

CHAPTER «CHEMICAL SCIENCES»

PHASE EQUILIBRIA IN THE $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ SYSTEM AT 1500 °C

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМІ $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ ПРИ 1500 °C

Serhii Yushkevych¹

Serhii Korichev²

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-499-3-13>

Abstract. Using recently published scientific literature, it was found that scientists around the world are increasingly interested in materials based on cerium oxide doped with rare earth metal oxides. The indisputable fact is that the study of phase equilibria of multicomponent oxide systems is both a physical and a chemical basis for the creation of new and improved materials. One of the important tasks of the study of phase equilibria of multicomponent systems is to determine the limits of stability of solid solutions in a certain range of temperatures and concentrations, as well as to confirm the existence of ordered phases. In this work, the phase equilibria of the $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ binary system in the entire range of concentrations were investigated. The performed work consisted in the construction of a fragment of the state diagram of the $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ binary system at 1500 °C. The obtained results indicate the absence of formation of new phases in the studied system under the used technological conditions. Using the XRD method, it was established that two cubic solid solutions are formed based on (F) modification of CeO_2 with a fluorite-type structure and (C) modification of Nd_2O_3 , as well as hexagonal (A) modifications of rare earth oxides in the studied system. The values of the parameters of the elementary lattice of solid solutions formed in the double system $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ at a temperature of 1500 °C were analyzed. From the obtained data,

¹ PhD, Junior Researcher,

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science the NAS of Ukraine, Ukraine

² Researcher,

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science the NAS of Ukraine, Ukraine

it can be concluded that the parameters of the unit cell of the cubic solid solutions formed in the studied system change linearly according to Vegard's law. The formation of a cubic solid solution with the F–CeO₂ fluorite type structure leads to the substitution of tetravalent Ce⁴⁺ ions for trivalent Ln³⁺ ions. As a result, there is an increase in the unit cell parameter for cubic solid solutions with a fluorite-type structure, since the substitution occurs with ions with a larger ionic radius.

1. Вступ

На сьогоднішній день оксиди рідкоземельних елементів (РЗО) виявилися ключовими компонентами у створенні стійких енергетичних рішень, забезпеченні екологічної безпеки та економічного прогресу завдяки своїм різноманітним властивостям. Виняткові оптичні, термодинамічні та хімічні властивості РЗО зробили їх незамінними в різноманітних технологіях, включаючи магніти для електромобілів, портативні енергетичні пристрої, каталізatori паливних елементів, захист від радіації, дозиметрію та багато інших. Таким чином, використання РЗО забезпечує конкурентні переваги для виробництва портативних енергетичних пристроїв, датчиків випромінювання та радіаційно-захисних стекел, а також покращує продуктивність існуючих фотоелектричних елементів. Оскільки останнім часом світовий попит на РЗО стрімко зростає, надзвичайно важливо визначити основні фізико-хімічні властивості матеріалів на їх основі, а також ширше дослідити наслідки використання РЗО для технологій сталості енергетики та атомної енергетики, як у найближчій, так і в довгостроковій перспективі [1–24].

З аналізу літературних джерел встановлено, що фазові рівноваги в подвійній системі CeO₂–Nd₂O₃ досліджувались декількома авторськими колективами [25–33]. Дослідження зазначеної системи проводилися за температур 700 °C [25], 1000 °C [27], 1450 °C [29–32] та 1600 °C [33]. Результати представлені у вказаних дослідженнях мають суперечливий характер.

В роботі [25] автори досліджували фазову взаємодію в подвійній системі CeO₂–Nd₂O₃ за температури 700 °C. В зазначеній роботі було досліджено наступні склади – Nd_xCe_{1-x}O_{2-δ} (0.05 ≤ x ≤ 0.55). Графічної інтерпретації діаграми стану системи CeO₂–Nd₂O₃ не наведено.

В той же час в роботі [25] наведено ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{NdO}_{1.5}\text{-SmO}_{1.5}\text{-CeO}_2$. З представленого ізотермічного ізотермічного перерізу слідує, що в концентраційному інтервалі від 0 до 40.5 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$ утворюється кубічний твердий розчин зі структурою типу флюориту. В концентраційному інтервалі 40.5 мол. % до 67 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$ утворюється область гомогенності на основі кубчного твердого розчину C-типу та від 67 до 100 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$ встановлено область існування двофазної області (A+C). Слід зазначити, що наявність гетерогенної області (F+C) та концентраційний інтервал існування твердого розчину на основі гексагональної модифікації Nd_2O_3 не встановлено.

Автори роботи [27] проводили дослідження зазначеної системи за температури 1000 °С. Встановлено, що розчинність оксиду церію в оксиді неодиму становить ~ 10 мол. %. Гетерогенна область (A+C) знаходиться в концентраційному інтервалі 90–73 мол. % Nd_2O_3 . В той же час наявність двофазної області (F+C) не встановлено. Кубічні тверді розчини на основі F-CeO₂ та C-Nd₂O₃ знаходяться в концентраційному інтервалі 0–40 мол. % Nd_2O_3 та 40–60 мол. % Nd_2O_3 , відповідно.

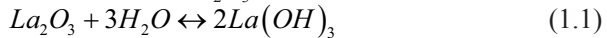
Дослідження при більш високій температурі, а саме при 1450 °С проводили різні групи авторів [29–32], отримані результати у вказаних дослідженнях не узгоджуються між собою. Авторами роботи [66] встановлено, що область гомогенності кубічного твердого розчину зі структурою типу флюориту простягається до 40 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$, область гомогенності кубічних твердих розчинів розташована в концентраційному інтервалі 45–75 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$. Межі існування гексагонального твердого розчину A-NdO_{1.5} не встановлено, крім того не визначено межі двофазної області (F+C).

В той же час автори праці [32] повідомили, що межа області гомогенності кубічного твердого розчину зі структурою типу флюориту знаходиться поблизу складів 50–52,5 мол. % $\text{NdO}_{1.5}$ за температури 1400 °С. В той же час, концентраційний інтервал існування кубічних твердих розчинів C-типу узгоджується в роботах [31] та [33]. Існування двофазної області (F+C) не встановлено. Автори дослідження [33] стверджують, що за температури 1600 °С розчинність іонів Nd_2O_3 в кубічний структурі типу флюориту становить 40 мол. %.

Отже, дані, що представлені в літературних джерелах, щодо фазових рівноваг в подвійній системі $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ вивчені не в повному обсязі та потребують подальших досліджень.

2. Підготовка зразків та експеримент

Для проведення експерименту зразки були синтезовані хімічним методом. В процесі синтезу використовували наступні реактиви: $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та Nd_2O_3 . Перед приготуванням наважок оксиди РЗЕ попередньо просушували у муфелі при $400\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 годин. Термообробку вихідних компонентів проводили задля видалення вологи, оскільки деякі оксиди РЗЕ схильні до гідратації при взаємодії з вологою (1.1), що є в атмосфері повітря. Відомо, що за температури вище $330\text{ }^\circ\text{C}$ $\text{Nd}(\text{OH})_3$ розкладається на NdOOH , який при подальшому нагріванні розкладається на оксид Nd_2O_3 [34].



Отримані наважки оксидів РЗЕ розчиняли у HNO_3 (1:1) випарювали та проводили термообробку отриманого прекурсору за температури $800\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 годин. Синтезовані порошки пресували в таблетки діаметром 5 мм і висотою 3 мм одностороннім пресуванням у сталеві пресформи без зв'язки під тиском $10\text{--}30$ МПа. Як вже зазначалось, зразки з великим вмістом оксиду неодиму, схильні до гідратації при взаємодії з повітрям, тому спресовані зразки перед та після термообробки зберігали в ексікаторі з силікагелем у вигляді засипки для запобігання їх руйнування.

Термообробку отриманих зразків проводили в лабораторних муфельних печах. Як відомо, рівновага в оксидних системах досягається протягом тривалого часу [35], тому термообробку зразків для дослідження фазових рівноваг за температури $1500\text{ }^\circ\text{C}$ проводили в дві стадії: 70 год. при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ та 80 год. при $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Підвищення температури від кімнатної до заданої проводили зі швидкістю $3,5\text{ град}\cdot\text{хв}^{-1}$. Повільне нагрівання зразків використовувалось з метою запобігання деформації зразків зі значною кількістю оксиду неодиму. Через певні проміжки часу перевіряли повноту синтезу експериментальних зразків. Охолодження проводили за інерцією печі. Після термообробки отримані зразки перетирали в агатовій ступці та проводили рентгенофазовий аналіз.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) виконували за допомогою установки ДРОН-3 за кімнатної температури (CuK_{α} – випромінювання, Ni – фільтр). Програму LATTEC використовували для визначення періодів кристалічних ґраток утворених фаз. Для ідентифікації фаз застосовували базу – *JSPSDS International Center for Diffraction Data 1999*.

В представлений роботі підготовку зразків для мікроструктурних досліджень проводили на шліфовально-полірувальному станку Buehler. Мікроструктури вивчали на скануючому електронному мікроскопі SUPERPROBE-733 (“*JEOL, Japan, Palo Alto, CA*) у зворотньо-відбитих електронах (BSE) на шліфах відпалених зразків із напеленти шаром золота.

3. Результати і обговорення

На основі проведених досліджень встановлено, що фазові рівноваги в подвійній системі при 1500 °C характеризуються утворенням твердих розчинів: $F-CeO_2$, $C-Nd_2O_3$ та $A-Ln_2O_3$. Області гомогенності на основі вказаних вище твердих розчинів межують з гетерогенними областями $F+C$ та $C+A$, відповідно. Фрагмент діаграми стану подвійної системи $CeO_2-Nd_2O_3$ представлено на рис. 1.

Слід зазначити, що полімофне перетворення оксиду неодиму $C \rightarrow A$ відбувається за температури 600 °C [36]. В проведеному дослідженні встановлено, що внаслідок легування оксиду неодиму діоксидом церію кубічні тверді розчини $C-Nd_2O_3$ утворюються при значно вищих температурах в порівнянні з не легованим оксидом неодиму. При 1500 °C кубічний твердий розчин C -типу існує в концентраційному інтервалі 65–40 мол. % Nd_2O_3 (табл. 1). З пониженням температури, напевно, зазначена область гомогенності буде розширюватись та зміщуватись в концентраційну область з великим вмістом оксиду неодиму, а також буде зменшуватись кількість фазових полів в дослідженій системі.

Для визначення положення границь фазових полів, що утворюються в даній системі, разом з даними щодо фазового складу зразків використовували концентраційні залежності параметрів елементарних комірок утворених фаз (рис. 2–3). За отриманими результатами встановлено, що максимальна розчинність Nd_2O_3 в $F-CeO_2$ становить 29 мол. % (рис. 2). Параметри елементарних комірок кубічних твердих

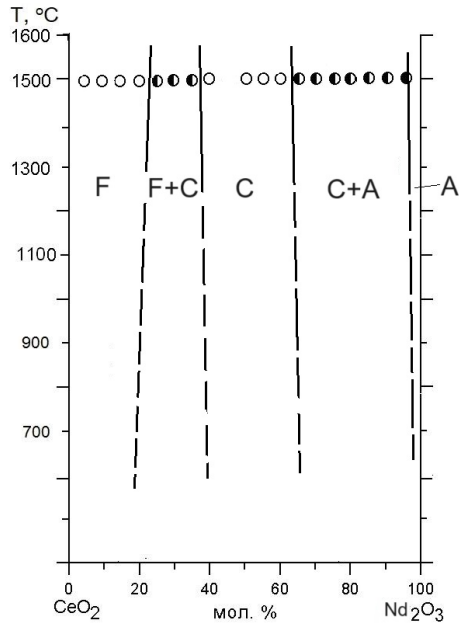


Рис. 1. Фазові рівноваги в системі $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ за температури $1500\text{ }^\circ\text{C}$

розчинів зі структурою типу флюориту змінюються від $a = 0.5409$ нм для нелегованого діоксиду церію до $a = 0.5480$ нм для двофазного зразка (F+C), що містить 70 мол. % CeO_2 –30 мол. % Nd_2O_3 (табл. 1, рис. 3). Отже, з представлених результатів слідує, що параметри елементарних комірок кубічних твердих розчинів типу флюориту F- CeO_2 змінюються лінійно відповідно до закону Вегарда.

На основі літературних даних [37–39] відомо, що при легуванні діоксиду церію оксидами РЗЕ утворення кубічної структури С-типу можливе при додаванні $> 33\%$ – 40% $\text{LnO}_{1.5}$. Отже, отримані результати, що до граничної розчинності Nd_2O_3 в F- CeO_2 узгоджується з літературними даними.

**Фазовий склад і параметри елементарних комірок фаз
після термообробки зразків системи $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$
при 1500 °С, 80 год. (за даними РФА та СЕМ)**

Хімічний склад, мол. %		Фазовий склад	Параметри елементарних комірок фаз, нм ($a \pm 0.0002$)				
CeO_2	Nd_2O_3		<F>	<C>	<A>		
			<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>c/a</i>
2.5	97.5	<A>	–	–	0.6428	0.3718	0.578
5	95	<A>+<C>	–	1.1015	0.6438	0.3712	0.577
10	90	<A>+<C>	–	1.1019	0.6422	0.3720	0.579
15	85	<A>+<C>	–	1.1015	0.6428	0.3727	0.579
20	80	<A>+<C>	–	1.1016	0.6416	0.3739	0.583
25	75	<A>+<C>	–	1.1014	0.6434	0.3722	0.578
30	70	<A>+<C>	–	1.1011	0.6454	0.3723	0.577
35	65	<A>+<C>	–	1.1015	0.6428	0.3716	0.578
40	60	<C>	–	1.1010	–	–	–
45	55	<C>	–	1.1003	–	–	–
50	50	<C>	–	1.0997	–	–	–
55	45	<C>	–	1.0985	–	–	–
60	40	<C>+<F>	0.5485	1.0979	–	–	–
62.5	37.5	<C>+<F>	0.5484	1.0978	–	–	–
65	35	<C>+<F>	0.5482	1.0977	–	–	–
70	30	<C>+<F>	0.5480	1.0980	–	–	–
75	25	<F>	0.5468	–	–	–	–
80	20	<F>	0.5461	–	–	–	–
90	10	<F>	0.5434	–	–	–	–
95	5	<F>	0.5417	–	–	–	–
100	0	<F>	0.5409	–	–	–	–

За даними представленими в роботі [40], перехід від кубічної структури типу флюориту до кубічної структури С-типу відбувається внаслідок видалення 25 % іонів O^{2-} . На думку авторів [39] упорядкування кисневих вакансій, яке відбувається зі збільшення концентрації Ln^{3+} сприяє переходу від кубічної структури типу флюориту F- CeO_2 до кубічної структури С-типу Ln_2O_3 . Схематичне зображення елементарних комірок зазначених вище структур представлено на рисунку 4.

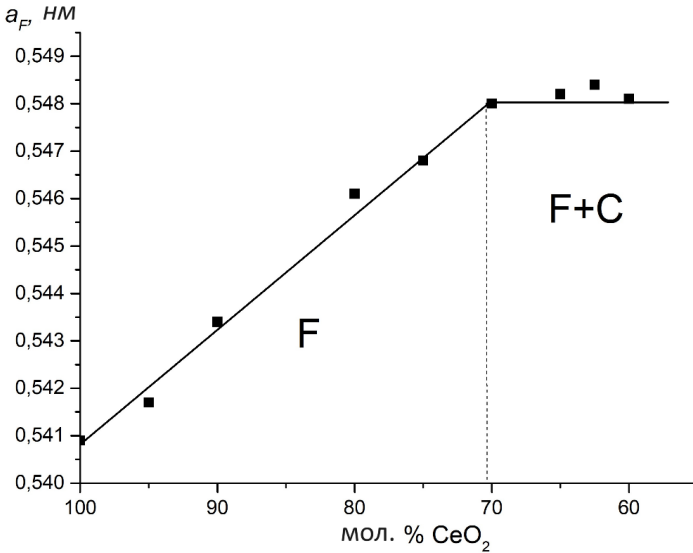


Рис. 2. Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердого розчину на основі F-CeO₂ системи CeO₂-Nd₂O₃ після термообробки зразків при 1500 °C

Мікροструктурні дослідження проведені в даній роботі узгоджуються з даними рентгенофазового аналізу. На рисунку 5 представлено мікροструктури зразків, що характеризують кубічні тверді розчини зі структурою типу флюориту (рис. 5 а) та гетерогенну область (F+C) (рис. 5 б). Мікροструктура зразка складу 70 мол. % CeO₂-30 мол. % Nd₂O₃ характеризується наявністю двох структурних складових, що відрізняються за морфологією. Матрицю складають кубічні тверді розчини зі структурою типу флюориту F-CeO₂, структурна складова, що викришується під час полірування відповідає кубічному твердому розчину С-типу.

Встановлено, що параметри елементарних комірок кубічного твердого розчину С-типу змінюються від $a = 1.1015$ нм для двофазного зразка (C+A), що містить 5 мол. % CeO₂-95 мол. % Nd₂O₃ до $a =$

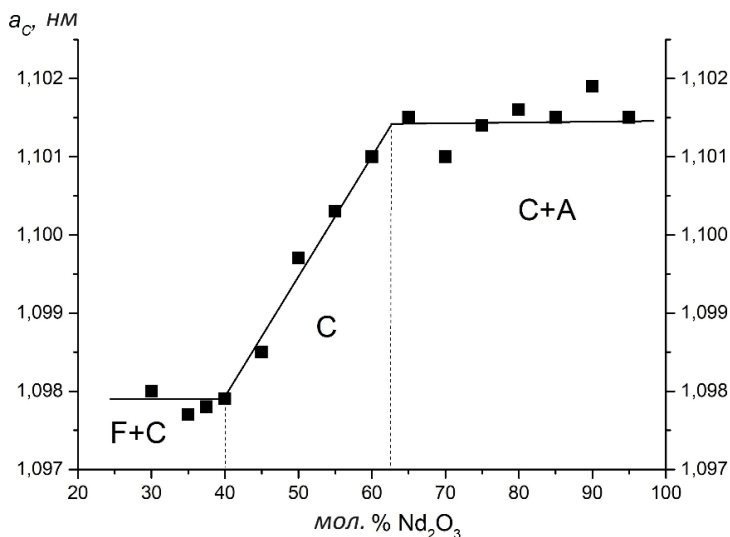


Рис. 3. Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердого розчину на основі $C-Nd^{2}O_3$ системи $CeO_2-Nd^{2}O_3$ після термообробки зразків при $1500\text{ }^\circ C$

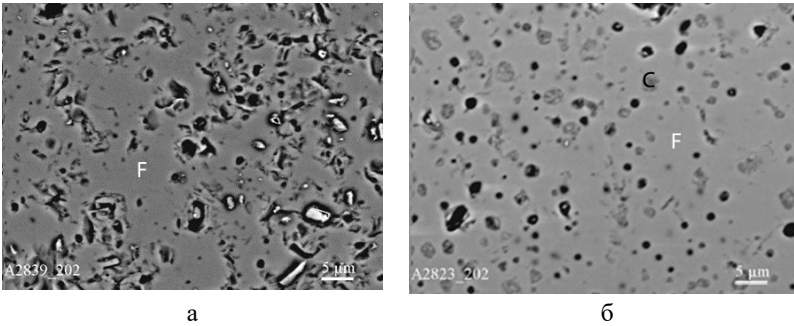


Рис. 4. Схема утворення впорядкованої структури С-типу [39]

1.1010 нм для граничного складу твердого розчину та до $a = 1.0979$ нм для двофазного зразка (C+F) складу 60 мол. % CeO_2 -40 мол. % Nd_2O_3 (рис. 3). При вказаній температурі в системі утворюється вузька

область гомогенності гексагонального твердого розчину $A\text{-Nd}_2\text{O}_3$. Встановлено, що гранична розчинність іонів CeO_2 в $A\text{-Nd}_2\text{O}_3$ становить > 5 мол. %.

На основі отриманих результатів, а також відомостей, що містяться в літературних джерелах [35–36; 41–49] встановлені загальні характеристики будови подвійних систем ряду $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$. Для систем зазначеного ряду характерним є утворення твердих розчинів на основі різних поліморфних модифікацій оксидів РЗЕ, а також кубічних твердих розчинів зі структурою типу флюориту. Утворення нових фаз для систем ряду $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ не встановлено.



а – 75 мол. % CeO_2 –25 мол. % Nd_2O_3 , (F); б – 70 мол. % CeO_2 –30 мол. % Nd_2O_3 , (F+C) матриця – F- CeO_2 , фаза, що викришується C- Nd_2O_3 .

Рис. 5. Мікроструктура зразків системи $\text{CeO}_2\text{-Nd}_2\text{O}_3$ після термообробки при 1500 °C

На рисунку 6 представлено області існування різних поліморфних модифікацій оксидів РЗЕ залежно від іонного радіуса Ln^{3+} .

Області твердих розчинів на основі гексагональної А-модифікації оксидів лантаноїдів існують в системах $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}$). В системах з оксидами Sm_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 спостерігається утворення твердих розчинів на основі моноклінної В-модифікації оксидів лантаноїдів.

Оскільки оксиди РЗЕ поділяються на дві підгрупи – церієву та ітрієву – і, відповідно, це має відображення і на елементах діаграмах

стану систем ряду. Так, із зменшенням іонного радіуса спостерігається звуження області гомогенності твердих розчинів на основі фази зі структурою типу флюориту від La_3^+ (0.114 нм) до Gd_3^+ (0.972 нм) [41–42; 45]. В той же час в системі з оксидом Dy_3^+ (0.092 нм) спостерігається збільшення області гомогенності твердих розчинів типу флюориту [36].

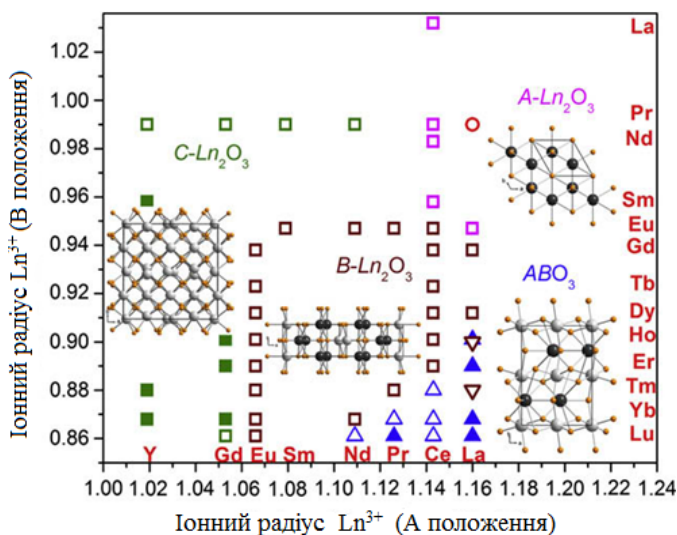


Рис. 6. Области існування різних поліморфних модифікації оксидів РЗЕ залежно від іонного радіуса Ln^{3+} [50]

Із зменшенням іонного радіуса лантаніду спостерігається зміна кількості фазових полів в системах $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$, що пов'язано з поліморфізмом вихідних компонентів. В результаті проведення аналізу будови діаграм стану подвійних систем ряду $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ визначено, що для зазначених систем характерно утворення переважно кубічних твердих розчинів на основі F-CeO_2 та $\text{C-Ln}_2\text{O}_3$ і їх гетерогенних сумішей [35–36; 41–49]. Для діаграм стану систем $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{Dy}, \text{Y}$) характерна майже симетрична будова внаслідок незначної різниці між іонними радіусами вихідних компонентів [35–36].

З використанням отриманих результатів, а також даних, що містяться в літературних джерелах [35–36; 41–49] визначено, що в концентраційному інтервалі 0–10 мол. % Ln_2O_3 для всіх систем ряду $\text{CeO}_2\text{--Ln}_2\text{O}_3$ спостерігається утворення кубічних твердих розчинів типу флюориту при 600–1500 °С. Отже зазначений концентраційний інтервал може бути перспективним для створення нових матеріалів, оскільки вони будуть стабільними як в процесі виготовлення, так і в процесі експлуатації. Відомості щодо будови діаграм стану оксидних систем є фізико-хімічною основою створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями.

Відомо, що збільшення кількості легуючих домішок призводить до покращення властивостей нових матеріалів. В роботах [47–49; 51–56] авторами проведено дослідження фазових рівноваг в потрібних системах ряду $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ та встановлено, що у всіх досліджених системах при спостерігається значне розширення області гомогенності на основі кубічних твердих розчинів зі структурою типу флюориту, що дає можливість змінювати фізико-хімічні властивості матеріалів без зміни фазового складу.

Висновки

В представленій роботі досліджено фазові рівноваги в подвійній системі на основі діоксиду церію та оксиду неодиму за температури 1500 °С. За отриманими результатами побудовано фрагмент зазначеної діаграми стану при 1500 °С. Встановлено, що в дослідженій системі спостерігається утворення твердих розчинів на основі гексагональної структури оксиду неодиму ($\text{A--Nd}_2\text{O}_3$), кубічної структури оксиду неодиму ($\text{C--Nd}_2\text{O}_3$), а також кубічної структури типу флюориту діоксиду церію (F--CeO_2). Зазначені області гомогенності розділені між собою гетерогенними областями (A+C , C+F) різної протяжності. Опираючись на відомості, щодо поліморфних перетворень оксиду неодиму зроблено припущення, що при зниженні температури до 600 °С будова зазначеної системи зміниться в бік зменшення кількості фазових полів і буде містити дві області гомогенності F--CeO_2 та $\text{C--Nd}_2\text{O}_3$, що будуть розділені широкою гетерогенною областю (C+F). Встановлено, що параметри елементарних комірок кубічних твердих розчинів типу флюориту F--CeO_2 та $\text{C--Nd}_2\text{O}_3$ змінюються лінійно відповідно до закону Vegarda.

З використанням отриманих результатів, а також відомостей, що існують в літературних джерелах встановлено деякі загальні характеристики для подвійних систем ряду $\text{CeO}_2\text{-Ln}_2\text{O}_3$. В зазначених системах утворюються тверді розчини на основі різних кристалічних модифікацій вихідних компонентів. Показано, що в досліджених системах у рівновазі знаходяться переважно фази кубічної симетрії: твердих розчинів із структурою типу флюориту F ($Fm\bar{3}m$) і C типу оксидів РЗЕ ($Ia\bar{3}$).

Список літератури:

1. Haxel G. B., Hedrick J. B., Orris G. J. Supporting Sound Management of Our Mineral Resources: Rare Earth Elements. *Critical Resources for High Technology*, 2002, p. 4.
2. M. Khalid Hossain, Gazi A. Raihan, Md Ali Akbar, Mirza Humaun Kabir Rubel, Mohammad Hafez Ahmed, Md. Ishak Khan, Shahadat Hossain, Sapan Kumar Sen, M. I. E. Jalal, A. El-Denglawey. Current Applications and Future Potential of Rare Earth Oxides in Sustainable Nuclear, Radiation, and Energy Devices: A Review. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2022, vol. 4, no. 7, pp. 3327–3353.
3. Tauseef M., Faisl M., Muhammad S., Muhammad R. Novel photocatalyst and antibacterial agent; direct dual Z-scheme $\text{ZnO-CeO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ heterostructured nanocomposite. *Sol. Stat. Scien.*, 2020, vol. 109, pp. 106446–106458.
4. Reisfeld R. Industrial applications of rare earths in fiber optics, luminescent solar concentrators and lasers. *Inorg. Chim. Acta.*, 1987, vol. 140, pp. 345–350.
5. Guanming Q., Xikum L., Tai Q., Haitao Z., Honghao Y., Ruiting M. Application of rare earths in advanced ceramic materials. *J. Rare Earths*, 2007, vol. 25, no. 2, pp. 281–286.
6. Yonushonis T.M. Overview of thermal barrier coatings in diesel engines. *J. Therm. Spray Technol.*, 1997, vol. 6, no. 1, pp. 50–56.
7. Singh M., Zappa D., Comini E. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no 54, pp. 27643–27674.
8. Zhou X. D. Fuel cells—solid oxide fuel cells. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Overview*, 2009, pp. 1–16.
9. Jacobson A. J. Materials for Solid Oxide Fuel Cells. *Chemistry of Materials*, 2010, vol. 22, no 3, pp. 660–674.
10. Yang C., Lu Y., Zhang L., Kong Z., Yang T., Tao L., Zou Y., Wang S. Defect Engineering on CeO_2 -Based Catalysts for Heterogeneous Catalytic Applications. *Small Structures*, 2021, vol. 2, no. 12, p. 2100058.
11. Lu G., Zheng H., Lu J., Wang G., Huang X. Review of recent research work on CeO_2 -based electrocatalysts in liquid-phase electrolytes. *Journal of Power Sources*, 2020, vol. 480, p. 229091.
12. Li T., Tsyshevsky R., McEntee M., Durke E. M., Karwacki C., Rodriguez E. E., Kuklja M. M. Alivalent-Doping Effects on the Surface Activity

of Mesoporous CeO₂ toward Nerve Agent Simulant DMMP Decomposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2022, vol. 126, no. 42, pp. 17923–17934.

13. Yujin Chen, Xiuqin Lin, Yanfu Lin, Zundu Luo, Yidong Huang. Spectroscopic properties of Yb³⁺ ions in La₂(WO₄)₃ crystal. *Solid State Communications*, 2004, vol. 132, no. 8, pp. 533–538.

14. Xinghong Gong, Feibing Xiong, Yanfu Lin, Qiguang Tan, Zundu Luo, Yidong Huang. Crystal growth and spectral properties of Pr³⁺:La₂(WO₄)₃. *Materials Research Bulletin*, 2007, vol. 42, no. 3, pp. 413–419.

15. Asati A., Santra S., Kaitanis Ch., Nath S., Perez J.M. Oxidase-Like Activity of Polymer-Coated Cerium Oxide Nanoparticles. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2009, vol. 48, no. 13, p. 2308.

16. Zahra Salehi, Sahar Zinatloo-Ajabshir, Masoud Salavati-Niasari. Dysprosium cerate nanostructures: facile synthesis, characterization, optical and photocatalytic properties. *Journal of rare earths*, 2017, vol. 35, no. 8, p. 805.

17. Kasyanova A. V., Lyagaeva J. G., Vdovin G. K., Murashkina A. A., Medvedev D. A. Transport properties of LaYbO₃-based electrolytes doped with alkaline earth elements. *Electrochimica Acta*, 2023, vol. 439, p. 141702.

18. Zhang W., Hu Y.H. Progress in proton-conducting oxides as electrolytes for low-temperature solid oxide fuel cells: from materials to devices. *Energy Sci. Eng.*, 2021, vol. 9, pp. 984–1011.

19. Boubchir M., Aourag H. Materials genome project: Mining the ionic conductivity in oxide perovskites. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, vol. 267, p. 114984.

20. Tryus M., Nikolaev K. V., Makhotkin I. A., Schubert Jü., Kibkalo L., Danylyuk S., Giglia A., Nicolosi P., Juschkin L. Optical and structural characterization of orthorhombic LaLuO₃ using extreme ultraviolet reflectometry. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 680, pp. 94–101.

21. R. Fiorenza, S. Scirè, A. Gulino. Ru-Pd bimetallic catalysts supported on CeO₂-oxides as efficient systems for H₂ purification through CO preferential oxidation. *Catalysts*, 2018, vol. 8, p. 203.

22. A. Le Gal, S. Abanades. Dopant incorporation in ceria for enhanced water-splitting activity during solar thermochemical hydrogen generation. *J. Phys. Chem. C*, 2012, vol. 116, pp. 13516–13523.

23. L. Vivier, D. Duprez. Ceria-based solid catalysts for organic chemistry. *Chem. Sus. Chem.*, 2010, vol. 3, no. 6, pp. 654–678.

24. C. Yang, X. Yu, P.N. Pleßow, S. Heißler, P.G. Weidler, A. Nefedov, F. Studt, Y. Wang, C. Woll. Rendering photoreactivity to ceria: the role of defects. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, vol. 56, pp. 14301–14305.

25. Luping Li, Robert Kasse, Satyajit Phadke, Wei Qiu, Ashfia Huq, Juan C. Nino. Ionic conductivity across the disorder–order phase transition in the NdO_{1.5-x}-CeO₂ system. *Solid State Ionics*, 2012, vol. 221, pp. 15–21.

26. T. Vanderah. *Electronic Materials and Applications 2011 Meeting, Orlando, FL*, 2011.

27. V. Grover, S.N. Achary, A.K. Tyagi. Structural analysis of excess-anion C-type rare earth oxide: a case study with Gd_{1-x}Ce_xO_{1.5+x/2} (x = 0.20 and 0.40). *J. Appl. Crystallogr.*, 2003, vol. 36, pp. 1082–1084.

28. Horlait D., Claparède L., Clavier N., Szenknect S., Dacheux N., Ravaux J., Podor R. Stability and structural evolution of Ce(IV)_(1-x)Ln(III)_xO_(2-x/2) solid solutions: a coupled μ -Raman/XRD approach. *Inorganic Chemistry*, 2011, vol. 50, no. 15, pp. 7150–7161.

29. Yasuro Ikuma; Eriko Shimada; Nobuko Okamura. Effect of Nd₂O₃ Concentration on the Defect Structure of CeO₂-Nd₂O₃. *Solid Solution*, 2005, vol. 88, no. 2, pp. 419–423.

30. Hagiwara T., Kyo Z., Manabe A., Yamamura H., Nomura, K. J. Formation of C-type rare earth structures in the Ce_{1-x}Nd_{2-3x}O_{2-3x/2} system: a factor in the decrease in oxide-ion conductivity. *Ceram. Soc. Jpn.*, 2009, vol. 117, pp. 1306–1310.

31. V. Grover; S.V. Chavan; P. Sengupta; A.K. Tyagi. CeO₂-YO_{1.5}-NdO_{1.5} system: An extensive phase relation study. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, vol. 30, no. 15, pp. 3137–3143.

32. Nitani H., Nakagawa T., Yamanouchi M., Osuki T., Yuya M., Yamamoto T. A. XAFS and XRD study of ceria doped with Pr, Nd or Sm. *Materials Letters*, 2004, vol. 58, no. 15, pp. 2076–2081.

33. Nandi Chiranjit, Shafeeq Muhammed, Kesari Swayam, Rao Rekha, Grover V., Prakash Amrit, Tyagi A.K. Structural and thermal expansion studies in ternary ThO₂-CeO₂-NdO_{1.5} system: Mimicking actinide substituted ThO₂. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 520, pp. 226–234.

34. Materazzi S. Coordination Compounds and Inorganics. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, vol. 5, pp. 478–482.

35. Andrievskaya E.R. Phase equilibriums in systems of hafnia, zirconia, and yttria with REE oxides: Monograph. *Kyiv: Naukova Dumka*, 2010, p. 470.

36. Kornienko O. A., Andrievska O. R. Phase equilibria in the Systems with ZrO₂, CeO₂ and Dy₂O₃. *Innovative scientific researches: European development trends and regional aspect. Collective monograph, 4th ed.*, 2020, pp. 155–179.

37. Longo V., Podda L. Phase equilibrium diagram of the system ceria-yttria for temperatures between 900 and 1700 °C. *Journal of Materials Science*, 1981, vol. 16, pp. 839–841.

38. Bevan D. J. M., Summerville E. Mixed rare earth oxides. *Handbook on the Physics and Chemistry on Rare Earths*, 1979, vol. 3, pp. 401–524.

39. Ding Rong Ou, Toshiyuki Mori, Fei Ye, Jin Zou, Graeme Auchterlonie, John Drennan. Oxygen-vacancy ordering in lanthanide-doped ceria: Dopant-type dependence and structure model. *Physical review B*, 2008, vol. 77, p. 024108.

40. Rouanet A., Couterus J., Foex M. J. *Solid State Chem.*, 1972, vol. 4, no. 2, pp. 219–222.

41. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Sameljuk A. V., Sayir A. Phase relation studies in the CeO₂-La₂O₃ system at 1100–1500 °C. *J. of the Europ. Ceram. Soc.*, 2011, vol. 31, pp. 1277–1283.

42. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Gorodov V. S. Phase relations in the CeO₂-Sm₂O₃ system at 1500 °C. *Current problems of physical material science*, 2008, vol. 17, pp. 25–29.

43. Andrievskaya E. R., Gusarov V. V., Kornienko O. A., Sameljuk A. V. Interaction of ceria and erbia at 1500 °C. *Proc. of Berezhnyi Institute for refractories*, 2012, vol. 112, pp. 133–140.

44. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Bykov O. I., Sameliuk A. V., Bohatyriova Z. D. Interaction of ceria and ytterbia in air within temperature range 1500–600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, pp. 2930–2935.

45. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Sameljuk A.V., Sayir A. Phase Relation Studies in the $\text{CeO}_2\text{--Eu}_2\text{O}_3$ System at 600 to 1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, no. 3, pp. 751–758.

46. Andrievska O. R., Kornienko O. A., Bykov O. I., Sameliuk A. V., Bohatyriova Z. D. Interaction of ceria and erbia in air within temperature range 1500–600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, no. 8, pp. 3098–3100.

47. Korniienko O.A., Yushkevych S.V., Bykov O.I., Samelyuk A. V., Bataiev Yu. M., Zamula M. V. Phase relation studies in the $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Ho}_2\text{O}_3$ system at temperature of 1500 °C. *Materials Today Communications*, 2023, vol. 35, p. 105789.

48. Andrievska O. R., Kornienko O. A., Yurchenko Yu. V. Phase relation studies in the $\text{CeO}_2\text{--Sm}_2\text{O}_3$ system at 1500 to 600 °C in air. *Research & Development in Material Science*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 1308–1314.

49. Korniienko O. A., Bykov O. I., Sameljuk A. V., Bataiev Yu. M., Yushkevych S. V. Phase equilibria in the $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Gd}_2\text{O}_3$ system at 1250 and 1500 °C. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 17–31.

50. Bharathy M., Fox A. H., Mugavero S. J. Crystal growth of inter-lanthanide $\text{LaLn}'\text{O}_3$ ($\text{Ln}' = \text{Y, Ho--Lu}$) perovskites from hydroxide fluxes. *Solid State Sciences*, 2009, vol. 11, pp. 651–654.

51. Корнієнко О. А., Биков О. І., Самелюк А. В., Барщевська Г. К. Ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Sm}_2\text{O}_3$ при 1500 °C. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2021, том. 29, № 2, с. 200–210.

52. Kornienko O., Yushkevych S., Bykov O., Samelyuk A., Bataiev Y. Phase Equilibrium in the Ternary $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ System at 1500 °C. *Solid State Phenomena*, 2022, vol. 331, pp. 159–172.

53. Korniienko O. A., Yushkevych S. V., Bykov O. I., Samelyuk A. V., Bataiev Yu. M., Zamula M. V. Phase equilibrium in binary $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Dy}_2\text{O}_3$ and ternary $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Dy}_2\text{O}_3$ systems. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, vol. 42, pp. 5820–5830.

54. Andrievskaya O. R., Kornienko O. A., Bykov O. I., Chudinovic O. V., Spasonova L. N. The interaction between cerium dioxide, lanthanum and europium oxides at 1500°C. *Processing and Application of Ceramics*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 32–39.

55. Kornienko O. A., Sameljuk A. V., Bykov O. I., Yurchenko Yu. V., Barshchevskaya A. K. Phase Relation Studies in the $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Er}_2\text{O}_3$ System at 1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, vol. 40, no 12, pp. 4184–4190.

56. Корнієнко О. А., Биков О. І., Самелюк А. В., Юрченко Ю. В. Ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Eu}_2\text{O}_3$ при температурі 1250 °C. *Український хімічний журнал*, 2020, том. 86, № 3, с. 35–47.

References:

1. Haxel G. B., Hedrick J. B., Orris G. J. (2002). Supporting Sound Management of Our Mineral Resources: Rare Earth Elements. *Critical Resources for High Technology*, p. 4.
2. M. Khalid Hossain, Gazi A. Raihan, Md Ali Akbar, Mirza Humaun Kabir Rubel, Mohammad Hafez Ahmed, Md. Ishak Khan, Shahadat Hossain, Sapan Kumar Sen, M. I. E. Jalal, A. El-Denglawey. (2022). Current Applications and Future Potential of Rare Earth Oxides in Sustainable Nuclear, Radiation, and Energy Devices: A Review. *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 4, no. 7, pp. 3327–3353.
3. Tauseef M., Faisl M., Muhammad S., Muhammad R. (2020). Novel photocatalyst and antibacterial agent; direct dual Z-scheme ZnO–CeO₂-Yb₂O₃ heterostructured nanocomposite. *Sol. Stat. Scien.*, vol. 109, pp. 106446–106458.
4. Reisfeld R. (1987). Industrial applications of rare earths in fiber optics, luminescent solar concentrators and lasers. *Inorg. Chim. Acta.*, vol. 140, pp. 345–350.
5. Guanming Q., Xikum L., Tai Q., Haitao Z., Honghao Y., Ruiting M. (2007). Application of rare earths in advanced ceramic materials. *J. Rare Earths*, vol. 25, no. 2, pp. 281–286.
6. Yonushonis T.M. (1997). Overview of thermal barrier coatings in diesel engines. *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 50–56.
7. Singh M., Zappa D., Comini E. (2021). Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no 54, pp. 27643–27674.
8. Zhou X. D. (2009). Fuel cells – solid oxide fuel cells. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. Overview*, pp. 1–16.
9. Jacobson A. J. (2010). Materials for Solid Oxide Fuel Cells. *Chemistry of Materials*, vol. 22, no 3, pp. 660–674.
10. Yang C., Lu Y., Zhang L., Kong Z., Yang T., Tao L., Zou Y., Wang S. (2021). Defect Engineering on CeO₂-Based Catalysts for Heterogeneous Catalytic Applications. *Small Structures*, vol. 2, no. 12, p. 2100058.
11. Lu G., Zheng H., Lu J., Wang G., Huang X. (2020). Review of recent research work on CeO₂-based electrocatalysts in liquid-phase electrolytes. *Journal of Power Sources*, vol. 480, p. 229091.
12. Li T., Tsyshevsky R., McEntee M., Durke E. M., Karwacki C., Rodriguez E. E., Kuklja M. M. (2022). Aliovalent-Doping Effects on the Surface Activity of Mesoporous CeO₂ toward Nerve Agent Simulant DMMP Decomposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 126, no. 42, pp. 17923–17934.
13. Yujin Chen, Xiuqin Lin, Yanfu Lin, Zundu Luo, Yidong Huang. (2004). Spectroscopic properties of Yb³⁺ ions in La₂(WO₄)₃ crystal. *Solid State Communications*, vol. 132, no. 8, pp. 533–538.
14. Xinghong Gong, Feibing Xiong, Yanfu Lin, Qiguang Tan, Zundu Luo, Yidong Huang. (2007). Crystal growth and spectral properties of Pr³⁺:La₂(WO₄)₃. *Materials Research Bulletin*, vol. 42, no. 3, pp. 413–419.
15. Asati A., Santra S., Kaitanis Ch., Nath S., Perez J.M. (2009). Oxidase-Like Activity of Polymer-Coated Cerium Oxide Nanoparticles. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, vol. 48, no. 13, p. 2308.

16. Zahra Salehi, Sahar Zinatloo-Ajabshir, Masoud Salavati-Niasari. (2017). Dysprosium cerate nanostructures: facile synthesis, characterization, optical and photocatalytic properties. *Journal of rare earths*, vol. 35, no. 8, p. 805.

17. Kasyanova A. V., Lyagaeva J. G., Vdovin G. K., Murashkina A. A., Medvedev D. A. (2023). Transport properties of LaYbO₃-based electrolytes doped with alkaline earth elements. *Electrochimica Acta*, vol. 439, p. 141702.

18. Zhang W., Hu Y.H. (2021). Progress in proton-conducting oxides as electrolytes for low-temperature solid oxide fuel cells: from materials to devices. *Energy Sci. Eng.*, vol. 9, pp. 984–1011.

19. Boubchir M., Aourag H. (2021). Materials genome project: Mining the ionic conductivity in oxide perovskites. *Materials Science and Engineering: B*, vol. 267, p. 114984.

20. Tryus M., Nikolaev K. V., Makhotkin I. A., Schubert Jü., Kibkalo L., Danylyuk S., Giglia A., Nicolosi P., Juschkin L. (2019). Optical and structural characterization of orthorhombic LaLuO₃ using extreme ultraviolet reflectometry. *Thin Solid Films*, vol. 680, pp. 94–101.

21. R. Fiorenza, S. Scirè, A. Gulino. (2018). Ru-Pd bimetallic catalysts supported on CeO₂-oxides as efficient systems for H₂ purification through CO preferential oxidation. *Catalysts*, vol. 8, p. 203.

22. A. Le Gal, S. Abanades. (2012). Dopant incorporation in ceria for enhanced water-splitting activity during solar thermochemical hydrogen generation. *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, pp. 13516–13523.

23. L. Vivier, D. Duprez. (2010). Ceria-based solid catalysts for organic chemistry. *Chem. Sus. Chem.*, vol. 3, no. 6, pp. 654–678.

24. C. Yang, X. Yu, P.N. Pleßow, S. Heißler, P.G. Weidler, A. Nefedov, F. Stedt, Y. Wang, C. Woll. (2017). Rendering photoreactivity to ceria: the role of defects. *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 56, pp. 14301–14305.

25. Luping Li, Robert Kasse, Satyajit Phadke, Wei Qiu, Ashfia Huq, Juan C. Nino. (2012). Ionic conductivity across the disorder–order phase transition in the NdO_{1.5}–CeO₂ system. *Solid State Ionics*, vol. 221, pp. 15–21.

26. T. Vanderah. (2021). *Electronic Materials and Applications 2011 Meeting, Orlando, FL*.

27. V. Grover, S.N. Achary, A.K. Tyagi. (2003). Structural analysis of excess-anion C-type rare earth oxide: a case study with Gd_{1-x}Ce_xO_{1.5+x/2} (x = 0.20 and 0.40). *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 36, pp. 1082–1084.

28. Horlait D., Claparède L., Clavier N., Szenknect S., Dacheux N., Ravaux J., Podor R. (2011). Stability and structural evolution of Ce(IV)_(1-x)Ln(III)_(x)O_(2-x/2) solid solutions: a coupled μ -Raman/XRD approach. *Inorganic Chemistry*, vol. 50, no. 15, pp. 7150–7161.

29. Yasuro Ikuma; Eriko Shimada; Nobuko Okamura. (2005) Effect of Nd₂O₃ Concentration on the Defect Structure of CeO₂–Nd₂O₃. *Solid Solution*, vol. 88, no. 2, pp. 419–423.

30. Hagiwara T., Kyo Z., Manabe A., Yamamura H., Nomura, K. J. (2009). Formation of C-type rare earth structures in the Ce_{1-x}Nd_xO_{2- δ} system: a factor in the decrease in oxide-ion conductivity. *Ceram. Soc. Jpn.*, vol. 117, pp. 1306–1310.

31. V. Grover; S.V. Chavan; P. Sengupta; A.K. Tyagi. (2010). $\text{CeO}_2\text{-YO}_{1.5}\text{-NdO}_{1.5}$ system: An extensive phase relation study. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 30, no. 15, pp. 3137–3143.
32. Nitani H., Nakagawa T., Yamanouchi M., Osuki T., Yuya M., Yamamoto T. A. (2004). XAFS and XRD study of ceria doped with Pr, Nd or Sm. *Materials Letters*, vol. 58, no. 15, pp. 2076–2081.
33. Nandi Chiranjit, Shafeeq Muhammed, Kesari Swayam, Rao Rekha, Grover V., Prakash Amrit, Tyagi A.K. (2019). Structural and thermal expansion studies in ternary $\text{ThO}_2\text{-CeO}_2\text{-NdO}_{1.5}$ system: Mimicking actinide substituted ThO_2 . *Journal of Nuclear Materials*, vol. 520, pp. 226–234.
34. Materazzi S. (2008). Coordination Compounds and Inorganics. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 5, pp. 478-482.
35. Andrievskaya E.R. (2010). Phase equilibriums in systems of hafnia, zirconia, and yttria with REE oxides: Monograph. *Kyiv: Naukova Dumka*, p. 470. (in Ukrainian).
36. Kornienko O. A., Andrievska O. R. (2020). Phase equilibria in the Systems with ZrO_2 , CeO_2 and Dy_2O_3 . *Innovative scientific researches: European development trends and regional aspect. Collective monograph, 4th ed.*, pp. 155–179.
37. Longo V., Podda L. (1981). Phase equilibrium diagram of the system ceria-yttria for temperatures between 900 and 1700 °C. *Journal of Materials Science*, vol. 16, pp. 839–841.
38. Bevan D. J. M., Summerville E. (1979). Mixed rare earth oxides. *Handbook on the Physics and Chemistry on Rare Earths*, vol. 3, pp. 401–524.
39. Ding Rong Ou, Toshiyuki Mori, Fei Ye, Jin Zou, Graeme Auchterlonie, John Drennan. (2008). Oxygen-vacancy ordering in lanthanide-doped ceria: Dopant-type dependence and structure model. *Physical review B*, vol. 77, p. 024108.
40. Rouanet A., Couterus J., Foex M. J. (1972). *Solid State Chem.*, vol. 4, no. 2, pp. 219–222.
41. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Sameljuk A. V., Sayir A. (2011). Phase relation studies in the $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3$ system at 1100–1500 °C. *J. of the Europ. Ceram. Soc.*, vol. 31, pp. 1277–1283.
42. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Gorodov V. S. (2008). Phase relations in the $\text{CeO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$ system at 1500 °C. *Current problems of physical material science*, vol. 17, pp. 25–29.
43. Andrievskaya E. R., Gusarov V. V., Kornienko O. A., Sameljuk A. V. (2012). Interaction of ceria and erbia at 1500 °C. *Proc. of Berezhnyi Institute for refractories*, vol. 112, pp. 133–140.
44. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Bykov O. I., Sameliuk A. V., Bohatyriova Z. D. (2019). Interaction of ceria and ytterbia in air within temperature range 1500–600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 2930–2935.
45. Andrievskaya E. R., Kornienko O. A., Sameljuk A. V., Sayir A. (2020). Phase Relation Studies in the $\text{CeO}_2\text{-Eu}_2\text{O}_3$ System at 600 to 1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 3, pp. 751–758.
46. Andrievska O. R., Kornienko O. A., Bykov O. I., Sameliuk A. V., Bohatyriova Z. D. (2020). Interaction of ceria and erbia in air within tempera-

ture range 1500–600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 8, pp. 3098–3100.

47. Korniienko O. A., Yushkevych S. V., Bykov O. I., Samelyuk A. V., Bataiev Yu. M., Zamula M. V. (2023). Phase relation studies in the $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Ho}_2\text{O}_3$ system at temperature of 1500 °C. *Materials Today Communications*, vol. 35, p. 105789.

48. Andrievska O. R., Korniienko O. A., Yurchenko Yu. V. (2020). Phase relation studies in the $\text{CeO}_2\text{-Sm}_2\text{O}_3$ system at 1500 to 600 °C in air. *Research & Development in Material Science*, vol. 12, no. 4, pp. 1308–1314.

49. Korniienko O. A., Bykov O. I., Sameljuk A. V., Bataiev Yu. M., Yushkevych S. V. (2021). Phase equilibria in the $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ system at 1250 and 1500 °C. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, vol. 3, no. 4, pp. 17–31.

50. Bharathy M., Fox A. H., Mugavero S. J. (2009). Crystal growth of inter-lanthanide $\text{LaLn}^{\prime}\text{O}_3$ ($\text{Ln}^{\prime} = \text{Y, Ho-Lu}$) perovskites from hydroxide fluxes. *Solid State Sciences*, vol. 11, pp. 651–654.

51. Korniienko O. A., Bykov O. I., Samelyuk A. V., Barshchevskaya A. K. (2021). Izotermichnyy pereriz diahramy stanu systemy $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3$ pry 1500 °C. *Journal of Chemistry and Technologies*, vol. 29 no 2, pp. 200–210. (in Ukrainian).

52. Korniienko O., Yushkevych S., Bykov O., Samelyuk A., Bataiev Y. (2022). Phase Equilibrium in the Ternary $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$ System at 1500 °C. *Solid State Phenomena*, vol. 331, pp. 159–172.

53. Korniienko O. A., Yushkevych S. V., Bykov O. I., Samelyuk A. V., Bataiev Yu. M., Zamula M. V. (2022). Phase equilibrium in binary $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3$ and ternary $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3$ systems. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 42, pp. 5820–5830.

54. Andrievskaya O. R., Korniienko O. A., Bykov O. I., Chudinovic O. V., Spasonova L. N. (2021). The interaction between cerium dioxide, lanthanum and europium oxides at 1500°C. *Processing and Application of Ceramics*, vol. 15, no. 1, pp. 32–39.

55. Korniienko O. A., Sameljuk A. V., Bykov O. I., Yurchenko Yu. V., Barshchevskaya A. K. (2020). Phase Relation Studies in the $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ System at 1500 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 40, no. 12, pp. 4184–4190.

56. Korniienko O. A., Bykov O. I., Samelyuk A. V., Yurchenko Yu. V. (2020). Izotermichnyy pereriz diahramy stanu systemy $\text{CeO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$ za temperatury 1250 °C. *Ukrayinskyy khimichnyy zhurnal*, vol. 86, no. 3, pp. 35–47. (in Ukrainian).