TiO}_2$  также может приводить к тушению генерируемых радикалов (ROS) [10].

Сравнивая полученные данные с предыдущими исследованиями [28,29], можно утверждать, что меньший размер наночастиц  $\text{TiO}_2$  (5 nm против 25–100 nm)

обеспечивает более выраженное угнетающее действие на численность клеток стафилококка. Также необходимо отметить, что прокалывание наночастиц  $\text{TiO}_2$  при температурах  $> 900^\circ\text{C}$  (в случае использованных нами NC — до  $1115^\circ\text{C}$ ) сужает ширину запрещенной зоны с 3.43 до 3.14 eV [38], что усиливает фотокаталитические свойства материалов для видимого излучения.

Полученные в ходе исследования данные представляют научный и практический интерес, поскольку открывают возможность использования фиолетового СИД излучения для контролируемого снижения численности бактериальных популяций, при этом фотокаталитическая активность созданных нанокompозитов зависит от ряда параметров и характеристик наночастиц, входящих в их состав, что открывает возможность управления их фотокаталитическими свойствами.

## Благодарности

Работа В.В. Тучина поддержана грантом Правительства Российской Федерации (регистрационный номер 2020-220-08-2389) для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых.

## Конфликте интересов

Авторы заявляют, что исследование проводилось при отсутствии каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

## Список литературы

- [1] Rawson T.M., Ming D., Ahmad R., Moore L.S., Alison H., Holmes A.H. // Nat Rev. Microbiol. 2020. V. 18. P. 409–410. doi 10.1038/s41579-020-0395-y
- [2] Gao W., Zhang L. // Nat Rev. Microbiol. 2021. V. 19. P. 5. doi 10.1038/s41579-020-00469-5
- [3] Hamblin M.R. // Current Opinion in Microbiology. 2016. V. 33. P. 67. doi 10.1016/j.mib.2016.06.008
- [4] Wei G., Yang G., Wang Y., Jiang H., Fu Y., Yue G., Ju R. // Theranostics. 2020. V. 10. N. 26. P. 12241. doi 10.7150/thno.52729
- [5] Jia Z., Nadtochenko V., Radzig M.A., Khmel I.A., Zavigelsky G., Azouani R., Kanaev A. // Mechanics & Industry. 2016. V. 17. N. 5. P. 1. doi 10.1051/meca/2015108
- [6] Wang L., Hu C., Shao L. // Int. J. Nanomed. 2017. V. 12. P. 1227. doi 10.2147/IJN.S121956
- [7] Ganguly P., Byrne C., Breen A., Pillai S.C. // Appl. Catalysis B: Environmental. 2018. V. 225. P. 51. doi 10.1016/j.apcatb.2017.11.018
- [8] Regmi C., Joshi B., Ray S.K., Gyawali G., Pandey R.P. // Front. Chem. 2018. V. 6. P. 1. doi 10.3389/fchem.2018.00033
- [9] Lad V.N., Murthy Z.V.P. // Handbook of Smart Photocatalytic Materials. 2020. V. 1. P. 3–8. doi 10.1016/B978-0-12-819051-7.00001-4
- [10] Nosaka Y., Nosaka A.Y. // Chem. Rev. 2017. V. 117. N 17. P. 11302–11336. doi 10.1021/acs.chemrev.7b00161
- [11] Kim I.-S., Baek M., Choi S.-J. // J. Nanoscience and Nanotechnology. 2010. V. 10. N 5. P. 3453. doi 10.1166/jnn.2010.2340
- [12] Li F., Zhao Y., Hao Y., Wang X., Liu R., Zhao D., Chen D. // J. Hazardous Materials. 2010. V. 239. N 15. P. 7058. doi 10.1016/j.jhazmat.2012.08.016
- [13] Ansari M.A., Khan H.M., Alzohairy M.A., Jalal M., Ali S.G., Pal R., Mussarat J. // World J. Microbiol. Biotechnol. 2014. V. 31. P. 153. doi 10.1007/s11274-014-1757-2
- [14] Li B., Yuan H., Yi B., Zhang Y. // Ceramics International. 2016. V. 42. N 15. P. 17405. doi 10.1016/j.ceramint.2016.08.040
- [15] Sikora P., Adrian Augustyniak A., Cendrowski K., Nawrotek P., Mijowska E. // Nanomaterials. 2018. V. 8. N 4. P. 212–220. doi 10.3390/nano8040212
- [16] Jie L., Changcheng L., Aizeng M., Zhijian D., Huidong Z. // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. 2018. V. 20. N 4. P. 1.
- [17] Parham S., Wicaksono D., Nur Y. // J. Textile Institute. 2018. V. 110. N 5. P. 791. doi 10.3390/ma13092153
- [18] Lozhkomoiev A.S., Kazantsev S.O., Pervikov V., Fomenko N., Gotman I. // Materials Research Bulletin. 2019. V. 119. P. 1105545. doi 10.1016/j.materresbull.2019.110545
- [19] Köerich J.S., Nogueira D.J., Vaz V.P., Simioni C., Da Silva M.L.N., Ouriques L.C., Vicentini D.S., Matias W.G. // J. Toxicology and Environmental Health, Part A. 2020. V. 83. N 9. P. 363–377. doi 10.1080/15287394.2020.1761496
- [20] Tuchina E.S., Tuchin V.V. // Laser Phys. Lett. 2010. V. 7. N 8. P. 607–612. doi 10.1002/lapl.201010030
- [21] Sarkar A., Shchukarev A., Leino A.-R., Kordas K., Mikkola J.-P., Petrov P.O., Tuchina E.S., Popov A.P., Darvin M.E., Meinke M., Lademann J., Tuchin V.V. // Nanotechnology. 2012. V. 23. N 47. P. 475711. doi 10.1088/0957-4484/23/47/475711
- [22] Mohl M., Dombvari A., Tuchina E.S., Petrov P.O., Bibikova O.A., Skovorodkin I., Popov A.P., Rautio A.-R., Sarkar A., Mikkola J.-P., Huuhtanen M., Vainio S., Keiski R.L., Prilepsky A., Kukovec A., Konya Z., Tuchin V.V., Kordas K. // J. Materials Chemistry B. 2014. V. 2. P. 1307.
- [23] Laxma Reddy P.V., Kavitha B., Kumar Reddy P.A., Kim K.H. // Environ. Res. 2017. V. 154. P. 296. doi 10.1016/j.envres.2017.01.018
- [24] Shayegan Z., Lee C.-S., Haghghat F. // Chemical Engineering J. 2018. V. 334. P. 2408. doi 10.1016/j.ccej.2017.09.153
- [25] Nagay B.E., Dini C., Cordeiro J.M., Ricomini-Filho A.P., de Avila E.D., Rangel E.C., da Cruz N.C., Barão V.A. // Applied Materials & Interfaces. 2019. V. 11. N 20. P. 18186. doi 10.1021/acsami.9b03311
- [26] Bilal M., Ambreen B., Ali J., Hassan S., Khan A.U. // Chemistry and Chemical Engineering. 2019. V. 38. N 96. P. 261.
- [27] Rahmati A.M., Shayesteh S.F., Shayesteh H.F. // Phys. Solid State. 2020. V. 62. P. 120. doi 10.1134/S1063783420010023
- [28] Тучина Е.С., Корченова М.В., Светлакова А.В., Кордас К., Тучин В.В. // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2020. Т. 20. № 3. С. 324.
- [29] Bouslama M., Amamra M.C., Tieng S., Brinza O., Chhor K., Abderrabba M., Vignes J.-L., Kanaev A. // Appl. Catal. A. 2011. V. 402. N 3. P. 156. doi 10.1016/j.apcata.2011.05.042
- [30] Bouslama M., Amamra M.C., Jia Z., Amar M.B., Brinza O., Chhor K., Abderrabba M., Vignes J.-L., Kanaev A. // ACS Catal. 2012. V. 2. N 9. P. 1884. doi 10.1021/cs300033y
- [31] Vignes J.-L., Frappart C., Di Costanzo T., Rouchaud J.-C., Mazerolles L., Michel D. // Mater. Sci. 2008. V. 43. P. 1234. doi 10.1007/s10853-007-2260-z
- [32] Khodan A., Nguyen T.H.N., Esaulkov M., Kisele M.R., Amamra M., Vignes J.-L., Kanaev A. // J. Nanoparticle Research. 2020. V. 20. P. 194. doi 10.1007/s11051-018-4285-4
- [33] Khatim O., Amamra M., Chhor K., Bell T., Novikov D., Vrel D., Kanaev A. // Chem. Phys. Lett. 2013. V. 558. P. 53–56. doi 10.1016/j.cplett.2012.12.019
- [34] Maclean M., MacGregor S.J., Anderson J.G., Woolsey G.A. // J. Photochem. Photobiol. B. 2008. V. 92. P. 180–184. doi 10.1016/j.jphotobiol.2008.06.006
- [35] Tomb R.M., Maclean M., Coia J.E. // Antimicrob. Resist. Infect. Control. 2017. V. 6. P. 100. doi 10.1186/s13756-017-0261-5
- [36] Vorontsov A.V., Tsybulya S.V. // Chemistry Research. 2018. V. 57. N 7. P. 2526. doi 10.1021/acs.iecr.7b04480
- [37] Евстропьев С.К., Никоноров Н.В., Киселев В.М., Саратовский А.С., Колобкова Е.В. // Опт. и спектр. 2019. Т. 127. № 9. С. 292–299.
- [38] Селиверстова Е.В., Ибраев Н.Х., Жумабеков А.Ж. // Опт. и спектр. 2020. Т. 128. № 9. С. 373.
- [39] Kumar S., Verma N.K., Singla M.L. // Digest J. Nanomaterials and Biostructures. 2012. V. 7. N 2. P. 607–619.
- [40] Ko K.C., Bromley S., Lee J., Illas F. // The J. Phys. Chem. Lett. 2017. V. 8. N 22. P. 5593–5598. doi 10.1021/acs.jpcclett.7b02474