

УДК 538.911

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-143-152>



Размерный состав, структура и антиоксидантные свойства наночастиц диоксида церия, полученных автоклавным синтезом

А.М. Чернов^{1✉}, Л.С. Агеева¹, Д.С. Рассеко¹, В.А. Пода¹, В.И. Каленчук¹,
В.В. Родионов¹, М.А. Пугачевский¹

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

✉ e-mail: tcer.ar28@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Провести характеристику размерного состава, атомного и электронного строения, а также антиоксидантной активности наночастиц диоксида церия, синтезированных гидротермальным методом в автоклаве.

Методы. Наночастицы диоксида церия были синтезированы в автоклаве при 150°C. Размерный состав наночастиц характеризовался дифрактометрией малоуглового рентгеновского рассеяния. Структурно-фазовый состав исследовался с помощью рентгеновской дифрактометрии. Сканирующая электронная микроскопия с приставкой энергодисперсионного рентгеновского анализа была задействована для анализа элементного состава образцов. Антиоксидантная активность исследовалась в реакции фотохимической дегградации красителя метиленового синего при облучении диодным источником с длиной волны 660 нм. Определение остаточной концентрации метиленового синего в процессе фотодегградации производили с помощью спектрофотометрии.

Результаты. Методом гидротермального синтеза в автоклаве при 150°C синтезированы беспримесные наночастицы диоксида церия размером 10–25 нм. В присутствии полученных наночастиц диоксида церия процесс фотодегградации красителя метиленового синего под действием красного лазерного излучения замедляется на 80%. Добавление стабилизированных цитратом аммония наночастиц диоксида церия приводит к замедлению процесса фотодегградации метиленового синего при облучении красным светом за счёт антиоксидантной активности, растущей с повышением концентрации наночастиц. Максимальная антиоксидантная активность проявляется при мольном соотношении цитрата аммония к CeO_2 не более 2:1.

Заключение. Синтезированные гидротермальным методом наночастицы CeO_2 , стабилизированные цитратом аммония, обладают выраженной антиоксидантной активностью. Полученные результаты могут быть использованы для разработки селективных противоопухолевых фотосенсибилизаторов на основе наночастиц диоксида церия.

Ключевые слова: наночастицы; диоксид церия; автоклавный синтез; структура; метиленовый синий; фотодегградация; антиоксидантные свойства.

Финансирование работы: Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Министерства образования и науки Курской области (Соглашения № 23-29-10198, № 173).

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

Для цитирования: Размерный состав, структура и антиоксидантные свойства наночастиц диоксида церия, полученных автоклавным синтезом / А.М. Чернов, Л.С. Агеева, Д.С. Рассеко, В.А. Пода, В.И. Каленчук, В.В. Родионов, М.А. Пугачевский // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 143–152. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-143-152>

Поступила в редакцию 29.10.2024

Подписана в печать 25.11.2024

Опубликована 13.12.2024

© Чернов А.М., Агеева Л.С., Рассеко Д.С., Пода В.А., Каленчук В.И., Родионов В.В., Пугачевский М.А., 2024

Size composition, structure and antioxidant properties of Cerium dioxide nanoparticles obtained by autoclave synthesis

Artem M. Chernov¹✉, Liliya S. Ageeva¹, Dmitry S. Rasseko¹, Vladislav A. Poda¹, Valery I. Kalenchuk¹, Vladimir V. Rodionov¹, Maksim A. Pugachevskii¹

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

✉ e-mail: rtcer.ar28@gmail.com

Abstract

Purpose of the study. To characterize the size composition, atomic and electronic structure, and antioxidant activity of Cerium dioxide nanoparticles synthesized by the hydrothermal method in an autoclave.

Methods. Cerium dioxide nanoparticles were synthesized in an autoclave at 150°C. The size composition of the nanoparticles was characterized by small-angle X-ray scattering diffractometry. The structural and phase composition was studied using X-ray diffractometry. Scanning electron microscopy with an energy-dispersive X-ray analysis attachment was used to analyze the elemental composition of the samples. Antioxidant activity was studied in the photochemical degradation reaction of methylene blue dye under irradiation with a diode source with a wavelength of 660 nm. The residual concentration of methylene blue in the process of photodegradation was determined using spectrophotometry.

Results. Pure Cerium dioxide nanoparticles measuring 10-25 nm were synthesized using hydrothermal synthesis in an autoclave at 150°C. In the presence of the obtained cerium dioxide nanoparticles, the process of photodegradation of the methylene blue dye under the influence of red laser radiation slows down by 80%. The addition of ammonium citrate-stabilized Cerium dioxide nanoparticles leads to a slowdown in the process of photodegradation of methylene blue under irradiation with red light due to antioxidant activity, which increases with increasing concentration of nanoparticles. Maximum antioxidant activity is manifested at a molar ratio of ammonium citrate to CeO₂ of no more than 2:1.

Conclusion. The hydrothermal synthesized CeO₂ nanoparticles stabilized by ammonium citrate exhibit pronounced antioxidant activity. The results obtained can be used to develop selective antitumor photosensitizers based on Cerium dioxide nanoparticles.

Keywords: nanoparticles; Cerium dioxide; autoclave synthesis; structure; methylene blue; photodegradation; antioxidant properties.

Funding: This work was supported by the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of the Kursk region (Agreements No. 23-29-10198, No. 173).

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

For citation: Chernov A.M., Ageeva L.S., Rasseko D.S., Poda V.A., Kalenchuk V.I., Rodionov V.V., Pugachevskii M.A. Size composition, structure and antioxidant properties of Cerium dioxide nanoparticles obtained by autoclave synthesis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):143–152. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-143-152>

Received 29.10.2024

Accepted 25.11.2024

Published 24.09.2024

Введение

Для повышения эффективности и безопасности фотодинамической терапии (ФДТ) онкологических новообразований необходимы фотосенсибилизаторы, которые проявляют высокую цитотоксичность к опухолевым клеткам и обладают выраженными протекторными свойствами для

защиты здоровых клеток в процессе ФДТ [1]. Перспективным в этом отношении направлением представляется получение селективных [2] противоопухолевых фотосенсибилизаторов [3] на основе наночастиц оксидов переходных металлов, в частности диоксида церия [4], который сочетает в себе уникальные физико-химиче-

ские и эксплуатационные свойства [5]: высокую антиоксидантную активность [6], стабильность атомной и электронной структуры, отсутствие токсичности для биологических организмов [7] и др. Эффективность проникновения и накопления в тканях организма напрямую зависит от размеров частиц, поэтому использование оксидов переходных металлов возможно только в форме наночастиц с размерами, не превышающими 100 нм. Гидротермальный синтез с использованием солей переходных металлов [8] представляется одним из перспективных способов получения наночастиц оксидов металлов, который позволяет формировать различные структурные и морфологические особенности строения наночастиц в зависимости от условий синтеза [9]. В этом отношении диоксид церия уникален тем, что позволяет формировать наночастицы вещества, обогащенные поверхностными структурными дефектами в виде кислородных вакансий [10], благодаря чему может значительно возрастать их биохимическая активность по сравнению с наночастицами [11], получаемыми другими методами. Кроме того, гидротермальный метод позволяет наиболее легко допировать формируемые наночастицы ионами других металлов [12]. Получаемые таким образом наночастицы в виде агрегативно-устойчивых золей удобны для медико-биологических целей, обладают набором новых свойств, которые могут усиливать антиоксидантные возможности фотосенсибилизатора. В частности, они имитируют свойства антиоксидантного фермента супероксиддисмутазы (СОД) [13] и удаляют активные формы кислорода или свободные радикалы [14]. Антиоксидантный эффект наночастиц оксида церия зависит от их размера и морфологии [15]. В настоящей работе в условиях гидротермального синтеза получены агрегативно-устойчивые наночастицы диоксида церия и исследована их антиоксидантная активность.

Материалы и методы

Для синтеза наночастиц диоксида церия в качестве исходных реагентов использовали следующие: дигексанитратоцерат аммония (IV) ($\text{H}_8\text{CeN}_8\text{O}_{18}$, х.ч.), цитрат аммония двузамещенный ($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_7\text{N}_2$, ТУ 6-09-01-755-89), бидистиллированная вода (ГОСТ Р 52501-2005), получаемая перегонкой с использованием лабораторного дистиллятора. Ранее отмечалось, что наночастицы диоксида церия можно получить в процессе гидротермальной обработки водного раствора дигексанитратоцерата аммония в автоклаве [10] в широких пределах по температуре и длительности обработки. Однако наши исследования показали, что эти параметры необходимо оптимизировать: агрегативно-устойчивые наночастицы удалось получить в автоклаве гидролизом 0.01 М водного раствора дигексанитратоцерата аммония при 150°C в течение 0,5 часа. Из полученного таким образом золя наночастицы выделяли центрифугированием с последующей декантацией. Выделенные фракции диспергировали в воде ультразвуковым воздействием при частоте 44 кГц. В процессе диспергации для ряда образцов проводили также стабилизацию наночастиц цитратом аммония при мольном соотношении в интервале от 0,25:1 до 5:1.

Размерный состав синтезированных наночастиц был исследован с помощью дифрактометрии малоуглового рентгеновского рассеяния (SAXSess mc2). Структурно-фазовый состав исследовали с помощью рентгеновской дифрактометрии (рентгеновский дифрактометр GBC EMMA). Сканирующая электронная микроскопия (сканирующий электронный микроскоп JSM-6610LV) с приставкой энергодисперсионного рентгеновского анализа (Oxford Instruments) была задействована для анализа элементного состава образцов.

Антиоксидантная активность исследовалась в реакции фотохимической деградации красителя метиленового синего при облучении диодным источником с длиной волны 660 нм. Определение остаточной концентрации метиленового синего в процессе фотодегradации производили с помощью оптической спектрофотометрии (спектрофотометр СФ-2000, ОКБ Спектр) по следующей методике: в кювету спектрофотометра СФ-2000 помещали 1,5 мл золя наночастиц диоксида церия с различными концентрациями и мольным соотношением стабилизатора цитрата аммония, добавляли 20 мкл 1%-ного раствора метиленового синего, после чего регистрировали спектр поглощения в интервале 550–750 нм, из которого определяли оптическую плотность при 664 нм

в сравнении с «холостой» пробой. Затем кювету облучали 50 минут лазером красного цвета и регистрировали спектры поглощения в том же интервале.

Результаты и их обсуждение

С помощью сканирующей электронной микроскопии с приставкой энергодисперсионного рентгеновского анализа был исследован элементный состав синтезированных образцов (рис. 1). По результатам анализа установлено, что синтезированные частицы содержат элементы церия, кислорода в стехиометрическом соотношении 1:2 (CeO_2), а также углерод (<5%) в остаточных производных органических продуктах синтеза.

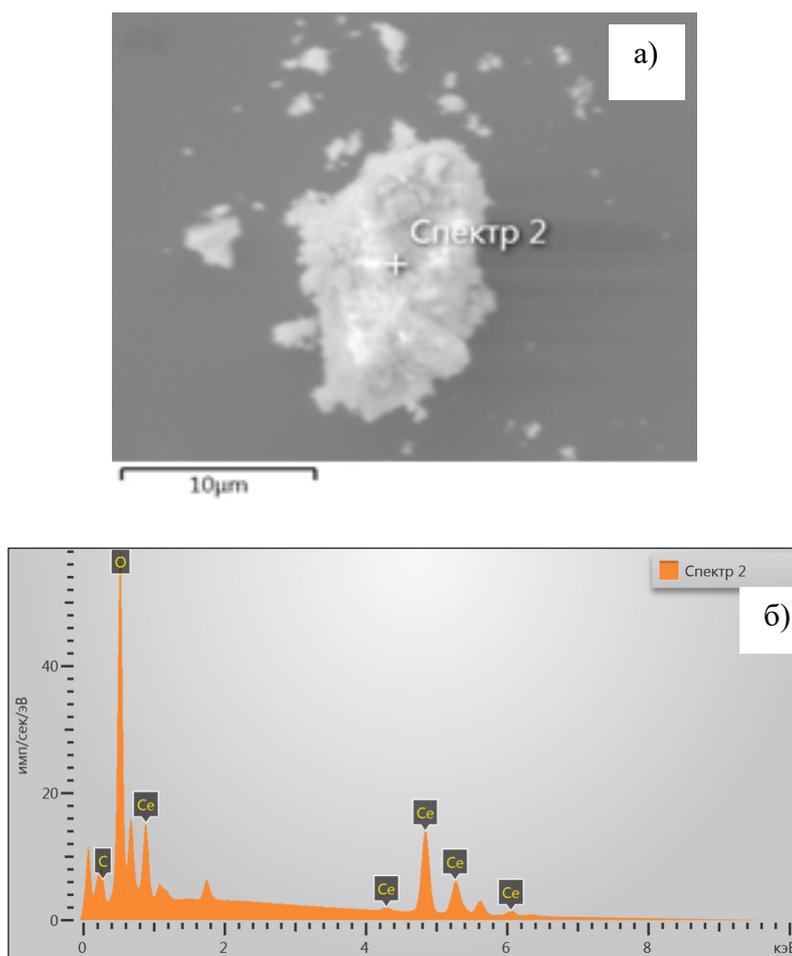


Рис. 1. СЭМ-изображение наночастиц диоксида церия (а) и EDX анализ элементного состава (б)

Fig. 1. SEM image of cerium dioxide nanoparticles (a) and EDX analysis of elemental composition (б)

На рисунке 2 представлена рентгеновская дифрактограмма продукта автоклавного синтеза, согласно которой выявляются дифракционные пики при 2θ значениях $28,6^\circ$; $33,0^\circ$; $47,4^\circ$ и $56,0^\circ$, что соответствует кристаллографическим плоскостям (111), (200), (220) и (311) кубической сингонии диоксида церия (ASTM №2-1306). Однако дифракционные пики характеризуются большой шириной (FWHM), что свидетельствует о малых

размерах области когерентного рассеяния (ОКР) или низкой кристалличности в синтезированных наночастицах. Размер ОКР, определенный по формуле Шеррера, составил (5 ± 2) нм.

На рисунке 3 представлена функция распределения парных расстояний, синтезированных наночастиц диоксида церия, полученная по данным малоугловой рентгеновской дифрактометрии.

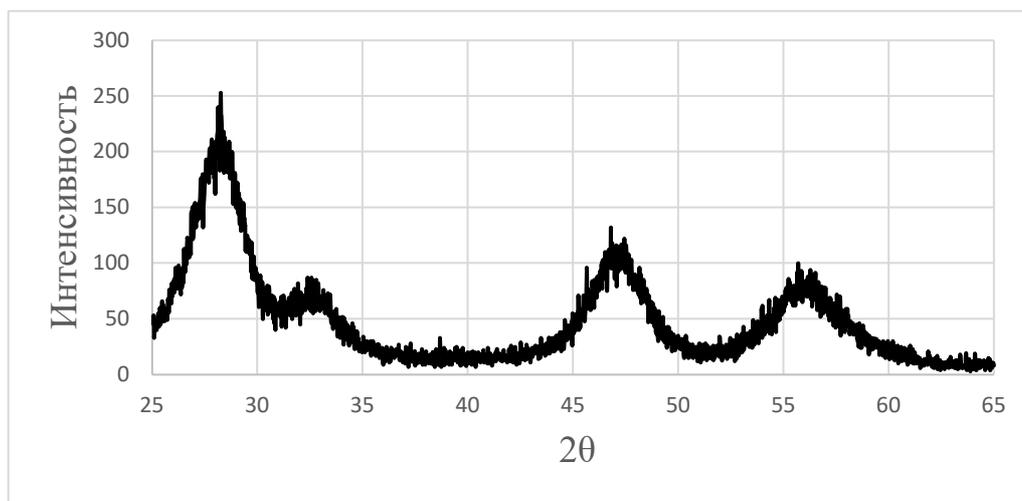


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма синтезированных наночастиц диоксида церия

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of synthesized cerium dioxide nanoparticles

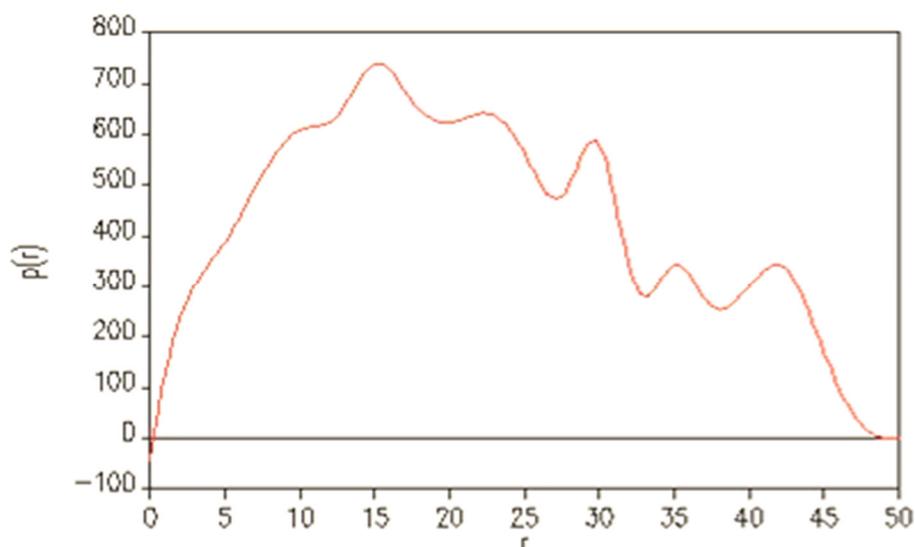


Рис. 3. Функция распределения парных расстояний синтезированных наночастиц диоксида церия по данным малоугловой рентгеновской дифрактометрии

Fig. 3. Pair distance distribution function of the synthesized cerium dioxide nanoparticles according to small-angle X-ray diffractometry data

Из рисунка 3 видно, что кривая распределения наночастиц в диспергированном золе имеет сложную структуру с преобладающими максимумами в интервале 10–25 нм, что говорит о том, что частицы имеют тенденцию к агломерации друг с другом, что приводит к необходимости их стабилизации, к примеру, цитратом аммония.

В работе была также исследована антиоксидантная активность полученных

наночастиц диоксида церия в реакции фотохимической деградации красителя метиленового синего при облучении диодным источником с длиной волны 660 нм. Были исследованы золи наночастиц диоксида церия с различными концентрациями CeO_2 и мольным соотношением стабилизатора цитрата аммония (табл. 1). Образец 16 без добавления наночастиц CeO_2 и стабилизатора был использован как образец сравнения.

Таблица 1. Результаты спектрофотометрических измерений антиоксидантной активности наночастиц диоксида церия

Table 1. Results of spectrophotometric measurements of antioxidant activity of cerium dioxide nanoparticles

Номер образца	Концентрация диоксида церия, ммоль/л	Кратность к стабилизатору	Оптическая плотность до облучения	Оптическая плотность после облучения	АОА
1	10	0	1,0785	0,9150	0,16
2	5	0	1,0588	0,8663	0,20
3	3	0	1,0691	0,7225	0,39
4	10	1,00	0,6526	0,6287	0,04
5	5	1,00	1,1133	1,0158	0,09
6	3	1,00	0,8767	0,7644	0,14
7	10	5,00	1,1446	0,8218	0,33
8	5	5,00	0,9009	0,7150	0,23
9	3	5,00	0,7812	0,6721	0,15
10	10	2,00	0,9482	0,7955	0,18
11	10	0,50	0,6389	0,5836	0,09
12	10	0,25	0,6827	0,6705	0,02
13	5	2,00	0,7965	0,6780	0,16
14	5	0,50	0,6242	0,5536	0,12
15	5	0,25	1,0450	0,7400	0,35
16	0	0	0,9342	0,5222	0,58

При облучении метиленового синего красным лазером происходит разрушение красителя образующимися кислородсодержащими радикалами, что приводит к уменьшению оптической плотности раствора при 664 нм. При добавлении в раствор наночастиц диоксида церия, проявляющего антиоксидантные свойства, происходит ингибирование процесса окисления за счет снижения концентрации кислородсодержащих радикалов. Соответственно,

интенсивность полосы поглощения при 664 нм снижается в меньшей степени. Антиоксидантная активность наночастиц диоксида церия была определена по формуле [10] $AOA = \ln \frac{A_1}{A_2}$, где A_1 – оптическая плотность раствора до облучения, A_2 – оптическая плотность раствора после облучения. Чем меньше значение АОА, тем большую антиоксидантную активность проявляет образец.

Как следует из представленных результатов, оптимизация методики гидротермального синтеза позволяет получить наночастицы диоксида церия, которые проявляют ярко выраженные антиоксидантные свойства. Так, наибольшей антиоксидантной активностью обладают образцы под номерами 4 и 12 с наибольшей концентрацией наночастиц диоксида церия и оптимальным количеством стабилизатора. При этом прослеживается характерная закономерность: с ростом концентрации наночастиц диоксида церия в золе их антиоксидантный эффект усиливается. Также можно отметить, что при мольном соотношении стабилизатора меньше 2:1 наблюдается увеличение антиоксидантных свойств, тогда как с ростом этого показателя антиоксидантные свойства ухудшаются.

Таким образом, процесс фотодеградации чистого метиленового синего под действием красного лазерного излучения с длиной волны 660 нм замедляется в присутствии наночастиц диоксида церия, полученных гидротермальным синтезом и

стабилизированных цитратом аммония. Полученные результаты могут быть использованы для разработки селективных противоопухолевых фотосенсибилизаторов на основе наночастиц диоксида церия.

Выводы

Наночастицы диоксида церия были получены методом гидротермального синтеза в автоклаве при 150°C. Наночастицы характеризуются стехиометрическим составом, кубической сингонией CeO₂ и областью когерентного рассеяния (5±2) нм. Синтезированные гидротермальным методом наночастицы CeO₂, стабилизированные цитратом аммония, обладают выраженной антиоксидантной активностью. С ростом концентрации наночастиц диоксида церия в золе их антиоксидантный эффект усиливается. При мольном соотношении стабилизатора меньше 2:1 наблюдается усиление антиоксидантных свойств, тогда как с увеличением содержания стабилизатора антиоксидантные свойства ухудшаются.

Список литературы

1. Biomedical applications of nanoceria: new roles for an old player / S. Kargozar, F. Baino, S. J. Hoseini, S. Hamzehlou, M. Darroudi, J. Verdi [et al.] // *Nanomedicine*. 2018. Vol. 3, is. 23. P. 3051–3069. <https://doi.org/10.2217/nnm-2018-0189>
2. 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/10.21869/2223-1528-2023-13-3-199-210>
3. Antioxidant properties of stabilized CeO₂ nanoparticles / M.A. Pugachevskii, A.N. Chibisov, V.A. Mamontov, A.P. Kuzmenko // *Physica status solidi (a)*. 2021. Vol. 218, no. 20. P. 2100355. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100355>
4. Rao G.R., Mishra B.G. Structural, redox and catalytic chemistry of ceria-based materials // *Bulletin of the Catalysis Society of India*. 2003. Vol. 2. P. 122–134.
5. Cerium oxide nanoparticles: properties, biosynthesis and biomedical applications / K.R.B. Singh, V. Nayak, T. Sarkar, R.P. Singh // *Royal society of chemistry*. 2020. Vol. 10, is. 45. P. 27194–27214. <https://doi.org/10.1039/d0ra04736h>
6. Bouzigues C., Gacoin T., Alexandrou A. Biological applications of rare-earth based nanoparticles // *ACS Nano*. 2011. Vol. 5, is. 11. P. 8488–505. <https://doi.org/10.1021/nn202378b>

7. Controlling the surface chemistry of cerium oxide nanoparticles for biological application / A. Gupta, S. Das, C. Neal, S. Seal // *Journal of Materials Chemistry B*. 2016. Vol. 4, is. 19. P. 3195–3202.
8. Нанокристаллический диоксид церия: свойства, получение, применение / В.К. Иванов, А.Б. Щербаков, А.Е. Баранчиков, В.В. Козик. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 284 с.
9. Ilves V.G., Sokovnin S.Yu. Production and studies of properties of nanopowders on the basis of CeO₂ // *Nanotechnologies in Russia*. 2012. Vol. 7, is. 5-6. P. 213–226.
10. Engineered defects in Cerium oxides: tuning chemical reactivity for biomedical, environmental, & energy applications / S. Seal, A. Jeyaranjan, C.J. Neal, U. Kumar, T.S. Sakthivel, D.C. Sayle // *Nanoscale*. 2020. Vol. 12, is. 13. P. 6879–6899. <https://doi.org/10.1039/d0nr01203c>
11. Catalytic properties and biomedical applications of Cerium oxide nanoparticles / C. Walkey, S. Das, S. Seal, J. Erlichman, K. Heckman, L. Ghibelli [et al.] // *Environ. Sci.: Nano*. 2015. Vol. 2, is. 1. P. 33–53. <https://doi.org/10.1039/C4EN00138A>
12. Hydrothermal synthesis of gadolinium (Gd) doped Cerium oxide (CeO₂) nanoparticles: characterization and antibacterial activity / Y.A. Syed Khadar, A. Balamurugan, V.P. Devarajan, R. Subramanian // *Oriental journal of chemistry*. 2017. Vol. 33, is. 5. P. 2405–2411. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/330533>
13. Environment-mediated structure, surface redox activity and reactivity of ceria nanoparticles / T.X.T. Sayle, M. Molinari, S. Das, U.M. Bhatta, G. Mobus, S.C. Parker, S. Seal [et al.] // *Nanoscale*. 2013. Vol. 5, is. 13. P. 6063–73. <https://doi.org/10.1039/c3nr00917c>
14. Способ получения стабильных водных коллоидных растворов наночастиц диоксида церия: патент 2615688 Российская Федерация, МПК C01F 17/00, B01J 13/00 / Иванов Е.К., Щербаков А.Б., Теплоногова М.А., Шекунова Т.О., Баранчиков А.Е., Иванова О.С. [и др.]. № 2016112343; заявл. 01.04.2016; опубл. 06.04.2017, Бюл. № 10.
15. Тринеева О.В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор) // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2017. № 4. С. 180–197.

References

1. Kargozar S., Baino F., Hoseini S.J., Hamzehlou S., Darroudi M., Verdi J., et al. Biomedical applications of nanoceria: new roles for an old player. *Nanomedicine*. 2018;3(23):3051-3069. <https://doi.org/10.2217/nmm-2018-0189>
2. Mamontov V.A., Rodionov V.V., Ryzhenkova A.Yu., Egelsky I.V., Kalenchuk V.I., Pugachevsky M.A. Antioxidant activity of ablated cerium dioxide nanoparticles in 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>
3. 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>
4. Rao G.R., Mishra B.G. Structural, redox and catalytic chemistry of ceria-based materials. *Bull. Catal. Soc. India*. 2003. 2003;2:122-134.
5. Singh K.R. B., Nayak V., Sarkar T., Singh R.P. Cerium oxide nanoparticles: properties, biosynthesis and biomedical applications. *Royal society of chemistry*. 2020;10(45):27194-27214. <https://doi.org/10.1039/d0ra04736h>
6. Bouzigues C., Gacoin T., Alexandrou A. Biological applications of rare-earth based nanoparticles. *ACS Nano*. 2011;5(11):8488-505. <https://doi.org/10.1021/nn202378b>
7. Gupta A., Das S., Neal C., Seal S. Controlling the surface chemistry of cerium oxide nanoparticles for biological application. *Journal of Materials Chemistry B*. 2016;4(19):3195-3202.

8. Ivanov V.K., Shcherbakov A.B., Baranchikov A.E., Kozik V.V. Nanocrystalline cerium dioxide: properties, preparation, application. Tomsk: Tomsk. un-t; 2013. 284 p. (In Russ.)
9. Ilves V.G., Sokovnin S.Yu. Production and studies of properties of nanopowders on the basis of CeO₂. *Nanotechnologies in Russia*. 2012;7(5-6):213-226.
10. Seal S., Jeyaranjan A., Neal C.J., Kumar U., Sakthivel T.S., Sayle D.C. Engineered defects in cerium oxides: tuning chemical reactivity for biomedical, environmental, & energy applications. *Nanoscale*. 2020;12(13):6879-6899. <https://doi.org/10.1039/d0nr01203c>
11. Walkey C., Das S., Seal S., Erlichman J., Heckman K., Ghibelli L., et al. Catalytic properties and biomedical applications of Cerium oxide nanoparticles. *Environ. Sci. Nano*. 201;2(1):33-53. <https://doi.org/10.1039/C4EN00138A>
12. Syed Khadar Y.A., Balamurugan A., Devarajan V.P., Subramanian R. Hydrothermal synthesis of Gadolinium (Gd) doped Cerium oxide (CeO₂) nanoparticles: characterization and antibacterial activity. *Oriental journal of chemistry*. 2017;33(5)2405-2411. <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/330533>
13. Sayle T.X.T., Molinari M., Das S., Bhatta U.M., Mobus G., Parker S.C., Seal S., et al. Environment-mediated structure, surface redox activity and reactivity of ceria nanoparticles. *Nanoscale*. 2013;5(13):6063-73. <https://doi.org/10.1039/c3nr00917c>
14. Ivanov E.K., Shcherbakov A.B., Teplonogova M.A., Shekunova T.O., Baranchikov A.E., Ivanova O.S., et al. Method for obtaining stable aqueous colloidal solutions of cerium dioxide nanoparticles. Russian Federation patent 2615688. 6 April 2017.
15. Trineeva O.V. Methods for determining the antioxidant activity of plant and synthetic objects in pharmacy (review). *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv = Development and registration of drugs*. 2017;(4):180-197. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Чернов Артем Максимович, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tcer.ar28@gmail.com

Artem M. Chernov, Post-Graduate Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tcer.ar28@gmail.com

Агеева Лилия Сергеевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: liliya-ageeva-als@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5644-3367

Liliya S. Ageeva, Candidate of Sciences (Chemistry), Senior Research of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: liliya-ageeva-als@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5644-3367

Рассеко Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: rasseko.dmitriy@bk.ru

Dmitry S. Rasseko, Post-Graduate Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: rasseko.dmitriy@bk.ru

Пода Владислав Андреевич, магистрант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tetrahedra81@gmail.com

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

Родионов Владимир Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: i@rodionov777.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

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

Vladislav A. Poda, Undergraduate of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tetrahedra81@gmail.com

Valery I. Kalenchuk, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kalenchukvalery@yandex.ru

Vladimir V. Rodionov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Research of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: i@rodionov777.ru, ORCID: 0000-0002-1893-1941

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