

Оригинальная статья / Original article

УДК 546.655

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-199-210>

Антиоксидантная активность аблированных наночастиц диоксида церия в окислительной фотокаталитической реакции

В. А. Мамонтов¹ ✉, В. В. Родионов¹, А. Ю. Рыженкова¹, И. В. Егельский¹,
В. И. Каленчук¹, М. А. Пугачевский¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: vladimir-mamontov@yandex.ru

Резюме

Цель. Исследование и сравнение антиоксидантных свойств наночастиц диоксида церия, аблированных из импортной и лабораторной мишеней в окислительной фотокаталитической деградации метиленового синего.

Методы. Путем прессования порошка диоксида церия и отжига прессованной мишени были получены лабораторные мишени, которые подверглись процессу лазерной абляции. Методом атомно-силовой микроскопии выполнена характеристика наночастиц диоксида церия. Спектрофотометрическим методом выполнено исследование антиоксидантных свойств наночастиц диоксида церия. Изучена и сравнена антиоксидантная активность аблированных наночастиц, полученных из двух мишеней в окислительной фотокаталитической реакции. Методом лазерной абляции получены наночастицы диоксида церия с высокой антиоксидантной активностью.

Результаты. Методом атомно-силовой микроскопии установлены средние предельные размеры нецентрифугированных и центрифугированных при скорости 1000 об/мин аблированных наночастиц диоксида церия. Выявлено, что элементный состав порошка диоксида церия, из которого прессовалась лабораторная мишень, и элементный состав импортной мишени совпадают, и процент примеси в них находится в рамках допустимого для проведения процесса лазерной абляции. Было проведено сравнение антиоксидантной активности наночастиц диоксида церия, аблированных из лабораторной и импортной мишеней. Полученные в ходе исследования данные свидетельствуют о том, что наибольшую антиоксидантную активность проявляют наночастицы диоксида церия, полученные из лабораторной мишени.

Заключение. Наночастицы диоксида церия, подвергнутые лазерной абляции из лабораторной мишени, представляют собой наноматериалы, являющиеся антиоксидантами, инактивирующими активные формы кислорода в фотокаталитической реакции. Антиоксидантная активность наночастиц диоксида церия, полученных из лабораторной мишени, не ниже, а выше, чем у наночастиц, полученных из импортной мишени. Данные свойства наночастиц диоксида церия обусловлены наличием на их поверхности кристаллических дефектов типа кислородных вакансий.

Ключевые слова: наночастицы; диоксид церия; лазерная абляция; отжиг; пресс; антиоксидантные свойства; фотокаталитическая реакция.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и Министерства образования и науки Курской области (Соглашения № 23-29-10198, № 173). Работа выполнена также при поддержке Министерства образования и науки РФ (з/з 2020 № 0851-2020-0035), в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1155).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Мамонтов В. А., Родионов В. В., Рыженкова А. Ю., Егельский И. В.,
Каленчук В. И., Пугачевский М. А., 2023

Для цитирования: Антиоксидантная активность аблированных наночастиц диоксида церия в окислительной фотокаталитической реакции / В. А. Мамонтов, В. В. Родионов, А. Ю. Рыженкова, И. В. Егельский, В. И. Каленчук, М. А. Пугачевский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 199–210. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-199-210>

Поступила в редакцию 18.07.2023

Подписана в печать 25.08.2023

Опубликована 29.09.2023

Antioxidant Activity of Ablated Cerium Dioxide Nanoparticles in an Oxidative Photocatalytic Reaction

Vladimir A. Mamontov¹✉, Vladimir V. Rodionov¹, Anna Yu. Ryzhenkova¹,
Ilia V. Egelsky¹, Valery I. Kalenchuk¹, Maksim A. Pugachevskii¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladimir-mamontov@yandex.ru

Abstract

Purpose of the study. Study and comparison of the antioxidant properties of ablated cerium dioxide nanoparticles in the oxidative photocatalytic degradation of methylene blue ablated from imported and laboratory targets.

Methods. By pressing cerium dioxide powder and annealing the pressed target, laboratory targets were obtained, which were subjected to the laser ablation process. Atomic force microscopy was used to characterize cerium dioxide nanoparticles. The spectrophotometric method was used to study the antioxidant properties of cerium dioxide nanoparticles. The antioxidant activity of ablated nanoparticles obtained from two targets in an oxidative photocatalytic reaction has been studied and compared. Cerium dioxide nanoparticles with high antioxidant activity were obtained by laser ablation.

Results. Using atomic force microscopy, the average limiting sizes of non-centrifuged and centrifuged samples at a speed of 1000 rpm of ablated cerium dioxide nanoparticles were established. It was found that the elemental composition of the cerium dioxide powder, from which the laboratory target was pressed, and the elemental composition of the imported target are the same, and the percentage of impurities in them is within the limits acceptable for the laser ablation process. The antioxidant activity of cerium dioxide nanoparticles ablated from laboratory and imported targets was compared. The data obtained in the course of the study indicate that cerium dioxide nanoparticles obtained from a laboratory target exhibit the highest antioxidant activity.

Conclusion. Cerium dioxide nanoparticles subjected to laser ablation from a laboratory target are nanomaterials that are antioxidants that inactivate reactive oxygen species in a photocatalytic reaction. The antioxidant activity of cerium dioxide nanoparticles obtained from a laboratory target is not lower, but higher than that of nanoparticles obtained from an imported target. These properties of cerium dioxide nanoparticles are due to the presence of crystalline defects such as oxygen vacancies on their surface.

Keywords: nanoparticles; cerium dioxide; laser ablation; annealing; press; antioxidant properties; photocatalytic reaction.

Funding: The study was financially supported by the Russian Science Foundation and the Ministry of Education and Science of the Kursk Region (Agreements No. 23-29-10198, No. 173). The work was also supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (g/z 2020 No. 0851-2020-0035), as part of the implementation of the Priority-2030 strategic academic leadership program (Agreement No. 075-15-2021-1155).

Conflict of interest: The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Mamontov V. A., Rodionov V. V., Ryzhenkova A. Yu., Egelsky I. V., Kalenchuk V. I., Pugachevskii M. A. Antioxidant Activity of Ablated Cerium Dioxide Nanoparticles in an Oxidative Photocatalytic Reaction. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(3): 199–210. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-199-210>

Received 18.07.2023

Accepted 25.08.2023

Published 29.09.2023

Введение

Наночастицы оксида церия широко используются в промышленных материалах в качестве катализаторов в системах сжигания топлива и в качестве электролитов в топливных элементах [1; 2]. Они также имеют применение в полировке стекла как основной компонент полирита [3] и в медико-биологическом направлении в качестве антиоксидантов в различных биологических системах [4; 5; 6]. Наночастицы диоксида церия нейтрализуют различные виды окислителей в окислительных реакциях, например в реакции Фентона [7]. Наночастицы оксида церия были исследованы на предмет активности против раковых опухолей [8], воспаления [9], в качестве противомикробных агентов [10–13], в качестве терапевтических средств при нейродегенеративных расстройствах, таких как болезнь Паркинсона [14] и болезнь Альцгеймера [15], и на активность, направленную против COVID-19 [16; 17].

Антиоксидантные свойства наночастиц диоксида церия определяются их структурными дефектами, такими как кислородные вакансии. При переходе в наноразмерное состояние на поверхности частиц диоксида церия возникает нестехиометрия кислорода за счет восстановления ионов Ce^{4+} до ионов Ce^{3+} . Инактивация активных форм кислорода обусловлена антиоксидантным циклом, который происходит на поверхности наночастиц диоксида церия [18–20].

В условиях импульсной лазерной абляции материала мишени можно получить наночастицы оксидов переходных металлов, обогащенных поверхностными структурными дефектами. Данные дефекты обуславливают высокую антиоксидантную активность наночастиц [21; 22].

В статье представлены результаты сравнения антиоксидантных свойств нецентрифугированных и центрифугированных при скорости 1000 об/мин нанодисперсных растворов диоксида церия, полученных из импортной и лабораторной мишеней, подвергнутых фотокатализу в присутствии частиц оксида цинка.

Материалы и методы

Импортные мишени были закуплены, а лабораторные мишени были изготовлены из порошка диоксида церия класса «ХЧ» при помощи гидравлического пресса для горячего прессования образцов с системой водяного охлаждения OPAL 460. Порошок диоксида церия массой 40 г прессовался при температуре 190°C и давлении 245 бар в течение 30 минут. Время охлаждения полученной мишени после процесса прессования составляло 15 мин. Так как диоксид церия является тугоплавким веществом с температурой плавления 2400°C, то температура пресса, которая являлась максимальной для данного прибора, была недостаточной, чтобы полученная мишень была прочной. Для увеличения прочности мишени, чтобы в дальнейшем из неё получать наночастицы диоксида церия методом лазерной абляции, был выполнен её отжиг в инфракрасной печи MILA-5000. Температура и время отжига составляли соответственно 970°C и 90 мин. После процесса отжига мишень становилась более прочной, что позволяло проводить в дальнейшем на мишени процесс лазерной абляции.

Для напыления наночастиц диоксида церия на кремниевые подложки был применён физический метод получения, а именно метод лазерной абляции. Импульсное лазерное излучение лазера IPG Photonics (длина волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса 200 мкс) направлялось на мишени диоксида церия

и наночастицы диоксида церия наносились на кремниевые пластины [23]. Время нанесения необходимого количества наночастиц для проведения исследований составляло 10 мин.

В дальнейшем в водной среде наночастицы диспергировали 30 мин и после процесса диспергирования центрифугировали со скоростью вращения 1000 об/мин 5 минут. Далее методом атомно-силовой микроскопии проводилась характеристика наночастиц диоксида церия. Также были проведены опыты по исследованию антиокислительных свойств наночастиц диоксида церия с помощью спектрофотометрического анализа в диапазоне 550–750 нм [23]. После центрифугирования 80% раствора от общего объема извлекали с помощью шприца из микропробирки объемом 2 мл. Образцы, полученные из диспергированного и центрифугированного раствора диоксида церия, по каплям наносились на кремниевые подложки из расчета одна капля на каждую подложку. Для элементного анализа импортной мишени и порошка диоксида церия, из которого была спрессована лабораторная мишень, использовалась энергодисперсионная приставка сканирующего электронного микроскопа.

Для изучения и сравнения антиоксидантных свойств аблированных наночастиц диоксида церия, полученных из лабораторной и импортной мишеней, проведен следующий эксперимент. Проводилась фотокаталитическая реакция с добавлением частиц оксида цинка и наночастиц диоксида церия. Фотокаталитическую реакцию проводили на органическом веществе метиленовом синем. После проведения процесса лазерной абляции наночастицы диоксида церия 30 минут диспергировали. Диспергированию также подвергался раствор оксида цинка в течение

30 мин. Далее оба раствора центрифугировали 5 мин со скоростью 1000 об/мин. Потом выполнялся забор поверхностной части полученного раствора из микропробирки [23]. Несмотря на то, что в нецентрифугированном нанодисперсном растворе диоксида церия частиц больше, чем в центрифугированном, наночастицы диоксида церия имеют более высокую антиоксидантную активность после центрифугирования. Обусловлено это тем, что в центрифугированном растворе больше частиц с нанометровым распределением по размерам. Время проведения фотокаталитической реакции составило 60 минут.

Результаты и их обсуждение

Методом атомно-силовой микроскопии выявлено, что размеры наночастиц диоксида церия варьируются в пределах от 10 до 190 нм. На рисунке 1 представлены снимки образцов с атомно-силового микроскопа.

По полученным АСМ-изображениям были построены гистограммы распределения наночастиц диоксида церия по размерам, показанные на рисунке 2.

В результате обработки АСМ-изображений были получены средние предельные размеры для нецентрифугированных и центрифугированных на скорости 1000 об/мин образцов аблированных наночастиц CeO_2 , которые составили $61,95 \pm 0,1$ нм и $56,59 \pm 0,1$ нм. В [24] установлено, что, используя центрифугирование, можно получать дисперсные растворы аблированных наночастиц диоксида церия.

На рисунке 3 указаны спектры энергодисперсионной спектроскопии порошка диоксида церия, из которого была отпрессована лабораторная мишень.

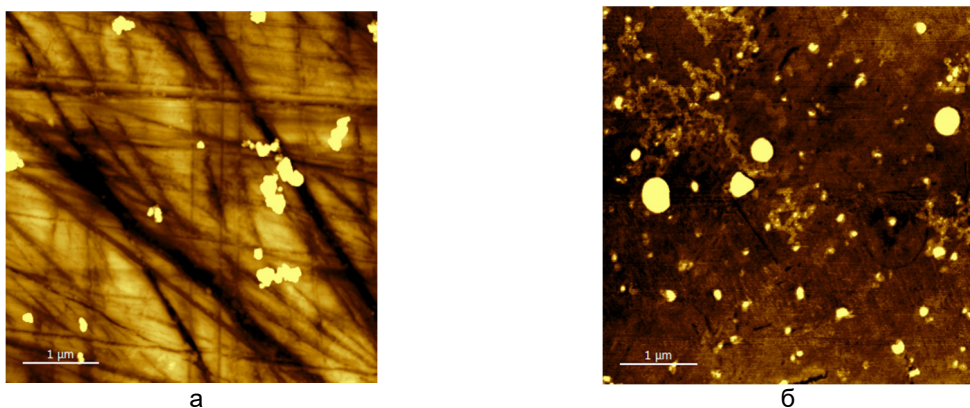


Рис. 1. Изображения с атомно-силового микроскопа аблированных наночастиц диоксида церия: а – нецентрифугированных; б – центрифугированных со скоростью 1000 об/мин

Fig. 1. Atomic force microscope images of ablated cerium dioxide nanoparticles: а – non-centrifuged; б - centrifuged at a speed of 1000 rpm

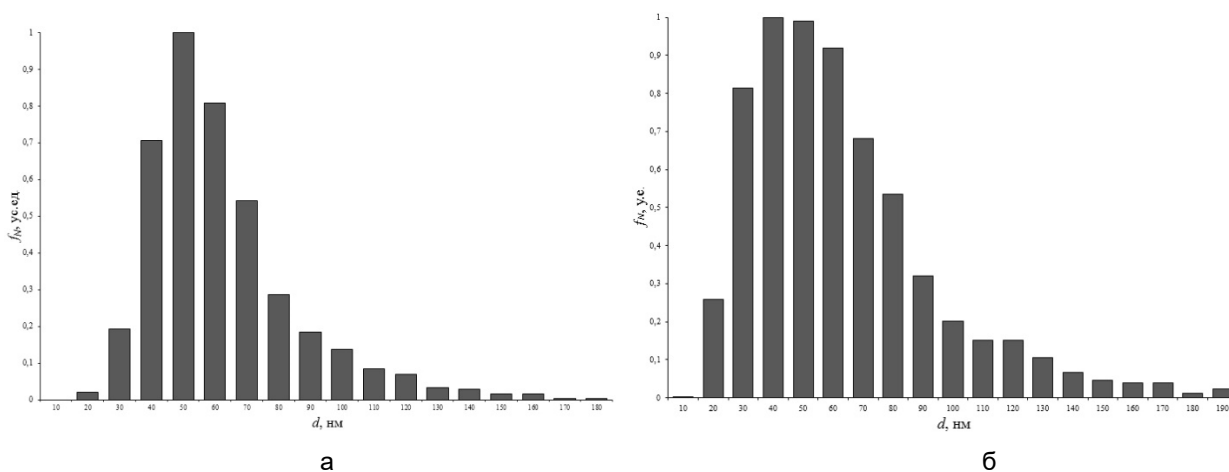


Рис. 2. Гранулометрия аблированных наночастиц диоксида церия по АСМ-изображениям: а – нецентрифугированных; б – центрифугированных со скоростью 1000 об/мин

Fig. 2. Granulometry of ablated cerium dioxide nanoparticles according to AFM images: а – non-centrifuged; б - centrifuged at a speed of 1000 rpm

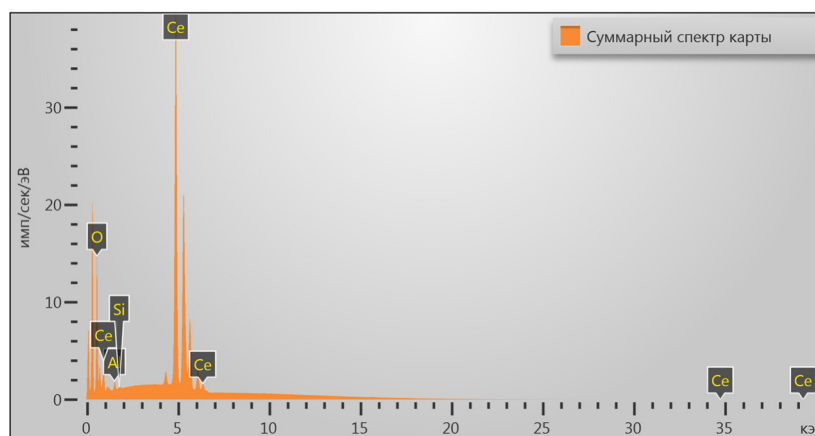


Рис. 3. Энергодисперсионная спектроскопия порошка диоксида церия, из которого прессовалась лабораторная мишень

Fig. 3. Energy dispersive spectroscopy of cerium dioxide powder from which a laboratory target was pressed

В таблице 1 указан количественный элементный состав порошка диоксида церия.

На рисунке 4 указаны спектры энергодисперсионной спектроскопии импортной мишени.

В таблице 2 указан количественный элементный состав импортной мишени.

Таблица 1. Количественный элементный состав порошка диоксида церия

Table 1. Quantitative elemental composition of cerium dioxide powder

Показатель	Элемент				Сумма
	O	Al	Si	Ce	
Тип линии	К серия	К серия	К серия	L серия	
Вес, %	21,88	1,32	0,16	76,65	100
Атом, %	69,45	2,48	0,29	27,78	100

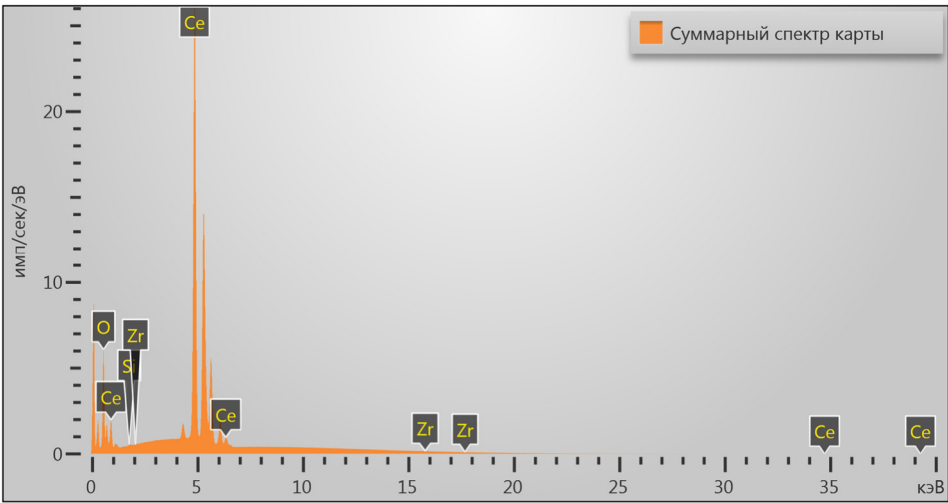


Рис. 4. Энергодисперсионная спектроскопия импортной мишени

Fig. 4. Energy dispersive spectroscopy of an imported target

Таблица 2. Количественный элементный состав импортной мишени

Table 2. Quantitative elemental composition of the imported target

Показатель	Элемент				Сумма
	O	Si	Zr	Ce	
Тип линии	К серия	К серия	L серия	L серия	
Вес, %	15,29	0,13	0,08	84,49	100
Атом, %	61,1	0,3	0,06	38,54	100

По итогам энергодисперсионного анализа выявлено, что элементный состав двух типов мишеней совпадает. Процент содержащихся в них примесей невысок.

Исследованы антиокислительные свойства наночастиц диоксида церия, по-

лученных из импортных и лабораторных мишеней. На рисунке 5 показан график зависимости концентрации раствора метиленового синего от времени фотокатализа.

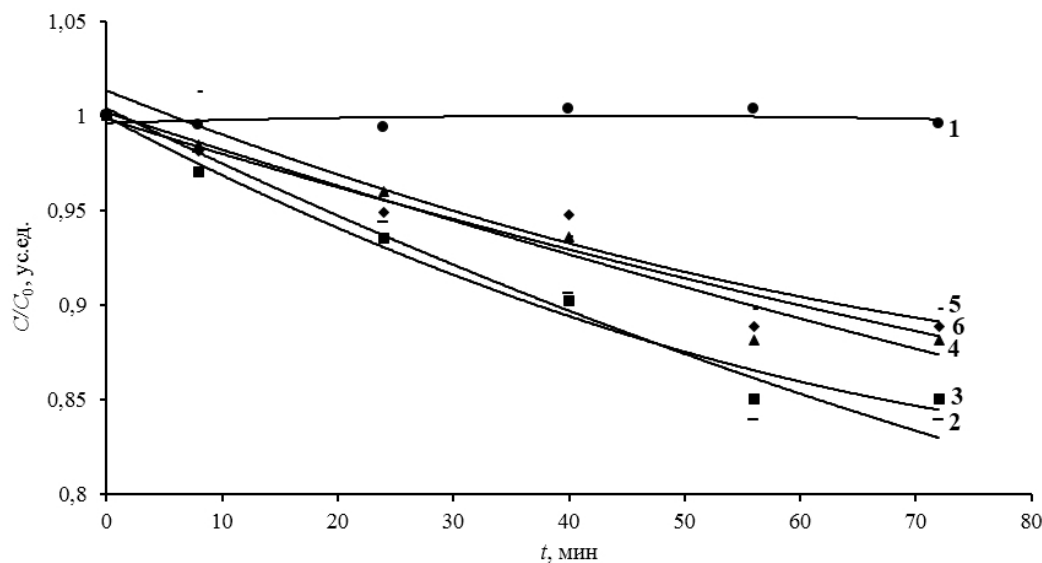


Рис. 5. Кинетические кривые метиленового синего в процессе фотокатализа: 1 – без присутствия наночастиц диоксида церия и частиц оксида цинка; 2 – без присутствия наночастиц диоксида церия и с присутствием частиц оксида цинка; 3 – с присутствием частиц оксида цинка и нецентрифугированных наночастиц диоксида церия, аблированных из импортной мишени; 4 – с присутствием частиц оксида цинка и центрифугированных наночастиц диоксида церия на скорости 1000 об/мин, аблированных из импортной мишени; 5 – с присутствием частиц оксида цинка и нецентрифугированных наночастиц диоксида церия, аблированных из лабораторной мишени; 6 – с присутствием частиц оксида цинка и центрифугированных наночастиц диоксида церия на скорости 1000 об/мин, аблированных из лабораторной мишени, сплошные линии – аппроксимирующие кривые

Fig. 5. Kinetic curves of methylene blue during photocatalysis: 1 – without the presence of cerium dioxide nanoparticles and zinc oxide particles; 2 – without the presence of cerium dioxide nanoparticles and with the presence of zinc oxide particles; 3 – with the presence of zinc oxide particles and non-centrifuged cerium dioxide nanoparticles ablated from an imported targets; 4 – with the presence of zinc oxide particles and centrifuged cerium dioxide nanoparticles at a speed of 1000 rpm, ablated from an imported target; 5 – with the presence of zinc oxide particles and non-centrifuged cerium dioxide nanoparticles ablated from a laboratory target; 6 – with the presence of oxide particles zinc and centrifuged cerium dioxide nanoparticles at a speed of 1000 rpm, ablated from a laboratory target, solid lines are approximating curves

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что наибольшую антиоксидантную активность проявляют наночастицы диоксида церия, полученные из лабораторной мишени. При нормировке полученных значений на остаточную концентрацию частиц CeO_2 антиоксидантный эффект стал еще более выраженным. Антиоксидантную активность наночастиц, взятых из лабораторной мишени, можно определить по высокому содержанию функциональных дефектов на поверхности наночастиц. Сильно неравновесные условия лазерной абляции, при которых происходит образование аблированных

наночастиц, способствуют их повышенному обогащению поверхностными структурными дефектами [25–26].

В окислительных процессах наночастицы диоксида церия являются эффективным антиоксидантом, инактивируя окислительный стресс, вызванный активными формами кислорода. На основе обратимого перехода между CeO_2 и Ce_2O_3 на поверхности наночастиц диоксида церия осуществляется антиоксидантный цикл, который эффективно удаляет активные формы кислорода (АФК). АФК оказывают вредное воздействие в биологических си-

стемах. Представленные результаты свидетельствуют о том, что наночастицы диоксида церия, полученные методом лазерной абляции из лабораторной мишени, обладают активно выраженными антиоксидантными свойствами. Установлено, что антиоксидантные свойства наночастиц диоксида церия, полученных из лабораторной мишени, более выражены, чем у наночастиц, полученных из импортной мишени.

Выводы

1. В результате исследований методом атомно-силовой микроскопии установлено, что средние предельные размеры

для нецентрифугированных и центрифугированных на скорости 1000 об/мин образцов аблированных наночастиц CeO_2 составили $61,95 \pm 0,1$ нм и $56,59 \pm 0,1$ нм.

2. Установлено, что элементный состав порошка диоксида церия, из которого прессовалась лабораторная мишень, и элементный состав импортной мишени совпадают, и процент примеси в них находится в рамках допустимого для проведения процесса лазерной абляции.

3. У аблированных наночастиц диоксида церия проявляются ярко выраженные антиокислительные свойства в окислительной фотокаталитической реакции с добавлением частиц оксида цинка.

Список литературы

1. Transformation of cerium oxide nanoparticles from a diesel fuel additive during combustion in a diesel engine / J. G. Dale, S. S. Cox, M. E. Vance [et al.] // *Environmental science & technology*. 2017. Vol. 51, no. 4. P. 1973–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03173>.
2. High performance low-temperature solid oxide fuel cells based on nanostructured ceria-based electrolyte / Iamei Liu, Chengjun Zhu, Decai Zhu [et al.] // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, no. 9. P. 2231. <https://doi.org/10.3390/nano11092231>.
3. Chemical mechanical glass polishing with cerium oxide: Effect of selected physico-chemical characteristics on polishing efficiency / P. Janoš, J. Ederer, V. Pilařová [et al.] // *Wear*. 2016. Vol. 362. P. 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.020>.
4. The advances of ceria nanoparticles for biomedical applications in orthopaedics / Hongru Li, Peng Xia, Su Pan [et al.] // *International journal of nanomedicine*. 2020. Vol. 15. P. 7199–7214. <https://doi.org/10.2147/IJN.S270229>.
5. Thakur N., Manna P., Das J. Synthesis and biomedical applications of nanoceria, a redox active nanoparticle // *Journal of nanobiotechnology*. 2019. Vol. 17, no. 1. P. 1–27. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0516-9>.
6. Antioxidant cerium oxide nanoparticles in biology and medicine / B. C. Nelson, M. E. Johnson, M. L. Walker [et al.] // *Antioxidants*. 2016. Vol. 5, no. 2. P. 15. <https://doi.org/10.3390/antiox5020015>.
7. Исследование антиоксидантных свойств аблированных наночастиц диоксида церия в окислительной реакции Фентона / М. А. Пугачевский, В. А. Мамонтов, А. П. Кузьменко, Ю. А. Неручев // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 1. С. 61–74.
8. Cerium oxide nanoparticles in cancer / Ying Gao, Kan Chen, Jin-Lu Ma, Fei Gao // *Onco Targets Ther*. 2014. Vol. 7. P. 835–40. <https://doi.org/10.2147/OTT.S62057>.
9. Ultrasmall antioxidant cerium oxide nanoparticles for regulation of acute inflammation / Johoon Kim, Gwanui Hong, Luda Mazaleuskaya [et al.] // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13, no. 51. P. 60852–60864. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c16126>.
10. Synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Gloriosa superba* L. leaf extract and their structural, optical and antibacterial properties / Ayyakannu Arumugam, Chandrasekaran Karthikeyan, Abdulrahman Syedahamed Haja Hameed [et al.] // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. Vol. 49. P. 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.042>

11. Cerium oxide nanoparticles and their efficient antibacterial application in vitro against gram-positive and gram-negative pathogens / O. L. Pop, Amalia Mesaros, D. C. Vodnar // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 8. P. 1614. <https://doi.org/10.3390/nano10081614>.
12. Cerium and its oxidant-based nanomaterials for antibacterial applications: a state-of-the-art review / Manlin Qi, Wen Li, Xufeng Zheng [et al.] // *Frontiers in Materials*. 2020. Vol. 7. P. 213. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00213>.
13. Antibacterial effect of cerium oxide nanoparticle against *Pseudomonas aeruginosa* / Khosro Zamani, Noushin Allah-Bakhshi, Faezeh Akhavan [et al.] // *BMC biotechnology*. 2021. Vol. 21, no. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00727-1>.
14. Cerium oxide nanoparticles rescue α -synuclein-induced toxicity in a yeast model of Parkinson's disease / Roberta Ruotolo, Giuseppe De Giorgio, Ilaria Minato [et al.] // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 235. <https://doi.org/10.3390/nano10020235>.
15. Sundararajan V., Venkatasubbu G. D., Sheik Mohideen S. Investigation of therapeutic potential of cerium oxide nanoparticles in Alzheimer's disease using transgenic *Drosophila* // *3 Biotech*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 159. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02706-x>.
16. Nanoceria as a possible agent for the management of COVID-19 / P. Allawadhi, A. Khurana, S. Allwadhi [et al.] // *Nano Today*. 2020. Vol. 35. P. 100982. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100982>.
17. Ulker D., Abacioglu N., Sehirli A. O. Cerium oxide (CeO_2) nanoparticles could have protective effect against COVID-19 // *Letters in Applied NanoBioScience*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 12. <https://doi.org/10.33263/LIANBS121.012>.
18. Lattice expansion and oxygen non-stoichiometry of nanocrystalline ceria / A. B. Barancvicov, O. S. Ivanova, V. K. Ivanov, Y. D. Tretyakov // *CrystEngComm*. 2010. No. 12. P. 3531–3533. <https://doi.org/10.1039/c0ce00245c>.
19. Oxygen-vacancy engineering of cerium-oxide nanoparticles for antioxidant activity / C. Gunawan, M. S. Lord, E. Lovell [et al.] // *ACS Omega*. 2019. Vol. 4, no. 5. P. 473–479. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00521>.
20. Cerium oxide nanoparticles: properties, biosynthesis and biomedical application / K. R. B. Singh, V. Nayak, T. Sarkar, R. P. Singh // *Royal Society of Chemistry*. 2020. Vol. 10(45). P. 27194–27214. <https://doi.org/10.1039/d0ra04736h>.
21. Antibacterial and cytotoxic activities of cerium oxide nanoparticles prepared by laser ablation in liquid / S. A. Abid, A. A. Taha, R. A. Ismail, M. H. Mohsin // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27(24). P. 30479–30489. <https://doi.org/10.1007/s11356-02009332-9>.
22. Lapin I. N., Shabalina A. V., Svetlichnyi V. A. Synthesis and Characterization of CeO_2 // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 683. P. 281–287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.683.281>.
23. Исследования физико-химических свойств аблированных наночастиц диоксида церия при фотокаталитическом процессе / В. А. Мамонтов, А. Ю. Рыженкова, М. А. Пугачевский, Ф. Ф. Ниязи // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 4. С. 78–94. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2021-11-4-78-94>.
24. Получение аблированных частиц CeO_2 с нанодисперсным распределением по составу / М. А. Пугачевский, В. А. Мамонтов, Ней Вин Аунг, А. С. Чекаданов, А. П. Кузьменко // *Письма в журнал технической физики*. 2020. Т. 46, вып. 20. С. 38–41. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.20.50155.18286>.
25. Oxidation state and lattice expansion of CeO_{2-x} nanoparticles as a function of particle size / L. J. Wu, H. J. Wiesmann, A. R. Moodenbaugh [et al.] // *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 69. P. 125415-1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.125415>.
26. Theoretical and experimental studies of structural defects in CeO_2 nanoparticles / М. А. Пугачевский, А. Н. Чибисов, А. П. Кузьменко, А. С. Федоров // *Solid state phenomena*. 2020. Vol. 312. P. 68–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.312.68>.

References

1. Dale J. G., Cox S. S., Vance M. E., eds. Transformation of cerium oxide nanoparticles from a diesel fuel additive during combustion in a diesel engine. *Environmental science & technology*, 2017, vol. 51, no. 4, pp. 1973–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03173>
2. Jamei Liu, Chengjun Zhu, Decai Zhu, eds. High performance low-temperature solid oxide fuel cells based on nanostructured ceria-based electrolyte. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 2231. <https://doi.org/10.3390/nano11092231>
3. Janoš P., Ederer Pilařová V., eds. Chemical mechanical glass polishing with cerium oxide: Effect of selected physico-chemical characteristics on polishing efficiency. *Wear*, 2016, vol. 362, pp. 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.020>
4. Hongru Li, Peng Xia, Su Pan, eds. The advances of ceria nanoparticles for biomedical applications in orthopaedics. *International journal of nanomedicine*, 2020, vol. 15, pp. 7199–7214. <https://doi.org/10.2147/IJN.S270229>
5. Thakur N., Manna P., Das J. Synthesis and biomedical applications of nanoceria, a redox active nanoparticle. *Journal of nanobiotechnology*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0516-9>
6. Nelson B. C., Johnson M. E., Walker M. L., eds. Antioxidant cerium oxide nanoparticles in biology and medicine. *Antioxidants*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 15. <https://doi.org/10.3390/antiox5020015>
7. Pugachevsky M. A., Mamontov V. A., Kuzmenko A. P., Neruchev Yu. A. Issledovanie antioksidantnykh svoystv ablirovannykh nanochastits dioksida tseriya v okislitel'noi reaktsii Fentona [Investigation of the antioxidant properties of ablated cerium dioxide nanoparticles in the Fenton oxidative reaction]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 61–74.
8. Ying Gao, Kan Chen, Jin-Lu Ma, Fei Gao. Cerium oxide nanoparticles in cancer. *Onco Targets Ther*, 2014, no. 7, pp. 835–40. <https://doi.org/10.2147/OTT.S62057>
9. Johoon Kim, Gwanui Hong, Luda Mazaleuskaya, eds. Ultrasmall antioxidant cerium oxide nanoparticles for regulation of acute inflammation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, vol. 13, pp. 51, pp. 60852–60864. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c16126>
10. Ayyakannu Arumugam, Chandrasekaran Karthikeyan, Abdulrahman Syedahamed Haja Hameed, eds. Synthesis of cerium oxide nanoparticles using Gloriosa superba L. leaf extract and their structural, optical and antibacterial properties. *Materials Science and Engineering: C*, 2015, vol. 49, pp. 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.042>
11. Pop O. L., Amalia Mesaros, Vodnar D. C., eds. Cerium oxide nanoparticles and their efficient antibacterial application in vitro against gram-positive and gram-negative pathogens. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 1614. <https://doi.org/10.3390/nano10081614>
12. Manlin Qi, Wen Li, Xufeng Zheng, eds. Cerium and its oxidant-based nanomaterials for antibacterial applications: a state-of-the-art review. *Frontiers in Materials*, 2020, vol. 7, pp. 213. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00213>
13. Khosro Zamani, Noushin Allah-Bakhshi, Faezeh Akhavan, eds. Antibacterial effect of cerium oxide nanoparticle against *Pseudomonas aeruginosa*. *BMC biotechnology*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00727-1>
14. Roberta Ruotolo, Giuseppe De Giorgio, Ilaria Minato, eds. Cerium oxide nanoparticles rescue α -synuclein-induced toxicity in a yeast model of Parkinson's disease. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 235. <https://doi.org/10.3390/nano10020235>
15. Sundararajan V., Venkatasubbu G. D., Sheik Mohideen S. Investigation of therapeutic potential of cerium oxide nanoparticles in Alzheimer's disease using transgenic *Drosophila*. *3 Biotech*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 159. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02706-x>
16. Allawadhi P., Khurana A., Allawadhi S., eds. Nanoceria as a possible agent for the management of COVID-19. *Nano Today*, 2020, vol. 35, pp. 100982. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100982>
17. Ulker D., Abacioglu N., Sehirli A. O. Cerium oxide (CeO₂) nanoparticles could have protective effect against COVID-19. *Letters in Applied NanoBioScience*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 12. <https://doi.org/10.33263/LIANBS121.012>

18. Barancvicov A. B., Ivanova O. S., Ivanov V. K., Tretyakov Y. D. Lattice expansion and oxygen non-stoichiometry of nanocrystalline ceria. *CrystEngComm.*, 2010, no. 12, pp. 3531–3533. <https://doi.org/10.1039/c0ce00245c>
19. Gunawan C., Lord M.S., Lovell E., eds. Oxygen-vacancy engineering of cerium-oxide nanoparticles for antioxidant activity. *ACS Omega*, 2019, vol. 4, no. 5, pp. 473–9479. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00521>
20. Singh K.R.B., Nayak V., Sarkar T., Singh R. P. Cerium oxide nanoparticles: properties, biosynthesis and biomedical application. *Royal Society of Chemistry*, 2020, vol. 10(45), pp. 27194–27214. <https://doi.org/10.1039/d0ra04736h>
21. Abid S. A., Taha A. A., Ismail R. A., Mohsin M. H. Antibacterial and cytotoxic activities of cerium oxide nanoparticles prepared by laser ablation in liquid. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27(24), pp. 30479–30489. <https://doi.org/10.1007/s11356-02009332-9>
22. Lapin I. N., Shabalina A. V., Svetlichnyi V. A. Synthesis and characterization of CeO₂. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 683, pp. 281–287. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.683.281>
23. Mamontov V. A., Ryzhenkova A. Yu., Pugachevskii M. A., Niyazi F. F. Issledovaniya fiziko-khimicheskikh svoystv ablirovannykh nanochastits dioksida tseriya pri fotokataliticheskom protsesse [Studies of the physicochemical properties of ablated cerium dioxide nanoparticles in the photocatalytic process]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 78–94. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2021-11-4-78-94>
24. Pugachevsky M. A., Mamontov V. A., Nei Win Aung, Chekadanov A. S., Kuzmenko A. P. Poluchenie ablirovannykh chastits CeO₂ s nanodispersnym raspredeleniem po sostavu [Obtaining ablated CeO₂ particles with a nanodispersed composition distribution]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Letters to the Journal of Technical Physics*, 2020, vol. 46, no. 20, pp. 38–41. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.20.50155.18286>
25. Wu L. J., Wiesmann H. J., Moodenbaugh A. R., eds. Oxidation state and lattice expansion of CeO_{2-x} nanoparticles as a function of particle size. *Phys. Rev. B.*, 2004, vol. 69, pp. 125415–1. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.125415>
26. Pugachevskii M. A., Chibisov A. N., Kuzmenko A. P., Fedorov A. S. Theoretical and Experimental Studies of Structural Defects in CeO₂ nanoparticles. *Solid state phenomena*, 2020, vol. 312, pp. 68–73. <https://doi.org/10.4028/www.sceintific.net/SSP.312.68>

Информация об авторах / Information about the Authors

Мамонтов Владимир Александрович, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru, ORCID: 000-0003-0592-3851

Vladimir A. Mamontov, Post-Graduate Student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0592-3851

Родионов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник регионального центра нано-технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Vladimir V. Rodionov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vovarodionov2009@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

Рыженкова Анна Юрьевна, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: anna.ryzhenkova25@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8353-9682

Anna Yu. Ryzhenkova, Student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Russian Federation, Kursk, Southwest State University,
e-mail: anna.ryzhenkova25@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8353-9682

Егельский Илья Викторович, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, инженер Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: ive1996@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-7085-8913

Ilya V. Egelsky, Post-Graduate Student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Engineer of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: ive1996@yandex.ru,
ORCID: 0000-0002-7085-8913

Каленчук Валерий Иванович, лаборант, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kalenchukvalery@yandex.ru

Valery Iv. Kalenchuk, Laboratory Assistant, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kalenchukvalery@yandex.ru

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, директор Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: pmaximal@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-5004-0823

Maksim A. Pugachevskii, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Director of the Regional center of nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: pmaximal@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-5004-0823