

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 544.478+544.227+615.281.9
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

Поступило в редакцию 20.11.2018
Received 20.11.2018

**А. В. Баглов¹, Т. А. Шевцова¹, Л. С. Хорошко¹,
Н. В. Дудчик², Е. В. Дроздова², В. Е. Борисенко¹**

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

²*Научно-практический центр гигиены, Минск, Республика Беларусь*

**ФОРМИРОВАНИЕ ИММОБИЛИЗОВАННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО
ДИОКСИДА ТИТАНА, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

(Представлено академиком В. А. Лабуновым)

Аннотация. Наноструктурированные покрытия из диоксида титана (TiO₂) сформированы на жестких алюминиевых и гибких стекловолоконных подложках золь-гель методом, модифицированным включением в золь нано- и субмикронных частиц TiO₂. Добавление в золь таких частиц приводит к образованию шероховатого покрытия из агломератов нано- и субмикронных частиц, скрепленных золь-гель синтезированным диоксидом титана. Антибактериальная активность полученных покрытий подтверждена в условиях облучения видимым светом светодиодного источника в течение 120 мин. Наибольшая активность продемонстрирована всеми образцами в отношении золотистого стафилококка.

Ключевые слова: диоксид титана, золь-гель метод, антибактериальная активность, наночастицы

Для цитирования: Формирование иммобилизованного наноструктурированного диоксида титана, обладающего антибактериальными свойствами / А. В. Баглов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 157–163. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

**Aleksey V. Baglov¹, Tatiana A. Shevtsova¹, Liudmila S. Khoroshko¹,
Natalia V. Dudchik², Alena V. Drozdova², Victor E. Borisenko¹**

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific Practical Centre of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus*

**FORMING IMMOBILIZED NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE
HAVING ANTIBACTERIAL PROPERTIES**

(Communicated by Academician Vladimir A. Labunov)

Abstract. Nanostructured titanium dioxide (TiO₂) coatings were formed on rigid aluminum and flexible fiberglass substrates using the sol-gel method modified by adding nano- and submicron TiO₂ particles to the sol. The use of sols with such particles leads to the formation of a rough coating of agglomerates of nano- and submicron particles bonded with sol-gel synthesized TiO₂. The antibacterial activity of the coatings was confirmed under irradiation with visible light from an LED source for 120 minutes. The most activity was demonstrated by all samples in relation to *Staphylococcus aureus*.

Keywords: titanium dioxide, sol-gel method, antibacterial activity, nanoparticles

For citation: Baglov A. V., Shevtsova T. A., Khoroshko L. S., Dudchik N. V., Drozdova A. V., Borisenko V. E. Forming immobilized nanostructured titanium dioxide having antibacterial properties. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 157–163 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-157-163>

Введение. Диоксид титана (TiO_2) зарекомендовал себя оптимальным широкозонным полупроводником для использования в качестве фотокатализатора благодаря его термической стабильности, химической стойкости, широкой распространенности, безвредности для человека и окружающей среды [1; 2]. Наноструктурированный TiO_2 проявляет высокую фотокаталитическую активность как при разложении органических соединений [3–5], так и при обеззараживании воды [4]. Однако он обладает довольно широкой запрещенной зоной (около 3,2 эВ для фазы анатаз), что накладывает определенные ограничения на спектр активирующих фотокатализатор источников излучения. Фотокатализаторы используют как в порошковом виде, диспергируя их в очищаемом растворе с последующей фильтрацией раствора после процесса очистки, так и в виде иммобилизованного покрытия на пассивной подложке.

В условиях фиксированного набора доступных источников излучения повышение фотокаталитической активности иммобилизованного фотокатализатора может быть достигнуто путем увеличения эффективной площади поверхности покрытия. Ранее мы продемонстрировали в [6], что формирование пленок с инкорпорированными нано- и субмикронными частицами TiO_2 позволяет значительно повысить их фотокаталитическую активность в отношении модельного красителя Родамин Б, ожидая аналогичного эффекта и в отношении антибактериальных свойств таких покрытий.

Антибактериальная активность фотокаталитически активных материалов обусловлена образованием свободных радикалов в результате взаимодействия фотогенерированных носителей заряда с ионами и молекулами очищаемой среды. Поверхность бактерий, как правило, имеет отрицательный заряд при биологических значениях pH, что способствует адсорбции радикалов на их поверхности с одновременной адсорбцией бактерий на положительно заряженных поверхностях. Поверхность микро- и наночастиц TiO_2 при нейтральных pH среды имеет отрицательный заряд. Их взаимодействие с бактериями обусловлено образованием водородных связей и катионных мостиков. Зависимость этих процессов от структуры поверхностного слоя катализатора и материала подложки представляет и научный, и практический интерес.

Целью проведенных нами исследований явилось определение антибактериальных свойств покрытий из наноструктурированного TiO_2 , сформированных золь-гель методом на жестких подложках из алюминия и гибких подложках из стекловолокна. Полученные результаты приведены в данном сообщении.

Материалы и методы исследования. В качестве жесткой подложки использовали алюминий технической чистоты толщиной 1 мм. Гибкой подложкой служило стекловолокно ЭЗ-200, состоящее из скрученных нитей алюмоборосиликатного стекла диаметром не более 20 мкм. Из них вырезали образцы размером 35×35 мм.

Предварительная очистка подложек из алюминия включала отмывку в изопропиловом спирте для удаления органических загрязнений и травление поверхности в 10 %-ном водном растворе гидроксида натрия (NaOH) для удаления поверхностного слоя естественного оксида алюминия и неорганических загрязнений. После каждого этапа химической обработки образцы тщательно промывали в дистиллированной воде и высушивали в потоке теплого (около 70 °С) воздуха. Часть очищенных алюминиевых подложек подвергали микроструктурированию поверхности с помощью химического травления в хлорсодержащем травителе по методике из работы [7] в течение 3,5 мин. Подготовка подложек из стекловолокна включала обезжиривание обработкой в ацетоне, отмывку в дистиллированной воде и сушку теплым воздухом.

Покрытия на всех подложках формировали с использованием двух золей – без диспергированных частиц и с диспергированными коммерческими нано- и субмикронными частицами TiO_2 с кристаллической структурой анатаза. Золь без частиц – базовый состав – включал 4 г этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и 4 г н-бутанола ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) в качестве дисперсионной среды золя, 0,18 г ацетилацетона ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) в качестве стабилизатора, 0,85 г тетраизопророксида титана ($\text{Ti}\{\text{OCH}(\text{CH}_3)_2\}_4$) в качестве прекурсора. В него добавляли 0,11 г дистиллированной воды для гидролиза прекурсора. В приготовленный таким образом базовый золь добавляли порошок из смеси наночастиц (Evonik P90) и субмикронных частиц TiO_2 в пропорции 1 : 1 в количестве 7,4 вес. %. Перед нанесением золя с диспергированными в нем частицами TiO_2 на подложки проводили его гомогенизацию переме-

шиванием на встряхивателе IKA Vortex 4 Digital с орбитальной траекторией встряхивания диаметром 4,5 мм в течение 1 ч.

Формирование покрытия на подложках осуществляли методом их окунания в два этапа. Сначала подложку погружали на 1 мин в непрерывно перемешиваемый на встряхивателе базовый золь. После ее извлечения избыток золя на боковых поверхностях удаляли бумажным фильтром. Затем подложку размещали горизонтально на кварцевом стекле с температурой 200 °С и высушивали на воздухе в течение 3 мин. Затем аналогичным образом наносили второй слой золя с диспергированными нано- и субмикронными частицами, после чего подложки с покрытием подвергали термообработке в муфельной печи при 500 °С на воздухе в течение 30 мин.

Анализ структуры поверхности образцов осуществляли методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фазовый состав сформированных покрытий определяли рентгеновским дифракционным анализом (РДА) в дифрактометре ДРОН-4 ($\lambda = 1,54179 \text{ \AA}$).

Антибактериальную активность сформированных покрытий определяли путем погружения подложек с исследуемыми покрытиями в раствор с тест-культурами вегетативных клеток и облучения поверхности покрытия светом видимого спектрального диапазона. В качестве тест-культур использовали кишечную палочку (*Escherichia coli*), золотистый стафилококк (*Staphylococcus aureus*) и синегнойную палочку (*Pseudomonas aeruginosa*). Облучение 50 мл стандартного раствора с каждой из этих культур и помещенной в них подложки с фотокатализатором осуществляли расположенной в 9,5 см от тестируемого образца светодиодной лампой видимого диапазона мощностью 10 Вт и цветовой температурой 4000 К. Оценку численности популяции микроорганизмов после светового воздействия осуществляли методом посева 0,1–1 мл тест-культуры на поверхность дифференциально-диагностических питательных сред, помещенных в чашки Петри. Использовали среду Эндо для *Escherichia coli*, желточно-солевой агар для *Staphylococcus aureus*, цитримидный агар для *Pseudomonas aeruginosa*. Посевы культивировали при оптимальной температуре 35–37 °С в течение 18–36 ч. После культивирования определяли количество колоний, имеющих типичные морфологические признаки, с последующим пересчетом колониеобразующих единиц на 1 мл раствора (КОЕ/мл). В качестве количественной оценки образующихся колоний брали среднее значение для трех идентичных по условиям культивирования чашек Петри [8].

Результаты и их обсуждение. Травление поверхности алюминия в течение 3,5 мин привело к удалению слоя алюминия толщиной около 50 мкм и образованию губкообразной неоднородной поверхности с углублениями диаметром 10–30 мкм и глубиной до 15 мкм. Стенки крупных углублений дополнительно имеют области протрава размером в единицы мкм (рис. 1). При большом увеличении (рис. 1, *b*) различима внутренняя слоистая структура алюминия, образованная при прокате фольги. Фото гладкой алюминиевой подложки мы не приводим из-за отсутствия значимых особенностей.

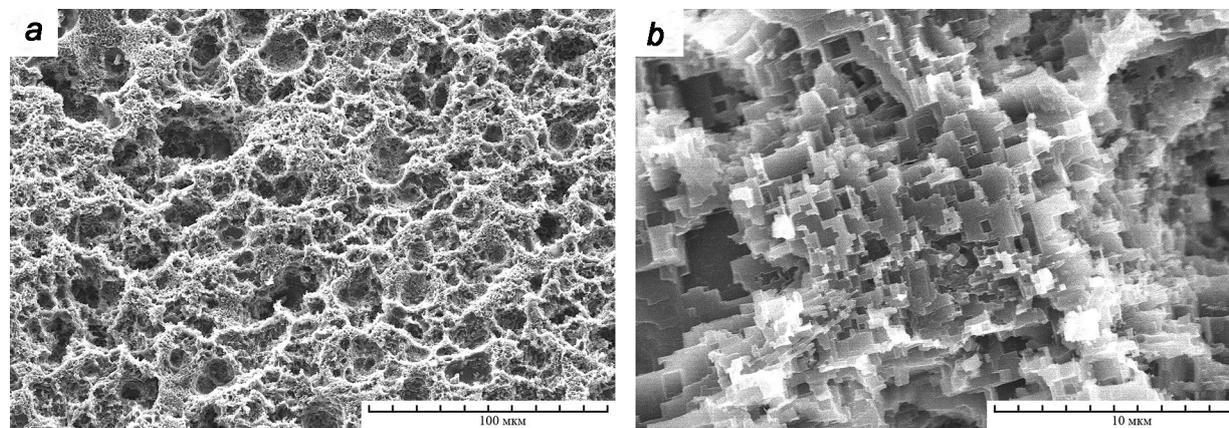


Рис. 1. Поверхность микроструктурированной подложки из алюминия. Увеличение: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 5000$

Fig. 1. Surface view of microstructured aluminum substrate. Magnification: *a* – $\times 500$; *b* – $\times 5000$

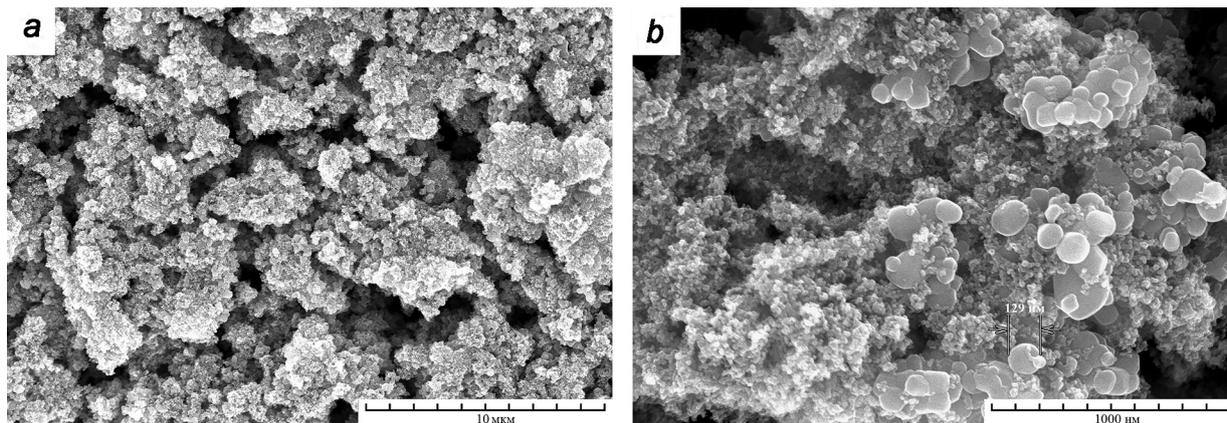


Рис. 2. Поверхность наноструктурированного покрытия, полученного из золя с диспергированными коммерческими нано- и субмикронными частицами TiO_2 . Увеличение: $a - \times 5000$, $b - \times 50000$

Fig. 2. Surface view of nanostructured coating fabricated from the sol with dispersed commercial nano- and submicron TiO_2 particles. Magnification: $a - \times 5000$, $b - \times 50000$

На гладких и микроструктурированных алюминиевых подложках после отжига ксерогеля образовалось шероховатое покрытие, состоящее из агломератов нано- и субмикронных частиц размером до 8 мкм, скрепленных диоксидом титана из золя (рис. 2). Толщина покрытий составляет 3–5 мкм, что больше, чем было получено нами ранее [6]. Это связано с горизонтальной ориентацией образцов во время нанесения золя, благодаря чему на поверхность подложки оседают частицы из слоя золя над образцом. Седиментация приводит к накоплению части субмикронных частиц в нижней части покрытия, что объясняет малое количество субмикронных частиц на его поверхности.

Ранее нами было показано [9], что микроструктурирование поверхности подложки увеличивает фотокаталитическую активность таких покрытий за счет увеличения неоднородности

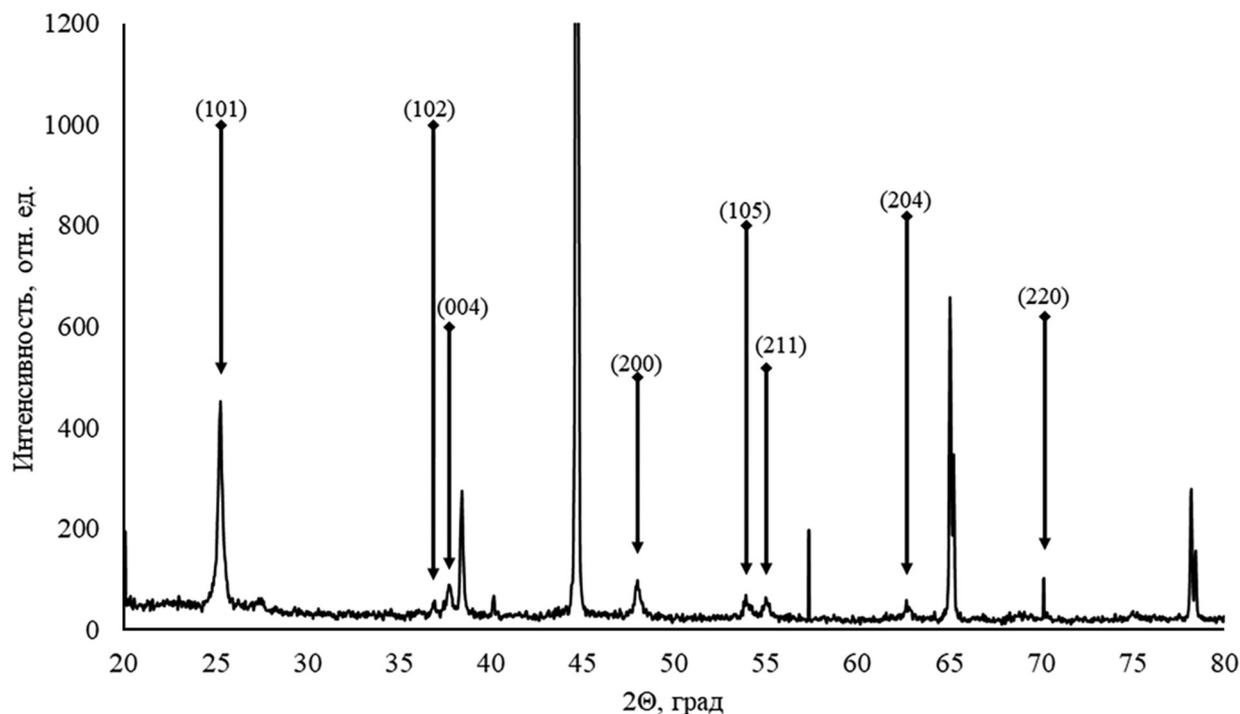


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма покрытия из TiO_2 с нано- и субмикронными частицами на алюминиевой подложке. В скобках обозначены индексы Миллера для анатаза

Fig. 3. XRD spectrum of TiO_2 coating with nano- and submicron particles on aluminum substrate. There are Miller's indexes for anatase in parentheses

рельефа. Однако, как установлено в выполненных экспериментах, с увеличением толщины покрытия после 3 мкм происходит выравнивание рельефа его поверхности, который становится практически независимым от шероховатости поверхности подложки. Покрытия, сформированные из базового золя (без нано- и субмикронных частиц), имели сравнительно гладкую поверхность.

Результаты рентгеновского исследования фазового состава сформированных покрытий приведены на рис. 3. На нем обозначены рефлексы, принадлежащие TiO_2 с кристаллической решеткой анатаза. Рефлексы без обозначения принадлежат алюминиевой подложке. Кристаллизация TiO_2 в анатаз полная, нет шумов, связанных с рентгеноаморфной фазой, а также рефлексов от рутила и брукита. Кристаллиты анатаза с ориентацией (101) являются основным компонентом полученного покрытия.

Формирование TiO_2 покрытий на гибкой стекловолоконной подложке проводили по той же методике. По результатам исследования РЭМ принципиальных отличий в структуре покрытий не обнаружено, за исключением большей неоднородности в толщине и наличия агломератов частиц, ограниченных замкнутыми областями, образованными нитями ткани. Проведенный рентгеновский анализ не показал отличий в фазовом составе полученных покрытий.

Оценку антибактериальной активности проводили в условиях описанного выше модельного эксперимента с временем экспозиции 120 мин. Критериально значимым принимали фактор редукции $R_{120} = \lg_0 - \lg_{120}$, где \lg_0 – логарифм количества клеток в начале экспозиции (\lg КОЕ/мл), \lg_{120} – логарифм количества клеток через 120 мин (\lg КОЕ/мл). Полученные результаты обобщены в таблице.

Антибактериальная активность покрытий из наноструктурированного диоксида титана

Antibacterial activity of nanostructured titanium dioxide coatings

Тест-модель Test-model	Фактор редукции R_{120} Reduction factor R_{120}		
	Гладкий алюминий Smooth aluminum	Микроструктурированный алюминий Microstructured aluminum	Стекловолокно Fiberglass
<i>Escherichia coli</i>	1,5	2,0	0,6
<i>Staphylococcus aureus</i>	2,5	2,8	3,1
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,3	1,2	0,9
Консорциум микроорганизмов microorganism consortium <i>E. coli</i> : <i>S. aureus</i> : <i>P. aeruginosa</i> (1 : 1 : 1)	0,4	0,6	0,6

Все образцы продемонстрировали антибактериальную активность в отношении используемых бактериальных культур. В отношении *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa* покрытия на алюминиевой подложке показали лучшую активность, а в случае *Staphylococcus aureus* лучшую активность продемонстрировали покрытия на стекловолокне. В случае консорциума культур покрытия на микроструктурированной подложке и стекловолокне показали одинаковый результат, превосходящий результат покрытия на гладкой алюминиевой подложке. Мы полагаем, что повышенная активность покрытий на стекловолокне в отношении *Staphylococcus aureus* связана со случайными факторами, например, попаданием в высеваемую тест-культуру мелкодисперсных частиц диоксида титана с поверхности волокон, так как гибкая подложка даже при малых деформациях способна нарушать целостность покрытия. Лучшая активность в случае микроструктурированной алюминиевой подложки может быть связана с несколько большей шероховатостью поверхности, плохо различимой на РЭМ-снимках, но влияющую на активность в масштабе всего образца.

Заключение. Предложена простая и эффективная золь-гель технология формирования наноструктурированных покрытий из диоксида титана на жестких алюминиевых и гибких стекловолоконных подложках. Включение в состав исходного золя нанометровых и субмикронных частиц уже сформированного в фазе анатаза TiO_2 повышает шероховатость поверхности покрытия, обеспечивая тем самым его повышенную антибактериальную активность. Наибольшую из исследованных антибактериальную активность имеют покрытия на микроструктурированном

алюминии, что позволяет рекомендовать их как опытный образец для дальнейших углубленных исследований с целью оценки безопасности для здоровья человека при практическом использовании в системах фотокаталитической очистки воды и воздуха от патогенных и условно-патогенных бактерий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Конвергенция–2020», задания 3.05 (№ 20163900, 20163533 и 20161869). Авторы выражают благодарность А. А. Малашевичу за рентгеновский дифракционный анализ образцов.

Acknowledgement. The work is supported by the SPSI “Convergence–2020”, the tasks 3.05 (no. 20163900, 20163533 and 20161869). We are grateful to A. A. Malashevich for XRD analysis of samples.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gupta, S. M. A Review of TiO₂ Nanoparticles / S. M. Gupta, M. Tripathi // *Chinese Sci. Bull.* – 2011. – Vol. 56, N 16. – P. 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
2. Wang, C.-T. Titania Nanocomposite Thin Films with Enhanced Photovoltaic Efficiency: Effects of Ti-Alkoxide Sol and Compact Layer / C.-T. Wang, C.-F. Yen // *Surface & Coatings Technology.* – 2012. – Vol. 206, N 8–9. – P. 2622–2627. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.025>
3. Photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide / O. V. Kupreeva [et al.] // *J. Appl. Spectroscopy.* – 2013. – Vol. 79, N 6. – P. 1010–1013. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9706-7>
4. Heterogeneous photocatalysis in titania-containing liquid foam / D. G. Shchukin [et al.] // *Photochemical & Photobiological Sciences.* – 2004. – Vol. 3, N 2. – P. 157–159. <https://doi.org/10.1039/b313935b>
5. Photocatalytic destruction of tetracycline hydrochloride on the surface of titanium dioxide films modified by gold nanoparticles / O. P. Linnik [et al.] // *J. Appl. Spectroscopy.* – 2015. – Vol. 81, N 6. – P. 990–995. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0040-0>
6. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates / A. V. Baglov [et al.] // *Inorganic Materials.* – 2017. – Vol. 53, N 11. – P. 1180–1184. <https://doi.org/10.1134/s0020168517110036>
7. Baglov, A. V. Formation of the microrelief on aluminum surface by chemical etching / A. V. Baglov, L. S. Khoroshko // XIIth International Conference “Electronics and Applied Physics”: proceedings of the EAP’2016. – Kyiv, 2016. – P. 59–60.
8. Дудчик, Н. В. Тест-модель и количественный критериальный показатель для оценки антимикробного потенциала наноматериалов, используемых для водоочистки и водоподготовки: обоснование и метрологическая оценка / Н. В. Дудчик, Е. В. Дроздова, С. И. Сычик // *Анализ риска здоровью.* – 2018. – № 3. – С. 104–111. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.11>
9. Baglov, A. V. Tuning the structure and photocatalytic activity of TiO₂ sol-gel fabricated films by incorporation of nano- and submicron particles / A. V. Baglov, N. M. Denisov // International Conference “Nanomeeting–2017”: Proceedings of International Conference Nanomeeting–2017. – Singapore, 2017. – P. 274–278. https://doi.org/10.1142/9789813224537_0063

References

1. Gupta S. M., Tripathi M. Review of TiO₂ nanoparticles. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 16, pp. 1639–1657. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4476-1>
2. Wang C.-T., Yen C.-F. Titania Nanocomposite Thin Films with Enhanced Photovoltaic Efficiency: Effects of Ti-Alkoxide Sol and Compact Layer. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 206, no. 8–9, pp. 2622–2627. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.11.025>
3. Kupreeva O. V., Lazarouk S. K., Borisenko V. E., Kun L., Kang T. Photocatalytic properties of nanostructured titanium dioxide. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 79, no. 6, pp. 1010–1013. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9706-7>
4. Shchukin D. G., Ustinovich E. A., Kulak A. I., Sviridov D. V. Heterogeneous photocatalysis in titania-containing liquid foam. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2004, vol. 3, no. 2, pp. 157–159. <https://doi.org/10.1039/b313935b>
5. Linnik O. P., Zhukovskiy M. A., Starukh G. N., Smirnova N. P., Gaponenko N. V., Asharif A. M., Khoroshko L. S., Borisenko V. E. Photocatalytic destruction of tetracycline hydrochloride on the surface of titanium dioxide films modified by gold nanoparticles. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 81, no. 6, pp. 990–995. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0040-0>
6. Baglov A. V., Denisov N. M., Borisenko V. E., Uglov V. V., Malashevich A. A. Photocatalytic activity of nanostructured titania coatings on aluminum substrates. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1180–1184. <https://doi.org/10.1134/s0020168517110036>
7. Baglov A. V., Khoroshko L. S. Formation of the microrelief on aluminum surface by chemical etching. *XIIth International Conference “Electronics and Applied Physics”: Proceedings of the EAP’2016*. Kyiv, 2016, pp. 59–60.
8. Dudchik N. V., Drozdova E. V., Sychik S. I. Test-model and quantitative R_{DDS} criterion index which are applied to estimate antimicrobial potential of nanomaterials used for water purification and treatment: substantiation and metrologic assessment. *Analiz riska zdorov’yu = Health Risk Analysis*, 2018, no. 3, pp. 104–111 (in Russian). <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.3.11.eng>
9. Baglov A. V., Denisov N. M. Tuning the structure and photocatalytic activity of TiO₂ sol-gel fabricated films by incorporation of nano- and submicron particles. *International Conference “Nanomeeting–2017”: Proceedings of International Conference Nanomeeting–2017*. Singapore, 2017, pp. 274–278. https://doi.org/10.1142/9789813224537_0063

Информация об авторах

Баглов Алексей Викторович – науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: baglov@bsuir.by.

Шевцова Татьяна Александровна – аспирант. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filippova.tatyana.a@gmail.com.

Хорошко Людмила Сергеевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: l_khoroshko@bsuir.by.

Дудчик Наталья Владимировна – д-р биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Научно-практический центр гигиены (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Дроздова Елена Валентиновна – канд. мед. наук, доцент, заведующий лабораторией. Научно-практический центр гигиены (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Борисенко Виктор Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: borisenko@bsuir.by.

Information about the authors

Baglov Aleksey Victorovich – Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: baglov@bsuir.by.

Shevtsova Tatiana Aleksandrovna – Postgraduate student. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filippova.tatyana.a@gmail.com.

Khoroshko Liudmila Sergeevna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: l_khoroshko@bsuir.by.

Dudchik Natalia Vladimirovna – D. Sc. (Biology), Associate professor, Head of the Laboratory. Scientific Practical Center of Hygiene (8, Akademicheskaya Str., 8, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_dudchik@tut.by.

Drozdova Alena Valentinovna – Ph. D. (Medicine), Associate professor, Head of the Department. Scientific Practical Center of Hygiene (8, Akademicheskaya Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: drozdovaev@mail.ru.

Borisenko Victor Evgenievich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department. Belarusian State University Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: borisenko@bsuir.by.