



UDC 544.02:547.9

STUDY ON PARTICIPATION OF *CAMELINA SATIVA* SEEDCAKE EXTRACT COMPONENTS IN THE SYNTHESIS OF CERIUM DIOXIDE NANOPARTICLES

Tetiana V. Fesenko,¹ Oksana M. Stavynska,¹ Pavlo O. Kuzema,¹ Olena I. Oranska,¹
Viktor M. Anishchenko,² Iryna V. Laguta¹

¹Chuiko Institute of Surface Chemistry of NAS of Ukraine, 17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine

²L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry of NAS of Ukraine, 50 Kharkiv's'ke hwy, Kyiv 02160, Ukraine

Received 12 October 2024; accepted 30 November 2024; available online 25 January 2025

Abstract

Aim. To evaluate the possibility of using the extract from *Camelina sativa* seedcake for the green synthesis of cerium oxide nanoparticles (CeO₂-NPs), to investigate the composition of this extract, to elucidate which components participate in the formation of CeO₂-NPs, to characterize the CeO₂-NPs obtained. **Methods.** High-performance liquid chromatography and matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry were used to identify the components of *Camelina sativa* seedcake extract and of the reaction mixture after removal of CeO₂-NPs. X-ray diffraction, thermal desorption of argon, transmission electron microscopy, dynamic light scattering were used to characterize the CeO₂-NPs obtained. **Results.** The main components of the extract are phenolic acids and/or their derivatives (ferulic acid, hydroxycavic acid, sinapin), flavonoids (rutin, quercetin, quercetin-2-O-apiosyl-3-O-rutinoside), glucosinolates (glucoarabin, glucocamelinin, gluconesliapaniculatin), unsaturated fatty acids and their esters. The majority of phenolic acids and flavonoids as well as some portion of glucosinolates participate in the formation of nanoparticles. The obtained CeO₂-NPs have a cubic crystalline structure with an average crystallite size of 23 nm, while the largest percentage of nanoparticles has a diameter of 30÷50 nm. **Conclusions.** The possibility of using the extract from *Camelina sativa* seedcake for the green synthesis of CeO₂-NPs is shown and the main components of the extract were identified. The majority of identified components of the extract participate in the formation of CeO₂-NPs. The obtained CeO₂-NPs are crystalline and their size allows them to be used in various biomedical applications.

Keywords: *Camelina sativa*; extract; nanoparticles; cerium oxide, «green» synthesis

ДОСЛІДЖЕННЯ УЧАСТІ КОМПОНЕНТІВ ЕКСТРАКТУ З ВИЧАВОК НАСІННЯ *CAMELINA SATIVA* У СИНТЕЗІ НАНОЧАСТИНОК ДІОКСИДУ ЦЕРІЮ

Тетяна В. Фесенко,¹ Оксана М. Ставинська,¹ Павло О. Кузема,¹ Олена І. Оранська,¹
Віктор М. Аніщенко,² Ірина В. Лагута¹

¹Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України, вул. Генерала Наумова, 17, м. Київ, 03164, Україна

²Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАНУ, Харківське шос., 50, м. Київ, 02160, Україна

Анотація

Мета. Оцінити можливість використання екстракту з вичавок насіння *Camelina sativa* для «зеленого» синтезу наночастинок церію (VI) оксиду (CeO₂-НЧ), дослідити склад цього екстракту, з'ясувати, які компоненти беруть участь в утворенні CeO₂-НЧ, охарактеризувати отримані наночастинок. **Методи.** Високоєфективна рідинна хроматографія та мас-спектрометрія з матрично-активованою лазерною десорбцією/іонізацією використовувалися для ідентифікації компонентів екстракту насіння *Camelina sativa* та надосадної рідини, одержаної після синтезу наночастинок. Наночастинок оксиду церію досліджено за допомогою методів рентгенофазового аналізу, теплової десорбції аргону, просвічуючої електронної мікроскопії, динамічного розсіювання світла. **Результати.** Виявлено, що основними компонентами екстракту є ряд фенольних кислот/похідних фенольних кислот (ферулова та гідроксикавова кислоти, синапін), флавоноїдів (рутин, кверцетин, кверцетин-2-О-апіозил-3-О-рутинозид), глюкозинолатів (глюкоарабін, глюкокамелінін, глюконесліпанікулатин), ненасичених жирних кислот та їх ефірів. Встановлено, що у формуванні наночастинок беруть участь більшість присутніх у екстракті фенольних кислот та флавоноїдів і частина глюкозинолатів. Встановлено, що CeO₂-НЧ мають кубічну кристалічну структуру з середнім розміром кристалітів 23 нм, а найбільший відсоток наночастинок має діаметр від 30 до 50 нм. **Висновки.** Показано можливість використання екстракту з вичавок насіння *Camelina sativa* для «зеленого» синтезу CeO₂-НЧ та визначено основні компоненти екстракту. Більшість ідентифікованих компонентів екстракту беруть участь в утворенні CeO₂-НЧ. Отримані наночастинок CeO₂ є кристалічними, а їх розмір дозволяє використовувати їх у різних біомедичних застосуваннях.

Ключові слова: *Camelina sativa*; екстракт; наночастинок; оксид церію; «зелений» синтез.

*Corresponding author: e-mail: t.fesenko@gmail.com

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University; doi: 10.15421/jchemtech.v32i4.316488

Вступ

Останнім часом значну увагу привертає застосування процесів «зеленого» синтезу для отримання наночастинок металів та оксидів металів різного призначення [1–4] «Зелений» синтез не потребує складних приладів та надмірного використання токсичних хімікатів, є економічним та екологічним.

Наночастинки діоксиду церію ($\text{CeO}_2\text{-НЧ}$) мають унікальні фізичні та хімічні властивості й можуть бути використані в каталізі, електроніці, сільському господарстві, діагностиці захворювань, як компоненти лікарських, косметологічних препаратів, як полірувальні матеріали, у складі присадок до автомобільного палива [5–7].

Розмір, ступінь агломерації, морфологія, стабільність, поверхневий заряд, покриття або залишки поверхнево-активних речовин та інші фізико-хімічні властивості наночастинок залежать від параметрів синтезу. Особливо важливе значення характеристики наночастинок мають у випадку їх медико-біологічного застосування [8–11].

Використовуючи різні методики «зеленого» синтезу, можна отримати частинки діоксиду церію з розмірами від 2 до 200 нм [12; 13]. Кожна методика передбачає, що під час синтезу $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ відбувається реакція складових «зеленого» реагенту з сіллю церію. Розчин реагентів може нагріватись до певної температури та оброблятися високим тиском,

опромінюватись мікрохвильовим або ультрафіолетовим випромінюванням, піддаватись ультразвуковій обробці, кип'ятінню [14]. Загалом температурні режими в різних методиках синтезу $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ варіюють від кімнатної температури до високих температур (понад $200\text{ }^\circ\text{C}$). Зазвичай високі температури використовують для отримання більш однорідних і стабільних наночастинок з меншою кількістю домішок та більш високою кристалічністю.

Джерелами активних сполук можуть слугувати різноманітні рослинні екстракти [15; 16], мікроорганізми, зокрема бактерії, гриби, водорості. Цікавим також є використання відходів переробки рослинної сировини.

У роботі ставилась задача оцінити можливість використання екстрактів з відходів виробництва олії з насіння *Camelina sativa* для «зеленого» синтезу наночастинок діоксиду церію, дослідити склад рослинного екстракту і участь компонентів екстракту у формуванні наночастинок.

Результати та їх обговорення

Склад екстракту та участь його компонентів у синтезі $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ вивчали за допомогою методів ВЕРХ та МАЛДІ МС. На рис. 1 представлені хроматограми зразків вихідного екстракту вичавок з насіння *Camelina sativa* та надосадної рідини після завершення реакції.

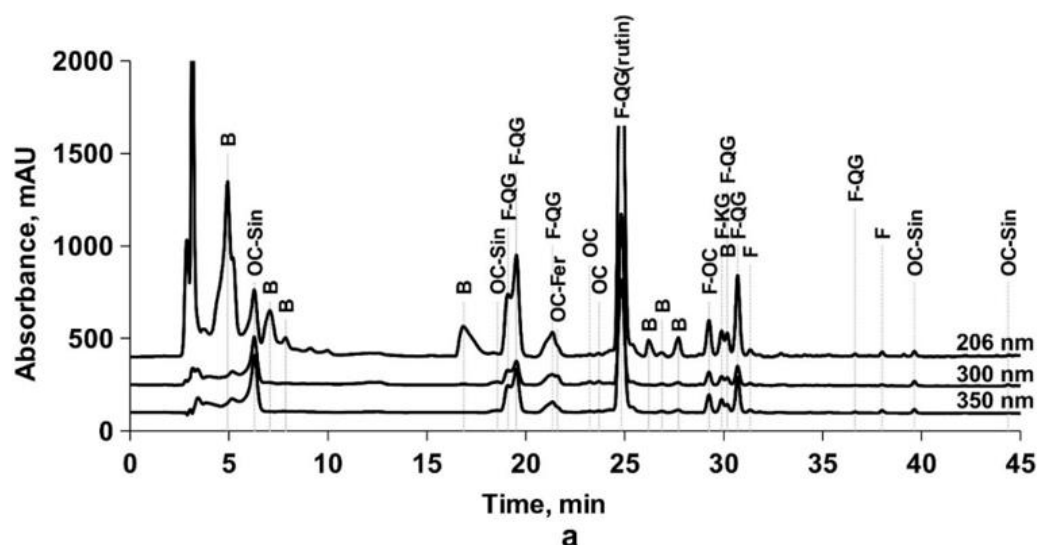


Fig. 1. Chromatograms for *Camelina sativa* seedcake extract (a)
Рис. 1. Хроматограми екстракту вичавок з насіння *Camelina sativa* (a)

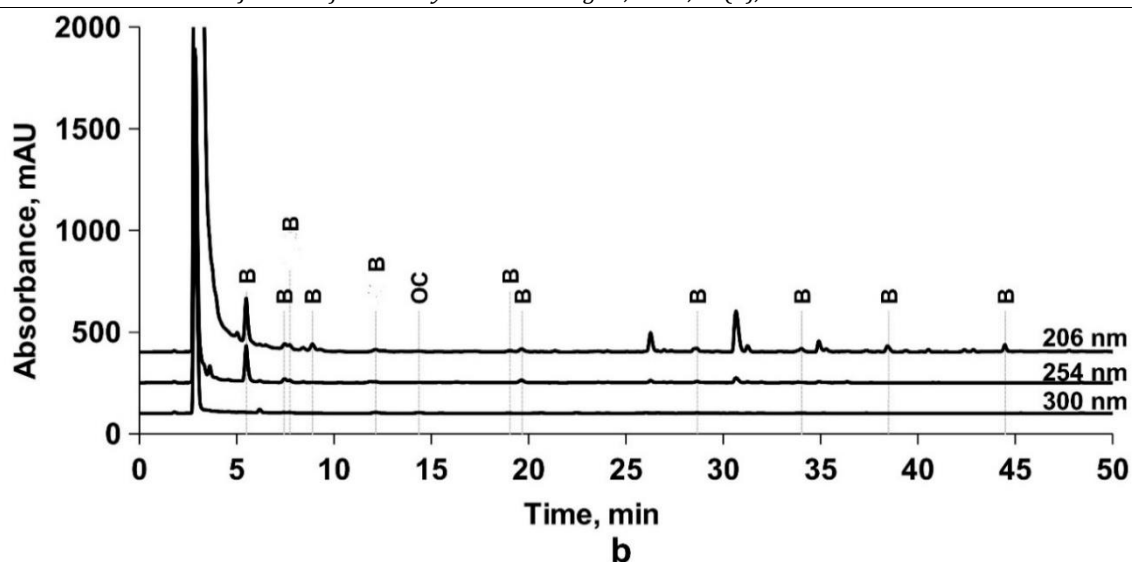


Fig. 1. Chromatograms for supernatant obtained after CeO_2 -NPs synthesis (b).

Designations of the peaks: B – carboxylic acids, simple phenols, hydroxybenzoic acids and their derivatives; OC – hydroxycinnamic acids and their derivatives (OC-Sin and OC-Fer – derivatives of sinapic and ferulic acids, respectively); F-OC – conjugates of flavonoids with hydroxycinnamic acids; F-QG – quercetin glycosides; F-KG – kaempferol glycosides; F – other flavonoids

Рис. 1. Хроматограми надосадної рідини, одержаної після синтезу CeO_2 -НЧ (b).

Умовні позначення піків: В – карбонові кислоти, прості феноли, гідроксибензойні кислоти та їх похідні; ОС – гідроксикоричні кислоти (ОС-Sin та ОС-Fer – похідні сінапової та ферулової кислот відповідно); F-OC – кон'югати флавоноїдів з гідроксикоричними кислотами; F-QG – глікозиди кверцетину; F-KG – глікозиди кемпферолу; F – інші флавоноїди

Згідно з отриманими даними, у вихідному екстракті міститься значна кількість глікозидів похідних кверцетину, кемпферолу та, очевидно, глікозидів інших сполук. Також спостерігаються піки карбонових і гідроксикоричних кислот та простих фенолів. Хроматограма реакційної суміші, відібраної після формування осаду в процесі синтезу CeO_2 -НЧ, значно бідніша за хроматограму вихідного екстракту, представленою здебільшого піками простих фенолів, кількома

піками гідроксикоричних кислот та декількома неідентифікованими піками. Одержані результати дозволяють припустити, що більша частина флавоноїдів, фенольних кислот та глікозидів не залишається в розчині, а приймає участь у формуванні наночастинок.

Результати мас-спектрометричних досліджень вихідного екстракту вичавок з насіння *Camelina sativa* та надосадної рідини наведено в табл. 1 та на рис. 2.

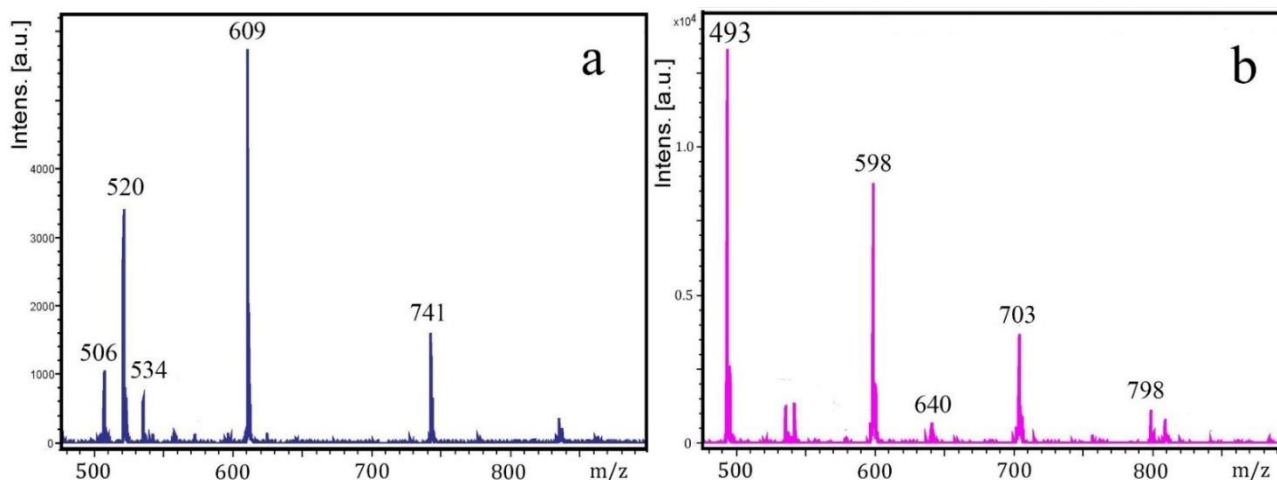


Fig. 2. Fragments of the MALDI mass spectra of negative ions for *Camelina sativa* seedcake extract (a) and for supernatant obtained after CeO_2 -NPs synthesis (b)

Рис. 2. Фрагменти мас-спектрів МАЛДІ негативних іонів екстракту вичавок з насіння *Camelina sativa* (a) та надосадної рідини, одержаної після синтезу CeO_2 -НЧ (б)

List of some positive (+) and negative (-) ions / compounds in mass spectra of *Camelina sativa* seedcake extract and of supernatant obtained after CeO₂-NPs synthesis

Таблиця 1

Перелік деяких позитивних (+) та негативних (-) йонів / сполук у мас-спектрах екстракту з вичавок насіння *Camelina sativa* та у надосадній рідині, одержаній після синтезу CeO₂-НЧ

| m/z | | Ion | Presence* | | Compound class/ Compound | Literature |
|--|----------------|---|-----------|------------------|---|------------|
| - | + | | extract | reaction mixture | | |
| <i>Hydroxycinnamic acids and their derivatives</i> | | | | | | |
| 193 | | [C ₁₀ H ₁₀ O ₄ -H] ⁻ | * | | Ferulic acid | |
| 195 | | [C ₉ H ₈ O ₅ -H] ⁻ / [C ₁₀ H ₁₂ O ₄ -H] ⁻ | * | | Hydroxycaffeic acid/dihydroferulic acid | |
| 310 | | [C ₁₆ H ₂₄ NO ₅] ⁺ | * | | Sinapine | [17] |
| <i>Flavonoids</i> | | | | | | |
| 301 | | [C ₁₅ H ₁₀ O ₇ -H] ⁻ | * | * | Quercetin | |
| 559 | | [C ₃₅ H ₄₂ O ₆ +H] ⁺ | * | | Denticulaflavonol | |
| 609 | 611 | [C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆ -H] ⁻ / [C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆ +H] ⁺ | * | | Rutin(quercetin-3-O-rutinoside) | [18] |
| 741 | 743 | [C ₃₂ H ₃₈ O ₂₀ -H] ⁻ / [C ₃₂ H ₃₈ O ₂₀ +H] ⁺ | * | | Quercetin-2-O-apiosyl-3-O-rutinoside | [17; 19] |
| <i>Fatty acids and their esters</i> | | | | | | |
| 230 | M ⁺ | | | * | Decandioate | |
| 280 | | | | * | Heptadecadienoate | |
| 285 | | [C ₁₈ H ₃₆ O ₂ +H] ⁺ | | * | Dihydroxy methylheptadecanoate | [20] |
| 294 | | | | * | Octadecodienoate | |
| 296 | | | | * | Octadesenoate | |
| 298 | | | | * | Dimethylhexadecanoate | |
| 301 | | [C ₂₀ H ₃₀ O ₂ -H] ⁻ | * | * | Eicosapentenoic acid | [21] |
| 314 | | M ⁺ | | * | Hexadecanedioate | |
| 341 | | [M-47] ⁻ / | * | | Hydroxypentadecanedioate | |
| 388 | | M ⁻ | | * | Hydroxypentadecanedioate dimethyl diester | [20] |
| 464 | | | | * | Triaccontenoate | |
| 474 | | | | * | Dihydroxyoctadecanoate | |
| <i>Glucosinolates and their derivatives</i> | | | | | | |
| 147 | | [C ₅ H ₉ NS ₂] ⁻ | * | * | 3-(methylthio)propyl glucosinolate | [22] |
| 251 | | [C ₁₂ H ₁₄ N ₂ O ₂ S+H] ⁺ | * | | Methoxybrassicin | |
| 437 | | [C ₁₂ H ₂₃ NO ₁₀ S ₃] ⁺ | | * | 4-(methylsulfinyl)butyl glucosinolate | [22] |
| 448 | | [C ₁₆ H ₂₀ N ₂ O ₉ S ₂] ⁺ | * | | Glucobrassicin | [22] |
| 478 | | [C ₁₇ H ₂₂ N ₂ O ₁₀ S ₂] ⁺ | * | | Neoglucobrassicin, 4-methoxy-glucobrassicin | [22] |
| 493 | | [C ₁₆ H ₃₁ NO ₁₀ S ₃ -H] ⁻ | | * | Glucohirsutin | [23] |
| 506 | | [C ₁₇ H ₃₃ NO ₁₀ S ₃ -H] ⁻ | * | | Glucocarabin | [17; 23] |
| 520 | 442 | [C ₁₈ H ₃₅ NO ₁₀ S ₃ -H] ⁻ | * | | Glucocamelinin | [17; 23] |
| 534 | | [C ₁₉ H ₃₆ NO ₁₀ S ₃] ⁻ | * | | Gluconesliapaniculatin | [17] |
| 534 | | [C ₁₉ H ₃₇ NO ₁₀ S ₃ -H] ⁻ | * | | 11-(Methylsulfinyl)undecyl-glucosinolate | [22] |
| 559 | | [C ₁₈ H ₃₄ KNO ₁₀ S ₃] ⁺ | * | | Glucocamelinin | [22] |

«*» - the presence of a peak in the mass spectra

Мас-спектри негативних іонів вихідного екстракту (табл. 1) містять піки флавоноїдів та глікозидів флавоноїдів, найбільш інтенсивними з яких є піки кверцетину (m/z 301), рутину (m/z 609) та кверцетин-2-О-апіозил-3-О-рутинозиду (m/z 741), і піки таких кислот як хінна (m/z 191), ферулова (m/z 193),

гідроксикавова, дигідроферулова (m/z 195), ейкозапентаєнова (m/z 301). Поряд з сигналами флавоноїдів і фенольних кислот в спектрі присутня значна кількість сигналів, пов'язаних з глюкозинолатами – представниками класу природних глікозидів, що містять сірку та азот і є похідними глюкози

та амінокислот. Серед них присутні такі описані раніше [17; 24] сполуки як глюкоарабін (m/z 506), глюкокамелінін (m/z 520), глюконесліапанікулатин (m/z 534), метилсульфінілундецил-глюкозинолат та ін. (табл. 1). Одержані дані підтверджують високу концентрацію глюкозинолатів у вичавках насіння *Camelina sativa*, що також було зафіксовано у інших дослідженнях [19]. У мас-спектрі позитивних іонів домінуючим піком був сигнал синапіну з m/z 310.

Мас-спектри надосадної рідини характеризуються зменшенням кількості та інтенсивності основних сигналів, зникненням або зменшенням інтенсивності більшості сигналів флавоноїдів, фенольних кислот та глюкозинолатів (m/z 191, 193, 195, 251, 301, 310, 478, 506, 520, 534, 559, 609-/611, 720, 741, 832, 860, 1140), а також появою нових (m/z 271, 285, 388, 493, 598, 640–641, 703, 756, 798, 808, 841, 883, 937, 1010) піків. Частину цих нових сигналів можна віднести до метилових ефірів жирних кислот, які можуть бути продуктами перетворення компонентів екстракту в процесі реакції за 80 °C [20]. Частина сигналів у спектрі реакційної суміші залишилась неідентифікованою (m/z 598, 640, 703, 798). Рис. 2 також наочно демонструє відмінності у мас-спектрах реакційної суміші та вихідного екстракту. Основні сигнали в обраному фрагменті спектру вихідного екстракту належать глюкозидам кверцетину (m/z 609, 741) та глюкозинолатам

глюкоарабіну, глюкокамелініну та глюконесліапанікулатину (m/z 506, 520, 534 відповідно), а в спектрі надосадної рідини всі ці сигнали відсутні. Таким чином, результати ВЕРХ та МАЛДІ МС показують, що більшість флавоноїдів, фенольних кислот і частина глюкозинолатів беруть участь у взаємодії з прекурсором, а після відділення надосадної рідини залишаються в складі осаду, або перетворюються в інші продукти реакції.

Наступним етапом у синтезі наночастинок є термообробка осаду за підвищених температур, в процесі якої відбувається формування кристалічної структури наночастинок (рис. 3) і розкладання більшої частини присутніх в осаді органічних сполук. Проведені нами раніше термогравіметричні дослідження висушеного осаду та частинок [25], отриманих після відпалу за 600 °C, показали, що частка органічних сполук в осаді перед високотемпературною обробкою становить ~65 %, і що деяка частина органічної складової (0.6 % від маси зразка) залишається на поверхні синтезованих НЧ навіть після відпалу за 600 °C.

На рис. 3 наведено дифрактограму зразку синтезованих CeO_2 -НЧ. Дифракційні лінії, які спостерігаються на ній, співпадають з лініями діоксиду церію кубічної симетрії згідно з рентгенівською базою даних стандартів ICDD з № 75–120. Середній розмір кристалітів CeO_2 , розрахований за уширшенням лінії (111), складає 23 нм.

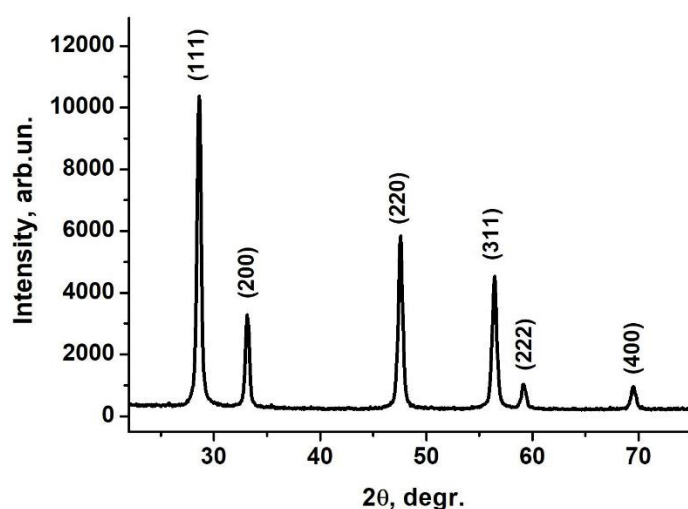


Fig. 3. Diffractogram of synthesized CeO_2 NPs sample
Рис. 3. Дифрактограма зразку синтезованих CeO_2 -НЧ

Structural characteristics of synthesized CeO₂ NPs

Таблиця 2

Структурні характеристики синтезованих CeO₂-НЧ

| Crystallites size, nm | Specific surface area, m ² /g | Calculated NPs radius, nm | Thickness of organic layer, nm |
|--------------------------|---|------------------------------|-----------------------------------|
| 23 | 5 | 80 | ~1.6 |

За даними теплової десорбції аргону, питома поверхня НЧ становить близько 5 м²/г, що відповідає середньому радіусу НЧ 80 нм. Значення радіусу НЧ і наведені вище дані щодо співвідношення органічних сполук і діоксиду церію в складі синтезованих наночастинок дозволяють також оцінити товщину органічного шару на поверхні синтезованих частинок, яка становить ~1.6 нм. У табл. 2 наведено розмірні характеристики отриманих наночастинок.

На рис. 4 наведено ПЕМ мікрофотографії порошку CeO₂-НЧ. Як можна побачити, зразок містить як окремі сферичні частинки відносно невеликого діаметру (~20 нм), так і більші частинки (~150 нм), і агрегати частинок розміром у декілька сотень нм. Після перенесення зразку в розчин ці агрегати можуть розпадатися на окремі частинки. Наведені на рис. 5 результати ДРС показують, що більшість частинок має діаметр 30÷50 нм.

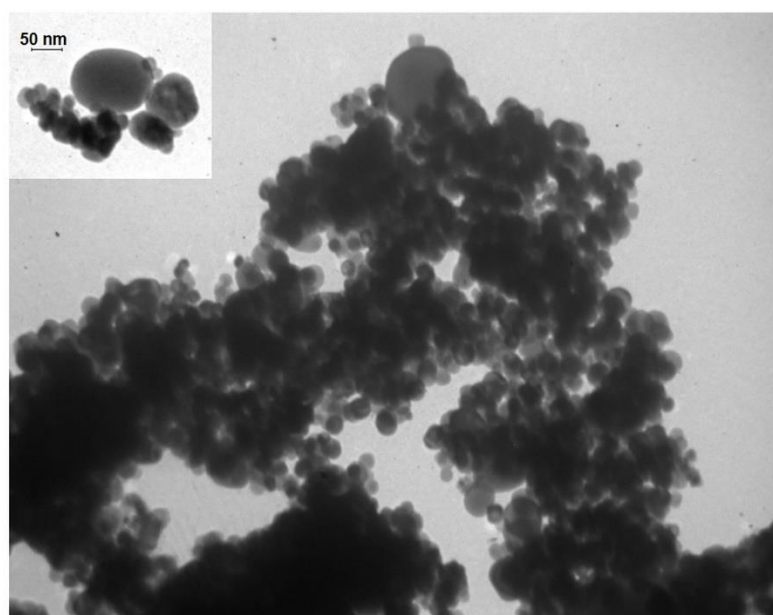


Fig. 4. TEM image of synthesized CeO₂-NPs
Рис. 4. ПЕМ зображення синтезованих CeO₂-НЧ

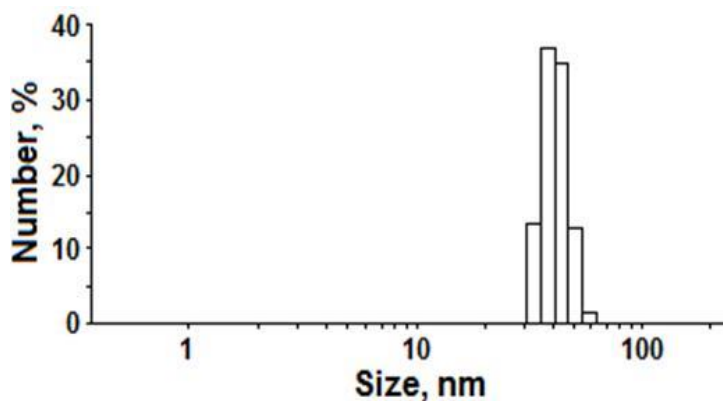


Fig. 5. Particle size distribution for synthesized CeO₂-NPs by DLS
Рис. 5. Розподіл синтезованих CeO₂-НЧ за розмірами за даними ДРС

Експериментальна частина

Для приготування екстрактів вичавки з насіння *Camelina sativa* розтирали в керамічній ступці й відбирали наважку 50 г. На першому етапі з подрібнених вичавок видаляли залишки олії за допомогою апарату Сокслета та гексану. На другому етапі проводили екстракцію біоактивних речовин на апараті Сокслета, використовуючи 500 мл 96% етанолу.

Як джерело іонів металу в синтезі $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ використовували сіль амонію церію (IV) нітрату. 10 мл екстракту *Camelina sativa* додавали до 100 мл 0.01 М водного розчину амонію церію (IV) нітрату. Реакційну суміш перемішували за допомогою магнітної мішалки протягом 5 год за температури 80 °C. Після утворення осаду аліквоту рідини над осадом відбирали для аналізу за допомогою високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) та мас-спектрометрії з матрично-активованою лазерною десорбцією/іонізацією (МАЛДІ МС). Осад сушили протягом 2 діб за кімнатної температури та протягом 2 год за 105 °C, а потім відпалювали в програмованій муфельній печі 2 год за 600 °C.

Якісний аналіз зразків проводили за допомогою часопротітної мас-спектрометрії з матрично-активованою лазерною десорбцією/іонізацією (МАЛДІ МС). Мас-спектри записували в режимі реєстрації негативних та позитивних іонів за допомогою мас-спектрометра Autoflex II (Bruker Daltonics Inc., Німеччина), з азотним лазером (337 нм). Пробопідготовка включала пошарове нанесення на сталеву мішень 1 мкл розчину матриці (насичений розчин 2,4,6-тригідроксіацетофенону в ацетоні) та 1 мкл аналіту. Висушені зразки піддавали лазерній десорбції/іонізації в імпульсному режимі: тривалість лазерного імпульсу становила 3 нс, частота – 20 Гц. Спектри записували в лінійному режимі із затримкою екстракції іонів 10 нс і прискорювальною напругою 20 кВ. Отримані спектри були сумою 100 індивідуальних спектрів. Потужність лазера визначалася за оптимальним відношенням сигнал/шум і залишалася однаковою для різних зразків. Ідентифікацію піків виконували шляхом порівняння з літературними даними та даними баз мас-спектрів чистих речовин [18]. Аналіз та визначення класів біологічно активних речовин у рослинному екстракті проводили за допомогою автоматичного

чотириканального рідинного хроматографа Agilent 1100 з діодно-матричним детектором на довжинах хвиль 206, 254, 300, 350 і 450 нм. Хроматографічне розділення речовин проводили на колонці Poroshell 120 EC-C18 (150 мм×2.1 мм, 2.7 мкм). Елюювання проводили наступним чином (А – водний розчин 0.05 М H_3PO_4 ; Б – метанол): 0–3 хв – 89 % А + 11 % В за швидкості потоку 0.12 мл/хв, 33 хв – 34 % А + 66 % В за швидкості потоку 0.12 мл/хв, 63 хв. – 0 % А + 100 % В за швидкості потоку 0.12 мл/хв, 70 хв – 0 % А + 100 % В за швидкості потоку 0.35 мл/хв. Об'єм проби становив 2 мкл, початкова температура колонки – 20 °C підвищувалася до 40 °C за 40 хв.

Дифрактограму зразку реєстрували на дифрактометрі ДРОН-4-07 з геометрією зйомки за Бреггом-Брентано у випромінюванні CuK_α -лінії аноду ($\lambda = 0.15418$ нм) та Ni-фільтром у відбитих променях, в кутовому інтервалі 10–80 град. Середній розмір кристалітів розраховували за розширенням дифракційних ліній за формулою Шеррера.

Питому поверхню синтезованих $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ визначали за допомогою стандартного методу теплової десорбції аргону згідно з ГОСТ 23401-90.

Морфологію $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ вивчали за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ, прилад ПЕМ-125К (СЕЛМІ, Україна)).

Розподіл $\text{CeO}_2\text{-НЧ}$ за розмірами досліджували методом динамічного розсіювання світла (ДРС, прилад Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments LTD, Великобританія)).

Висновки

Результати ВЕРХ та МАЛДІ МС показують, що екстракт з вичавок насіння *Camelina sativa* містить значну кількість біоактивних сполук, основними з яких є фенольні кислоти, флавоноїди, глюкозинолати, ненасичені жирні кислоти та їхні ефіри. Більша частина біоактивних речовин екстракту бере участь у формуванні наночастинок, а деяка кількість органічних сполук залишається на поверхні наночастинок навіть після високотемпературної обробки за 600 °C.

Синтезовані наночастинки характеризуються кристалічною структурою і розмірами кристалітів 23 нм, найбільший відсоток наночастинок має діаметр від 30 до 50 нм.

Синтезовані наночастинки можуть бути використані в медико-біологічних цілях, хоча

бажаним є оптимізація процесу синтезу НЧ для одержання частинок меншого розміру.

Подяка

Автори висловлюють подяку за фінансування публікації статті в рамках

проєкту Вішеградської четвірки (Project ID #/Title: 22330251, ChemHub-powerful scientific and educational UA-Visegrad tool for the development of green approaches).

References

- [1] Bhattarai, B., Zaker, Y., Terry P. Bigioni, T. P. (2018). Green synthesis of gold and silver nanoparticles: Challenges and opportunities. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, 12, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.007>.
- [2] Alharbi, N.S., Alsubhi, N.S., Felimban, A.I., Alsubhi, N.S. (2022). Green synthesis of silver nanoparticles using medicinal plants: Characterization and application. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 15(3), 109–124.
- [3] Sharma, A., Rejeeth, C., Vivek, R., Varukattu Nipun Babu, V. N., Ding, X.. (2020). Novel Green Silver Nanoparticles as Matrix in the Detection of Small Molecules Using Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization Mass Spectrometry (MALDI-MS). *J Pharm Innov*, 16, 715–725. <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09486-6>.
- [4] Laguta, I., Fesenko, T., Stavinskaya, O., Dzjuba, O., Shpak, L. (2016). Antioxidant and Antimicrobial Properties of Stevia Leaves Extracts and Silver Nanoparticles Colloids. *Chemistry Journal of Moldova*, 11(2), 46–51. [http://dx.doi.org/10.19261/cjm.2016.11\(2\).08](http://dx.doi.org/10.19261/cjm.2016.11(2).08).
- [5] Ayub, M. A., Sohail, M. I., Umair, M., Zia ur Rehman, M., Usman, M., Sabir, M., Rizwan, M., Ali, S., Ahmad, Z. (2019). Chapter Eight - Cerium oxide nanoparticles: Advances in synthesis, prospects and application in agro-ecosystem. *Comprehensive Analytical Chemistry*, 87, 209–250. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.10.003>.
- [6] Sriramcharan, P., Natarajan, J., Raman, R., Nagaraju, G., Justin, A., Senthil, V. (2022). A Review on Green-Syntheses of Cerium Oxide Nanoparticles: Focus on Central Nervous System Disorders. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 14(4), 94–102. <https://doi.org/10.22159/ijap.2022v14i4.44487>.
- [7] Druzian, D. M., Oviedo, L. R., Loureiro, S. N., Wouters, R. D., Vizzotto, B. S., Pinto, E. O., Schüssler de Vanconcellos, N. J., Moreno Ruiz, Y. P., Galembeck, A., Pavoski, G., Romano Espinosa, D. G., Cristiane dos Santos, Leonardo da Silva, W. (2023). Cerium oxide nanoparticles: Biosynthesis, characterization, antimicrobial, ecotoxicity and photocatalytic activity, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 442, 114773. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114773>.
- [8] Fifere, N., Airinei, A., Doroftei, F., Ardeleanu, T. S., Dobromir, M., Tîmpu, D., Ursu, E.-L. (2023). Phytomediated-Assisted Preparation of Cerium Oxide Nanoparticles Using Plant Extracts and Assessment of Their Structural and Optical Properties. *Int. J. Mol. Sci.*, 24, 8917. <https://doi.org/10.3390/ijms24108917>.
- [9] Nosrati, H., Heydari, M., Khodaei, M. (2023). Cerium oxide nanoparticles: Synthesis methods and applications in wound healing. *Materials Today Bio*, 23, 100823. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100823>.
- [10] Devi, N. S., Ganapathy, D. M., Rajeshkumar, S., Maiti, S. (2022). Characterization and antimicrobial activity of cerium oxide nanoparticles synthesized using neem and ginger. *Journal of advanced pharmaceutical technology & research*, 13(2), S491–S495. <https://doi.org/10.4103/japtr.196.22>
- [11] Selvaraj, S., Chauhan, A., Radhakrishnan, A., Rana, G., Dutta, V., Batoo, K. M., Suresh Ghotakar, S. (2024). Cerium Oxide Nanoparticles and Their Polymeric Composites: Advancements in Biomedical Applications. *J Inorg Organomet Polym.* <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03263-5>.
- [12] Nadeem, M., Khan, R., Afridi, K., Nadhman, A., Ullah, S., Faisal, S., Mabood, Z. U., Hano, C., Abbasi, B. H. (2020). Green Synthesis of Cerium Oxide Nanoparticles (CeO₂ NPs) and Their Antimicrobial Applications: A Review. *International journal of nanomedicine*, 15, 5951–5961. <https://doi.org/10.2147/IJN.S255784>.
- [13] Khan, M., Mashwani, Z. U., Ikram, M., Raja, N. I., Mohamed, A. H., Ren, G., Omar, A. A. (2022). Efficacy of Green Cerium Oxide Nanoparticles for Potential Therapeutic Applications: Circumstantial Insight on Mechanistic Aspects. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 12(12), 2117. <https://doi.org/10.3390/nano12122117/>.
- [14] Nyoka, M., Choonara, Y. E., Kumar, P., Kondiah, P. P. D., Pillay, V. (2020). Synthesis of Cerium Oxide Nanoparticles Using Various Methods: Implications for Biomedical Applications. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 10(2), 242. <https://doi.org/10.3390/nano10020242>.
- [15] Fesenko, T., Laguta, I., Stavinskaya, O., Kuzema, P., Anishchenko, V., Oranska, O., Ivannikov, R., Diyuk, O., Skorochod, I. (2023). Green synthesis of antibacterial cerium oxide nanoparticles using Magnolia kobus leaves extract. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 14(4), 546–554. <https://dx.doi.org/10.15407/hftp14.04.546>
- [16] Fesenko, T., Laguta, I., Stavynska, O., Oranska, O. (2020). Synthesis of cerium oxide nanoparticles using Vitex extract. *Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 11(4), 477–483. <https://dx.doi.org/10.15407/hftp11.04.477>.
- [17] Cojocariu, R. O., Balmus, I. M., Lefter, R., Hritcu, L., Ababei, D. C., Ciobica, A., Copaci, S., Mot, S. E. L., Copolovici, L., Copolovici, D. M., Jurcoane, S. (2020). *Camelina sativa* Methanolic and Ethanolic Extract Potential in Alleviating Oxidative Stress, Memory Deficits, and Affective Impairments in Stress Exposure-Based Irritable Bowel Syndrome Mouse Models. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2020, 9510305. <https://doi.org/10.1155/2020/9510305>.
- [18] William (Bill) W. Christie. *LipidMaps* [Internet]. https://www.lipidmaps.org/resources/lipidweb/lipid_web_html/ms/methesters/me_arch/index.htm
- [19] Berhow, M. A., Vaughn, S. F., Moser, B. R., Belenli, D., Polat, U. (2014). Evaluating the Phytochemical Potential of Camelina: An Emerging New Crop of Old World Origin. *Recent Advances in Phytochemistry*, 44, 129–148. <https://doi.org/289471/>
- [20] Razeq, F. M., Kosma, D. K., França, D., Rowland, O., Molina, I. (2021). Extracellular lipids of Camelina sativa: Characterization of cutin and suberin reveals typical

- polyester monomers and unusual dicarboxylic fatty acids. *Phytochemistry*, 184, 112665. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2021.112665/>.
- [21] Lisova, T. O., Trzhetsynskyi, S. D. (2022). [Study of fatty acids of *Camelina sativa* (L.) Crantz]. *Pharmaceutical Review*, 1, 5–11. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.11603/2312-0967.2022.1.12772>.
- [22] Ghidoli, M., Pesenti, M., Colombo, F., Nocito, F. F., Pilu, R., Araniti, F. (2023). *Camelina sativa* (L.) crantz as a promising cover crop species with allelopathic potential. *Agronomy*, 13, 2187–2204. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082187>
- [23] Pagliari, S., Domínguez-Rodríguez, G., Cifuentes, A., Ibáñez, E., Labra, M., Campone, L. (2024). Pressurized liquid extraction of glucosinolates from *Camelina sativa* (L.) Crantz by-products: Process optimization and biological activities of green extract. *Food chemistry: X*, 22, 101324. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101324>.
- [24] Meza, S., Zhou, Y., Chastain, J., Yang, Y., Cheng, H. H., Iassonova, D., Rivest, J., You, H. (2022). Eco-Efficient Quantification of Glucosinolates in *Camelina* Seed, Oil, and Defatted Meal: Optimization, Development, and Validation of a UPLC-DAD Method. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(12), 2441. <https://doi.org/10.3390/antiox11122441>.
- [25] Fesenko, T., Stavynska, O., Kuzema, P., Oranska, O., Borysenko, M., Anishchenko, V., Mischanchuk, O., Laguta, I. (2024) [Synthesis of cerium oxide nanoparticles using *Camelina sativa* seedcake extract sativa]. In A. I. Vovk, *Bioactive compounds, new substances and materials*. Kyiv: Interservice (in Ukrainian).