



**ШЛАПА**

**Юлія Юрївна** –  
кандидат хїмічних наук,  
старший науковий співробітник  
відділу хїмії твердого тіла  
Інституту загальної та  
неорганїчної хїмії  
їм. В.І. Вернадського НАН  
України

## БІОАКТИВНІ НАНОКОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ЦЕРІЙ ДІОКСИДУ ЯК ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ОКСИДАТИВНОГО СТРЕСУ ТА ЙОГО НАСЛІДКІВ

За матеріалами наукового повідомлення  
на засіданні Президії НАН України  
17 грудня 2025 р.

*У доповіді наведено результати комплексних досліджень двох типів нанокompозитів на основі наночастинок  $\text{CeO}_2$  (з частинками активованого вуглецю та магнітними наночастинками  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) із синергетично підвищеною біоактивністю порівняно з індивідуальними частинками. Показано, що поєднання різних типів наночастинок в одному композиті, а також варіювання умов їх синтезу дозволяють цілеспрямовано керувати морфологією та окисно-відновним станом поверхні наноматеріалів, що безпосередньо впливає на їхню біоактивність. Запропоновано механізми синергетичного підвищення біоактивності при взаємодії компонентів у композитах як ефективний і перспективний інструмент створення засобів комплексної дії для боротьби з оксидативним стресом та його наслідками.*

**Ключові слова:** нанокompозити на основі  $\text{CeO}_2$ , біоактивність, біосумісність, захист від оксидативного стресу.

Неорганічні наноматеріали привертають сьогодні значну увагу дослідників завдяки можливості їх використання в медицині. Це пов'язано з тим, що з переходом до нанорозмірного стану такі матеріали набувають унікальних і керованих властивостей (магнітних, оптичних, каталітичних) завдяки великій питомій площі поверхні та нестандартній геометрії поверхневих структур. Крім того, синтез неорганічних наноматеріалів відносно простий, швидкий і недорогий, що зумовлює перспективність їх масового застосування в реальних умовах [1].

Особливу увагу варто зосередити на розробленні неорганічних наноматеріалів, здатних пригнічувати прояви оксидативного стресу — надмірне утворення активних форм кисню та азоту, які можуть руйнувати нормальні тканини і завдавати істотної

шкоди організму людини [2]. Відомо, що оксидативний стрес може бути як причиною, так і наслідком розвитку різних захворювань — від онкологічних до нейродегенеративних, зокрема хвороби Альцгеймера. Крім того, він може виникати під час опромінення організму. Сьогодні це питання набуває особливої актуальності через реальні ризики застосування зброї масового ураження, проте навіть у мирний час воно не втрачає свого значення з огляду на небезпеку аварій на атомних електростанціях (як приклад можна згадати трагедії Чорнобиля та Фукусіми). Тому так важливо створювати біоактивні неорганічні наноматеріали з вираженими антиоксидантними властивостями, які можуть стати ефективним засобом у боротьбі з оксидативним стресом, що виникає внаслідок різних ушкоджень організму.

Важливим аспектом створення наноматеріалів для практичного застосування в медицині є їхня багатофункціональність, оскільки ефективна терапія часто потребує комплексних підходів. Одним із перспективних шляхів досягнення такої багатофункціональності є створення композитних наноматеріалів, які поєднують два або більше компонентів. Використання нанокompозитів дозволяє інтегрувати кілька функцій в одному матеріалі, поліпшити поверхневі характеристики, підвищити хімічну та колоїдну стабільність, а також реалізувати синергетичні взаємодії між компонентами, що може приводити до появи нових або посилення наявних функціональних властивостей. У цьому контексті особливо перспективними є нанокompозити на основі церій діоксиду, який характеризується високою біосумісністю та біоактивністю, присутністю на поверхні окисно-відновної пари  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  та високою колоїдною стійкістю, що зумовлює його привабливість як компонента для створення біоактивних наноматеріалів медичного призначення.

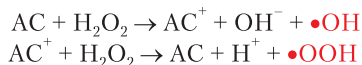
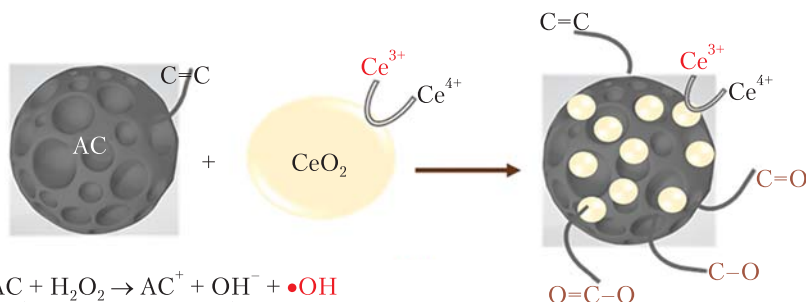
Перед тим, як перейти безпосередньо до композитів, слід зазначити, що в своїх дослідженнях ми аналізували можливість отримання наночастинок церій діоксиду з керованими параметрами, які можна регулювати, варіюючи умови синтезу. Важливо, що дослідження це-

рій діоксиду з точки зору його біомедичного використання є актуальними в усьому світі, в тому числі й в Україні [3, 4]. Однак детальні та систематизовані дослідження фізико-хімічних параметрів церій діоксиду зазвичай проводили з метою створення промислових каталізаторів, для чого часто використовують термообробку, що не підходить для медичних застосувань.

У нашій роботі ми систематизували умови отримання наночастинок із керованими розмірами та часткою поверхневих іонів  $\text{Ce}^{3+}$ , що є ключовим фактором їхньої біоактивності. Нам вдалося отримати стабільні наночастинки церій діоксиду у водних суспензіях без використання додаткових стабілізаторів, а детальні біологічні дослідження, проведені в тісній кооперації з колегами з Інституту експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України та Інституту експериментальної фізики Словацької академії наук, показали, що синтезовані нами наночастинки мають виражені антиоксидантні, антиамілоїдні і, що особливо важливо, радіопротекторні властивості. Це відкриває перспективи для їх подальших біомедичних застосувань, а також для розроблення нанокompозитів на їх основі [5—7].

Перший тип досліджуваних нами нанокompозитів — це **композити на основі активованого вуглецю та частинок церій діоксиду**. Ідея їх створення полягала в поєднанні в одному матеріалі сорбційного потенціалу вуглецевих частинок та біоактивності церій діоксиду. Незважаючи на наявність окремих робіт, присвячених біомедичним дослідженням різних композитів вуглецевих матеріалів із церій діоксидом, композитні системи активованій вуглець —  $\text{CeO}_2$  досі не були описані в науковій літературі.

Ми синтезували серію композитів із різним масовим співвідношенням активованого вуглецю та наночастинок  $\text{CeO}_2$  шляхом механічного змішування попередньо одержаних індивідуальних компонентів у планетарному млині. За даними електронної мікроскопії та елементного аналізу встановлено, що наночастинки  $\text{CeO}_2$  розміром приблизно 4 нм нерівно-



Ілюстрація окисно-відновних взаємодій між активними центрами при формуванні композитів C@CeO<sub>2</sub>

мірно розподіляються на поверхні аморфних частинок активованого вуглецю. Зменшення питомої поверхні та пористості вуглецю в композитах вказує на часткове блокування пор наночастинками CeO<sub>2</sub>, однак отримані композити зберігають сорбційний потенціал.

Дослідження хімічного стану поверхні методом рентгенфотоелектронної спектроскопії (РФС) продемонстрували збільшення кількості кисневмісних функціональних груп на поверхні вуглецю зі зростанням частки CeO<sub>2</sub>, що свідчить про наявність активних окисно-відновних взаємодій між компонентами при формуванні композиту. Встановлено, що композит C@CeO<sub>2</sub> із масовим співвідношенням вуглецю та CeO<sub>2</sub> 1:1 характеризується оптимальним балансом поверхневих функціональних груп, у тому числі C=O, які відіграють ключову роль у прояві псевдоферментативної (зокрема, SOD-подібної) активності.

Результати біологічних досліджень, які ми проводили в тісній співпраці з колегами з Інституту експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України та Інституту експериментальної фізики Словацької академії наук, показали, що синтезовані композити C@CeO<sub>2</sub> проявляють синергетичне підсилення псевдоензиматичної активності щодо нейтралізації активних форм кисню порівняно з індивідуальними компонентами. Так, композит C@CeO<sub>2</sub> з масовим співвідношенням компонентів 1:1 виявив більш як вдвічі ефективнішу SOD-подібну дію, а також на 15–20 % вищий радіопротекторний ефект на клітинних лініях в умовах опромінення дозою 22 Гр.

За результатами комплексних досліджень було запропоновано узгоджений механізм, який пояснює синергетичне підсилення біоактивності композитів C@CeO<sub>2</sub>. Наночастинки CeO<sub>2</sub> завдяки переходам між Ce<sup>3+</sup> і Ce<sup>4+</sup> мають власну потужну антиоксидантну активність, а їхня присутність на поверхні вуглецю додатково стимулює утворення кисневмісних груп, що підсилюють псевдоензиматичну дію самого активованого вуглецю (див. рис.). У результаті така взаємодія ефективно «розриває» ланцюгові реакції утворення активних форм кисню, забезпечуючи значно вищий антиоксидантний та радіопротекторний ефект, ніж у кожного компонента окремо.

Отже, встановлений механізм підтверджує, що саме синергія між CeO<sub>2</sub> і вуглецевою матрицею є ключем до підвищеної біоактивності отриманих нанокompозитів.

Другий тип досліджуваних нами нанокompозитів — це **композити на основі наночастинок магнетиту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та церій діоксиду**. Ідея їх створення полягала в поєднанні магнітних властивостей магнетиту з біоактивністю CeO<sub>2</sub>. Попри поодинокі літературні дані щодо нанокompозитів Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CeO<sub>2</sub> та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@CeO<sub>2</sub> біомедичного призначення, питання синергетичного підвищення їхньої біологічної активності, оптимального співвідношення компонентів і впливу нагрівання під дією змінного магнітного поля на їхню біофункціональність залишаються відкритими.

У своїх дослідженнях ми успішно використали два підходи до синтезу нанокompозитів Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CeO<sub>2</sub>, що дало змогу отримати структу-

ри типу «ядро—оболонка», в яких залежно від методу спостерігалось або часткове покриття магнітних частинок, або рівномірна, поширено нарощена оболонка церій діоксиду. Такий контроль морфології забезпечив оптимальне розташування активних окисно-відновних центрів  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  та  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , створюючи передумови для підсиленої й керованої біофункціональності матеріалів.

Результати РФС-досліджень показали, що збільшення вмісту  $\text{CeO}_2$  у нанокompозитах змінює хімічний стан поверхні, впливаючи на співвідношення між  $\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Ce}^{3+}$ , що вказує на активні окисно-відновні взаємодії між ними. Така конфігурація створює сприятливі умови для підсилення псевдоензиматичної активності матеріалу, що є ключовим фактором його потенційної біокаталітичної і терапевтичної ефективності. За результатами комплексних досліджень ми встановили прямий зв'язок між умовами синтезу, морфологією композитів та хімічним станом їхньої поверхні, що є важливим кроком до їх раціонального синтезу для потенційних біомедичних застосувань.

Біологічні дослідження розроблених магнітних нанокompозитів ми проводили разом із колегами з Інституту експериментальної фізики Словацької академії наук. Нанокompозити  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CeO}_2$  демонструють виражену псевдоензиматичну та антиамілоїдну активність, причому композити, поверхня яких збагачена

$\text{Fe}^{2+}$  та  $\text{Ce}^{3+}$ , мають підвищену біоактивність. Встановлено, що морфологія композиту також впливає на біоактивність. Зокрема, доступ до активних центрів  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  та їхня участь у біокаталітичних процесах сприяє максимальній біоактивності. Взаємодія між окисно-відновними парами  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  та  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  забезпечує синергетичну регенерацію активних центрів та ефективне розщеплення активних форм кисню.

Ми вперше системно дослідили магнітні нанокompозити  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CeO}_2$  і запропонували механізм синергетичного підвищення їхньої біоактивності, що ґрунтується на взаємодії активних окисно-відновних центрів  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  і  $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ . Ці результати підтверджують, що створення гібридних структур типу «ядро—оболонка» є ефективним шляхом підвищення біофункціональних властивостей нанокompозитів.

Отже, на сьогодні нам вдалося розробити два типи нанокompозитів на основі наночастинок церій діоксиду із синергетично підвищеною біоактивністю порівняно з індивідуальними частинками, запропонувати механізми такої синергії при взаємодії компонентів у композиціях. Це може стати ефективним і перспективним інструментом створення засобів комплексної дії для боротьби з оксидативним стресом та його наслідками. Наведені вище результати опубліковано в роботах [8, 9].

## REFERENCES

1. Campora S., Ghersi G. Recent developments and applications of smart nanoparticles in biomedicine. *Nanotechnology Reviews*. 2022. **11**(1): 2595—2631. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0148>
2. Sies H., Berndt C., Jones D.P. Oxidative stress. *Annual Review of Biochemistry*. 2017. **86**(1): 715—748. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-061516-045037>
3. Derevianko S., Vasylychenko A., Kaplunenko V., Kharchuk M., Demchenko O., Spivak M. Antiviral properties of cerium nanoparticles. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendel. Brun.* 2022. **70**(3): 187—204. <https://doi.org/10.11118/actaun.2022.014>
4. Klochkov V.K., Malyukin Y.V., Grygorova G.V., Sedyh O.O., Kavok N.S., Seminko V.V., Semynozhenko V.P. Oxidation-reduction processes in  $\text{CeO}_{2-x}$  nanocrystals under UV irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A*. 2018. **364**: 282—287. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.06.025>
5. Shlapa Yu., Timashkov I., Veltruska K., Siposova K., Garcarova I., Musatov A., Solopan S., Kubovcikova M., Belous A. Structural and physical-chemical characterization of redox active  $\text{CeO}_2$  nanoparticles synthesized by the precipitation in the water-alcohol solutions. *Nanotechnology*. 2021. **32**(31): 315706. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abf7e9>

6. Shlapa Yu., Solopan S., Sarnatskaya V., Siposova K., Garcarova I., Veltruska K., Timashkov I., Lykhova O., Kolesnik D., Musatov A., Nikolaev V., Belous A. Cerium dioxide nanoparticles synthesized via precipitation at constant pH: synthesis, physical-chemical and antioxidant properties. *Colloids Surf. B*. 2022. **220**: 112960. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112960>
7. Sarnatskaya V., Shlapa Yu., Kolesnik D., Lykhova O., Klymchuk D., Solopan S., Lyubchik S., Golovynska I., Qu J., Stepanov Yu., Belous A. Bioactivity of cerium dioxide nanoparticles as a function of size and surface features. *Biomater. Sci*. 2024. **12**: 2689—2704. <https://doi.org/10.1039/D3BM01900D>
8. Shlapa Yu., Siposova K., Veltruska K., Maraloiu V.-A., Rajnak M., Garcarova I., Musatov A., Belous A. Design of magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CeO<sub>2</sub> “core/shell”-like nanocomposites with pronounced antiamyloidogenic and antioxidant bioactivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023. **15**(42): 49346—49361. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c10845>
9. Shlapa Yu., Siposova K., Sarnatskaya V., Drainova M., Silvestre-Albero J., Lykhova O., Maraloiu V.A., Solopan S.O., Molcan M., Musatov A., Belous A. Bioactive Carbon@CeO<sub>2</sub> composites as efficient antioxidants with antiamyloid and radioprotective potentials. *ACS Appl. Bio Mater*. 2024. **7**(10): 6749—6767. <https://doi.org/10.1021/acsabm.4c00912>

Yuliia Yu. Shlapa

V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1732-0962>

#### BIOACTIVE NANOCOMPOSITES BASED ON CERIUM DIOXIDE AS PROMISING MATERIALS FOR PROTECTION AGAINST OXIDATIVE STRESS AND ITS CONSEQUENCES

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 17, 2025

The report presents the results of comprehensive studies on two types of nanocomposites based on CeO<sub>2</sub> nanoparticles (combined with activated carbon particles and magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles) exhibiting synergistically enhanced bioactivity compared to the individual components. Specifically, the studies demonstrated that the combination of different types of nanoparticles within a single composite, as well as the variation in synthesis conditions, allow for targeted control over the morphology and redox state of the nanoparticle surfaces, which directly influences their bioactivity. Based on comprehensive physicochemical and biological investigations, mechanisms of synergistic bioactivity enhancement through component interactions in the composites were proposed, highlighting their potential as an effective and promising tool for the development of multifunctional agents to combat oxidative stress and its consequences.

**Keywords:** CeO<sub>2</sub>-based nanocomposites, bioactivity, biocompatibility, protection against oxidative stress.

**Cite this article:** Shlapa Yu.Yu. Bioactive nanocomposites based on cerium dioxide as promising materials for protection against oxidative stress and its consequences (according to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 17, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (2): 84—88. <https://doi.org/10.15407/visn2026.02.084>