

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.915

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-123-134>

Влияние высокотемпературного отжига на электронную структуру и антиоксидантные свойства аблированных наночастиц диоксида церия

В.А. Мамонтов^{1✉}, М.А. Пугачевский¹, А.С. Сизов¹, Ю.А. Неручев²

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Курский государственный университет
ул. Радищева, д. 33, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru

Резюме

Цель. Исследование зависимости электронной структуры и антиоксидантных свойств аблированных наночастиц диоксида церия от температуры отжига в условиях фотокаталитической реакции в присутствии наночастиц диоксида титана.

Методы. Были получены наночастицы диоксида церия методом лазерной абляции. По АСМ-изображениям рассчитаны средние размеры аблированных наночастиц диоксида церия, подвергнутых центрифугированию и высокотемпературному отжигу. Спектрофотометрическим методом устанавливалось изменение энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещенной зоны отожженных наночастиц диоксида церия и исследовалась их седиментация. Также с помощью спектрофотометра определялась зависимость от температуры отжига антиоксидантной активности наночастиц диоксида церия в процессе фотокатализа.

Результаты. Установлены средние размеры аблированных отожженных центрифугированных наночастиц диоксида церия в диапазоне от $(46,3 \pm 0,5)$ нм до $(82,8 \pm 0,5)$ нм. В результате исследований определен батохромный сдвиг энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещенной зоны аблированных наночастиц диоксида церия после отжига, а его влияние на процесс седиментации наночастиц не выявлен. Установлено, что в ходе фотокаталитической реакции в присутствии аблированных отожженных наночастиц диоксида церия увеличивается скорость деградации красителя метиленового синего, то есть снижается антиоксидантная активность наночастиц CeO_2 .

Заключение. Из результатов исследований, представленных в данной работе, следует, что под воздействием высокотемпературного отжига физико-химические свойства аблированных наночастиц диоксида церия меняются, в частности снижается их антиоксидантная активность, но скорость седиментации наночастиц диоксида церия в водном растворе остается постоянной.

Ключевые слова: наночастицы; диоксид церия; лазерная абляция; электронная структура; спектрофотометрия; антиоксидантные свойства; фотокатализ.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (с/о № 075-03–2025–526) и в рамках Программы «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

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

Для цитирования: Влияние высокотемпературного отжига на электронную структуру и антиоксидантные свойства аблированных наночастиц диоксида церия / В.А. Мамонтов, М.А. Пугачевский, А.С. Сизов, Ю.А. Неручев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 123–134. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-123-134>.

Поступила в редакцию 30.01.2025

Подписана в печать 25.02.2025

Опубликована 20.03.2025

Effect of high temperature annealing on the electronic structure and antioxidant properties of ablated Cerium dioxide nanoparticles

Vladimir A. Mamontov^{1✉}, Maksim A. Pugachevskii¹, Alexander S. Sizov¹,
Yury A. Neruchev²

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

² Kursk State University
33 Radishcheva Str., Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru

Abstract

Purpose. Study of the dependence of the electronic structure and antioxidant properties of ablated cerium dioxide nanoparticles on the annealing temperature under photocatalytic reaction conditions in the presence of titanium dioxide nanoparticles.

Methods. Nanoparticles of cerium dioxide were obtained by laser ablation. The average sizes of ablated nanoparticles of cerium dioxide subjected to centrifugation and high-temperature annealing were calculated from AFM images. A change in the electronic structure of annealing was detected by spectrophotometry, and sedimentation of annealed nanoparticles was studied. Also, the dependence of the antioxidant activity of cerium dioxide nanoparticles on the annealing temperature in the photocatalysis process was determined using a spectrophotometer.

Results. The average sizes of ablated annealed centrifuged cerium dioxide nanoparticles were determined to be in the range from $46,3 \pm 0,5$ nm to $82,8 \pm 0,5$ nm. The studies revealed a bathochromic shift in the energy position of the $4f^0$ states of Ce^{4+} ions in the bandwidth of the bandgap of annealed cerium dioxide nanoparticles after annealing, and its effect on the sedimentation process of nanoparticles was not revealed. It was found that during the photocatalytic reaction in the presence of ablated annealed cerium dioxide nanoparticles, the degradation rate of the methylene blue dye increases, i.e., the antioxidant activity of CeO_2 nanoparticles decreases.

Conclusion: From the results of the studies presented in this paper it follows that under the influence of high-temperature annealing the physicochemical properties of ablated cerium dioxide nanoparticles change, in particular, their antioxidant activity decreases, but the sedimentation rate of nanoparticles in an aqueous solution remains constant.

Keywords: nanoparticles; Cerium dioxide; laser ablation; electronic structure; spectrophotometry; antioxidant properties; photocatalysis.

Financing: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (contract No. 075-03–2025–526) and within the framework of the Priority 2030 Program (Agreement No. 075-15-2021-1213).

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., Pugachevskii M.A., Sizov A.S., Neruchev Y.A. Effect of high temperature annealing on the electronic structure and antioxidant properties of ablated Cerium dioxide nanoparticles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(1):123–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-123-134>.

Received 30.01.2025

Accepted 25.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

Наноразмерный диоксид церия используется как катализатор в системах сжигания топлива [1] и как электролит в топливных элементах [2], а также применяется в качестве антиокислителя в биологических системах [3]. В обзоре [4] были проанализированы данные о ферментативной активности церия и определены конкретные условия, при которых наночастицы диоксида церия могут выступать в качестве энзимов. В работе [5] представлены примеры использования наночастиц CeO_2 в качестве наносенсора. Авторами в обзоре [6] описывается потенциальное биологическое применение наночастиц диоксида церия в качестве антибактериального средства. В работе [7] рассмотрена биологическая активность наночастиц диоксида церия, синтезированных методом осаждения в смешанных водно-спиртовых растворах при постоянном pH равном 9. Изучены терапевтические механизмы [8] наночастиц CeO_2 в процессе заживления ран. Наноструктурированный CeO_2 был исследован на предмет активности против раковых опухолей [9], как терапевтическое средство для лечения болезни Паркинсона [10] и болезни Альцгеймера [11] и на предмет активности, направленной на нейтрализацию COVID-19 [12].

Водные растворы наночастиц CeO_2 , полученные методом лазерной абляции, после процесса центрифугирования проявляют антиокислительную активность [13] в реакциях деградации красителя метиленового синего, например, реакция Фентона [14] и фотокаталитическая реакция [15]. Аблированные наночастицы CeO_2 отличаются ярко выраженными химическими свойствами по сравнению с наночастицами, полученными сольвотермическим синтезом [16]. Аблированные наночастицы диоксида церия в дисперсных

водных растворах, центрифугированных на различных скоростях, характеризуются низкой стехиометрией, что определяет рост концентрации поверхностных структурных дефектов наноразмерного CeO_2 [17].

При обработке наноразмерного диоксида церия при высоких температурах в диапазоне 600–800°C увеличивался размер частиц и уменьшалась удельная площадь поверхности [18]. С увеличением температуры отжига происходит рост размеров наночастиц CeO_2 , полученных методом химического осаждения [19]. В данной работе исследуется влияние высокотемпературного отжига на физико-химические свойства аблированных центрифугированных наночастиц CeO_2 .

Материалы и методы

Методом получения наноразмерного CeO_2 являлась лазерная абляция с использованием лазерного комплекса IPG Photonics [17]. Характеристики лазера в процессе лазерной абляции имели следующие значения: интенсивность излучения составляла 10^9 Вт/м², длительность импульса 200 мкс, частота следования до 1 кГц [17]. Из мишени CeO_2 в процессе лазерной абляции на монокристаллический кремний наносились слои наночастиц диоксида церия. После нанесения наночастиц на кремниевые подложки они отжигались при температурах 400°C, 600°C, 800°C. После отжига наночастицы CeO_2 диспергировались в водной среде, а далее были процентрифугированы со скоростями в диапазоне от 1000 до 13400 об/мин.

Оценка размеров и морфологии отожжённых наночастиц CeO_2 проводилась на атомно-силовом микроскопе СЗМ SmartSPM™-1000. Из полученных водных растворов аблированные отожжённые центрифугированные наночастицы диок-

сида церия были нанесены капельным методом на кремниевые подложки. После высыхания образцов проводились исследования. Спектрофотометрическим методом проведены исследования седиментации, электронной структуры и антиоксидантных свойств аблированных отождённых центрифугированных наночастиц диоксида церия на спектрофотометре СФ-2000.

Подготовка к исследованию седиментации отождённых наночастиц CeO_2 проводилась следующим образом. Нанодисперсные растворы с концентрацией 0,0001 г/мл диспергировались 30 мин. В дальнейшем из каждого из четырёх стаканчиков с нанодисперсными растворами брались заборы образцов объёмом 1 мл в течение 60 мин. Оптические спектры образцов измерялись в диапазоне длин волн от 200 до 400 нм. На длине волны 390 нм отслеживались изменения концентраций наночастиц в водных растворах.

Изучение влияния отжига на энергетическое положение $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны аблированных центрифугированных наночастиц диоксида церия было осуществлено следующим образом. Водные дисперсные растворы наночастиц CeO_2 с концентрацией 0,0001 г/мл диспергировались в течение 30 мин. Далее часть растворов центрифугировалась 5 минут со скоростями 1000, 5000 и 13400 об/мин. Оптические спектры образцов измерялись в диапазоне длин волн от 200 до 700 нм. В дальнейшем оптические спектры обрабатывались по методу Тауца и определялся сдвиг энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны.

Для исследования антиоксидантных свойств аблированных неотожжённых и

отождённых центрифугированных наночастиц диоксида церия была выполнена следующая подготовка. Свойства наночастиц CeO_2 исследовались в процессе фотокаталитической реакции с присутствием наночастиц диоксида титана. Нанодисперсные растворы диоксидов церия и титана диспергировались 30 минут. Концентрация водного раствора диоксида церия составляла 0,0001 г/мл, водного раствора диоксида титана – 0,00006 г/мл. Далее часть нанодисперсных растворов CeO_2 центрифугировалась в течение 5 минут со скоростями 1000, 5000 и 13400 об/мин. Объём забора растворов из микропробирок после центрифугирования составлял 80% от их объёма. Далее на спектрофотометре измерялась оптическая плотность поглощения полученных водных нанодисперсных растворов в диапазоне от 200 до 400 нм для выявления концентрации водных растворов наноразмерного CeO_2 . На каждую температуру отжига приходилось 5 систем для проведения фотокатализа. Объём систем в кюветах был 2 мл: для первой кюветы 1 мл дистиллированной воды и 1 мл дисперсного раствора наночастиц диоксида титана, для оставшихся четырёх кювет 1 мл нанодисперсных растворов диоксида церия, нецентрифугированного и центрифугированных со скоростями 1000, 5000 и 13400 об/мин и 1 мл дисперсного раствора наночастиц диоксида титана. Краситель метиленовый синий добавлялся в кюветы в объёме 70 мкл. Время облучения систем ультрафиолетовым излучением составляло 60 мин.

Метиленовый синий содержит мономерную форму с максимумом светопоглощения на длине волны 668 нм. Остаточную концентрацию красителя измеряли на спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне длин волн от 550 до 750 нм. Далее по оптическим спектрам поглощения рассчиты-

вались скорости реакции деградации красителя метиленового синего во всех системах и определялась антиоксидантная активность аблированных наночастиц диоксида церия для каждой системы.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 продемонстрированы АСМ-изображения наноразмерного CeO_2 , центрифугированного со скоростью 13400 об/мин до и после отжига. После отжига на 600°C наноструктурированного CeO_2 увеличивается размер его частиц

(рис. 1). Определены средние размеры наночастиц CeO_2 , нецентрифугированных и центрифугированных со скоростями 1000, 5000 и 13400 об/мин до и после отжига. Размеры нецентрифугированных наночастиц после отжига при температурах 400°C , 600°C , 800°C находятся в диапазоне от $(61,95 \pm 0,5)$ нм до $(70,94 \pm 0,5)$ нм, центрифугированных со скоростью 1000 об/мин – от $(62,59 \pm 0,5)$ нм до $(65,75 \pm 0,5)$ нм, со скоростью 5000 об/мин – от $(60,2 \pm 0,5)$ нм до $(59,7 \pm 0,5)$ нм, со скоростью 13400 об/мин – от $(46,3 \pm 0,5)$ нм до $(82,8 \pm 0,5)$ нм.

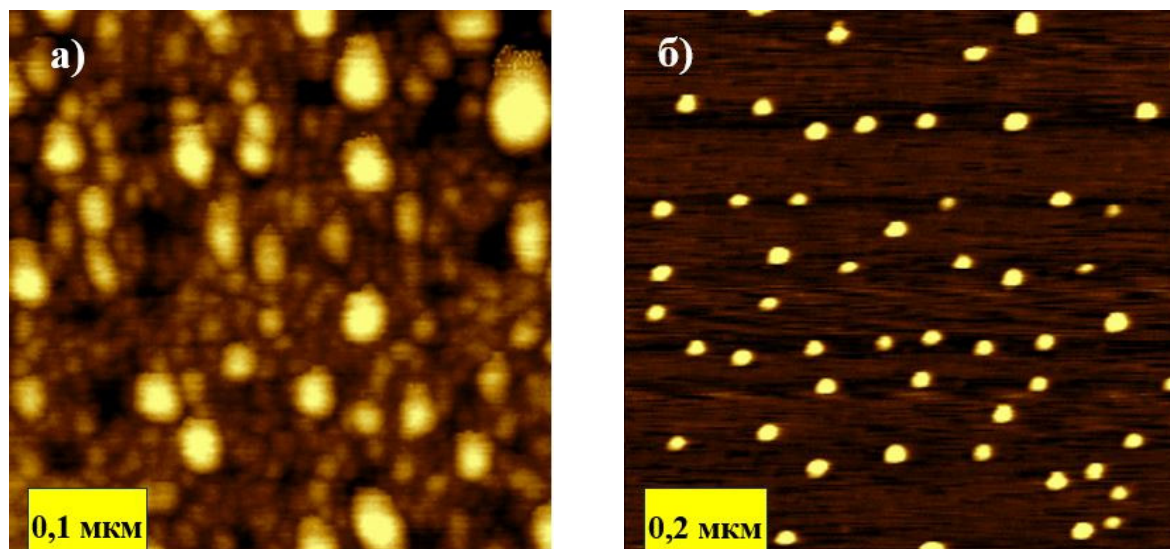


Рис. 1. АСМ-изображения наночастиц CeO_2 , центрифугированных со скоростью 13400 об/мин: а – без отжига; б – после отжига при 600°C

Fig. 1. AFM images of CeO_2 nanoparticles centrifuged at 13400 rpm, а – without annealing; б – after annealing at 600°C

Рост средних размеров аблированных наночастиц диоксида церия обусловлен агломерацией в процессе отжига. В работе [19] указано, что на изображениях ПЭМ-микроскопии отожженного при 900°C образца видно постепенное увеличение размеров наночастиц, т. е. они агломерировали, образуя пористые структуры. Таким образом, отжиг способствует процессу аг-

ломерации наноразмерного CeO_2 , что характеризуется ростом средних размеров его наночастиц.

Возникает сдвиг энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосу пропускания ширины запрещенной зоны наночастиц CeO_2 в длинноволновую область с увеличением температуры отжига (рис. 2).

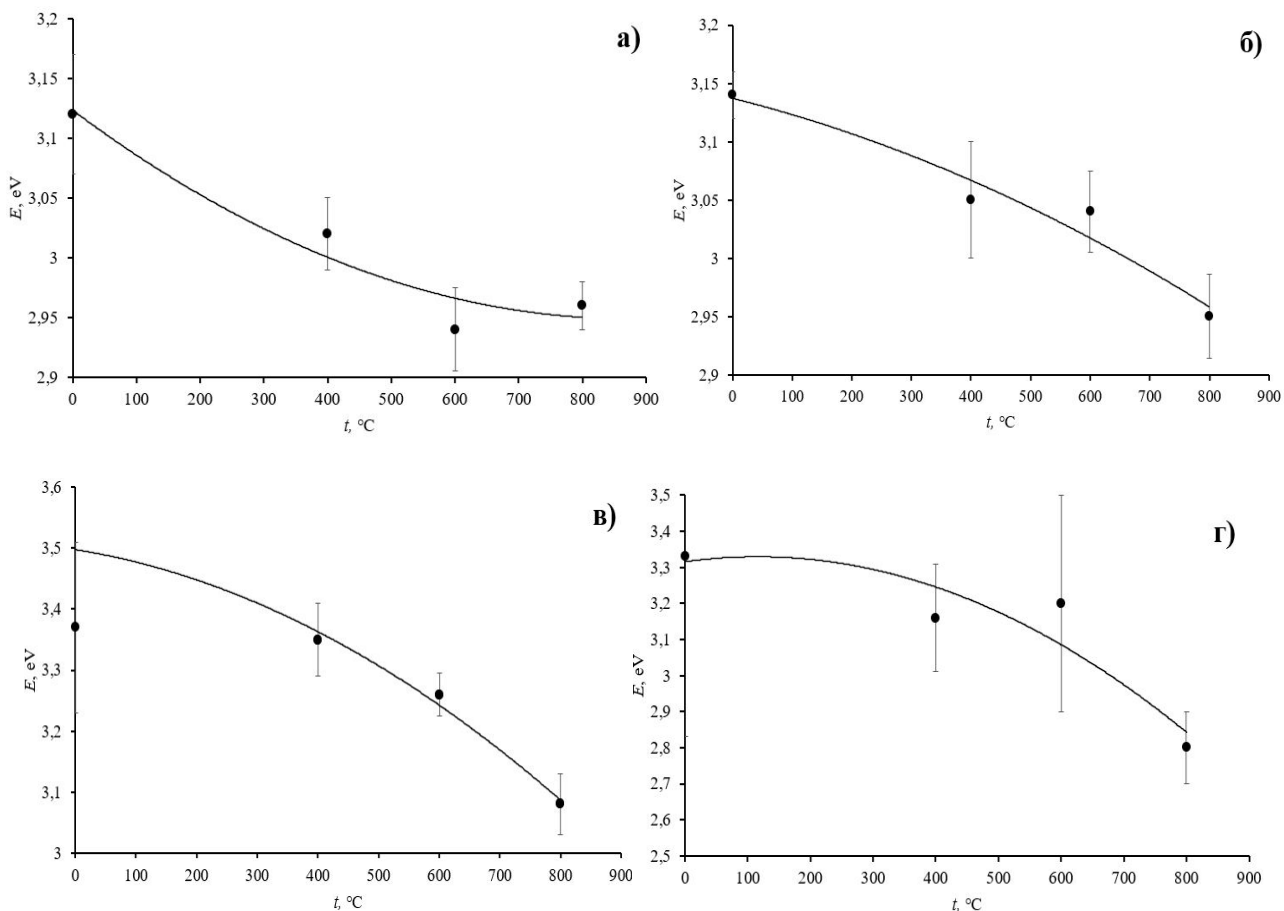


Рис. 2. Зависимость энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны аблированных центрифугированных наночастиц диоксида церия от температуры отжига: а – 0 об/мин; б – 1000 об/мин; в – 5000 об/мин; г – 13400 об/мин; сплошные линии — аппроксимирующие кривые

Fig. 2. Dependence of the energy position of the $4f^0$ states of Ce^{4+} ions in the passband of the band gap of ablated centrifuged cerium dioxide nanoparticles on the annealing temperature: а – 0 rpm; б – 1000 rpm; в – 5000 rpm; г – 13400 rpm; solid lines are approximating curves

Батохромный сдвиг энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны характеризуется увеличением размеров наночастиц диоксида церия после отжига.

Изменение остаточной концентрации для каждого образца происходит на уровне погрешности (меньше 5%), т. е.

концентрации частиц наноразмерного CeO_2 не меняются по прошествии 60 мин. Таким образом, отжиг не влияет на седиментационные свойства нанодисперсных растворов CeO_2 .

На рисунке 3 показан график зависимости антиоксидантной активности нецентрифугированных и центрифугированных нанодисперсных растворов диоксида церия от температуры отжига.

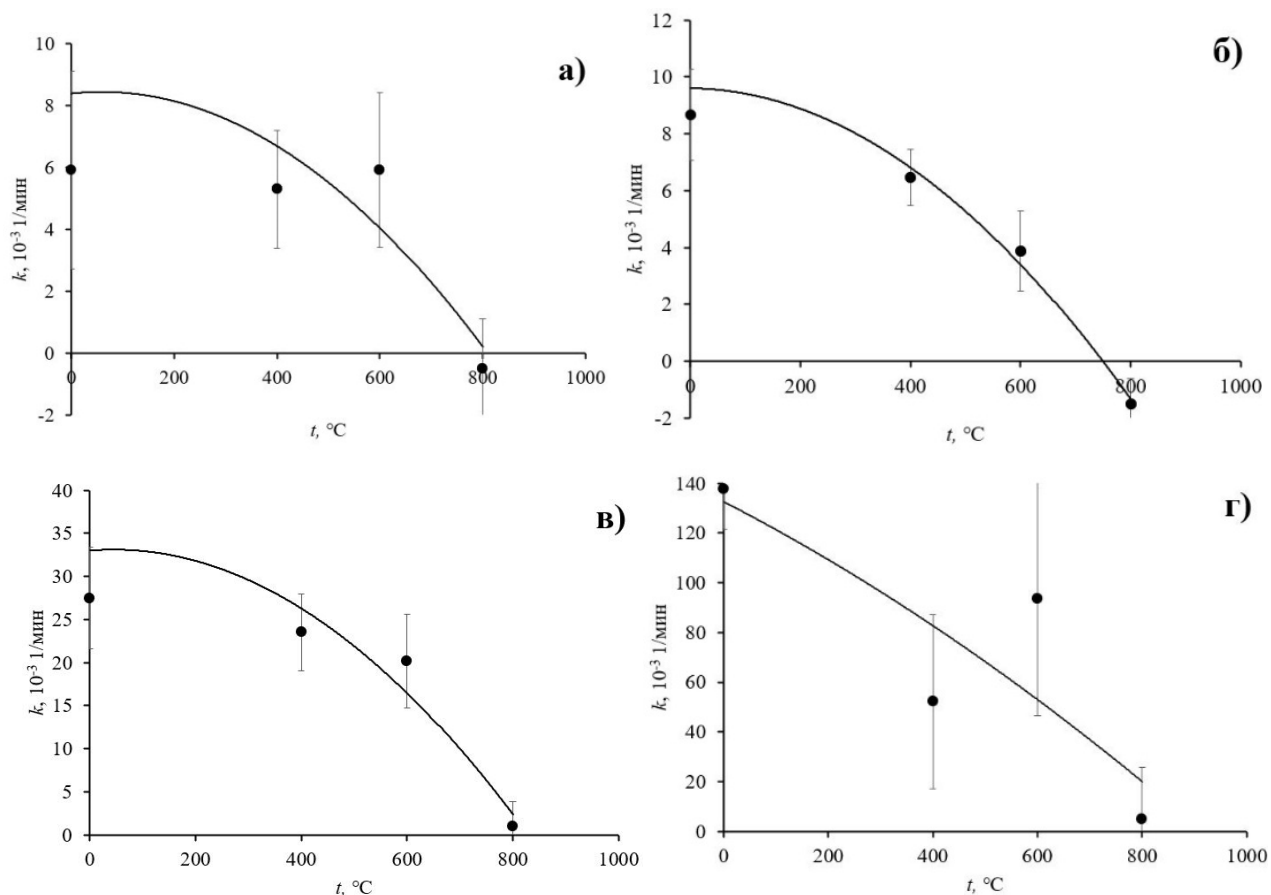


Рис. 3. Антиоксидантная активность аблированных отожжённых центрифугированных наночастиц диоксида церия в процессе фотокаталитической реакции: а – 0 об/мин; б – 1000 об/мин; в – 5000 об/мин; г — 13400 об/мин; сплошные линии — аппроксимирующие кривые

Fig. 3. Antioxidant activity of ablated annealed centrifuged cerium dioxide nanoparticles during photocatalytic reaction: а – 0 rpm; б – 1000 rpm; в – 5000 rpm; г – 13400 rpm; solid lines – approximating curves

Из результатов эксперимента следует, что с увеличением температуры отжига снижается антиоксидантная активность наночастиц диоксида церия. У нецентрифугированного и центрифугированного со скоростью 1000 об/мин образцов наблюдаются после отжига на 800°C прооксидантные свойства. Уменьшение антиоксидантной активности и проявление прооксидантных свойств обусловлено сдвигом энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосу пропускания ширины запрещённой зоны аблированных отожжённых центрифугированных наночастиц CeO_2 в длинноволновую область.

Снижение антиоксидантной активности наночастиц диоксида церия после отжига обусловлено рядом причин. Чем меньше размер наночастиц, тем более ярко выражены антибактериальная и антиоксидантная активности. Это обусловлено тем, что при уменьшении размеров наночастиц увеличивается удельная площадь поверхности. Но после отжига происходит рост средних размеров аблированных наночастиц диоксида церия вследствие их агломерации, и следовательно, уменьшается антиоксидантная активность [20]. Также термическая обработка в печи может приводить к частичному отжигу структурных дефектов, таких как кислородные вакансии, которые обуславливают

антиоксидантные свойства аблированных наночастиц диоксида церия [21]. Влияние отжига на кристаллические дефекты аблированных наночастиц диоксида церия косвенно подтверждается снижением химической активности [22].

В среде со значением pH равным 7 наночастицы диоксида церия проявляют антиоксидантные свойства, что приводит к ослаблению окислительного стресса, но с уменьшением значений pH у наночастиц ярко выражены прооксидантные свойства [23]. Тогда концентрация активных форм кислорода растёт, и следовательно, процессы окисления и разрушения раковых клеток происходят эффективнее. В работе выявлено наличие прооксидантных свойств наноразмерного CeO_2 после отжига на 800°C , дальнейшие исследования могут быть перспективными для биомедицинской области.

Выводы

1. Применяв метод лазерной абляции, были нанесены наночастицы CeO_2 на кремниевые подложки. Установлено, что после высокотемпературного отжига увеличиваются средние размеры наночастиц

диоксида церия вследствие их агломерации.

2. Определено, что у отожжённых центрифугированных наночастиц диоксида церия происходит батохромный сдвиг энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны. Изменение данного параметра электронной структуры наночастиц обусловлено увеличением их размеров после отжига.

3. Выявлено, что высокотемпературный отжиг не влияет на седиментационные свойства нанодисперсных растворов диоксида церия.

4. Установлено, что у нецентрифугированного и центрифугированного со скоростью 1000 об/мин образцов после отжига на 800°C проявляются прооксидантные свойства. У всех образцов нанодисперсных водных растворов отожжённых частиц диоксида церия наблюдается снижение антиоксидантной активности. Её снижение и проявление прооксидантных свойств обусловлено сдвигом энергетического положения $4f^0$ состояний ионов Ce^{4+} в полосе пропускания ширины запрещённой зоны аблированных отожжённых центрифугированных наночастиц диоксида церия.

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, L.C. Marr, Jr M.F. Hochella // *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 / J. Liu, C. Zhu, D. Zhu, X. Jia, Y. Zhang, J. Yu [et al.] // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, no. 9. P. 2231. <https://doi.org/10.3390/nano11092231>.
3. The advances of ceria nanoparticles for biomedical applications in orthopaedics / H. Li, P. Xia, S. Pan, Z. Qi, C. Fu, Z. Yu [et al.] // *International journal of nanomedicine*. 2020. Vol. 15. P. 7199–7214. <https://doi.org/10.2147/IJN.S270229>.
4. Cerium dioxide nanoparticles as third-generation enzymes (nanozymes) / A.L. Popov, A.B. Shcherbakov, N.M. Zholobak, A.Y. Baranchikov, V.K. Ivanov // *Nanosystems: Physics Chemistry Mathematics*. 2017. Vol. 8, no. 6. P. 760–781. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2017-8-6-760-781>.
5. Cerium dioxide nanoparticles for luminescence based analytical systems: Challenging nanosensor and effective label / O.A. Goryacheva, D.V. Tsyupka, S.V. Pigarev, P.D. Strokin, A.A. Kovyrshina,

A.A. Moiseev [et al.] // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 174. P. 117665. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117665>.

6. Bioengineered Cerium oxide (CeO₂) nanoparticles and their diverse applications: a review / S. Pansambal, R. Oza, S. Borgave, A. Chauhan, P. Bardapurkar, S. Vyas [et al.] // *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13, no. 9. P. 6067–6092. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02574-8>.

7. Bioactivity of Cerium dioxide nanoparticles as a function of size and surface features / V. Sarnatskaya, Y. Shlapa, D. Kolesnik, O. Lykhova, D. Klymchuk, S. Solopan, A. Belous // *Biomaterials Science*. 2024. Vol. 12, no. 10. P. 2689–2704. <https://doi.org/10.1039/D4BM90076F>.

8. Cerium oxide nanoparticles in wound care: a review of mechanisms and therapeutic applications / S. Chen, Y. Wang, S. Bao, L. Yao, X. Fu, Y. Yu [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024. Vol. 12. P. 1404651. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1404651>.

9. Cerium oxide nanoparticles in cancer / Y. Gao, K. Chen, J.L. Ma, F. Gao // *Onco Targets Ther*. 2014. Vol. 7. P. 835–40. <https://doi.org/10.2147/OTT.S62057>.

10. Cerium oxide nanoparticles rescue α -synuclein-induced toxicity in a yeast model of Parkinson's disease / R. Ruotolo, G. De Giorgio, I. Minato, M.G. Bianchi, O. Bussolati, N. Marmioli // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 235. <https://doi.org/10.3390/nano10020235>.

11. 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>.

12. 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. P. 12. <https://doi.org/10.33263/LIANBS121.012>.

13. Mamontov V.A., Ryzhenkova A.Y., Pugachevskii M.A. Characterization of size and morphological composition of ablated nanoparticles of cerium dioxide after ultrasonic dispersion and centrifugation in aqueous solution // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Vol. 2064, no. 1. P. 012083. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012083>.

14. Pugachevskii M.A., Chibisov A.N., Mamontov V.A., Kuzmenko A.P. Antioxidant properties of stabilized CeO₂ nanoparticles // *Physica status solidi (a)*. 2021. Vol. 218, no. 20. P. 2100355. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100355>.

15. Pugachevskii M.A., Mamontov V.A., Syuy A.V., Kuzmenko A.P. Effect of pH on antioxidant properties of ablated CeO₂ nanoparticles in photocatalytic process // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2022. Vol. 106. P. 74–76. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.036>.

16. Walton R.I. Solvothermal synthesis of cerium oxides // *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2011. Vol. 57, no. 4. P. 93–108. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2011.10.002>.

17. Production of ablated CeO₂ Particles with nanodispersed compositional distribution / M.A. Pugachevskii, V.A. Mamontov, N.V. Aung, A.S. Chekadanov, A.P. Kuzmenko // *Technical Physics Letters*. 2020. Vol. 46. P. 1032–1035. <https://doi.org/10.1134/S1063785020100259>.

18. Oxidative stress induced by cerium oxide nanoparticles in cultured BEAS-2B cells / E.J. Park, J. Choi, Y.K. Park, K. Park // *Toxicology*. 2008. Vol. 245, no. 1–2. P. 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2007.12.022>.

19. Suresh R., Ponnuswamy V., Mariappan R. Effect of annealing temperature on the microstructural, optical and electrical properties of CeO₂ nanoparticles by chemical precipitation method // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 273. P. 457–464. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.062>.

20. Пугачевский М.А. Формирование структурных дефектов в наночастицах CeO₂ при лазерной абляции // *Письма в Журнал технической физики*. 2017. Т. 43, № 15. С. 28–33. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.15.44867.16821>.

21. Пугачевский М.А. Изменение фотолуминесцентных свойств наночастиц CeO₂ вследствие термического отжига // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2019. Т. 86, № 2. С. 316–319. <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00821-5>.

22. Пугачевский М.А. Влияние отжига на фотолюминесцентные свойства наночастиц диоксида титана // Журнал прикладной спектроскопии. 2012. Т. 79, № 5. С. 838–841.
23. Saifia M.A., Seal S., Godugu C. Nanoceria, the versatile nanoparticles: Promising biomedical applications // Journal of Controlled Release. 2021. No. 338. P. 164–189. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.08.033>.

References

1. Dale J.G., Cox S.S., Vance M.E., Marr L.C., Hochella Jr M.F. Transformation of Cerium oxide nanoparticles from a diesel fuel additive during combustion in a diesel engine. *Environmental science & technology*. 2017;51(4):1973–1980. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03173>.
2. Liu J., Zhu C., Zhu D., Jia X., Zhang Y., Yu J., Yang M. High performance low-temperature solid oxide fuel cells based on nanostructured ceria-based electrolyte. *Nanomaterials*. 2021;11(9):2231. <https://doi.org/10.3390/nano11092231>.
3. Li H., Xia P., Pan S., Qi Z., Fu C., Yu Z., et al. The advances of ceria nanoparticles for biomedical applications in orthopaedics. *International journal of nanomedicine*. 2020;(15):7199–7214. <https://doi.org/10.2147/IJN.S270229>.
4. Popov A.L., Shcherbakov A.B., Zholobak N.M., Baranchikov A.Y., Ivanov V.K. Cerium dioxide nanoparticles as third-generation enzymes (nanozymes). *Nanosystems: Physics Chemistry Mathematics*. 2017;8(6):760–781. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2017-8-6-760-781>.
5. Goryacheva O.A., Tsyupka D.V., Pigarev S.V., Strokin P.D., Kovyrshina A.A., Moiseev A.A., et al. Cerium dioxide nanoparticles for luminescence based analytical systems: Challenging nanosensor and effective label. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2024;174:117665. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117665>.
6. Pansambal S., Oza R., Borgave S., Chauhan A., Bardapurkar P., Vyas S., et al. Bioengineered cerium oxide (CeO₂) nanoparticles and their diverse applications: a review. *Applied Nanoscience*. 2023;13(9):6067–6092. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02574-8>.
7. Sarnatskaya V., Shlapa Y., Kolesnik D., Lykhova O., Klymchuk D., Solopan S., Belous A. Bioactivity of cerium dioxide nanoparticles as a function of size and surface features. *Biomaterials Science*. 2024;12(10):2689–2704. <https://doi.org/10.1039/D4BM90076F>.
8. Chen S., Wang Y., Bao S., Yao L., Fu X., Yu Y., et al. Cerium oxide nanoparticles in wound care: a review of mechanisms and therapeutic applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024;12:1404651. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1404651>.
9. Gao Y., Chen K., Ma J.L., Gao F. Cerium oxide nanoparticles in cancer. *Onco Targets Ther*. 2014;7:835. <https://doi.org/10.2147/OTT.S62057>.
10. Ruotolo R., De Giorgio G., Minato I., Bianchi M. G., Bussolati O., Marmioli N. Cerium oxide nanoparticles rescue α -synuclein-induced toxicity in a yeast model of Parkinson's disease. *Nanomaterials*. 2020;10(2):235. <https://doi.org/10.3390/nano10020235>.
11. 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;11(4):159. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02706-x>.
12. Ulker D., Abacioglu N., Sehirli A.O. Cerium oxide (CeO₂) nanoparticles could have protective effect against COVID-19. *Letters in Applied NanoBioScience*. 2022;12(1):12. <https://doi.org/10.33263/LIANBS121.012>.
13. Mamontov V.A., Ryzhenkova A.Y., Pugachevskii M.A. Characterization of size and morphological composition of ablated nanoparticles of cerium dioxide after ultrasonic dispersion and centrifugation in aqueous solution. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2021;2064(1):012083. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012083>.

14. Pugachevskii M.A., Chibisov A.N., Mamontov V.A., Kuzmenko A.P. Antioxidant properties of stabilized CeO₂ nanoparticles. *Physica status solidi (a)*. 2021;218(20):2100355. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100355>.
15. Pugachevskii M.A., Mamontov V.A., Syuy A.V., Kuzmenko A.P. Effect of pH on antioxidant properties of ablated CeO₂ nanoparticles in photocatalytic process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2022;106:74–76. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.036>.
16. Walton R.I. Solvothermal synthesis of Cerium oxides. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2011;57(4):93–108. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrw.2011.10.002>.
17. Pugachevskii M.A., Mamontov V.A., Aung N.V., Chekadanov A.S., Kuzmenko A.P. Production of ablated CeO₂ particles with nanodispersed compositional distribution. *Technical Physics Letters*. 2020;46:1032–1035. <https://doi.org/10.1134/S1063785020100259>.
18. Park E.J., Choi J., Park Y.K., Park K. Oxidative stress induced by cerium oxide nanoparticles in cultured BEAS-2B cells. *Toxicology*. 2008;245(1-2):90–100. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2007.12.022>.
19. Suresh R., Ponnuswamy V., Mariappan R. Effect of annealing temperature on the microstructural, optical and electrical properties of CeO₂ nanoparticles by chemical precipitation method. *Applied Surface Science*. 2013;273:457–464. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.062>.
20. Pugachevsky M.A. Formation of structural defects in CeO₂ nanoparticles during laser ablation. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2017;43(15):28–33. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.15.44867.16821>.
21. Pugachevsky M.A. Change in photoluminescent properties of CeO₂ nanoparticles due to thermal annealing. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2019;86(2):316–319. <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00821-5>.
22. Pugachevsky M.A. Effect of annealing on the photoluminescent properties of titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2012;79(5):838–841.
23. Saifia M.A., Seal S., Godugu C. Nanoceria, the versatile nanoparticles: Promising biomedical applications. *Journal of Controlled Release*. 2021(338):164–189. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.08.033>.

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: 0000-0003-0592-3851

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

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

Сизов Александр Семёнович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sizov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8110-9929

Alexander S. Sizov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sizov@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8110-9929

Неручев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и нанотехнологий, научный руководитель научно-исследовательского центра физики конденсированного состояния, Курский государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X

Yury A. Neruchev, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Nanotechnology, Scientific Supervisor of the Research Center for Condensed Matter Physics, Kursk State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: yuan2003@mail.ru,
ORCID: 0000-0002-8087-874X