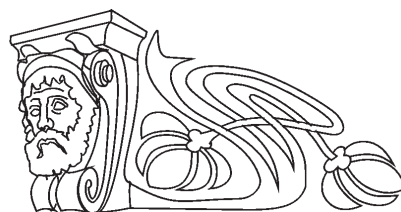




УДК 577.344.3.579.61.666.1.056

Новые гипс-титановые композиты для антимикробного фотокаталитического воздействия на *Staphylococcus aureus*

Е. С. Тучина, М. В. Корченова, А. В. Светлакова, К. Кордас, В. В. Тучин



Тучина Елена Святославна, кандидат биологических наук, доцент, кафедра биохимии, биофизики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kliany@rambler.ru

Корченова Мария Владимировна, магистр, кафедра биохимии, биофизики, биологический факультет, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, masha.korchenova@mail.ru

Светлакова Анна Владимировна, студент, кафедра биохимии, биофизики, биологический факультет, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, anna5vetlakova@yandex.ru

Кордас Криштиану, профессор лаборатории микроэлектроники и физики материалов и оптоэлектроники и технических измерений, университет Оулу, Финляндия, lary@ee.oulu.fi

Тучин Валерий Викторович, член-корреспондент РАН, профессор, кафедра оптики и биофотоники, физический факультет, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского; Национальный исследовательский Томский государственный университет; Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, tuchinvv@mail.ru

В последнее десятилетие были созданы новые композитные фотокаталитические материалы с широким спектром применения. Антимикробные покрытия на основе фотокаталитических материалов являются экологически чистыми и эффективными для применения в здравоохранении, пищевой промышленности, на предприятиях и объектах сферы услуг. Данное исследование посвящено изучению антибактериальной активности гипс-титановых нанокомпозитов. Были проверены иммобилизованные в гипсе нанопроволоки диоксида титана, легированные палладием и допированные азотом и водородом при освещении светодиодными источниками в УФ и фиолетовой части спектра (365, 385, 405 нм). Было показано, что материалы с повышенным содержанием гипса и легированные палладием проявляют наибольшую антибактериальную активность (до 90–98% гибели микробной популяции) за счет оптимального поглощения света на выбранных длинах волн и его рассеяния в гипсе. При использовании композитов в сочетании с разным освещением показано, что наиболее эффективным является комплексное действие образца G-Ti-Pd-7, содержащего 10 масс.% нанопроволок TiO_2 , прошедших допирование азотом и легирование палладием.

Ключевые слова: фотокаталитическое воздействие, нанопокрyтия, наночастицы, нанокомпозиты, гипс, TiO_2 , УФ и фиолетовый свет, микроорганизмы, метициллин-чувствительный *Staphylococcus aureus* (MSSA), метициллин-устойчивый *Staphylococcus aureus* (MRSA).

Поступила в редакцию: 24.04.2020 / Принята: 20.05.2020 / Опубликовано: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-324-331>

Введение

В настоящее время резистентность бактерий к антибиотикам является огромной проблемой современной медицины. Каждый год разрабатываются новые препараты для антимикробной терапии, у возбудителей госпитальных инфекций развилась устойчивость уже ко многим из существующих видов антибактериальных препаратов [1–3]. Совершенно очевидно, что требуются новые способы борьбы с патогенами, в том числе при создании и оборудовании медицинских учреждений, объектов образования, предприятий по производству пищевой продукции и т. п. Одним из таких способов является фотокаталитическая антимикробная терапия. Метод основан на способности фотокатализаторов генерировать активные радикалы (гидроксид-ион и активные формы кислорода (АФК)), которые негативно воздействуют на микроорганизмы [4]. Метод является экологически чистым и безопасным для человека [5].

Распространение бактерий особенно опасно в сферах здравоохранения, пищевой промышленности, поэтому создание самоочищающихся поверхностей на основе гипса имеет важное значение [6, 7]. Гипс обладает собственной фотокаталитической активностью, обусловленной наличием свободных орбиталей, обеспечивающих возникновение пары «электрон – дырка», обладающих высокой химической активностью. Углубленное изучение поверхностей с фотокаталитической активностью началось в последние несколько лет [8–14]. Дополнение гипса неорганическими полупроводниковыми материалами (Au , Fe_2O_3 , CuO , TiO_2) является эффективным способом борьбы с патогенами в общественных местах [13, 14]. На основе гипса, дополненного наночастицами из полупроводниковых материалов, создаются покрасочные и отделочные материалы.



Гипс-титановые композиты являются перспективным наноматериалами и используются не только для покрытия поверхностей, но и для добавления в протезы, зубные пломбы, текстильные материалы [13–17].

В данном исследовании представлены гипс-титановые композиты, допированные азотом, водородом и легированные палладием [16, 17], активность которых проверена на двух штаммах *Staphylococcus aureus* – метициллин-чувствительном (MSSA) и метициллин-устойчивом (MRSA). Усиление антимикробных свойств новых композитных материалов достигалось с использованием светодиодов УФ и фиолетовой части спектра.

Материалы и методы

Объектами исследования служили два бактериальных штамма – метициллин-чувствительный и метициллин-устойчивый *Staphylococcus aureus* (ГИСК им. Л. А. Тарасевич, Москва, Россия).

Культуры выращивали на универсальной плотной питательной среде (ГРМ-агар, Оболенск) при 37° С. Для проведения экспериментов использовали 24-часовые культуры.

В качестве источников излучения использовали светодиодные источники УФ и фиолетовой части спектра (табл. 1).

Нанопроволоки диоксида титана были получены гидротермальным методом из диоксида титана в форме анатаза [12]. Допированные азотом частицы (G-Ti-N-3, 7) были синтезированы путем отжига волокон диоксида титана при 600° С в течение 4 ч в 2% NH₃.

Легирование палладием (G-Ti-Pd-5, 7) осуществлялось путем мокрой пропитки из Pd-ацетилацетоната (Sigma-Aldrich; 99,9% раствор). Все образцы были кальцинированы, часть образцов – окислена-восстановлена (G-Ti-Pd-5, 7) в смеси 15% H₂/Ar (AGA, Linde) в течение 4 ч при 500°С (табл. 2).

Таблица 1 / Tabel 1

Светодиодные источники излучения, использованные в работе
LED sources of radiation used in the work

Максимум испускания, нм / Emission maximum, nm	Плотность мощности, мВт/см ² / Power density, mW/cm ²
365	8
385	17
405	70

Таблица 2 / Tabel 2

Характеристики новых гипс-титановых нанокompозитов
Characteristics of new gypsum-titanium nanocomposites

Обозначение / Abbreviation	Количество, г / Amount, g		Наличие / Presence		Процесс окисления – восстановления / Oxidation – reduction process
	TiO ₂	Гипс / Gypsum	Азот / Nitrogen	Палладий / Palladium	
G-Ti-1	0,5	1,5			
G-Ti-N-3	0,2	0,5	+		
G-Ti-Pd-5	0,5	1,5		+	+
G-Ti-Pd-7	0,5	1,5	+	+	+
G	10	0			

Гипсовые композиты были приготовлены смешением коммерчески доступного обожженного гипса (Ardex A828) с дистиллированной водой и нанопроволоками. Полученные композиты были помещены в лунки коммерческого 24-луночного полистирольного планшета.

При проведении экспериментов по антимикробному действию гипс-титановых композитов бактериальную суспензию (10⁹ мл/мл) объемом 1 мл наносили на поверхность образцов

в лунках планшета, оставляли в темноте на 1 ч (контроль). Аналогичным образом помещенную в лунки суспензию облучали светом с выбранной длиной волны в течение 5, 10, 15 и 30 мин. После воздействия бактериальную суспензию доводили до концентрации ~ 10³ мк/мл, наносили на поверхность питательной среды и распределяли стерильным шпателем.

Учет результатов осуществлялся путем подсчета колониеобразующих единиц (КОЕ) через



24–48 ч после инкубации при 37° С. В качестве контроля принимали значения колониеобразующей способности для бактерий, не подвергавшихся облучению светом и не контактировавших с нанокompозитами. Каждый эксперимент проводился в десяти повторностях.

Результаты и их обсуждение

Наночастицы (НЧ) диоксида титана (анатаз) имеют край полосы поглощения в УФ-части спектра на длине волны 367 нм. Расширение спектра поглощения в сторону видимой области возможно благодаря легированию диоксида титана разными металлами, допированию во-

дородом, азотом и т. д., что, в свою очередь, дает большие возможности в использовании НЧ [16]. Как показано в работе [17], наночастицы диоксида титана, допированные азотом и легированные палладием, дают смещение в сторону видимого спектра, что оправдывает выбор трех длин волн излучения для проведения эксперимента.

Показано, что излучение всех трех типов светодиодных источников (365, 385, 405 нм) оказывает незначительное действие на жизнеспособность исследуемых штаммов. Снижение числа КОЕ после 30 мин облучения отмечено не более чем на 39% (рис. 1–3).

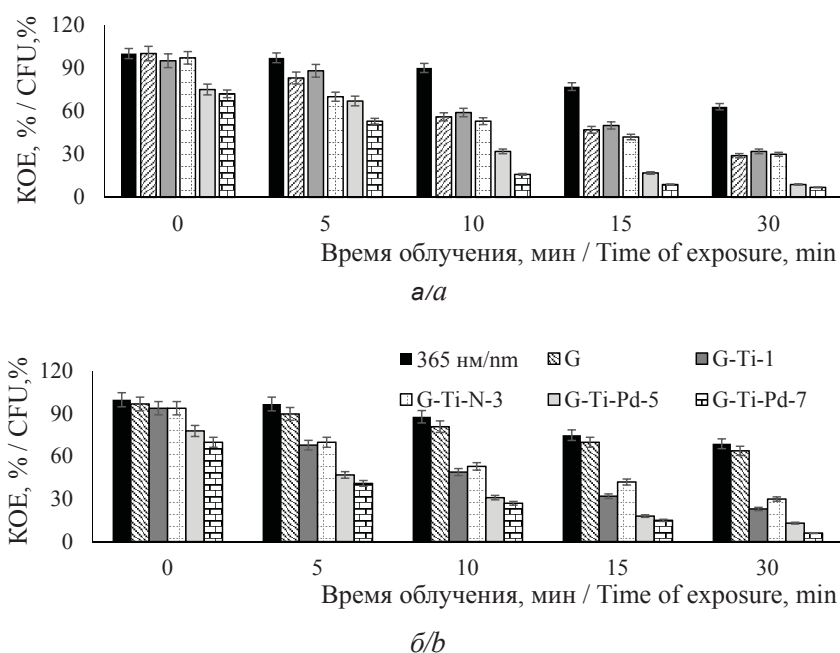


Рис. 1. Влияние УФ светодиодного излучения (365 нм, 8 мВт/см²) на выживаемость стафилококков: а – MSSA, б – MRSA
Fig. 1. Effect of UV LED light (365 nm, 8 mW/cm²) on staphylococci: a – MSSA, b – MRSA

Токсическое действие чистого гипса в сочетании с излучением было выражено более ярко. Свет с длиной волны 365 нм после 30 мин воздействия на бактериальные клетки, инкубированные с чистым гипсом, вызывал гибель 71% популяции MSSA (рис. 1, а), в то время как длины волн 385 нм и 405 нм приводили к снижению числа КОЕ данного штамма на 42 и 39% соответственно.

Для метициллин-резистентного штамма показана обратная зависимость: наибольшее сокращение КОЕ было отмечено после облучения светом с длиной волны 405 нм в присутствии гипса и составило 86% (рис. 3, б), тогда как свет

на длинах волн 365 нм и 385 нм вызывал гибель 36 и 47% клеток соответственно (рис. 1, б, 2, б).

Добавление титановых проволок к гипсу в соотношении 1 : 3 усиливало антибактериальный эффект нанокompозитов при действии всех трех длин волн. Для MSSA это усиление происходило в среднем на 7%, для MRSA – на 15%. Допирование наночастиц NH₃ влечет за собой еще одну ступень повышения их фотокаталитической активности, которая, однако, не превышает в среднем 10% для обоих исследованных штаммов.

Легированные палладием нанопроволоки в составе нанокompозитов обладали темновой

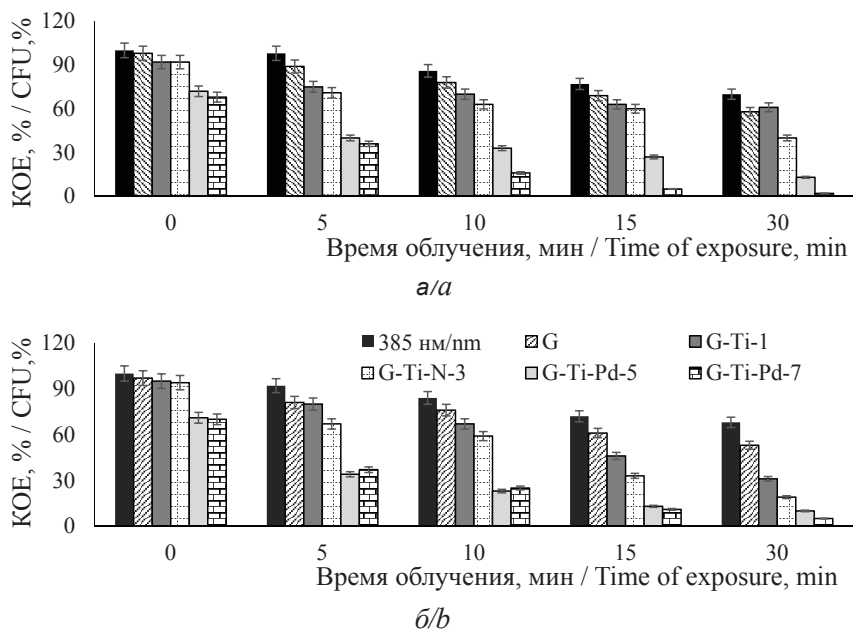


Рис. 2. Влияние УФ светодиодного излучения (385 нм, 17 мВт/см²) на выживаемость стафилококков: а – MSSA; б – MRSA

Fig. 2. Effect of LED light (385 nm, 8 mW/cm²) on staphylococci: a – MSSA; b – MRSA

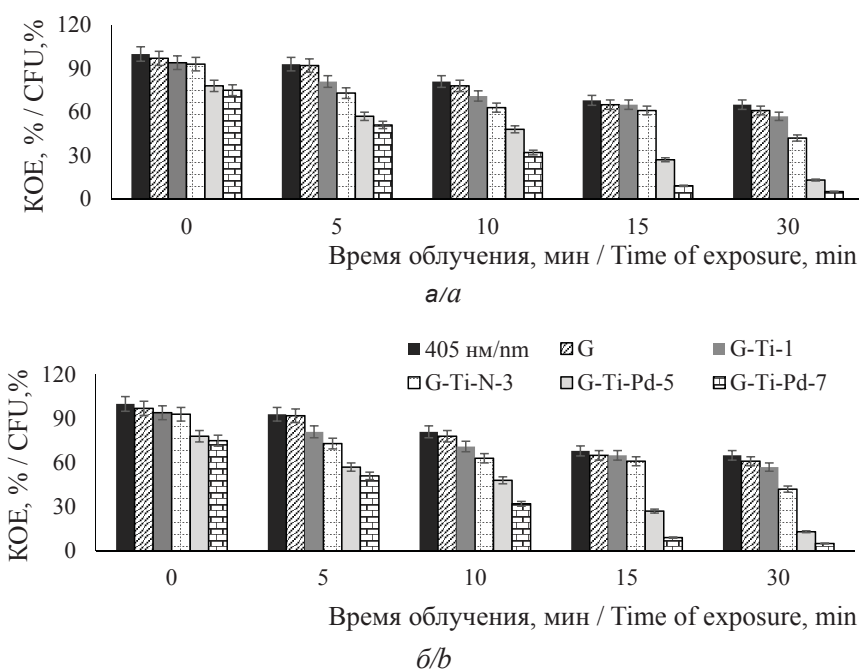


Рис. 3. Влияние фиолетового светодиодного излучения (405 нм, 70 мВт/см²) на выживаемость стафилококков: а – MSSA; б – MRSA

Fig. 3. Effect of LED light (405 nm, 70 mW/cm²) on staphylococci: a – MSSA; b – MRSA

токсичностью в небольших пределах (до 25% гибели бактериальных клеток) и существенно усиливали антимикробную активность образцов при облучении светом. При этом наиболее эффективными оказались вариант G-Ti-Pd-7 и длина

волны источника излучения 385 нм – для MSSA сокращение КОЕ составило 98% (рис. 2, а), для MRSA сокращение КОЕ составило 95% (рис. 2, б).

Эффективность фотокаталитического воздействия можно оценить как % подавления патогенна,



поделенный на плотность мощности источника света. Максимальное значение данного показателя отмечено для сочетания 365 нм и G-Ti-Pd-7 и для MSSA равно 12,1, а для MRSA – 11,8. Аналогичным образом проявило себя это сочетание и случае с длиной волны 385 нм (значения 5,7 и

5,5 для MSSA и MRSA соответственно). Интерес представляет то, что для метициллин-устойчивого штамма при облучении фиолетовым светом видимого спектра (405 нм) данный показатель составлял 1,3 и не зависел от типа исследуемых композитов (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Эффективность подавления клеток *S. aureus* [%/(мВт/см²)] различными источниками излучения (табл. 1) для исследуемых фотокатализаторов
Efficiency of suppression of *S. aureus* cells [% / (mW / cm²)] by various radiation sources (table 1) for the studied photocatalysts

Обозначение / Abbreviation	Средняя длина волны, нм / Mean wavelength, nm					
	365		385		405	
	MSSA	MRSA	MSSA	MRSA	MSSA	MRSA
G-Ti-1	8,8	9,6	2,3	4,1	0,6	1,3
G-Ti-N-3	7,1	9,1	3,5	4,8	0,8	1,3
G-Ti-Pd-5	11,4	10,9	5,1	5,2	1,2	1,3
G-Ti-Pd-7	12,1	11,8	5,7	5,5	1,3	1,3
G	8,5	4,5	2,5	2,8	0,5	1,2

Показано, что штамм MSSA оказался более чувствительным к воздействию фиолетового света, тогда как MRSA проявил большую чувствительность к УФ-излучению. Оба штамма микроорганизмов проявили выраженную чувствительность к образцам с повышенным содержанием гипса.

Это можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, гипс также имеет собственную каталитическую активность [6, 7]. Во-вторых, наночастицы диоксида титана, находящиеся в гипсе, увеличивают свою реакционную способность за счет диффузии света при его сильном рассеянии в гипсе. Легирование диоксида титана азотом и палладием изменяет характер спектра поглощения, увеличивает поглощение света на используемых длинах волн и, следовательно, усиливает бактериостатическое действие материала.

Гипс-титановые нанокompозиты являются перспективным антибактериальным материалом. При использовании композитов в сочетании с разным освещением показано, что наиболее эффективным является комплексное действие образца G-Ti-Pd-7, содержащего 10 масс.% нанопроволок TiO₂, света с длиной волны 365 нм и плотностью мощности 8 мВт/см². Антибактериальное воздействие нанокompозитов зависит от плотности мощности (дозы облучения) и фотокаталитической активности материалов, а также рассеяния света в гипсе и содержания порфиринов и каротиноидов в клетках бактерий,

которые могут усиливать бактерицидное действие света (порфирины) или, наоборот, частично маскировать его действие на линиях поглощения тех же порфиринов и каротиноидов.

Следует также отметить, что биологические ткани оказываются более прозрачными на длинах волн 365 и 385 нм, чем на 405 нм, и прозрачность на длинах волн 365 и 385 нм можно увеличить в десятки раз при использовании оптических просветляющих агентов типа глицерина [18, 19]. Это открывает возможность антимикробной УФ-фототерапии слизистых оболочек человека.

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам лабораторий микроэлектроники и физики материалов и оптоэлектроники и технических измерений Университета Оулу (Оулу, Финляндия) за предоставленные образцы гипс-титановых нанокompозитов; сотруднику кафедры оптики и биофотоники СГУ им. Н. Г. Чернышевского (Саратов, Россия) Л. Е. Долотову за помощь при проведении измерений и настройке оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № АААА-А18-118042790042-4) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология. Основы технологии» (подпрограмма «Нанобиотехнология»).



Список литературы

1. Решедько Г. Л., Рябкова Е. Л., Кречикова О. И., Сухорукова М. В., Шевченко О. В., Эйдельштейн М. В., Козлов Р. С. Резистентность к антибиотикам грамотрицательных возбудителей нозокомиальных инфекций в ОРИТ многопрофильных стационаров России // *Болезни и возбудители*. 2008. Т. 10, № 2. С. 96–112.
2. Thompson K. A., Bennett A. M., Walker J. T., Hosp J. Aerosol survival of *Staphylococcus epidermidis* // *Journal of Hospital Infection*. 2011. Vol. 78, № 3. P. 216–220.
3. Martin J. K., Sheehan J. K., Bratton B. P., Moore G. M., Mateus A., Li S. H.-J., Kim H., Rabinowitz J. D., Typas A., Savitski M. M., Wilson M. Z., Gitai Z. A Dual-Mechanism Antibiotic Kills Gram-Negative Bacteria and Avoids Drug Resistance // *The Cell*. 2020. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.05.005>
4. Lipovsky A., Nitzan Y., Friedmann H., Lubart R. Sensitivity of *Staphylococcus aureus* Strains to Broadband Visible Light // *Photochem. Photobiol.* 2009. Vol. 85, № 1. P. 255–260.
5. Szczawinski J., Tomaszewski H., Jackowska-Tracz A., Szczawińska M. E. Survival of *Staphylococcus aureus* exposed to UV radiation on the surface of ceramic tiles coated with TiO₂ // *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2011. Vol. 14, № 1. P. 41–46.
6. Subhi H., Reza F., Husein A., Nurul A. A. Cytotoxicity of gypsum-based biomaterial for direct pulp capping using stem cells from human exfoliated deciduous teeth // *J. Conserv Dent*. 2018. Vol. 21, № 1. P. 21–25.
7. Нуриева Е. М., Королев Э. А., Бахтин А. И., Халлиллин М. И., Алтыкис М. Г., Рахимов Р. З., Сабанина Ю. В. Комплексные исследования физико-механических и структурных свойств минералов многофазовых гипсовых вяжущих при длительном хранении // *Минералогия техногенеза*. 2006. Т. 6, № 1. С. 333–339.
8. Фатхутдинова Л. М., Халиллин Т. О., Залялов Р. Р. Токсичность искусственных наночастиц // *Казан. мед. журн.* 2009. Т. 90, № 4. С. 578–584.
9. Абдуллин И. Ш., Канарская З. А., Хубатхузин А. А., Калашиников Д. И., Гатина Э. Б. Нанодисперсные материалы на основе оксида титана в микробиологической, медицинской и пищевой промышленности // *Вестн. Казан. техн. ун-та*. 2012. Т. 10, № 12. С. 158–165.
10. Makvandi P., Wang C.-Y., Nazarzadeh Zare E., Borzacchiello A., Niu L., Tay F. Metal-based nanomaterials in biomedical applications : Antimicrobial activity and cytotoxicity aspects // *Adv. Funct. Mater.* 2020. Vol. 30, № 22. DOI: [10.1002/adfm.201910021](https://doi.org/10.1002/adfm.201910021)
11. Fujishima A., Zhang X. Titanium dioxide photocatalysis : present situation and future approaches // *C. R. Chimie*. 2006. Vol. 9. P. 750–760.
12. Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles : Focus on anti-microbial properties // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2010. Vol. 79, № 1. P. 5–18.
13. Гуров А. А., Позорова С. Е. Создание полифазных керамических образцов на основе наноразмерного диоксида титана // *Master's Journal*. 2016. Vol. 1. P. 36–40.
14. Тучина Е. С., Гвоздев Г. А., Кособудский И. Д., Ших В.-С., Тучин В. В. Антимикробное фотодинамическое воздействие с использованием покрытий на основе наночастиц металлов (Ag, Au) // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 322–325. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-3-322-325>
15. Jing Z., Wang C., Wang G., Li W., Lu D. Preparation and antibacterial activities of undoped and palladium doped titania nanoparticles // *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2010. Vol. 56. P. 121–127.
16. 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. Photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: effect of thermal annealing under various gaseous atmospheres // *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. P. 1–8.
17. Mohl M., Dombovari 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. Titania nanofibers in gypsum composites: an antibacterial and cytotoxicology study // *Journal of Materials Chemistry B*. 2014. Vol. 2. P. 1307–1316.
18. Carneiro I., Carvalho S., Henrique R., Oliveira L., Tuchin V. Moving tissue spectral window to the deep-ultraviolet via optical clearing // *J. Biophotonics*. 2019. Vol. 12, № 12. P. e201900181.
19. Селифонова А. А., Тучин В. В. Управление оптическими свойствами тканей десны и дентина зуба человека на лазерных линиях в диапазоне 200–800 нм // *Квантовая электроника*. 2020. Т. 50, № 1. С. 47–54.

Образец для цитирования:

Тучина Е. С., Корченова М. В., Светлакова А. В., Кордас К., Тучин В. В. Новые гипс-титановые композиты для антимикробного фотокаталитического воздействия на *Staphylococcus aureus* // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология*. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 324–331. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-324-331>

New Gypsum-Titanium Composites for Antimicrobial Photocatalytic Action on *Staphylococcus aureus*

E. S. Tuchina, M. V. Korchenova, A. V. Svetlakova, K. Kordas, V. V. Tuchin

Elena S. Tuchina, <https://orcid.org/0000-0003-4498-2846>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, kliany@rambler.ru

Mariya V. Korchenova, <https://orcid.org/0000-0002-5398-4045>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, masha.korchenova@mail.ru



Anna V. Svetlakova, <https://orcid.org/0000-0002-2293-5849>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, anna5vetlakova@yandex.ru

Krisztian Kordas, <https://orcid.org/00000-0002-7331-1278>, Microelectronics Research Unit, University of Oulu, P.O. Box 4500, FIN-90014, Finland, lapy@ee.oulu.fi

Valery V. Tuchin, <https://orcid.org/0000-0001-7479-2694>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012; Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050; Institute of Problems of Precision Mechanics and Control, Russian Academy of Sciences, 24 Rabochaia St., Saratov 410056, Russia, tuchinvv@mail.ru

The last decade has allowed the creation of new composite photocatalytic materials with a wide range of applications. Antimicrobial coatings based on photocatalytic materials are environmentally friendly and effective for use in health care, the food industry, enterprises and service facilities. This study is devoted to the study of the antibacterial activity of gypsum-titanium nanocomposites. Titanium dioxide nanowires immobilized in gypsum, doped with palladium and supplemented with nitrogen and hydrogen, when illuminated by LED sources in the UV and violet spectral regions (365, 385, 405 nm) were tested. It was shown that materials with a high content of gypsum and doped with palladium exhibit the highest antibacterial activity (up to 90–97% of the death of the microbial population) due to better absorption of light and its diffusion. The most effective was the complex action of radiation and G-Ti-Pd-7 sample containing 10 wt.% TiO₂ nanowires that were doped with nitrogen and palladium.

Keywords: photocatalytic effects, UV and violet light, nanocoatings, nanoparticles, nanocomposites, gypsum, TiO₂, microorganisms, methicillin-sensitive *Staphylococcus aureus* (MSSA), methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA).

Received: 24.04.2020 / Accepted: 20.05.2020 / Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: Authors are grateful to the staff of laboratory of microelectronics and physics of materials and laboratory of optoelectronics and technical measurements of the University of Oulu (Oulu, Finland) for the provided samples of gypsum-titanium nanocomposites; to L. E. Dolotov (Department of Optics and Biophotonics, SSU, Saratov, Russia) for helping with measurements and setting up equipment.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. AAAA-A18-118042790042-4) and the Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 32 “Nanostructures: physics, chemistry, biology. Technology Basics” (subprogram “Nanobiotechnology”) for supporting research.

References

1. Reshedko G. L., Ryabkova E. L., Krechikova O. I., Sukhorukova M. V., Shevchenko O. V., Eidelshstein M. V., Kozlov R. S. Antibiotic resistance of gram-negative pathogens of nosocomial infections in the ICU of multi-disciplinary hospitals in Russia. *Diseases and Pathogens*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 96–112 (in Russian).
2. Thompson K. A., Bennett A. M., Walker J. T., Hosp J. Aerosol survival of *Staphylococcus epidermidis*. *Journal of Hospital Infection*, 2011, vol. 78, no. 3, pp. 216–220.
3. Martin J. K., Sheehan J. K., Bratton B. P., Moore G. M., Mateus A., Li Sh.-J., Kim H., Rabinowitz J. D., Typas A., Savitski M. M., Wilson M. Z., Gitai Z. A Dual-Mechanism Antibiotic Kills Gram-Negative Bacteria and Avoids Drug Resistance. *The Cell*, 2020, vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.05.005>
4. Lipovsky A., Nitzan Y., Friedmann H., Lubart R., Sensitivity of *Staphylococcus aureus* Strains to Broadband Visible Light. *Photochem. Photobiol.*, 2009, vol. 85, no. 1, pp. 255–260.
5. Szczawinski J., Tomaszewski H., Jackowska-Tracz A., Szczawińska M.E. Survival of *Staphylococcus aureus* exposed to UV radiation on the surface of ceramic tiles coated with TiO₂. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 41–46.
6. Subhi H., Reza F., Husein A., Nurul A. A. Cytotoxicity of gypsum-based biomaterial for direct pulp capping using stem cells from human exfoliated deciduous teeth. *J. Conserv Dent.*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 21–25.
7. Nurieva E. M., Korolev E. A., Bakhtin A. I., Halliullin M. I., Altykis M. G., Rakhimov R. Z., Sabanina Yu. V. Comprehensive studies of the physicochemical and structural properties of multiphase gypsum binders minerals during long-term storage. *Mineralogy of Technogenesis*, 2006, vol. 6, no. 1, pp. 333–339 (in Russian).
8. Fathutdinova L. M., Khaliullin T. O., Zalyalov R. R. Toxicity of artificial nanoparticles. *Kazan Medical Journal*, 2009, vol. 90, no. 4, pp. 578–584 (in Russian).
9. Abdullin I. Sh., Kanarskaya Z. A., Khubathuzin A. A., Kalashnikov D. I., Gatina E. B. Nanodispersed materials based on titanium oxide in the microbiological, medical and food industries. *Bulletin of Kazan Technical University*, 2012, vol. 10, no. 12, pp. 158–165 (in Russian).
10. Makvandi P., Wang C.-Y., Nazarzadeh Zare E., Borzacchiello A., Niu L., Tay F. Metal-based nanomaterials in biomedical applications: Antimicrobial activity and cytotoxicity aspects. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, vol. 30, no. 22. DOI: 10.1002/adfm.201910021
11. Fujishima A., Zhang X. Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches. *C. R. Chimie*. 2006. vol. 9, pp. 750–760.
12. Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, vol. 79, no. 1, pp. 5–18.
13. Gurov A. A., Pozorova S. E. Creating polyphase ceramic samples based on nanosized titanium dioxide. *Master's Journal*, 2016, vol. 1, pp. 36–40.



14. Tuchina E. S., Gvozdev G. A., Kosobudskiy I. D., Shih W.-C., Tuchin V. V. Antimicrobial Photodynamic Effects Using Coatings Based on Metal Nanoparticles (Ag, Au). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 322–325 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2019-19-3-322-325>
15. Jing Z., Wang C., Wang G., Li W., Lu D. Preparation and antibacterial activities of undoped and palladium doped titania nanoparticles. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2010, vol. 56, pp. 121–127.
16. 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. Photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: effect of thermal annealing under various gaseous atmospheres. *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, pp. 1–8.
17. Mohl M., Dombovari 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., Kukovecz A., Konya Z., Tuchin V. V., Kordas K. Titania nanofibers in gypsum composites: an antibacterial and cytotoxicology study. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, vol. 2, pp. 1307–1316.
18. Carneiro I., Carvalho S., Henrique R., Oliveira L., Tuchin V. Moving tissue spectral window to the deep-ultraviolet via optical clearing. *J. Biophotonics*, 2019, vol. 12, no. 12, pp. e201900181.
19. Selifonov A. A., Tuchin V. V. Control of the optical properties of gum and dentin tissue of a human tooth on laser lines in the range 200–800 nm. *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 1, pp. 47–54 (in Russian).

Cite this article as:

Tuchina E. S., Korchenova M. V., Svetlakova A. V., Kordas K., Tuchin V. V. New Gypsum-Titanium Composites for Antimicrobial Photocatalytic Action on *Staphylococcus aureus*. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 324–331 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2020-20-3-324-331>