Оригинальная статья / Original article

УДК 539.1.074:543.42.062
https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-2-102-112

CC BY 4.0

Влияние размерного фактора на морфологию аблированных наночастиц диоксида церия

В.А. Мамонтов[1]✉, М.А. Пугачевский[1], И.С. Сапрыкин[1]

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

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

Резюме

***Цель исследования**. Получение аблированных наночастиц диоксида церия в узкоразмерном диапазоне с заданными максимальным и минимальным значениями для определения зависимости морфологии частиц от размерного фактора.*

***Методы**. По специально разработанной методике получены нанодисперсные растворы аблированных частиц диоксида церия, характеризующиеся узкоразмерным распределением. С помощью просвечивающей электронной микроскопии изучена морфология аблированных наночастиц диоксида церия, полученных посредством последовательного диспергирования и центрифугирования. С помощью рентгеновской дифрактометрии была исследована кристаллическая структура узкоразмерных групп наночастиц CeO_2 и рассчитаны их области когерентного рассеивания.*

***Результаты.** Выяснено, что при росте значений средних размеров аблированных наночастиц диоксида церия их морфология принимает сферическую форму. Установлено, что с увеличением размера частиц происходит уменьшение интенсивности рефлекса рентгеновской дифракции от кристаллографических плоскостей (111), но при этом возрастает интенсивность рефлекса от кристаллографических плоскостей (200). Установлено, что размеры областей когерентного рассеяния аблированных наночастиц диоксида церия для кристаллографических плоскостей (111) меняются в диапазоне от (21,8±0,2) нм до (38,2±0,2) нм, а для кристаллографических плоскостей (200) меняются в диапазоне от (22,9±0,2) нм до (42,5±0,2) нм с ростом размеров частиц. Разница между средними размерами наночастиц диоксида церия и размерами их ОКР обусловлена наличием аморфного поверхностного слоя.*

***Заключение.** По результатам исследований, представленных в данной работе, установлено, что с увеличением размеров аблированных наночастиц диоксида церия их морфология меняется преимущественно от кубической формы к сферической, что проявляется в изменении соотношения интенсивностей рефлексов от различных кристаллографических плоскостей в их структуре.*

***Ключевые слова:** наноразмерный диоксид церия; лазерная абляция; нанодисперсные растворы; узкоразмерные группы; кубическая морфология; кристаллическая структура.*

***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:** Мамонтов В.А., Пугачевский М.А., Сапрыкин И.С. Влияние размерного фактора на морфологию аблированных наночастиц диоксида церия // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 102–112. https://doi.org/10.21869/ 2223-1528-2025-15-2-102-112.

Поступила в редакцию 25.04.2025 *Подписана в печать 30.05.2025* *Опубликована 30.06.2025*

© В.А. Мамонтов, М.А. Пугачевский, И.С. Сапрыкин, 2025

Effect of size factor on the morphology of ablated Cerium dioxide nanoparticles

Vladimir A. Mamontov[1]✉, Maksim A. Pugachevskii[1], Ivan S. Saprykin[1]

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

✉ e-mail: apk3527@mail.ru

Abstract

Purpose of the study. *Obtaining ablated Cerium dioxide nanoparticles in a narrow size range with specified maximum and minimum values to determine the dependence of particle morphology on the size factor.*

Methods. *Nanodispersed solutions of ablated cerium dioxide particles characterized by a narrow-size distribution were obtained using a specially developed technique. The morphology of ablated cerium dioxide nanoparticles obtained by sequential dispersion and centrifugation was studied using transmission electron microscopy. The crystal structure of narrow-size groups of CeO_2 nanoparticles was studied using X-ray diffractometry and their coherent scattering regions were calculated.*

Results. *The studies have shown that with increasing average sizes of ablated cerium dioxide nanoparticles, their morphology becomes spherical. It has been established that with increasing particle size, the intensity of the X-ray diffraction reflection from the (111) crystallographic planes decreases, while the intensity of the reflection from the (200) crystallographic planes increases. It has been established that the sizes of the coherent scattering regions of ablated cerium dioxide nanoparticles for the (111) crystallographic planes vary in the range from (21.8±0.2) nm to (38.2±0.2) nm, and for the (200) crystallographic planes, vary in the range from (22.9±0.2) nm to (42.5±0.2) nm with increasing particle size. The difference between the average sizes of cerium dioxide nanoparticles and the sizes of their CSRs is due to the presence of an amorphous surface layer.*

Conclusion. *According to the results of the studies presented in this paper, it follows that with an increase in the size of ablated cerium dioxide nanoparticles, their morphology changes predominantly from a cubic shape to a spherical one, which is manifested in a change in the ratio of the intensities of reflections from various crystallographic planes in their structure.*

Keywords: *nanosized cerium dioxide; laser ablation; nanodispersed solutions; narrow-sized groups; cubic morphology; crystal structure.*

Funding: *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., Saprykin I.S. Effect of size factor on the morphology 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(2):102–112. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/ 2223-1528-2025-15-2-102-112.

Received 25.04.2025 *Accepted 30.05.2025* *Published 30.06.2025*

***

Введение

В настоящее время активно исследуются физико-химические свойства наночастиц диоксида церия для различного применения. Наноразмерный диоксид церия может применяться в энергетике [1], при изготовлении электрохимического суперконденсатора в качестве покрытия кремниевых электродов [2], как компонент тройной топливной смеси в разработке более эффективной топливной присадки [3].

Особый интерес представляет применение нанокристаллического CeO_2 в биомедицине. Вследствие способности церия менять степень окисления $Ce^{3+} \leftrightarrow Ce^{4+}$ на поверхности наночастиц реализуется антиоксидантный цикл, способный инактивировать высокоактивные радикалы активных форм кислорода [4]. Наночастицы диоксида церия (НЧ CeO_2) проявляют антиоксидантные свойства в процессе окислительного стресса [5], в частности в качестве допирующей добавки [6]. НЧ CeO_2 способны выполнять защитную функцию для нервных клеток при их повреждении в результате окислительного стресса [7]. Были исследованы биохимические свойства диоксида церия [8]. НЧ CeO_2 может действовать как антиоксидант, который защищает клетки от ионизирующего излучения. Для уменьшения гематологического синдрома острой лучевой болезни разработаны наноносители для перорального приёма лекарств на основе пэгфилграстима [9]. Указан молекулярный механизм, лежащий в основе терапевтического эффекта наночастиц церия в онкологии [10]. В работе [11] показано, что наночастицы диоксида церия проявили эффективную инактивацию радикалов DPPH с концентрацией 242 мкг/мл и безопасную гемолитическую активность на уровнях ниже 2,5 мг/мл, что указывает на их потенциал в качестве перспективных наноматериалов в биомедицинских приложениях. Наночастицы диоксида церия, покрытые декстраном, оказывают влияние на клетки рака головы и шеи через апоптотический путь [12]. Таким образом, количество исследований антиоксидантных свойств наночастиц CeO_2 в последнее время значительно возросло вследствие их высокого терапевтического потенциала.

Одним из распространённых методов получения наночастиц диоксида церия является метод лазерной абляции. Из-за резко неравновесных условий метод лазерной абляции позволяет получить наночастицы диоксида церия, обогащенные поверхностными структурными дефектами, которые за счет развития термоупругих напряжений способны стабилизировать метастабильные состояния вещества [13]. Среди недостатков лазерной абляции можно выделить сложность контролирования размера получаемых наночастиц [14]. Для решения данной проблемы исследователи пытаются разработать специальные методики, позволяющие получать аблированные наночастицы в заданном размерном диапазоне. В наших предыдующих работах было показано, что нанодисперсные растворы аблированных частиц диоксида церия после процесса центрифугирования проявляют выраженные антиокислительные свойства в реакции Фентона [15] и фотокаталитическом процессе [16] в зависимости от размерного фактора. Вследствие этой зависимости представляет интерес разделение нанодисперсных растворов аблированных частиц диоксида церия на узкоразмерные группы для исследования зависимости антиоксидантных свойств наночастиц от их размеров. В работе [17] описано получение нанодисперсных водных растворов на основе аблированных наночастиц диоксида церия, характеризующихся узким размерным распределением, и приводятся результаты исследований их физико-химических свойств. Методом молекулярной динамики выявлен предельный размерный переход от кубической морфологии к сферической форме в наночастицах диоксида церия [18]. От морфологии наночастиц диоксида церия зависят различные свойства, например, существенно увеличивается удельная площадь поверхности, происходит рост количества структурных дефектов на границах и вершинах граней их кристаллической решётки при уменьшении размеров наночастиц диоксида церия [18]. Предположительно на

морфологию НЧ CeO_2 влияет размерный фактор. В данной работе для подтверждения влияния размеров узкоразмерных групп аблированных наночастиц CeO_2 на их морфологию мы представляем результаты исследования ПЭМ-микроскопии и кристаллической структуры методом рентгеновской дифрактометрии.

Материалы и методы

Получение наночастиц диоксида церия методом лазерной абляции проводилось с помощью ПЛМК ARGENT FMark-20RL [19]. Для изготовления мишени для лазерной абляции был использован гидравлический пресс OPAL 460. Для последующего отжига использовали ИК-печь MILA-5050 с нагревом до 1000°C. Порошок диоксида церия класса «ХЧ» массой 40 г помещался в предварительно очищенную пресс-форму. Время прессования составило 30 мин при температуре 190°C, давлении 245 бар. Прибор позволяет проводить отжиг образца в процессе прессования с максимальной температурой 200°C. Для увеличения прочности мишени диоксида церия есть необходимость дополнительного высокотемпературного его отжига, т. к. диоксид церия является тугоплавким материалом, температура плавления которого 2400°C. Дополнительный отжиг был осуществлен в минипечи при температуре 980°C в течение 90 мин. Мишень представляла собой цилиндр диаметром 40 мм и далее подвергалась лазерной абляции.

Характеристики лазерного воздействия в процессе абляции имели следующие значения: интенсивность излучения 10^9 Вт/м^2, длительность импульса 200 мкс, частота следования до 1 кГц, скорость маркировки 0,5 мм/с [19]. Под действием сфокусированного лазерного излучения диоксид церия взрывообразно распылялся, образуя поток аблированных частиц.

Полученная мишень закреплялась в металлическом держателе и помещалась на рабочую площадку лазерного комплекса. Каждая пластина фиксировалась в держателе и её положение относительно мишени регулировалось им на штативе. Расстояние от мишени до подложки варьировалось от 10 до 15 мм, при этом угол наклона подложки относительно поверхности мишени варьировался от 60º до 80º (рис. 1).

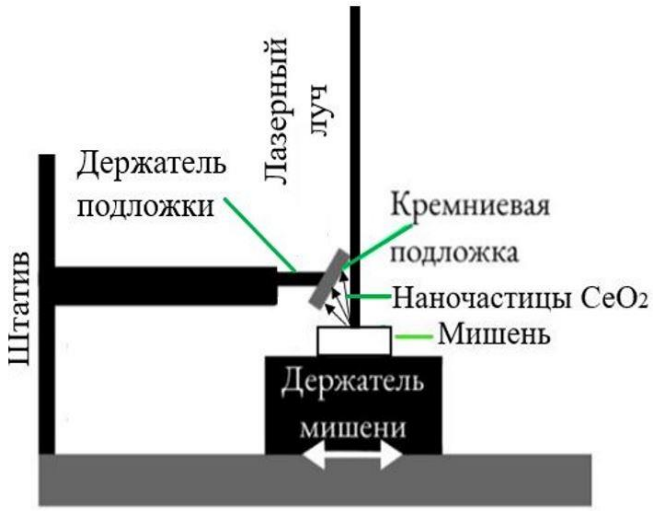

Рис. 1. Схематическое изображение закрепленных в держателях мишени диоксида церия и кремниевой подложки

Fig. 1. Schematic representation of the cerium dioxide target and silicon substrate fixed in holders

За 20–30 мин проведения лазерной абляции наносился слой наночастиц диоксида церия массой 10 мг.

Была специально разработана методика последовательного диспергирования и центрифугирования для получения стабилизированных нанодисперсных растворов аблированных частиц диоксида церия с узкоразмерным распределением с заданными максимальным и минимальным размерами. С помощью данной методики было получено 7 образцов нанодисперсных растворов в водной среде частиц диоксида церия.

Изначально был получен дисперсный раствор с концентрацией НЧ CeO_2 0,33 г/л, который впоследствии диспергировали в ультразвуковой ванне в течение 10 минут с мощностью 30 Вт. Далее часть раствора в объеме 2 мл была перенесена в микропробирку, после чего центрифугирована. Время центрифугирования составляло 5 мин. Для получения раствора 1 микроцентрифуга работала со скоростью 13400 об/мин. 1,5 мл центрифугированного раствора из верхней части пробирки, не касаясь ее дна и стенок, перемещали шприцем в кварцевую кювету спектрофотометра. Далее снимали спектры поглощения НЧ CeO_2 в диапазоне длин волн 200–400 нм для отслеживания концентрации НЧ CeO_2 в растворе. Раствор 2 был получен следующим образом: к оставшимся в микропробирке 0,5 мл раствора НЧ CeO_2 добавляли 1,5 мл H_2O, тщательно перемешивали и вновь диспергировали 10 мин. Содержимое микропробирки центрифуги-ровали при скорости центрифуги 10000 об/мин. Растворы 3–6 были получены аналогично, отличались лишь режимы центрифугирования: 5000, 2000, 1000 и 800 об/мин. К оставшимся в микропробирке 0,5 мл раствора НЧ CeO_2, центрифугированного при 800 об/мин, добавляли 1 мл H_2O, перемешивали и диспергировали 10 минут – так был получен раствор 7. Для растворов 2–7 также спектрофотометрическим методом фиксировались величины их оптических плотностей [17].

Для исследования морфологии аблированных узкоразмерных групп наночастиц диоксида церия был использован просвечивающий электронный микроскоп JEOL JEM-2100 с ускоряющим напряжением 120 кВ. На медную сеточку с углеродным напылением диаметром 3 мм и размером ячеек 68 мкм из нанодисперсных растворов наносились образцы и далее исследовались. С помощью порошкового рентгеновского дифрактометра GBC EMMA проведены исследования кристаллической структуры аблированных НЧ CeO_2. Образцы растворов были нанесены капельным методом на подложки монокристаллического кремния и в дальнейшем измерения проводились в диапазонах 2θ от 25°C до 35°C.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 представлены ПЭМ-изображения аблированных наночастиц CeO_2.

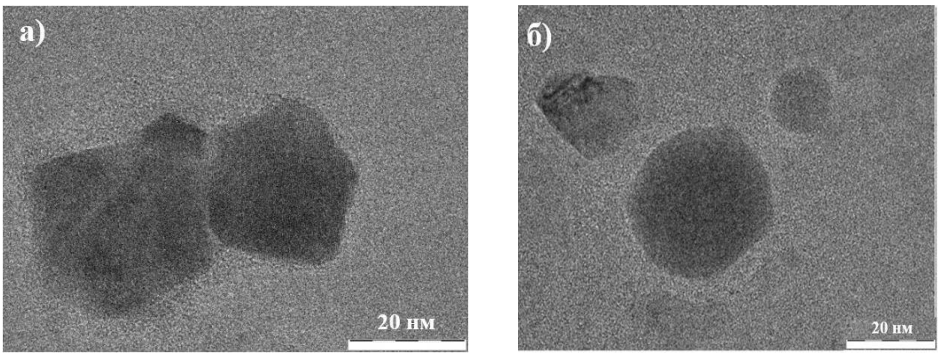

Рис. 2. ПЭМ-изображения аблированных наночастиц диоксида церия из дисперсных растворов: а – 1; б – 7

Fig. 2. TEM images of ablated cerium dioxide nanoparticles from dispersed solutions, a – 1; б – 7

Как видно из полученных изображений, морфология аблированных наночастиц диоксида церия из дисперсного раствора 1 с наименьшим средним размером характеризуется преимущественно кубической формой, а из дисперсного раствора 7 с наибольшим средним размером – более сферической формой. По результатам исследований методом малоуглового рентгеновского рассеяния и методом атомно-силовой микроскопии установлено, что в узкоразмерных группах аблированных наночастиц диоксида церия диапазон средних размеров гомогенных сфер составляет от (29,7±0,5) нм до (41,3±0,5) нм, а диапазон средних размеров составляет от (30,4±0,2) нм до (38,2±0,2) нм [17].

На рисунке 3 представлены рентгеновские дифрактограммы от аблированных узкоразмерных групп наночастиц диоксида церия с дифракционными рефлексами, характерными для диоксида церия, находящиеся при значениях 2θ = 28.55 (111), 33.08 (200).

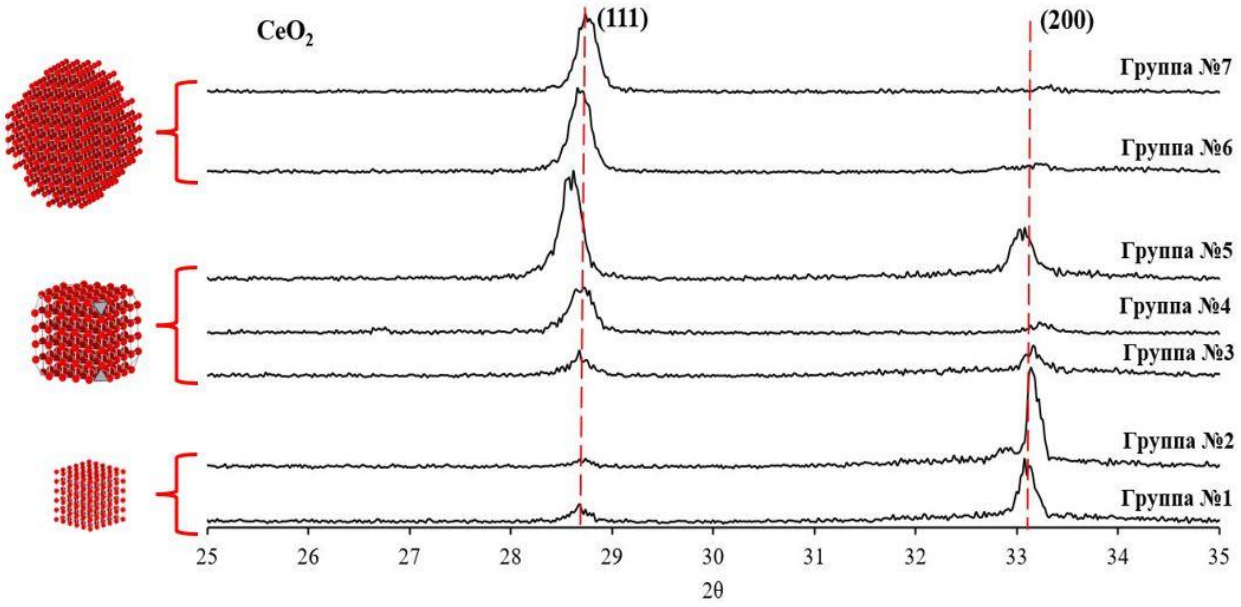

Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы от узкоразмерных групп аблированных наночастиц CeO_2, с пиками диоксида церия при 2θ ≈ 28,55; 33,08

Fig. 3. X-ray diffraction patterns from narrow-sized groups of ablated CeO_2 nanoparticles, with peaks of cerium dioxide at 2θ ≈ 28.55; 33.08

Дифракционные линии полученных образцов узкоразмерных групп отличаются друг от друга по интенсивности, что указывает на различие степени дифрагирования рентгеновских лучей на кристаллографических плоскостях (111) и (200). Это в первую очередь обусловлено изменением форм-фактора частиц при варьировании размеров частиц. Так для групп 1-2 рефлекс (200) преобладает над (111), что характерно для кубических кристаллитов конечных размеров, грань (100) которых ориентирована преимущественно параллельно подложке. Для 6-7 рефлекс (111), наоборот, преобладает над (200), что характерно для сферических частиц с сильными искажениями поверхностных атомарных слоев, когда наиболее плотно упакованные плоскости (111) способны давать наибольший вклад в дифракцию рентгеновских лучей. В группах 3-5, как видно из рисунка 1, соотношение интенсивности рефлексов (200) и (111) практически одинаково, что характерно для кубических частиц с округлёнными верши-

нами. Таким образом, методом рентгеновской дифрактометрии доказано, что кристаллическая структура и морфология аблированных наночастиц диоксида церия значительно изменяется с варьированием их размеров.

Дифракционные рефлексы аппроксимировались в программной среде «Origin» гауссовой кривой, что позволяло с помощью уравнения Шерера вычислить размеры областей когерентного рассеяния:

$$D = \frac{k\lambda}{\delta\cos\theta}, \quad (1)$$

где k – постоянная; δ – ширина дифракционных максимумов на уровне половины амплитуды; θ – брегговский угол рассеяния; λ – постоянная излучения, равная 0,154 нм для Cu на линии K_α.

Так как с увеличением средних размеров аблированных НЧ CeO_2 меняется их кристаллическая структура, то для достоверного расчёта постоянной k были использованы различные формулы. Для сферической формы наночастиц диоксида церия вычисление постоянной k выполнялось по формуле

$$k_{\text{sph}} = \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\pi}{6}\right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Для кубической формы НЧ CeO_2 использовались следующие формулы для расчёта постоянной k:

$$k_{\text{cub}(hkl)} = \frac{6h^3}{N^{\frac{1}{2}} \cdot [6h^2 - 2 \cdot (k+l) \times h + k \cdot l]}; \quad (3)$$

$$N = h^2 + k^2 + l^2. \quad (4)$$

В таблице 1 представлены результаты расчётов областей когерентного рассеяния.

Таблица 1. Размеры областей когерентного рассеяния узкоразмерных групп аблированных наночастиц диоксида церия для двух кристаллографических плоскостей

Table 1. Sizes of coherent scattering regions of narrow-sized groups of ablated cerium dioxide nanoparticles for two crystallographic planes

N	Группы аблированных наночастиц						
	1	2	3	4	5	6	7
	D, нм						
(111)	$k_{\text{cub}(111)} = 1{,}15$			$k_{\text{sph}} = 1{,}07$			
	25,6±0,2	26,6±0,2	27,1±0,2	28,3±0,2	29,4±0,2	30,3±0,2	31,2±0,2
(200)	$k_{\text{cub}(200)} = 1$			$k_{\text{sph}} = 1{,}07$			
	23,7±0,2	24,3±0,2	25,4±0,2	26,1±0,2	27,5±0,2	28,1±0,2	29,7±0,2

Как видно из таблицы 1, размеры областей когерентного рассеяния аблированных НЧ CeO_2 для семейства кристаллографических плоскостей (111) меняется в диапазоне от (21,8±0,2) нм до (38,2± ±0,2) нм и для семейства кристаллографических плоскостей (200) меняется в диапазоне от (22,9±0,2) нм до (42,5±0,2) нм при увеличении их средних размеров. Продемонстрированные расчёты подтверждают наноразмерное распределение аблированных наночастиц диоксида церия. Разница между средними размерами наночастиц диоксида церия и размерами их ОКР обусловлена наличием аморфного поверхностного слоя.

Экспериментальные данные показали, что полученные НЧ CeO_2 имеют кубическую и сферическую морфологию в зависимости от размера частиц. Эти результаты согласуются с данными моделирования о переходе от кубической морфологии к сферической с увеличением средних размеров наночастиц диоксида церия [18]. В дальнейшем существует возмож-

ность получения наночастиц диоксида церия с заданными физико-химическими свойствами за счёт контролируемых размеров и морфологии. Представленные результаты исследований могут быть актуальными для разработки методики получения аблированных наночастиц диоксида церия с контролируемыми размерами.

Выводы

1. Разработана специальная методика последовательного центрифугирования для получения нанодисперсных растворов аблированных наночастиц CeO_2 с узким размерным распределением и с различным средним размером.

2. Выявлено, что с увеличением размеров аблированных наночастиц диоксида церия в узкоразмерных группах их морфология претерпевает изменения из кубической формы в сферическую.

3. С помощью метода рентгеновской дифрактометрии показано изменение соотношения интенсивности рефлексов от кристаллографических плоскостей (111) и (200) в зависимости от размеров аблированных наночастиц диоксида церия, что обусловлено изменением форм-фактора частиц.

4. Определены размеры областей когерентного рассеяния аблированных наночастиц CeO_2 для семейства кристаллографических плоскостей (111), которые меняются в диапазоне от (21,8±0,2) нм до (38,2±0,2) нм, и для семейства кристаллографических плоскостей (200), которые меняются в диапазоне от (22,9±0,2) нм до (42,5±0,2) нм при увеличении их средних размеров.

Список литературы

1. Recent progress on cerium oxide-based nanostructures for energy and environmental applications / S.K. Ray, R. Dahal, M.D. Ashie, S.M.M. Alonzo, B.R. KC, B.P. Bastakoti // Advanced Energy and Sustainability Research. Wiley, 2025. P. 2500022. https://doi.org/10.1002/aesr.202500022.

2. Cerium oxide anchored free-standing silicon nanowires as potential anode materials for electrochemical supercapacitor / B.K. Singh, Ravi Kumar, A.K. Satpati, S.S. Mahapatra // Journal of the Indian Chemical Society. 2025. Vol. 102, no. 1. P. 101504. https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101504.

3. Size impact of cerium oxide nanoparticles (CeO_2) on ternary fuel blend using third-generation biodiesel in VCR diesel engine / N. Upadhyay, R.K. Das, S.K. Ghosh // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024. Vol. 149, no. 9. P. 3851-3876. https://doi.org/10.1007/s10973-024-12958-3.

4. Modeling the kinetic behavior of reactive oxygen species with cerium dioxide nanoparticles / K. Reed, N. Bush, Z. Burns, G. Doherty, T. Foley, M. Milone [et al.] // Biomolecules. 2019. Vol. 9, no. 9. P. 447. https://doi.org/10.3390/biom9090447.

5. Ge X., Cao Z., Chu L. The antioxidant effect of the metal and metal-oxide nanoparticles // Antioxidants. 2022. Vol. 11. P. 791. https://doi.org/10.3390/antiox11040791.

6. Cerium oxide-decorated γ-Fe_2O_3 nanoparticles: Design, synthesis and in vivo effects on parameters of oxidative stress / M. Moskvin, I. Marková, H. Malínská, D. Miklánková, M. Hüttl, O. Oliyarnyk [et al.] // Frontiers in Chemistry. 2020. Vol. 8. P. 682. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00682.

7. Cerium and yttrium oxide nanoparticles are neuroprotective / D. Schubert, R. Dargusch, J. Raitano, S.W. Chan // Biochemical and biophysical research communications. 2006. Vol. 342, no. 1. P. 86-91. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.01.129.

8. Vacancy engineered ceria nanostructures for protection from radiation-induced cellular damage / R.W. Tarnuzzer, J. Colon, S. Patil, S. Seal // Nano letters. 2005. Vol. 5, no. 12. P. 2573-2577. https://doi.org/10.1021/nl052024f.

9. Development of nanocarrier-based oral pegfilgrastim formulations for mitigating hematopoietic acute radiation syndrome / Y. Zhu, D.N. Tavakol, H. Wang, S. He, B. Ponnaiya, Z. Zhu, [et al.] // Advanced Functional Materials. 2025. P. 2421462. https://doi.org/10.1002/adfm.202421462.

10. Differential effect of cerium nanoparticles on the viability, redox-status and Ca^{2+}-signaling system of cancer cells of various origins / E.G. Varlamova, S.V. Gudkov, E.A. Turovsky // Archives of Biochemistry and Biophysics. 2025. Vol. 764. P. 110261. https://doi.org/10.1016/j.abb.2024.110261.

11. Cerium oxide nanoparticles: sustainable synthesis and diverse applications in electrical properties, catalysis and biomedicine / H.S. Lalithamba, G.K. Prashanth, H.K.E. Latha, A. Siddekha, G. Nagendra // Chemical Papers. 2025. Vol. 79, no. 1. P. 193-209. https://doi.org/10.1007/s11696-024-03770-2.

12. New insights of cerium oxide nanoparticles in head and neck cancer treatment / E. Tarakci, S. Esmkhani, J. Bayramova, F.M. Bilgin, K. Kidik, S. Adiguzel, Y. Tufan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15, no. 1. P. 7665. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85228-3.

13. Pugachevskii M.A., Panfilov V.I. Effect of the pulse laser radiation on the stabilization of the ZrO_2 and HfO_2 high-temperature phases // Solid state phenomena. 2016. Vol. 245. P. 200-203. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.200.

14. Особенности и направления развития метода лазерной абляции для синтеза наночастиц / Е.С. Шитова, Ф.В. Макаров, А.А. Перцев, А.П. Пономаренко, А.А. Штраус // Аналитика веществ и материалов. 2023. Т. 13, № 1. С. 48–54. https://doi.org/10.22184/2227-572x.2023.13.1.48.54.

15. Antioxidant properties of stabilized CeO_2 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.

16. Effect of pH on antioxidant properties of ablated CeO_2 nanoparticles in photocatalytic process / M.A. Pugachevskii, V.A. Mamontov, A.V. Syuy, A.P. Kuzmenko // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2022. Vol. 106. P. 74–76. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.036.

17. Antioxidant activity of ablated CeO_2 nanoparticles with narrow-size distribution / V.A. Mamontov, M.A. Pugachevskii, P.P. Snetkov, R.K. Ratnesh // Engineering Proceedings. 2025. Vol. 87, no. 1. P. 55. https://doi.org/10.3390/engproc2025087055.

18. Effect of morphology and size on the thermodynamic stability of cerium oxide nanoparticles: Experiment and molecular dynamics calculation / A.N. Chibisov, M.A. Pugachevskii, A.P. Kuzmenko, M.M. Than, A.I. Kartsev // Nanotechnology Reviews. 2022. Vol. 11, no. 1. P. 620-624. https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0038.

19. Production of ablated CeO_2 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.

References

1. Ray S.K., Dahal R., Ashie M.D., Alonzo S.M.M., KC B.R., Bastakoti B.P. Recent progress on cerium oxide-based nanostructures for energy and environmental applications. *Advanced Energy and Sustainability Research*. Wiley; 2025. P. 2500022. https://doi.org/10.1002/aesr.202500022.

2. Singh B.K., Kumar R., Satpati A.K., Mahapatra S.S. Cerium oxide anchored free-standing silicon nanowires as potential anode materials for electrochemical supercapacitor. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2025;102(1):101504. https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101504.

3. Upadhyay N., Das R.K., Ghosh S.K. Size impact of cerium oxide nanoparticles (CeO_2) on ternary fuel blend using third-generation biodiesel in VCR diesel engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2024;149(9):3851-3876. https://doi.org/10.1007/s10973-024-12958-3.

4. Reed K., Bush N., Burns Z., Doherty G., Foley T., Milone M., et al. Modeling the kinetic behavior of reactive oxygen species with cerium dioxide nanoparticles. *Biomolecules.* 2019;9(9):447. https://doi.org/10.3390/biom9090447.

5. Ge X., Cao Z., Chu L. The antioxidant effect of the metal and metal-oxide nanoparticles. *Antioxidants.* 2022;11(4):791. https://doi.org/10.3390/antiox11040791.

6. Moskvin M., Markova I., Malinska H., Miklankova D., Huttl M., Oliyarnyk O., et al. Cerium oxide-decorated γ-Fe_2O_3 nanoparticles: Design, synthesis and in vivo effects on parameters of oxidative stress. *Frontiers in Chemistry.* 2020;8:682. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00682.

7. Schubert D., Dargusch R., Raitano J., Chan S.W. Cerium and yttrium oxide nanoparticles are neuroprotective. *Biochemical and biophysical research communications*. 2006;342(1):86-91. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2006.01.129.

8. Tarnuzzer R.W., Colon J., Patil S., Seal S. Vacancy engineered ceria nanostructures for protection from radiation-induced cellular damage. *Nano letters*. 2005;5(12):2573-2577. https://doi.org/10.1021/nl052024f.

9. Zhu Y., Tavakol D.N., Wang H., He S., Ponnaiya B., Zhu Z., et al. Development of nanocarrier-based oral pegfilgrastim formulations for mitigating hematopoietic acute radiation syndrome. *Advanced functional materials*. 2025:2421462. https://doi.org/10.1002/adfm.202421462.

10. Varlamova E.G., Gudkov S.V., Turovsky E.A. Differential effect of cerium nanoparticles on the viability, redox-status and Ca^{2+}-signaling system of cancer cells of various origins. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2025;764:110261. https://doi.org/10.1016/j.abb.2024.110261.

11. Lalithamba H.S., Prashanth G.K., Latha H.K.E., Siddekha A., Nagendra G. Cerium oxide nanoparticles: sustainable synthesis and diverse applications in electrical properties, catalysis and biomedicine. *Chemical Papers*. 2025;79(1):193-209. https://doi.org/10.1007/s11696-024-03770-2.

12. Tarakci E., Esmkhani S., Bayramova J., Bilgin F.M., Kidik K., Adiguzel S., et al. New insights of cerium oxide nanoparticles in head and neck cancer treatment. *Scientific Reports*. 2025;15(1):7665. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85228-3.

13. Pugachevskii M.A., Panfilov V.I. Effect of the pulse laser radiation on the stabilization of the ZrO_2 and HfO_2 high-temperature phases. *Solid state phenomena*. 2016;245:200-203. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.200.

14. Shitova E.S., Makarov F.V., Pertsev A.A., Ponomarenko A.P., Strauss A.A. Features and directions of development of the laser ablation method for the synthesis of nanoparticles. *Analitika veshchestv i materialov = Analytics of substances and materials.* 2023;13(1):48-54. (In Russ.) https://doi.org/10.22184/2227-572x.2023.13.1.48.54.

15. Pugachevskii M.A., Chibisov A.N., Mamontov V.A., Kuzmenko A.P. Antioxidant properties of stabilized CeO_2 nanoparticles. *Physica status solidi (a).* 2021;218(20):2100355. https://doi.org/10.1002/pssa.202100355.

16. Pugachevskii M.A., Mamontov V.A., Syuy A.V., Kuzmenko A.P. Effect of pH on antioxidant properties of ablated CeO_2 nanoparticles in photocatalytic process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2022;106:74-76. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.036.

17. Mamontov V.A., Pugachevskii M.A., Snetkov P.P., Ratnesh R.K. Antioxidant activity of ablated CeO_2 nanoparticles with narrow-size distribution. *Engineering Proceedings*. 2025;87(1):55. https://doi.org/10.3390/engproc2025087055.

18. Chibisov A.N., Pugachevskii M.A., Kuzmenko A.P., Than M.M., Kartsev A.I. Effect of morphology and size on the thermodynamic stability of cerium oxide nanoparticles: Experiment and molecular dynamics calculation. *Nanotechnology Reviews*. 2022;11(1):620-624. https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0038.

19. Pugachevskii M.A., Mamontov V.A., Aung N.V., Chekadanov A.S., Kuzmenko A.P. Production of ablated CeO_2 particles with nanodispersed compositional distribution. *Technical Physics Letters*. 2020;46:1032-1035. https://doi.org/10.1134/S1063785020100259.

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, Postgraduate 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

Сапрыкин Иван Сергеевич, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ivan.saprykin.04@mail.ru

Ivan S. Saprykin, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ivan.saprykin.04@mail.ru