



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І. М. ФРАНЦЕВИЧА

Тверді розчини на основі оксидів цирконію, ітрію та рідкісноземельних елементів як основа створення новітніх функціональних матеріалів оптичного та медичного призначення

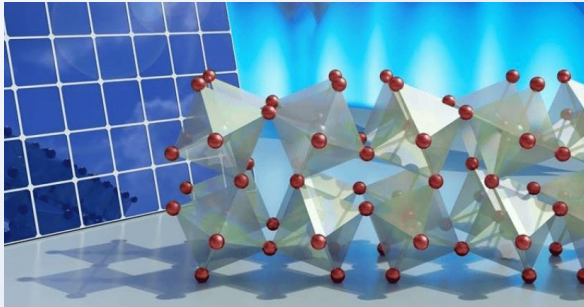
ЧУДІНОВИЧ Ольга Василівна – кандидат хімічних наук

МАРЕК Ірина Олегівна – кандидат хімічних наук

Київ 2024

Матеріали оптичного призначення на основі оксидів рідкісноземельних елементів

Кольорове телебачення



Атомна та лазерна техніка



Медицина

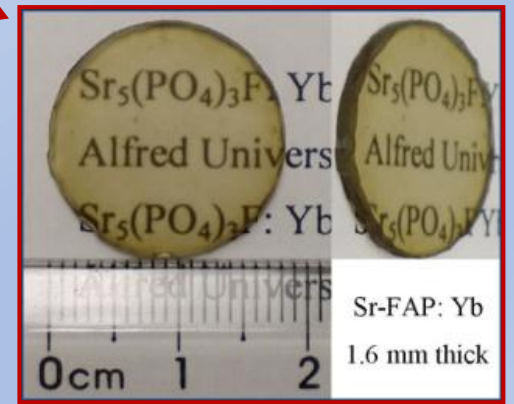
Виробництво кераміки та скла

Абразивні матеріали для поліровки скла

Спеціальні стекла для поглинання УФ



Ізотропна Nd:YAG кераміка



Анізотропна кераміка Yb:S-FAP

Матеріали медичного призначення на основі ZrO_2



Кераміка на основі ZrO_2

Висока міцність, твердість, в'язкість, зносостійкість, низький коефіцієнт тертя, висока $T_{пл}$, низька теплопровідність

Фазове перетворення мартенситного типу $T-ZrO_2-M-ZrO_2$

Трансформаційне зміцнення

Низькотемпературна деградація властивостей у присутності води



Фотографія біоімплантатів ендопротеза тазостегнового суглоба та фаланг пальців



Хірургічні скальпелі

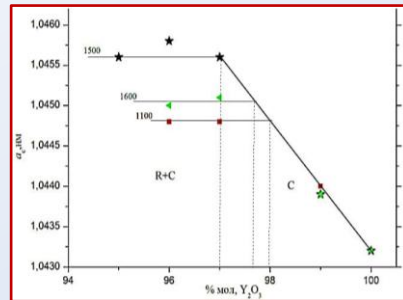
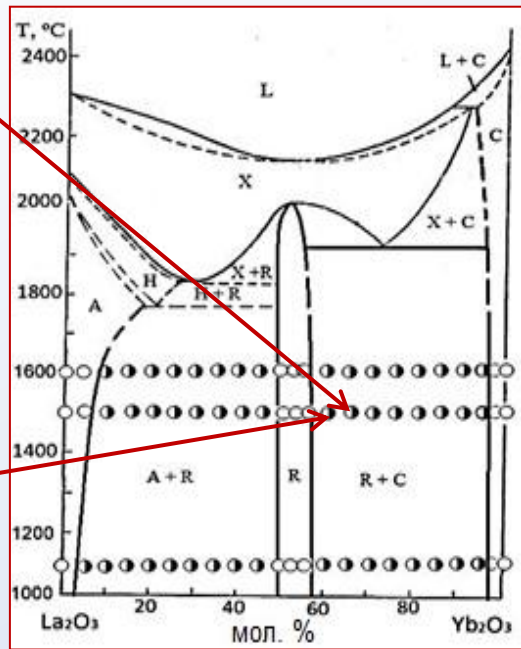
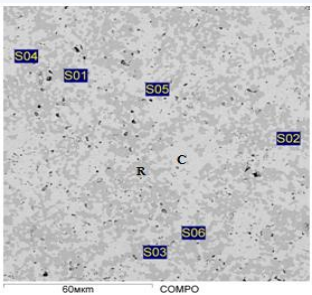
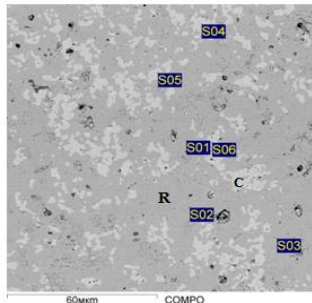
Метою роботи є

- побудова діаграм стану трикомпонентних систем $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$, де $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Yb}$, при 1500 і 1600 °С, де відбувається упорядкування/розупорядкування проміжної фази в усьому інтервалі концентрацій для створення фізико-хімічних основ розробки нових керамічних матеріалів функціонального призначення;
- встановити закономірності зміни властивостей нанодисперсних порошків в системі $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--CeO}_2$ в залежності від складу твердого розчину на основі ZrO_2 . Дослідити стійкість матеріалів з одержаних порошків на основі ZrO_2 , до низькотемпературної деградації властивостей (старіння).

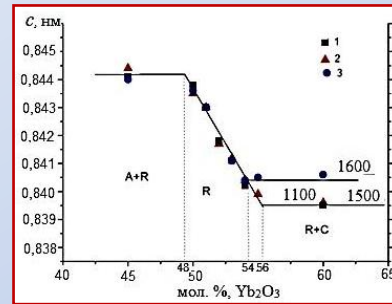
Методи дослідження:

- Диференціально-термічний аналіз;
- Рентгенофазовий аналіз;
- Електронна та оптична мікроскопія;
- Метод БЕТ;
- Метод прискореного старіння в гідротермальних умовах
- Петрографія

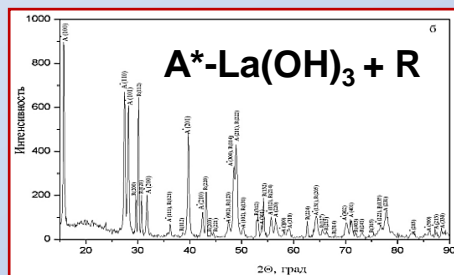
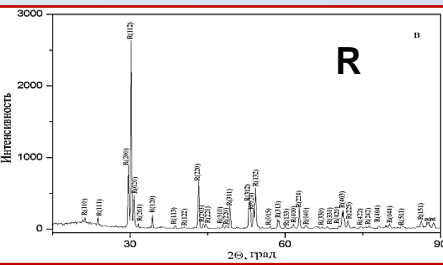
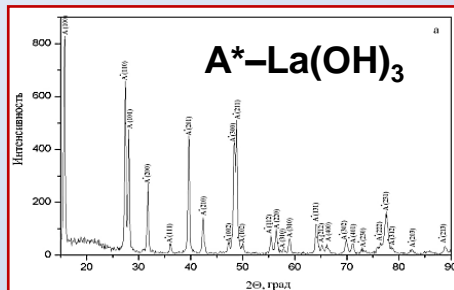
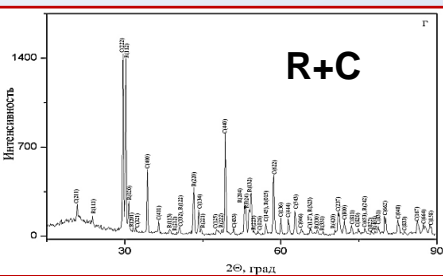
Діаграма стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$



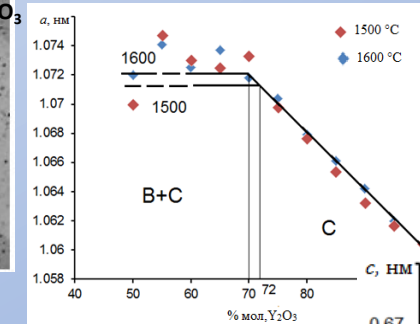
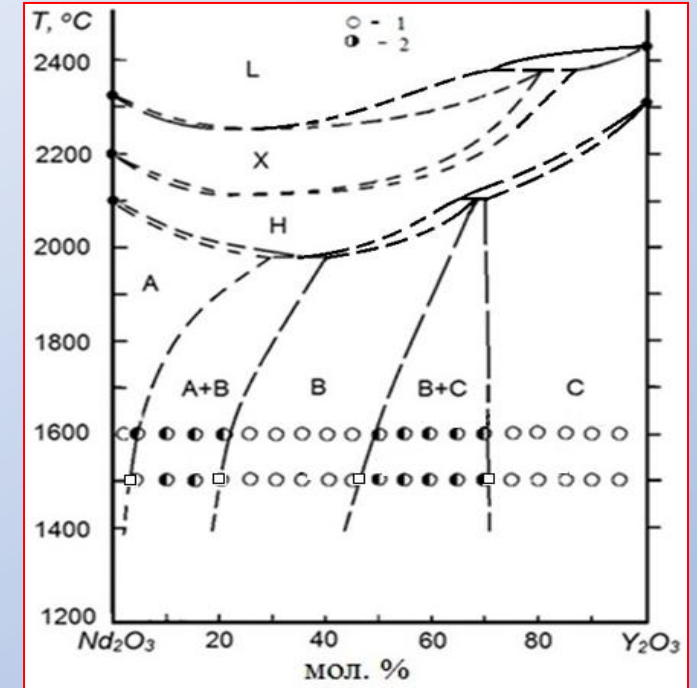
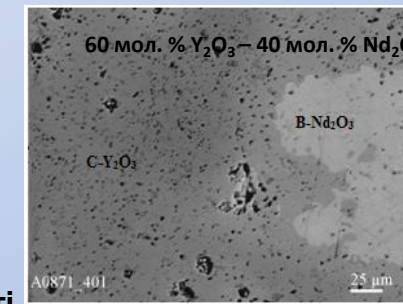
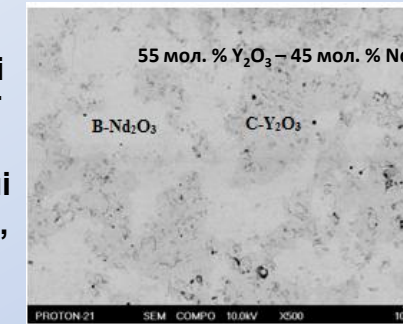
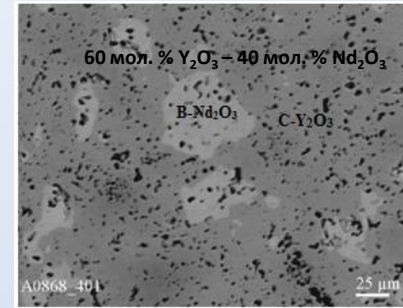
Концентраційні залежності параметра *a* елементарної комірки твердих розчинів на основі $\text{C-Yb}_2\text{O}_3$ в системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ при 1100, 1500, 1600 °C



Концентраційні залежності параметра *c* елементарної комірки твердих розчинів на основі $\text{LaYbO}_3(\text{R})$ в системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$

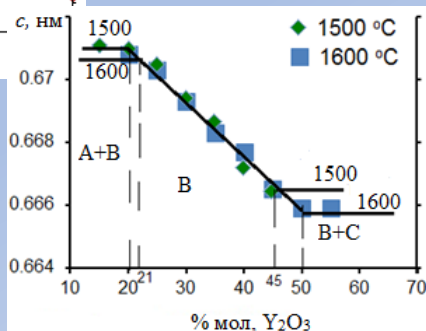


Діаграма стану системи $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ в інтервалі температур 1500–1600 °C

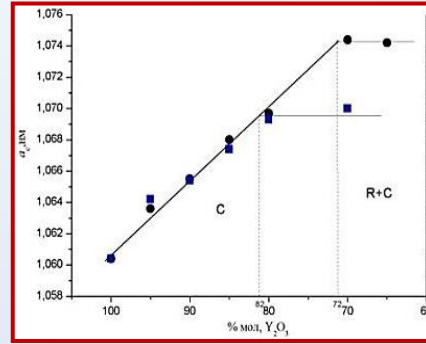
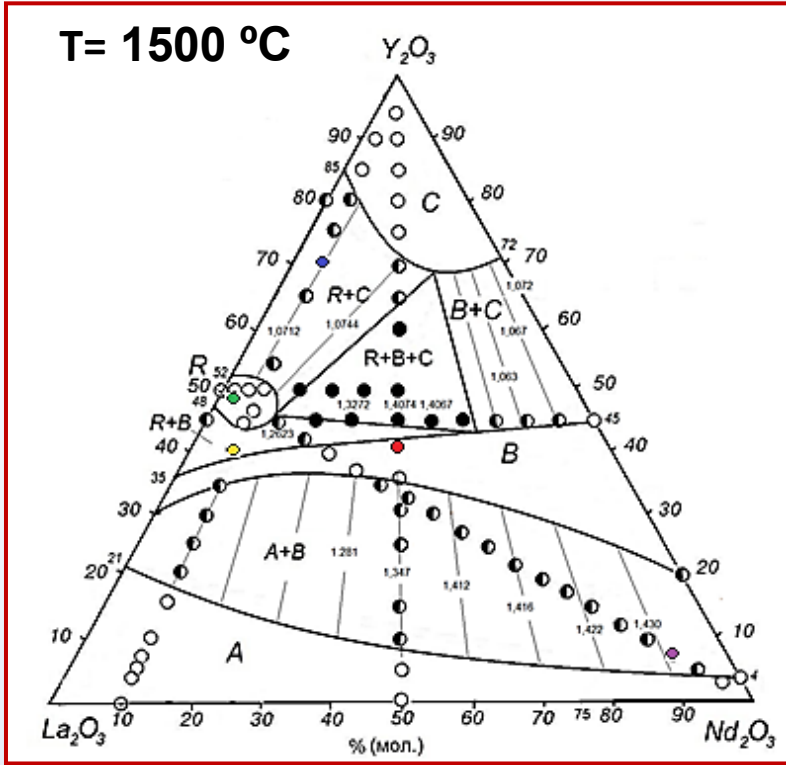


Концентраційні залежності параметра *a* елементарної комірки твердих розчинів на основі $\text{C-Y}_2\text{O}_3$ в системі $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ при 1500 і 1600 °C

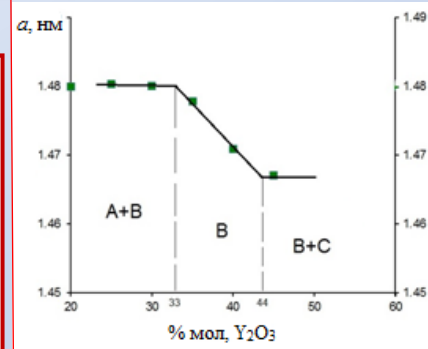
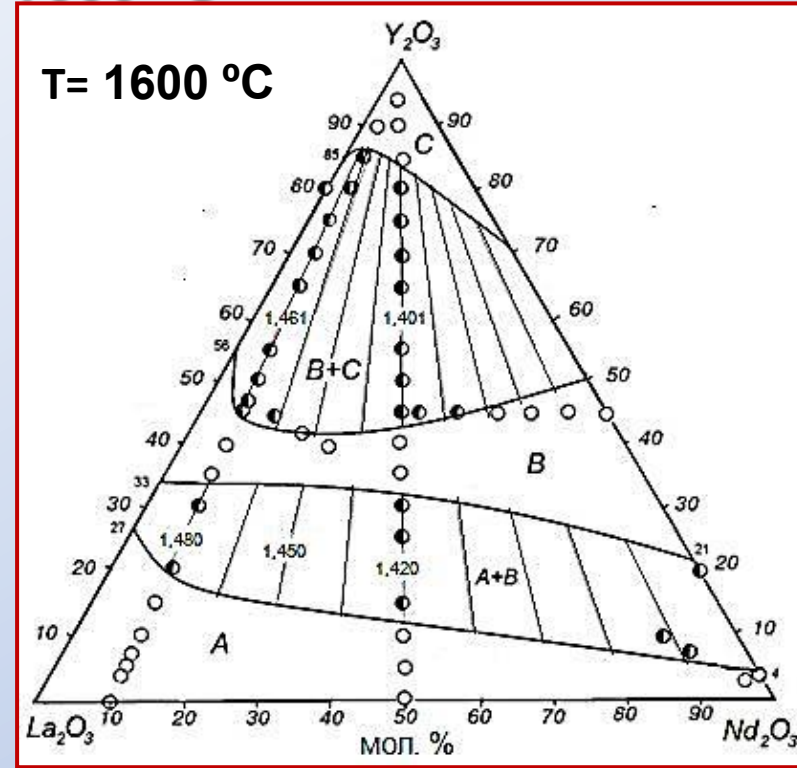
Концентраційні залежності параметра *c* елементарної комірки твердих розчинів на основі $\text{B-Nd}_2\text{O}_3$ в системі $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ при 1500 і 1600 °C



Ізотермічні перерізи діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$ при 1500 та 1600 °C

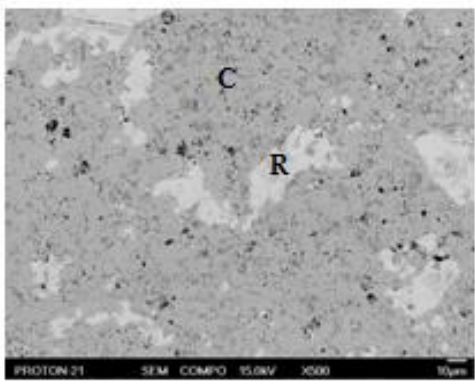


Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердого розчину на основі C- Y_2O_3 : у перерізі Y_2O_3 – (90 мол.% La_2O_3 –10 мол.% Nd_2O_3) та у перерізі Y_2O_3 – (50 мол.% La_2O_3 –50 мол.% Nd_2O_3) системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$

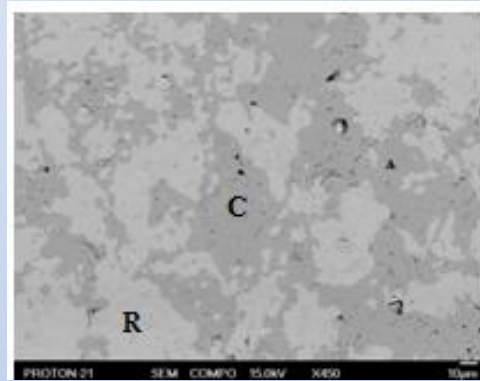


Концентраційна залежності параметрів a елементарної комірки твердих розчинів на основі B-фази у перерізі Y_2O_3 – (90 мол.% La_2O_3 – 10 мол.% Nd_2O_3) у системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$ після випалу зразків при 1600°C

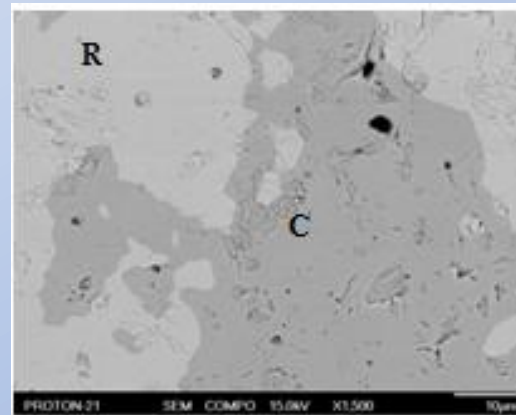
J. Eur. Ceram. Soc. – 2021. Vol. 41. – P. 6606–6616 (Q1)



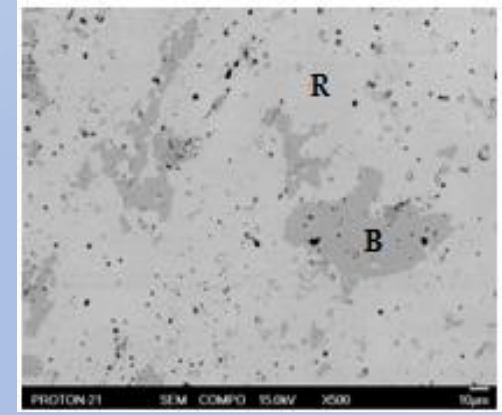
75 мол % Y_2O_3 –22.5 мол % La_2O_3 –2.5 мол % Nd_2O_3



65 мол % Y_2O_3 –31.5 мол % La_2O_3 –3.5 мол % Nd_2O_3

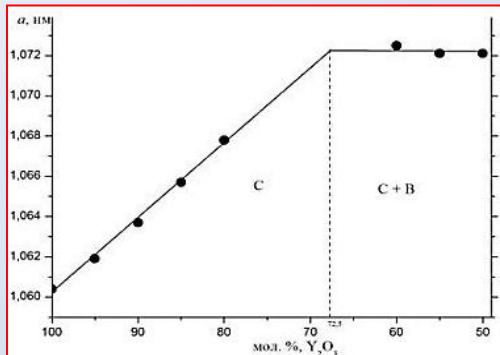
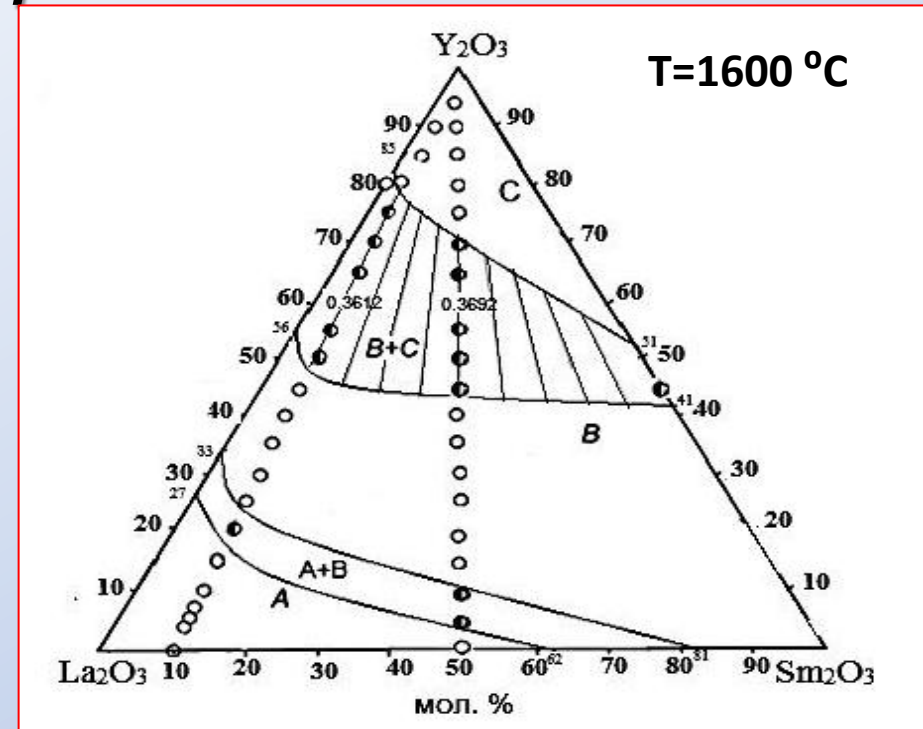
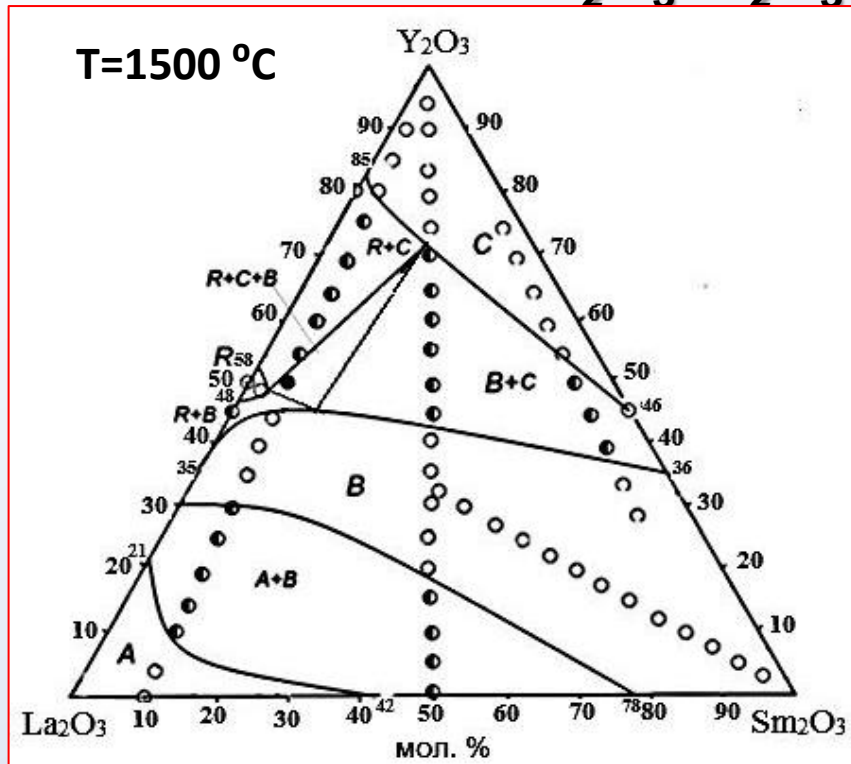


60 мол % Y_2O_3 –36 мол % La_2O_3 –4 мол % Nd_2O_3



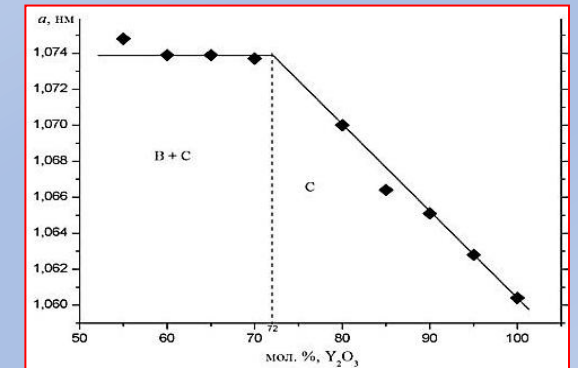
40 мол % Y_2O_3 –54 мол % La_2O_3 –6 мол % Nd_2O_3

Ізотермічні перерізи діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Sm}_2\text{O}_3$ при 1500 та 1600 °C

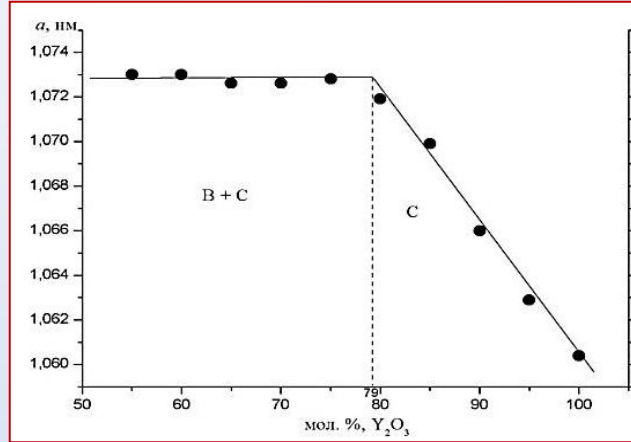
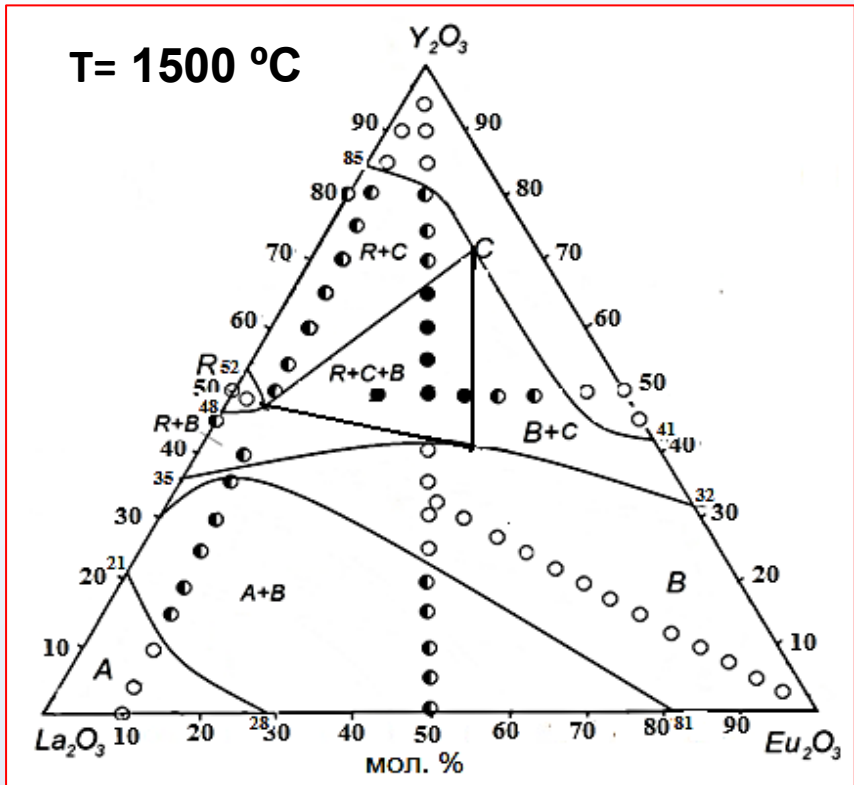


Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердих розчинів на основі C-Y₂O₃ у перерізі Y₂O₃ – (50 мол. % La₂O₃–50 мол.% Sm₂O₃) у системі La₂O₃–Y₂O₃–Sm₂O₃ після випалу зразків при 1500°C

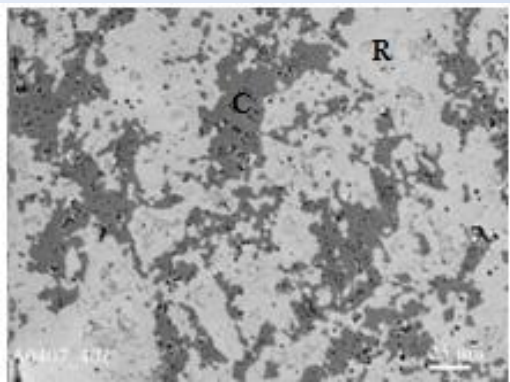
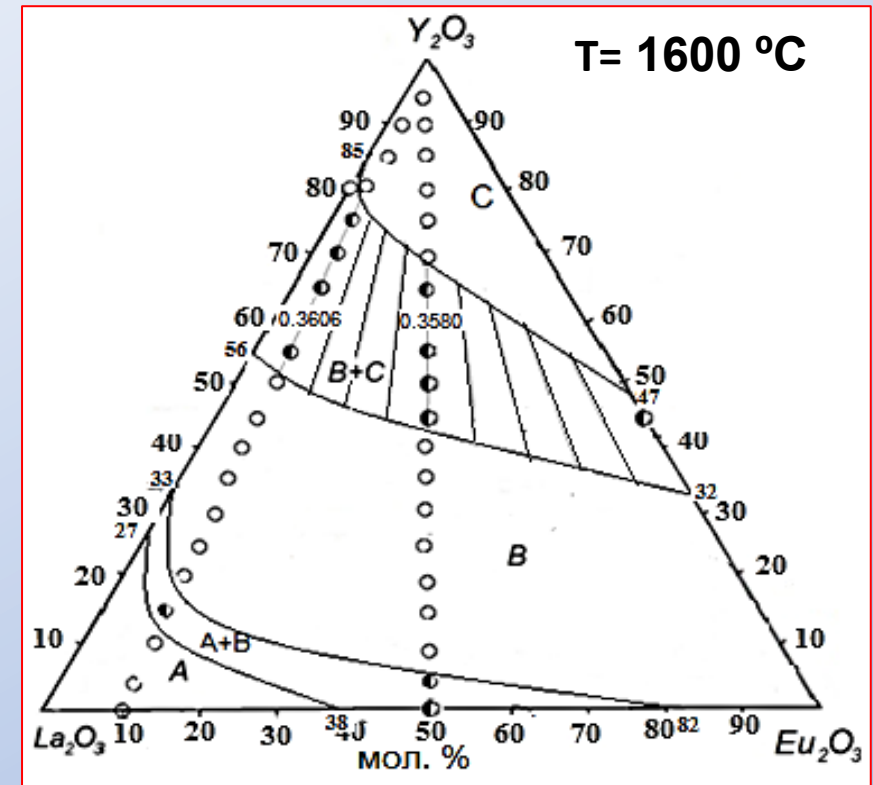
Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердих розчинів на основі C-Y₂O₃ у перерізі Y₂O₃ – (50 мол. % La₂O₃ – 50 мол.% Sm₂O₃) у системі La₂O₃–Y₂O₃–Sm₂O₃ після випалу зразків при 1600°C



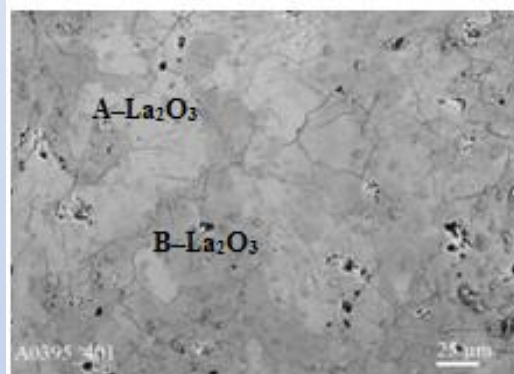
Ізотермічні перерізи діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$ при 1500 та 1600 °С



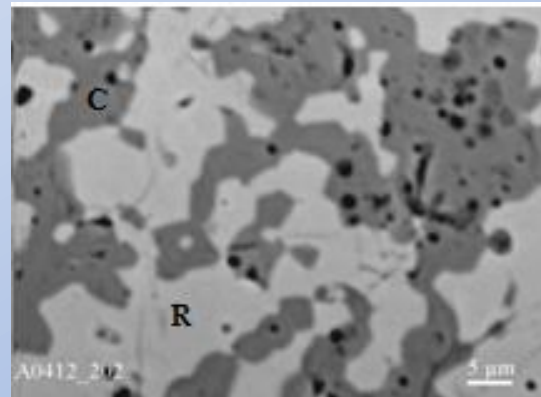
Концентраційна залежність параметра a елементарної комірки твердого розчину на основі C- Y_2O_3 у перерізі $\text{Y}_2\text{O}_3 - (90 \text{ мол. \% } \text{La}_2\text{O}_3 - 10 \text{ мол. \% } \text{Eu}_2\text{O}_3)$ у системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$ після випалу зразків при 1600 °С



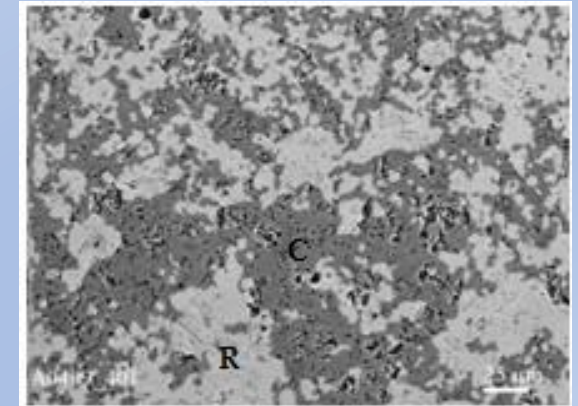
60 мол. % Y_2O_3 – 36 мол. % La_2O_3 – 4 мол. % Eu_2O_3



35 мол. % Y_2O_3 – 58.5 мол. % La_2O_3 – 6.5 мол. % Eu_2O_3



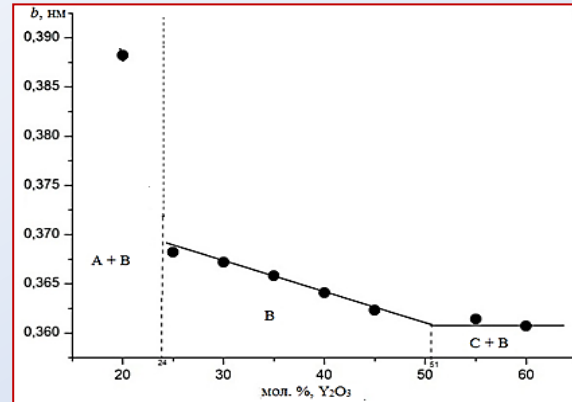
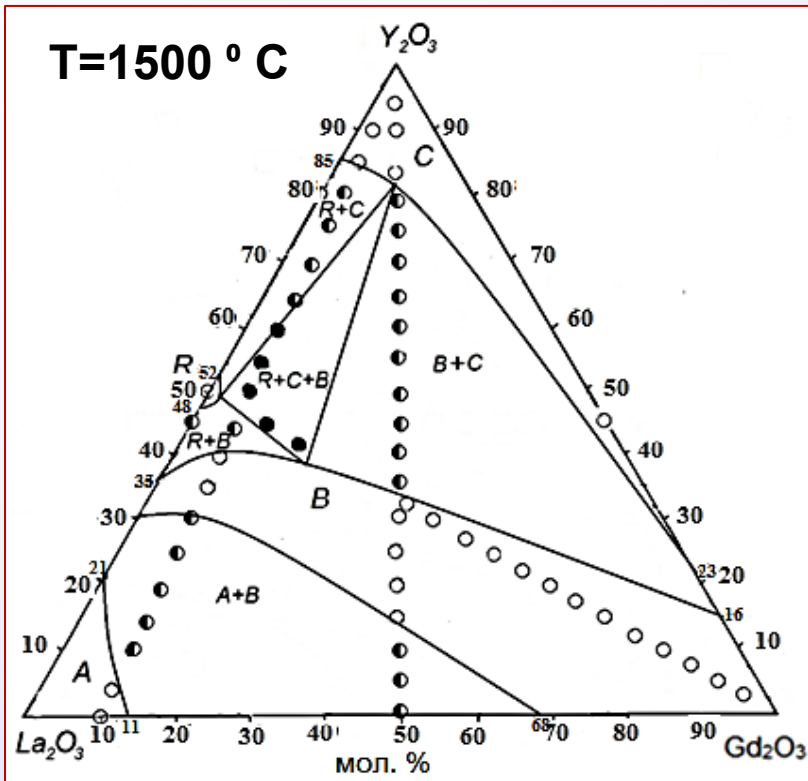
70 мол. % Y_2O_3 – 27 мол. % La_2O_3 – 3 мол. % Eu_2O_3



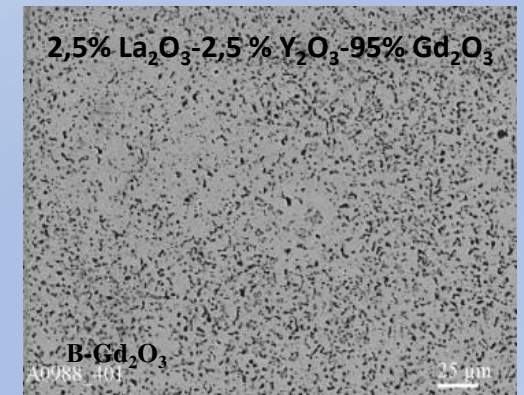
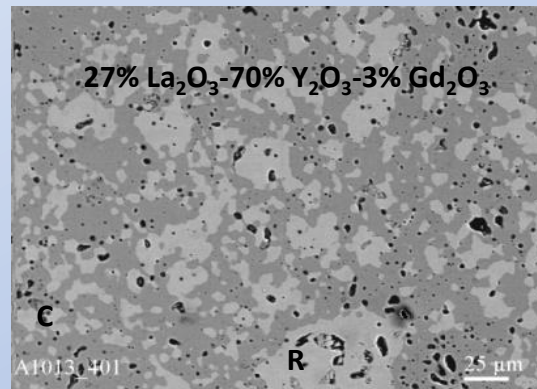
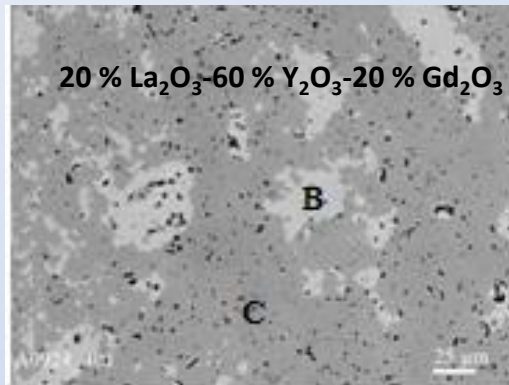
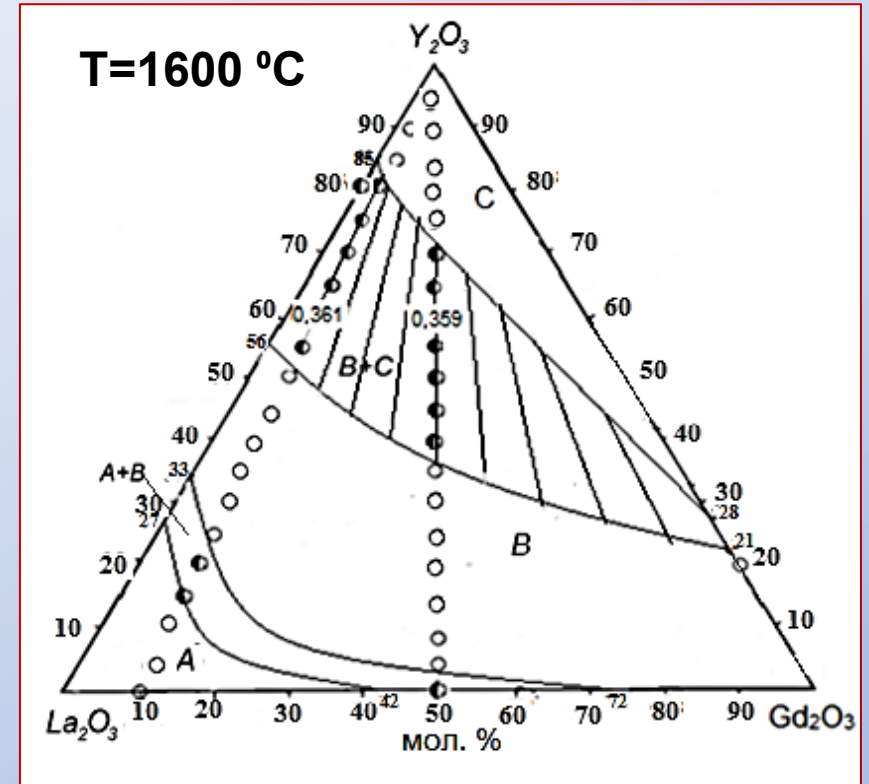
65 мол. % Y_2O_3 – 31,5 мол. % La_2O_3 – 3,5 мол. % Eu_2O_3

Ізотермічні перерізи діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$

при 1500 та 1600 °C

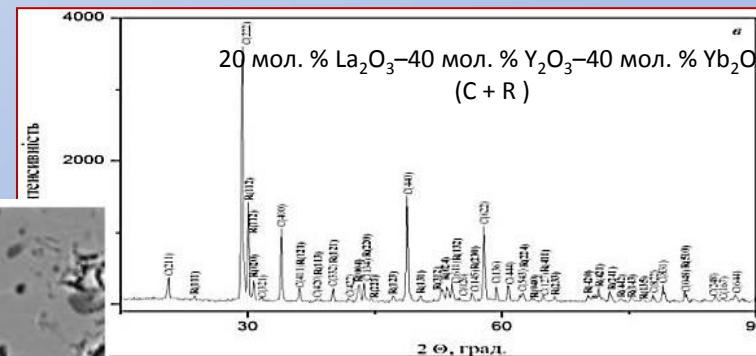
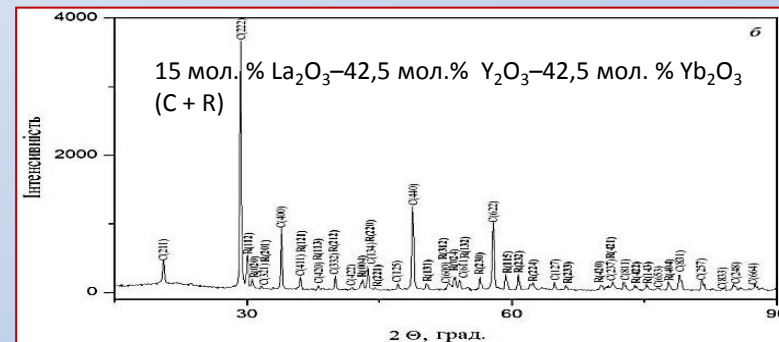
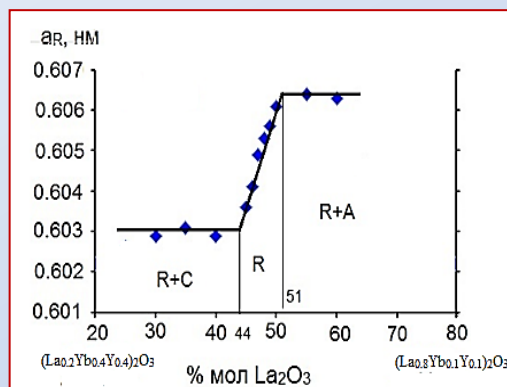
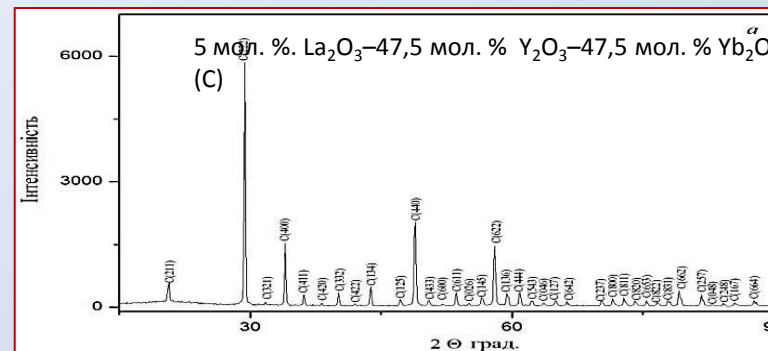
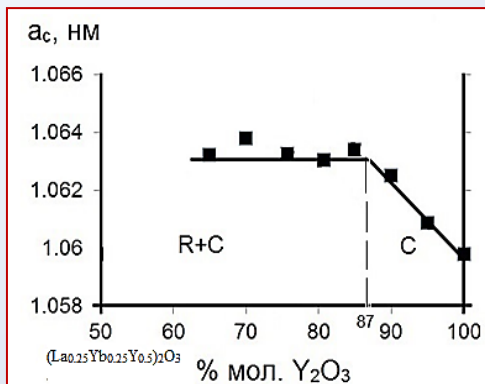
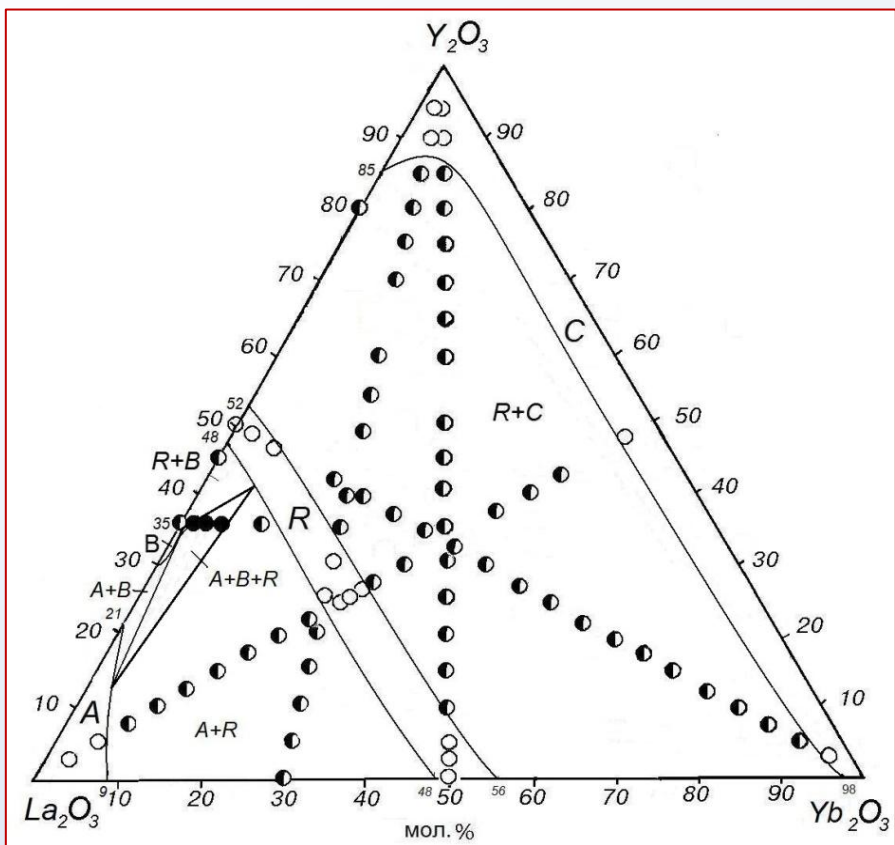


Концентраційна залежність параметра b елементарної комірки твердих розчинів на основі В-типу оксидів РЗЕ у перерізі $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-}$ (90 мол. % $\text{La}_2\text{O}_3\text{-}10$ мол. % Gd_2O_3) системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ після випалу зразків при 1600 °C

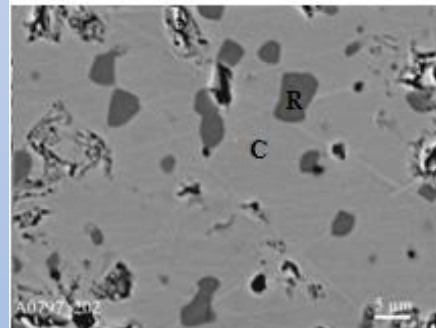
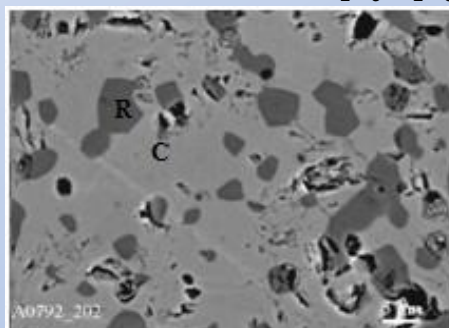
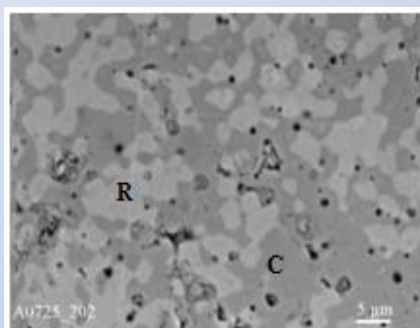
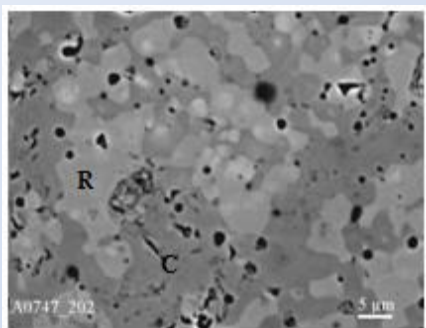


Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2023. V. 62. (Q3)

Ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$ при $1500\text{ }^\circ\text{C}$



Концентраційні залежності параметрів елементарної комірки твердих розчинів системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$

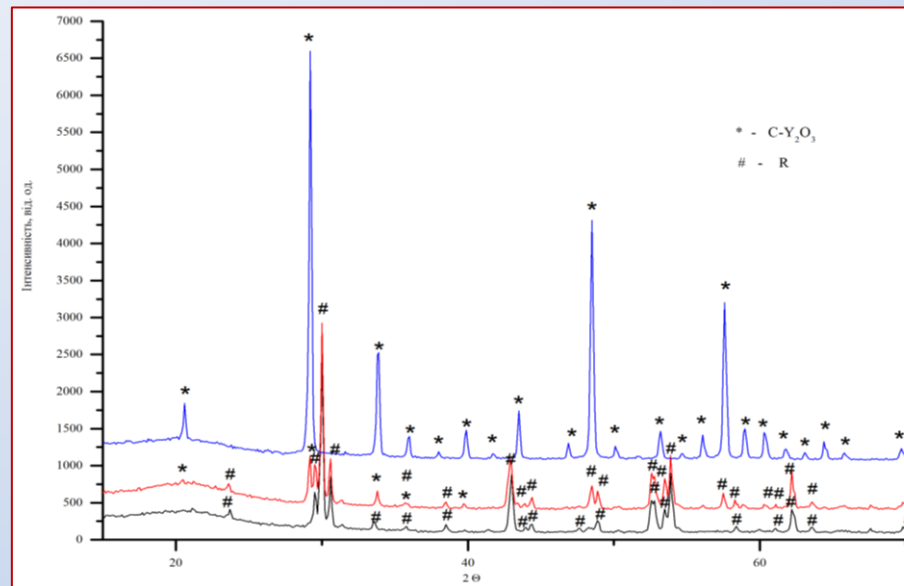
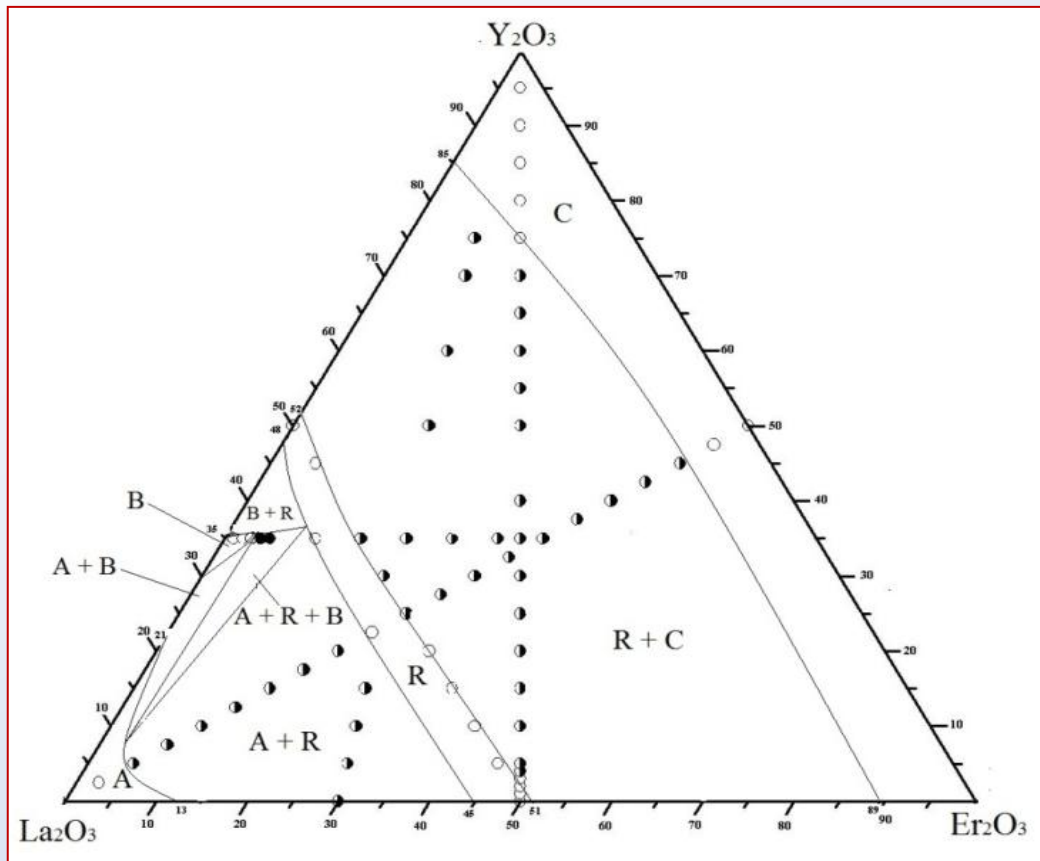


35 мол. % Y_2O_3 –32,5 мол. % La_2O_3 – 45 мол. % Y_2O_3 –27,5 мол. % La_2O_3 – 32,5 мол. % Yb_2O_3

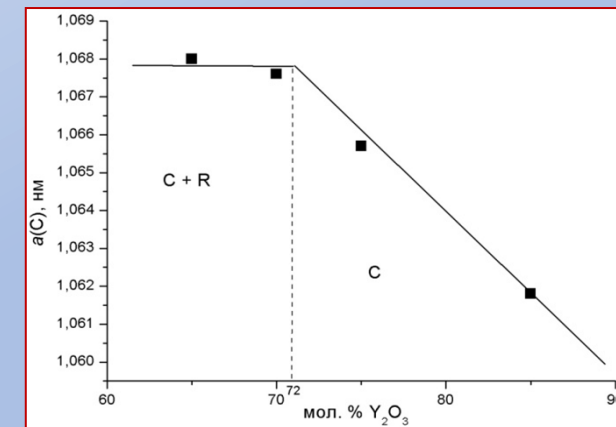
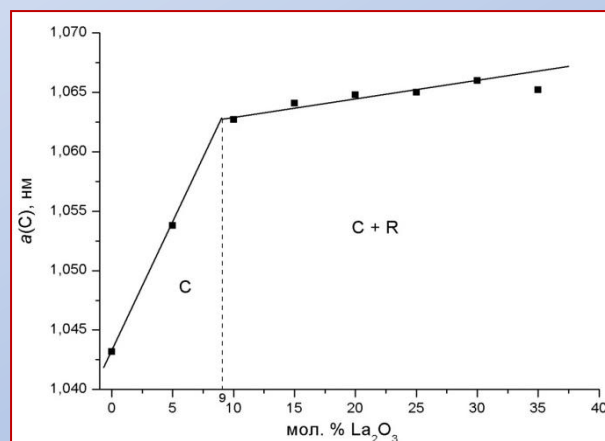
12,5 мол. % Y_2O_3 –12,5 мол. % La_2O_3 – 75 мол. % Yb_2O_3

7,5 мол. % Y_2O_3 –7,5 мол. % La_2O_3 – 85 мол. % Yb_2O_3

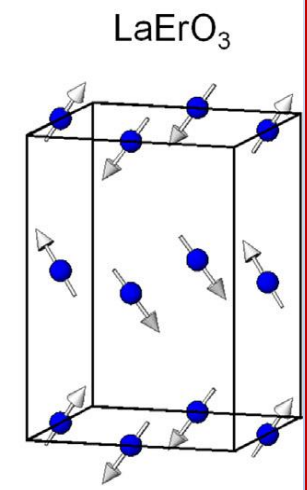
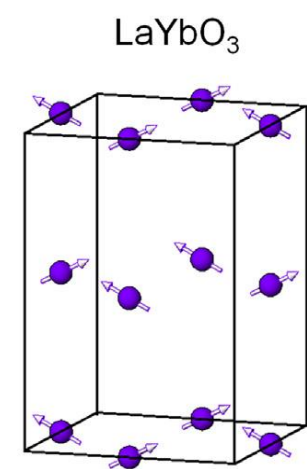
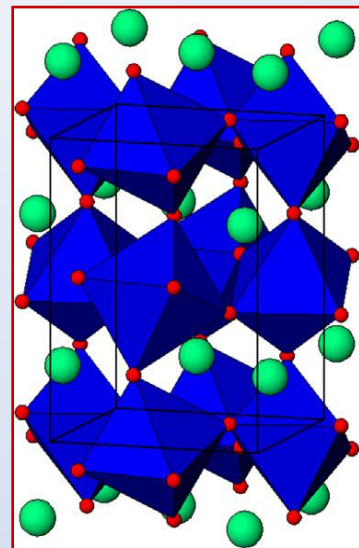
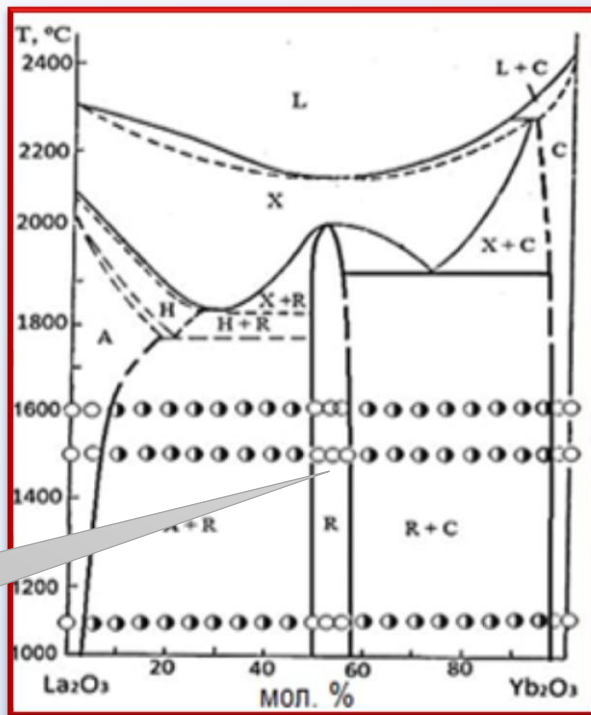
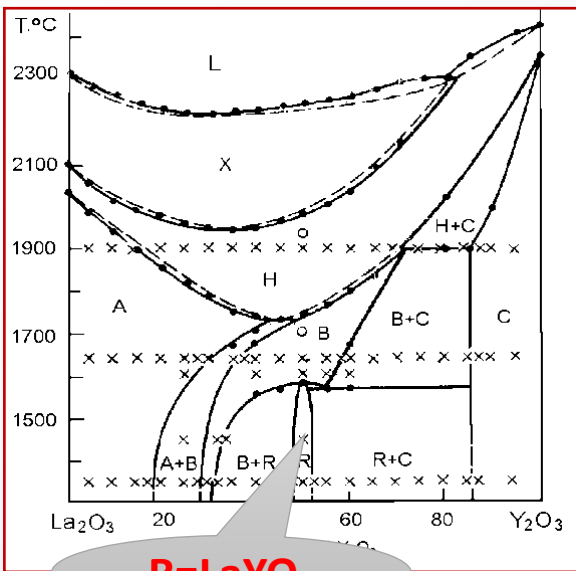
Ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ при $1500\text{ }^\circ\text{C}$



Дифрактограми твердих розчинів системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$



Концентраційні залежності параметрів елементарної комірки твердих розчинів системи $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$



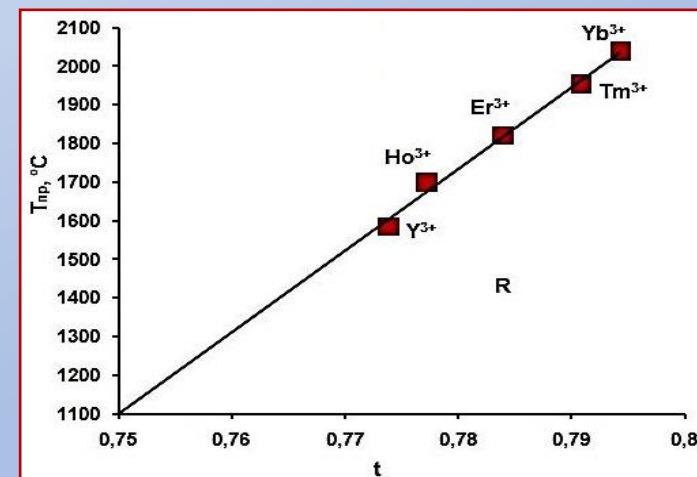
Температури перетворення фази типу перовскиту ABO_3 для різних РЗЕ

A	B					
	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
La	1600	1700	1820	1955	2040	-
Ce				1700	1900	2050
Pr					1500	1950
Nd						1300

Умова стабільності R-фази по Гольдшміту

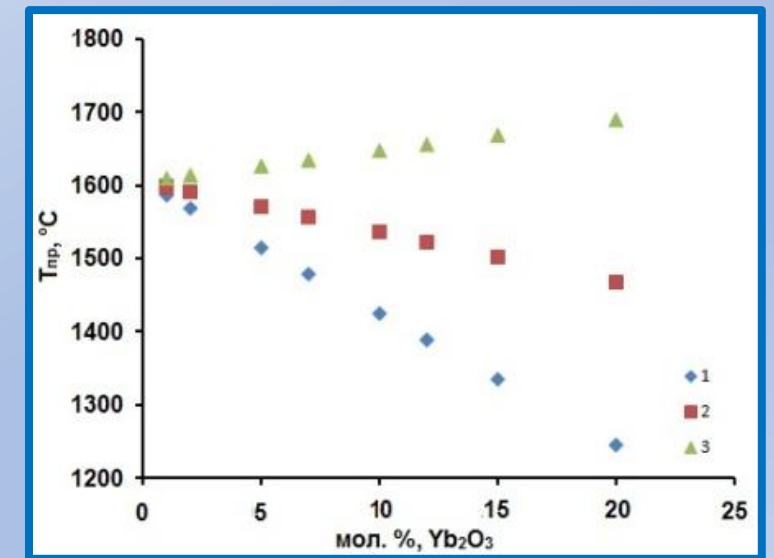
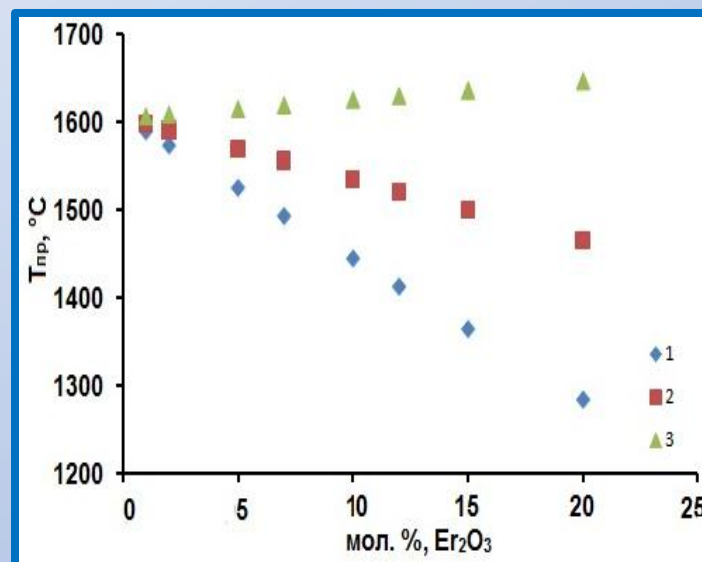
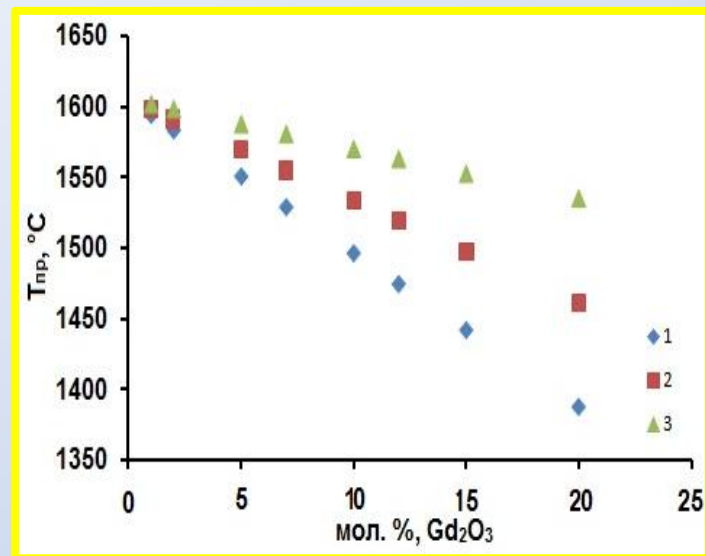
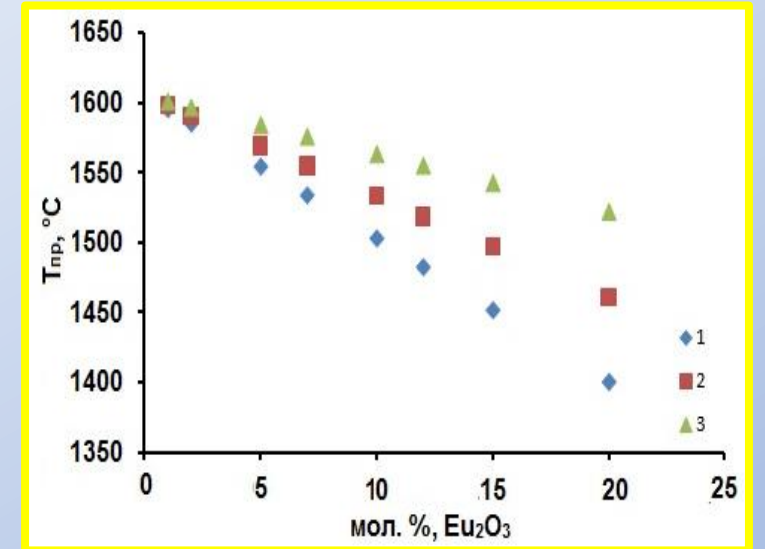
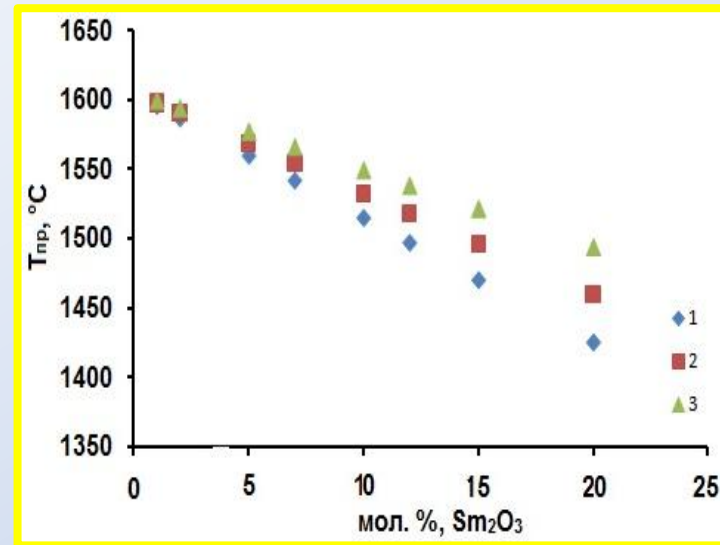
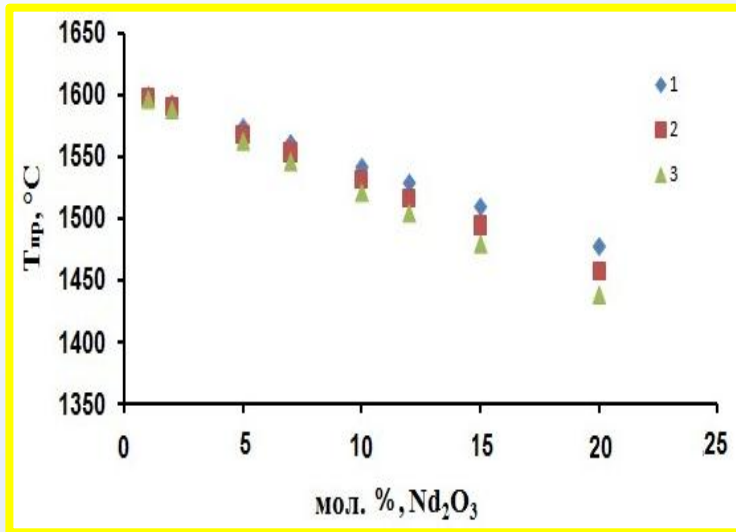
$$0,75 < t < 1,00$$

$$t = (R_A + R_O) / \sqrt{2}(R_B + R_O)$$

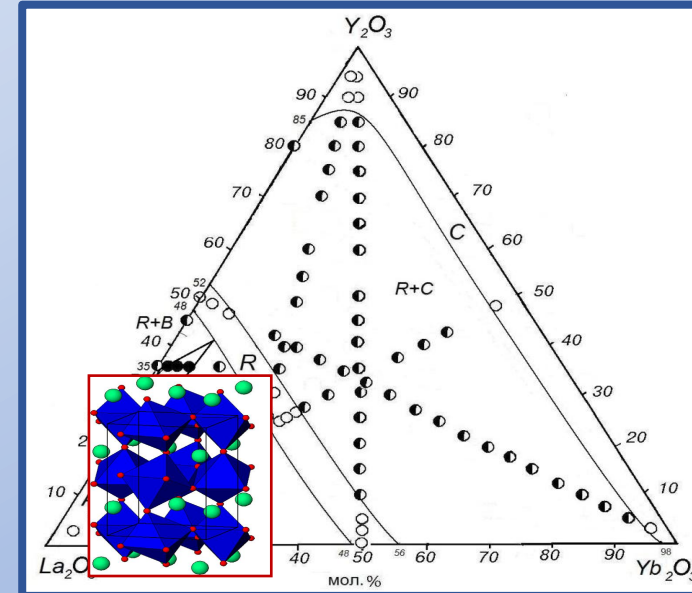
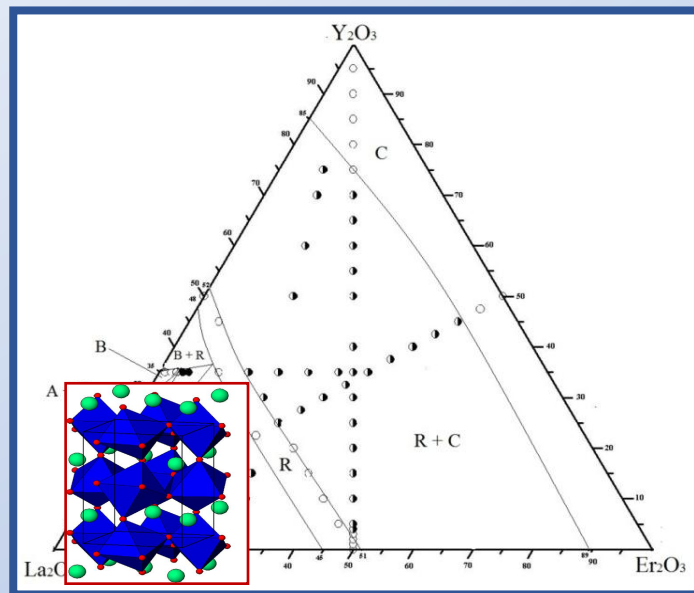
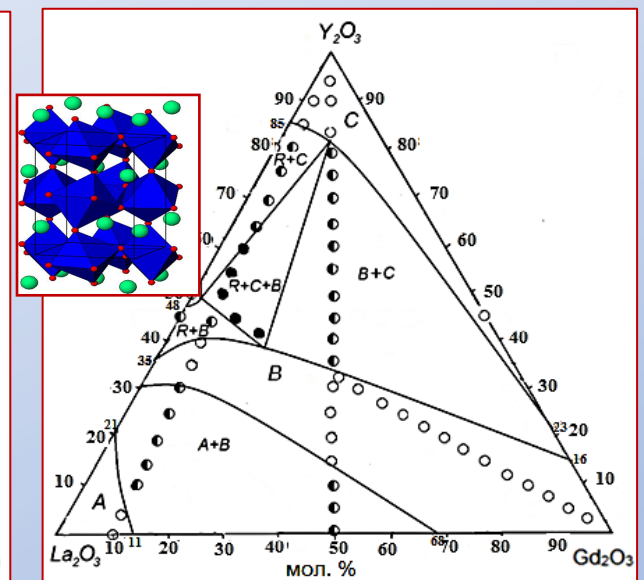
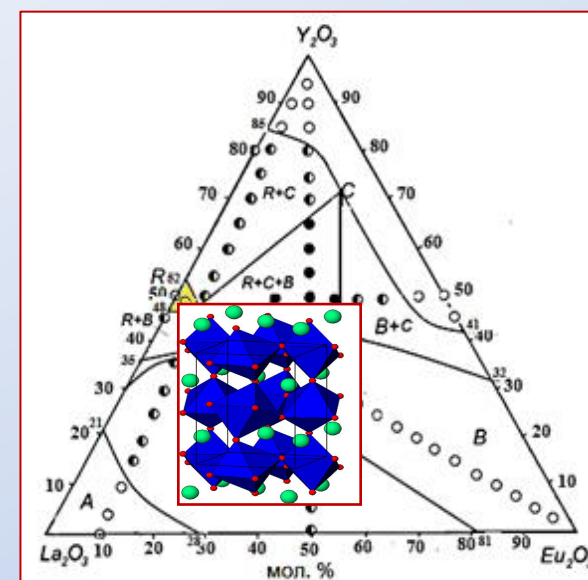
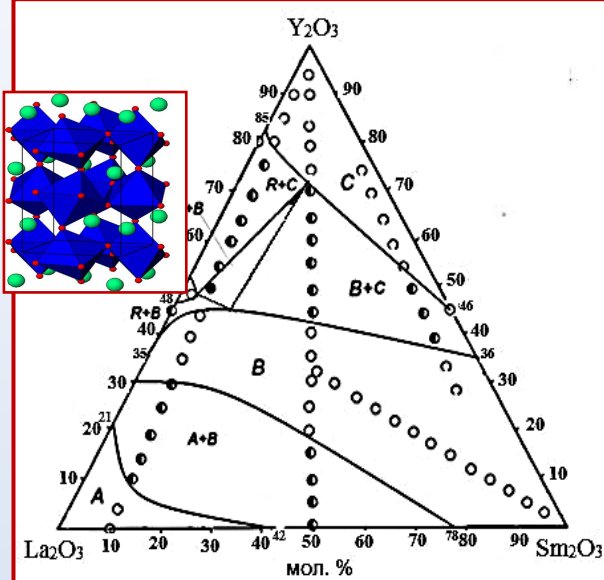
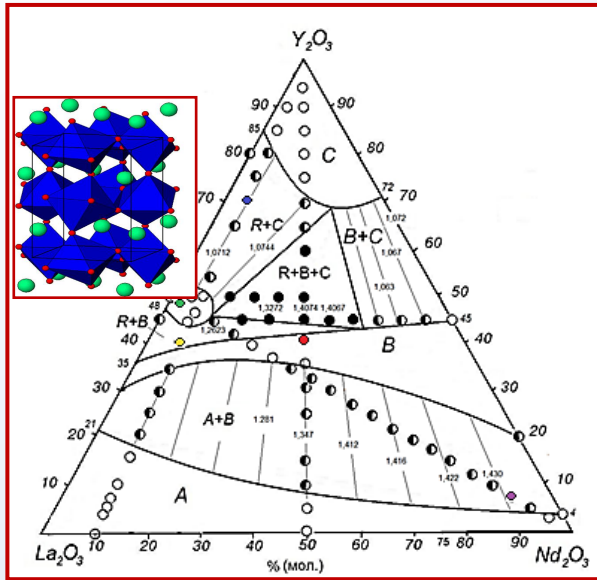


Температура перетворення (T_{np}) фази типу перовскиту $LaLnO_3$ ($Ln = Y, Ho, Er, Tm, Yb$) від фактора толерантності t за Гольдшмідтом

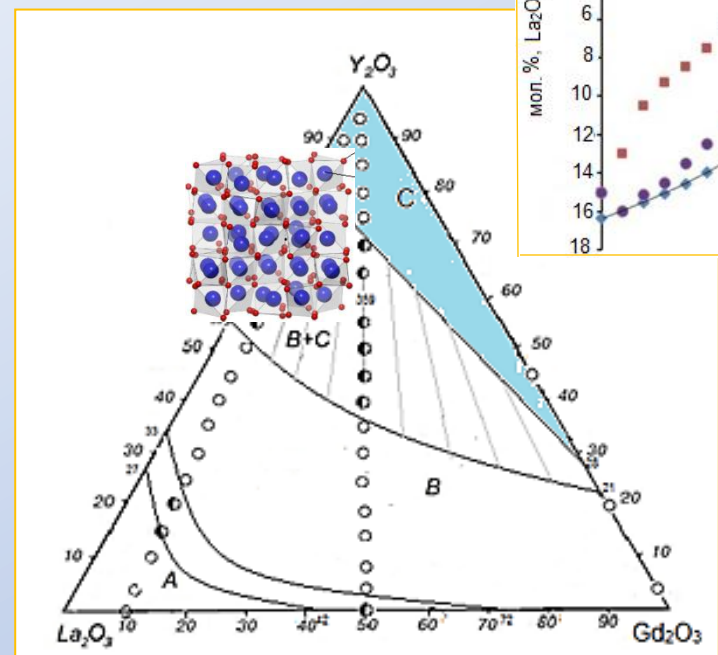
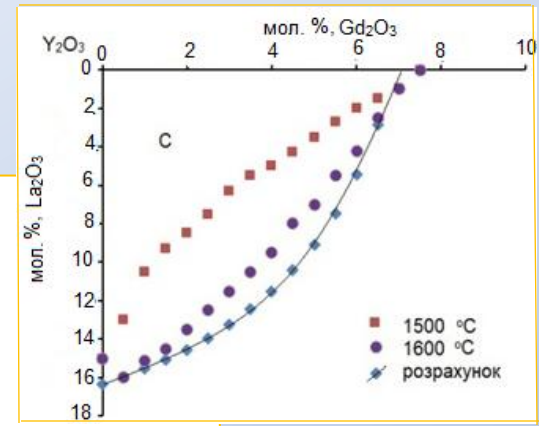
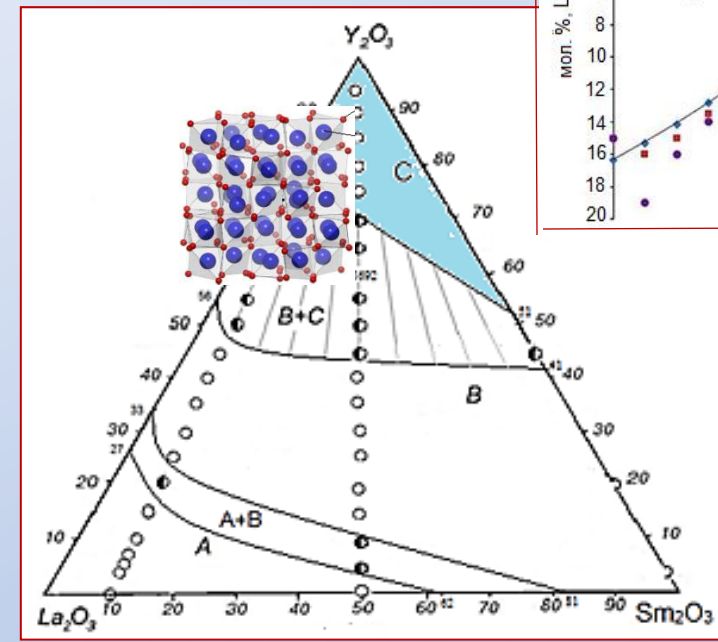
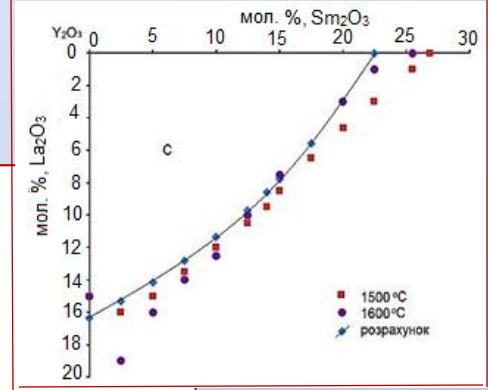
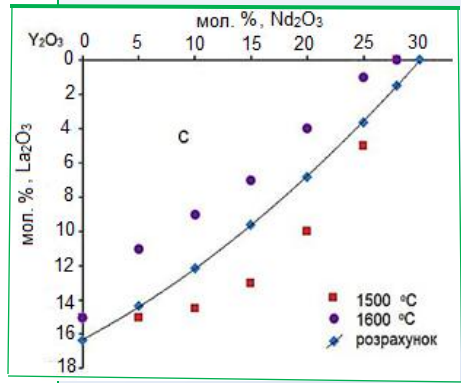
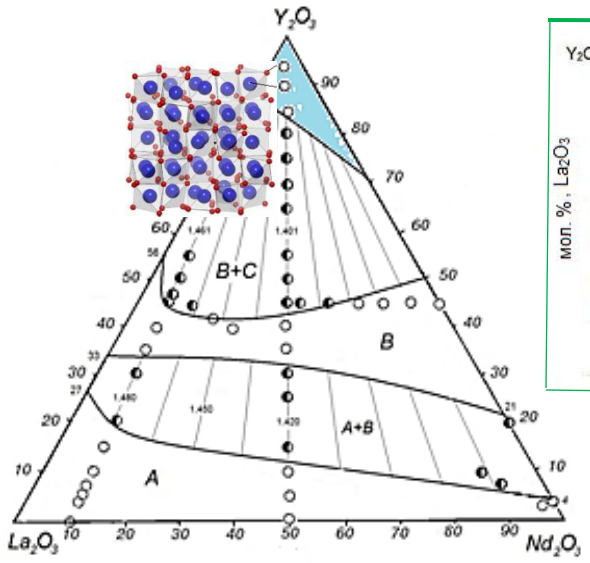
Залежність температури перетворення фази $LaLnO_3$ від концентрації добавки РЗЕ у вузлі А (1), у вузлах А і В (2), у вузлі В (3) у потрійних системах $La_2O_3-Y_2O_3-Ln_2O_3$ ($Ln = Nd, Sm, Eu, Gd, Er, Yb$)



Ізотермічні перерізи діаграм стану систем $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{Nd, Sm, Eu, Gd, Er, Yb}$) при $1500\text{ }^\circ\text{C}$



Ізотермічні перерізи діаграм стану систем $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$) при $1600\text{ }^\circ\text{C}$

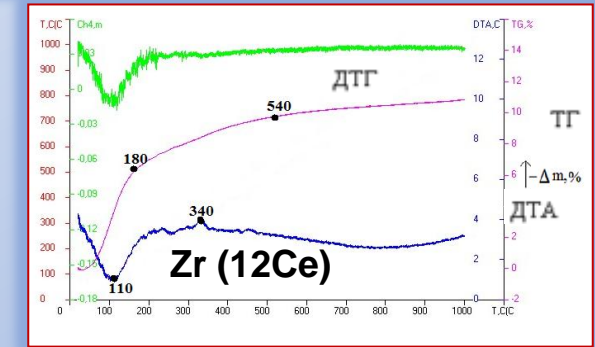
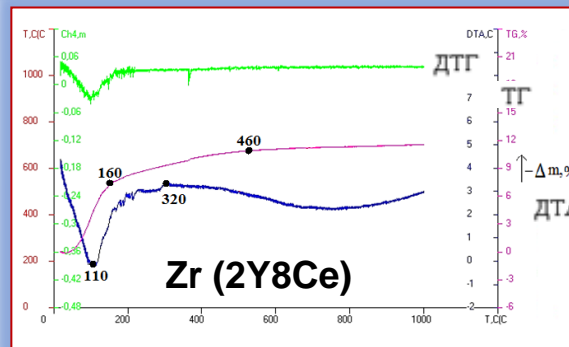
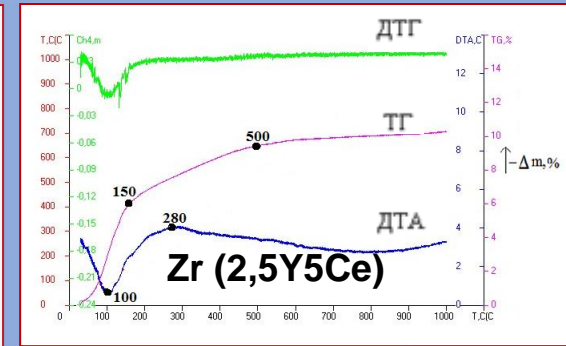
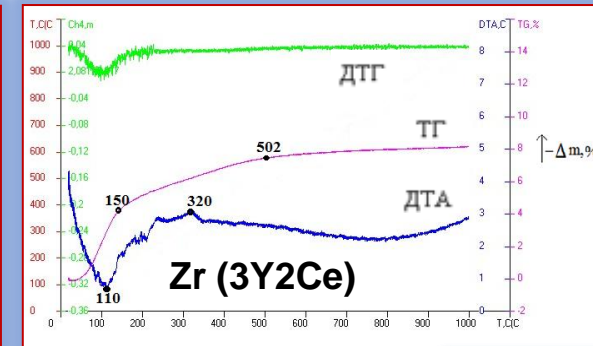
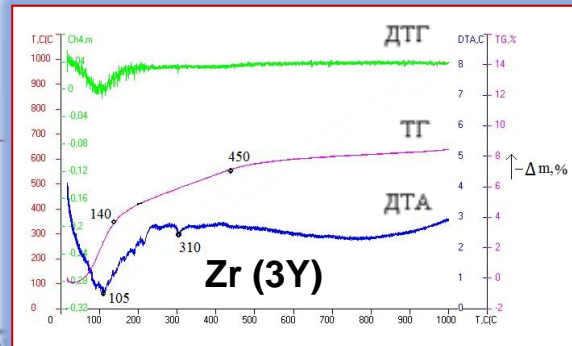
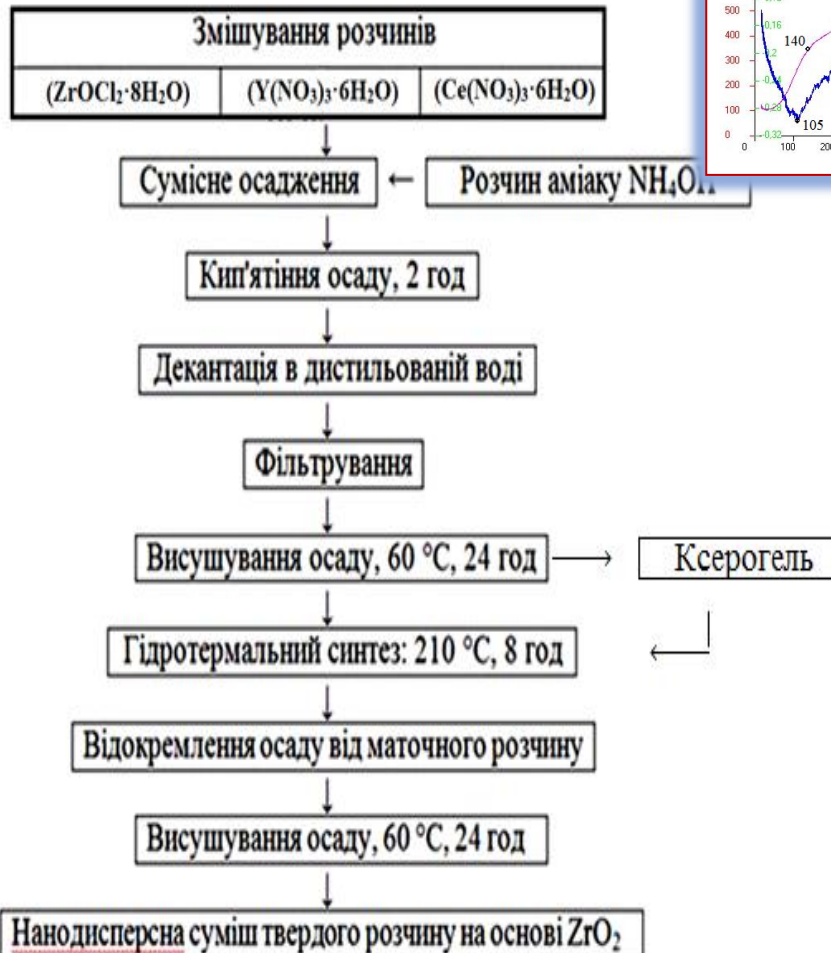


Встановлено закономірності утворення твердих розчинів C-типу оксидів РЗЕ у потрійних системах $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$) при 1500 та $1600\text{ }^\circ\text{C}$: **розчинність Ln_2O_3 у твердих розчинах на основі $\text{C-Y}_2\text{O}_3(\text{Yb}_2\text{O}_3)$ зі зменшенням іонного радіуса Ln^{3+} збільшується.**

Фізико-хімічні властивості вихідних порошків системи $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$

Результати ДТА нанодисперсних порошків системи $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$ після гідротермального синтезу

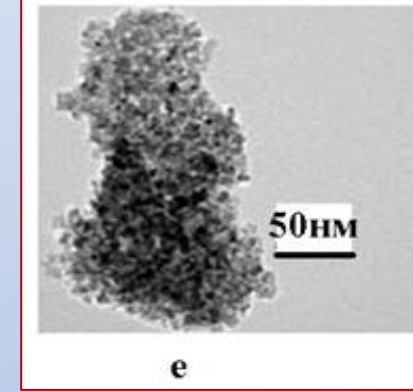
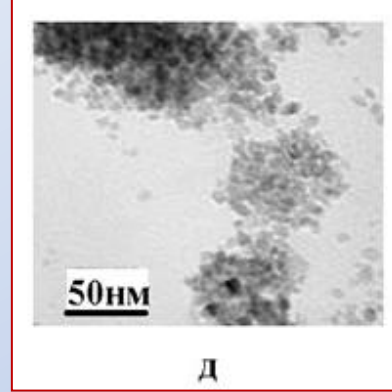
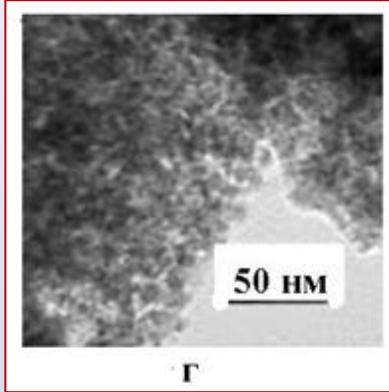
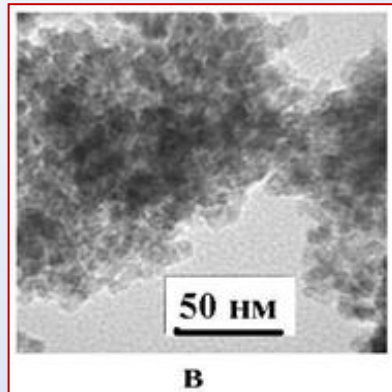
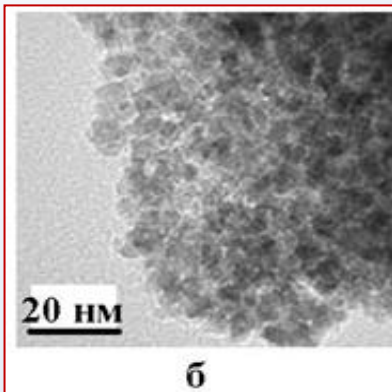
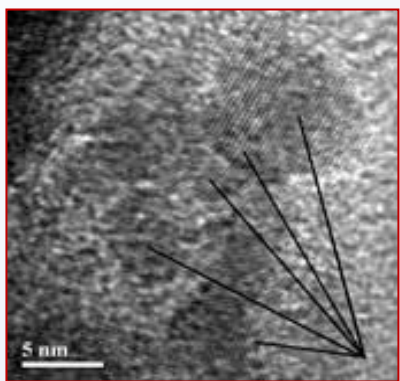
Схема гідротермального синтезу порошків системи $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$



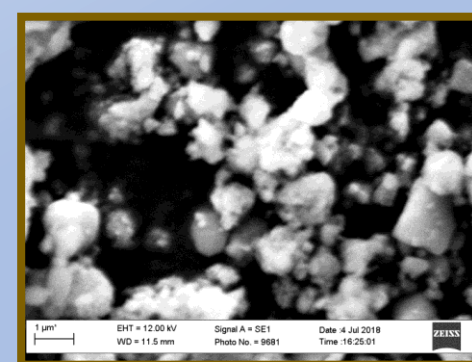
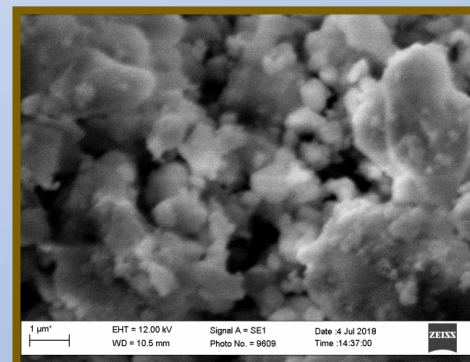
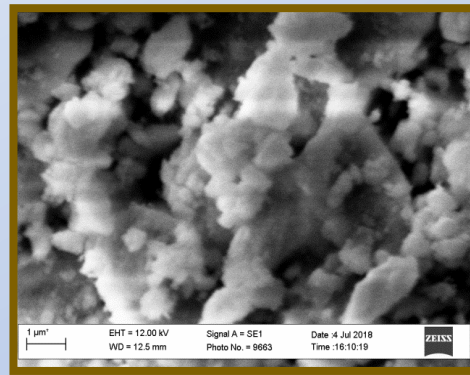
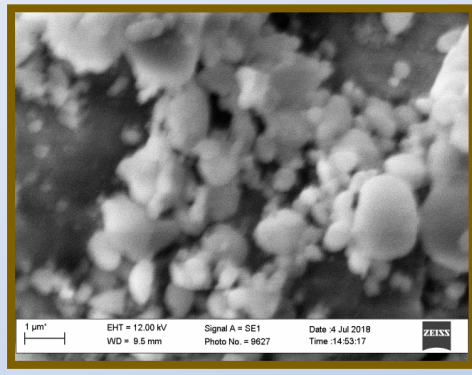
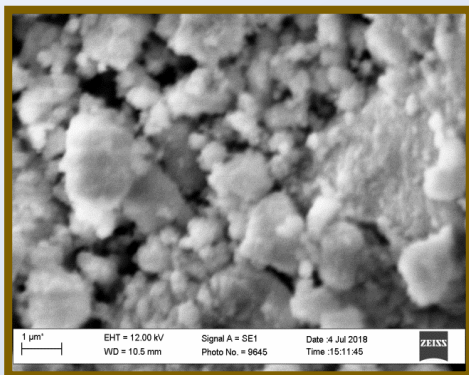
Властивості порошків після гідротермального синтезу

Порошок	Питома поверхня, м ² /г	Фазовий склад/розмір частинок, нм	Параметри кристалічної ґратки	
			a _f , Å	V _f , Å ³
Zr(3Y)	99	F-ZrO ₂ /6	5,126	134,71
Zr(3Y2Ce)	81	F-ZrO ₂ /7	5,143	136,08
Zr(2,5Y5Ce)	110	F-ZrO ₂ /8	5,157	137,14
Zr(2Y8Ce)	93	F-ZrO ₂ /9	5,159	137,32
Zr(12Ce)	106	F-ZrO ₂ /7	5,1161	137,50

Морфологія порошків системи $ZrO_2-Y_2O_3-CeO_2$ після гідротермального синтезу



Морфологія первинних частинок (а) та агрегатів (б–е) : б — $Zr(3Y)$; в — $Zr(3Y_2Ce)$; г — $Zr(2,5Y_5Ce)$; д — $Zr(2Y_8Ce)$; е — $Zr(12Ce)$

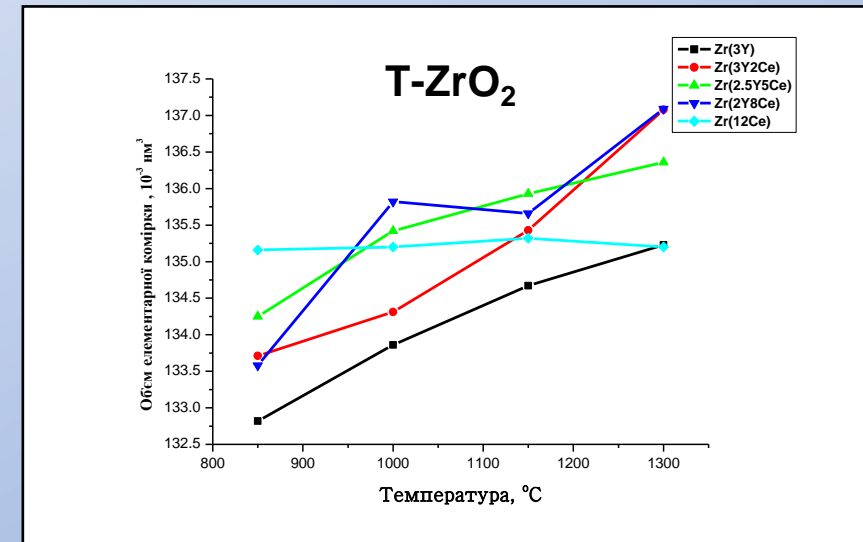
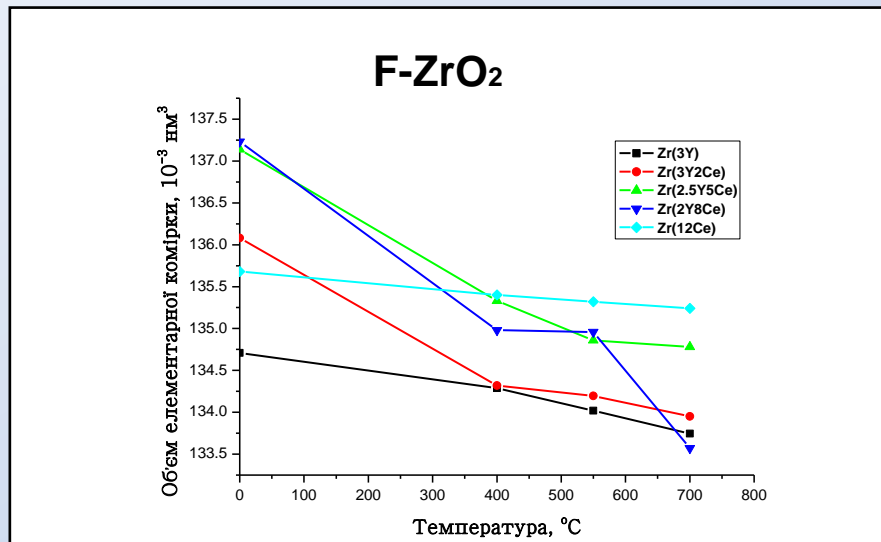


Морфологія агломератів : а– $Zr(3Y)$, б– $Zr(3Y_2Ce)$, в– $Zr(2,5Y_5Ce)$, г– $Zr(2Y_8Ce)$, д– $Zr(12Ce)$

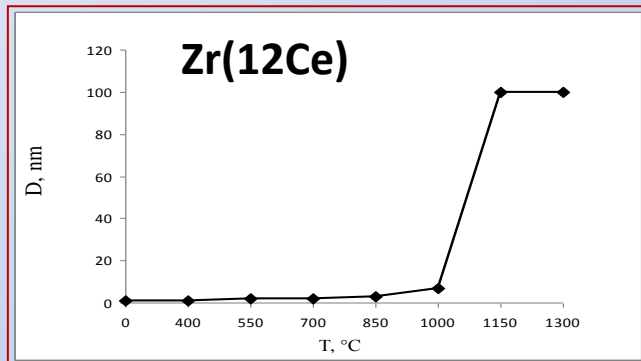
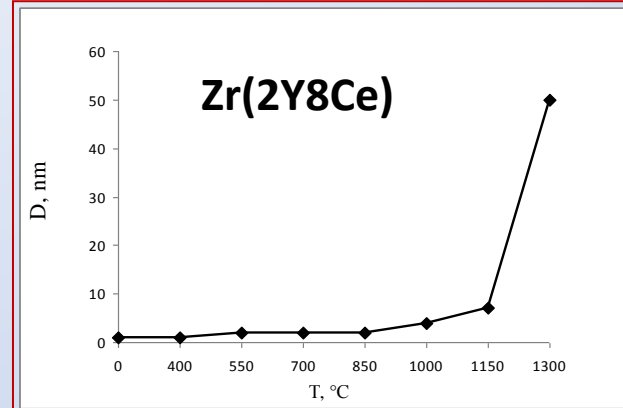
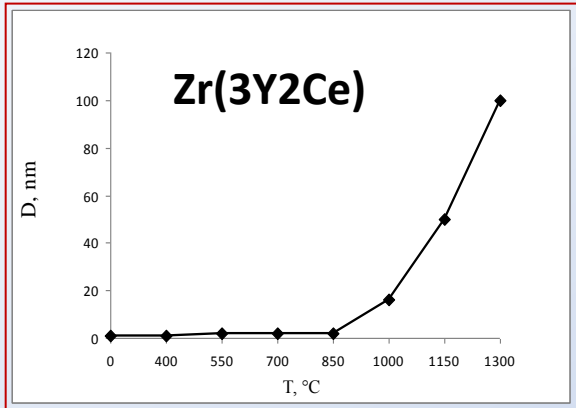
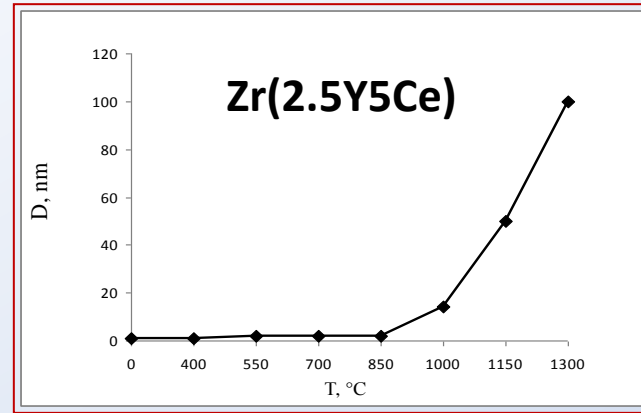
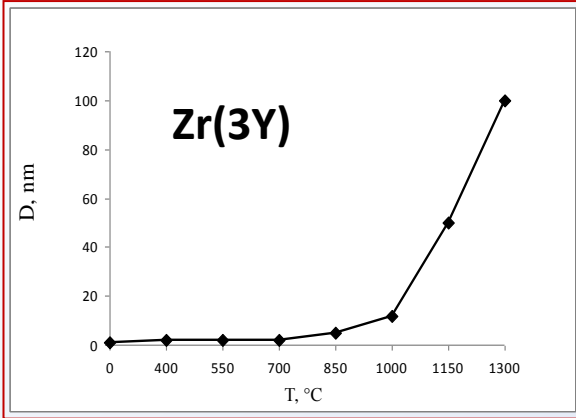
Фазовий склад гідротермальних нанокристалічних порошків в процесі термічної обробки за даними РФА

Склад	Температура термічної обробки, °C							
	Вихідні	400	550	700	850	1000	1150	1300
Zr(3Y)	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂
Zr(3Y2Ce)	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂
Zr(2,5Y5Ce)	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂
Zr(2Y8Ce)	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂
Zr(12Ce)	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	F-ZrO ₂ , сліди T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂	T-ZrO ₂

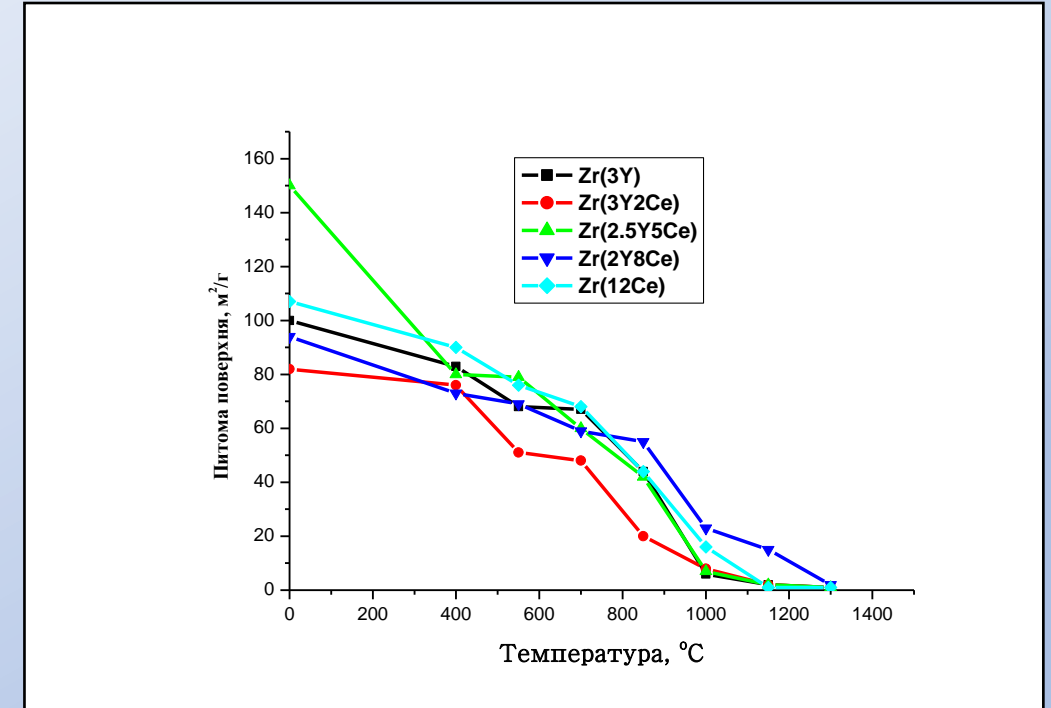
Залежність об'ємів елементарних комірок від температури термічної обробки



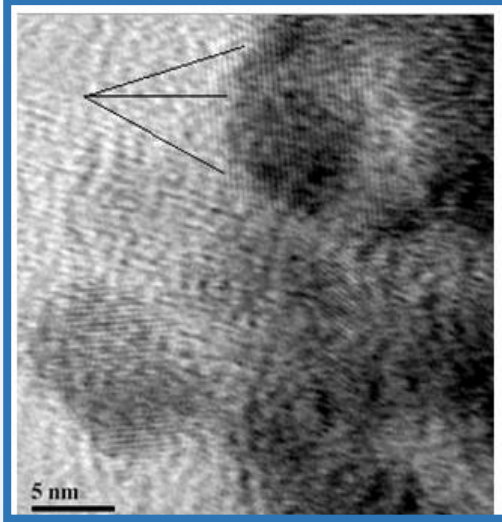
Залежність розмірів первинних частинок порошків від температури термічної обробки



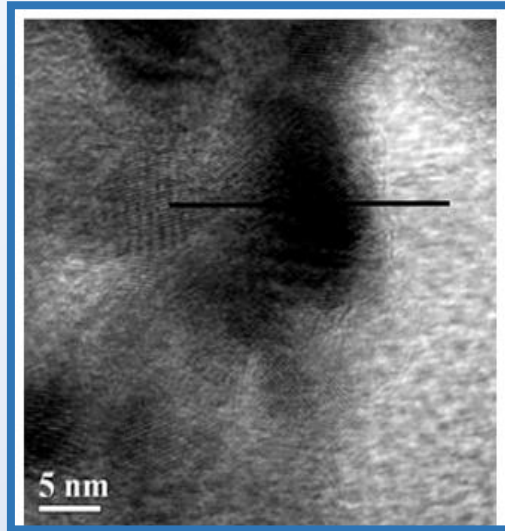
Залежність питомої поверхні первинних частинок порошоків від температури термічної обробки



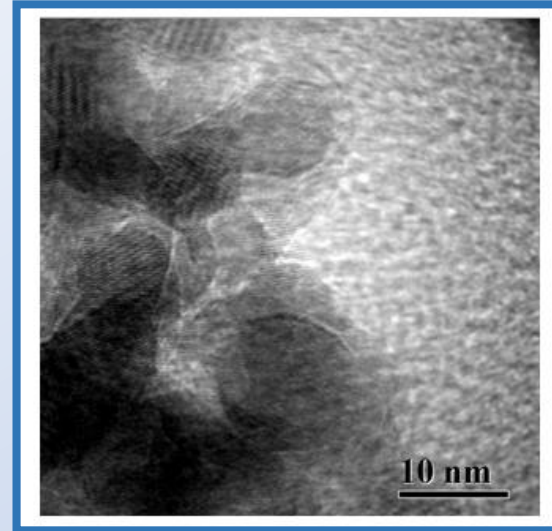
Електронно-мікроскопічні дослідження високої роздільної здатності нанокристалічного порошку $Zr(2Y8Ce)$ після гідротермального синтезу та термічної обробки



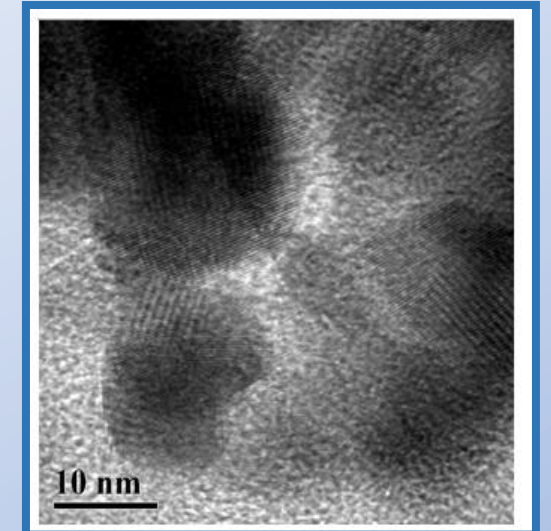
ГТС



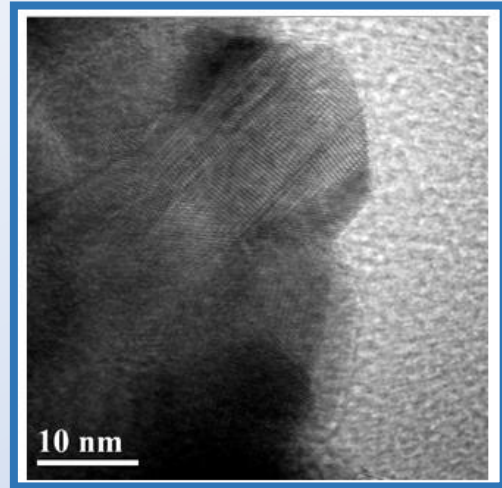
400 °C



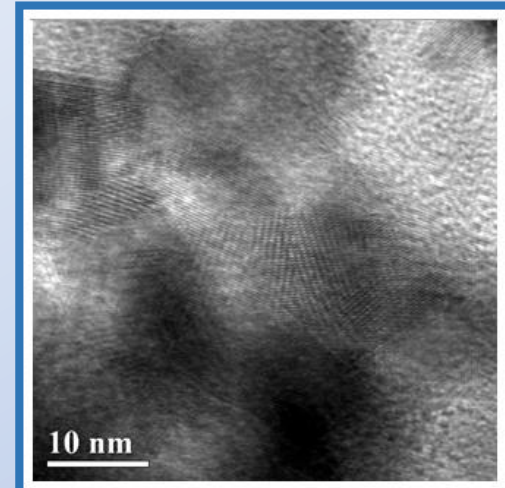
550 °C



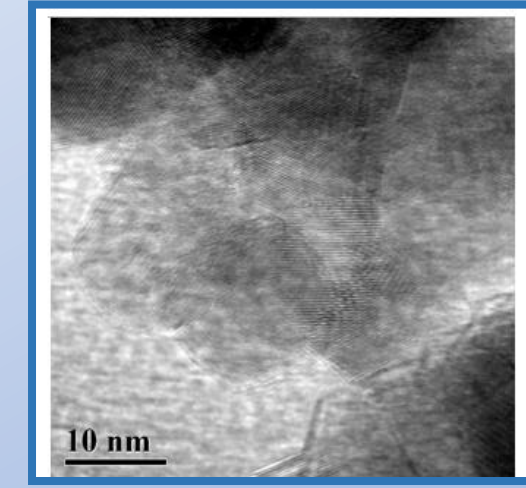
700 °C



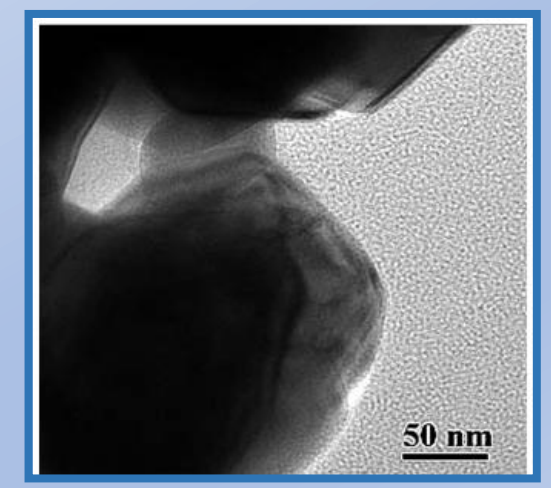
850 °C



1000 °C

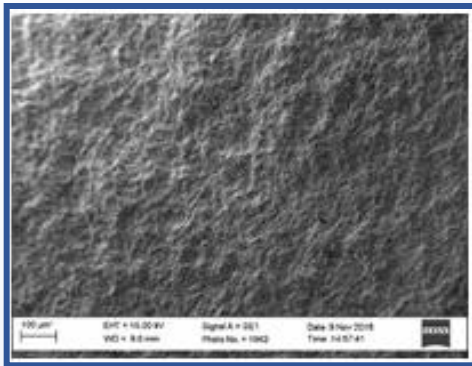


1150 °C

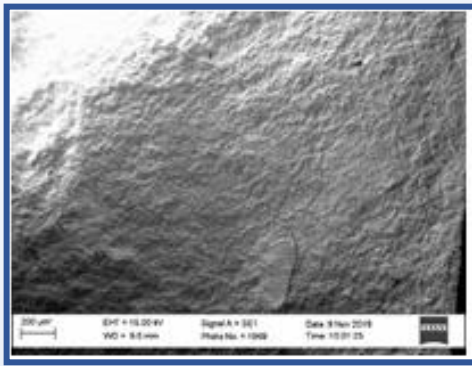


1300 °C

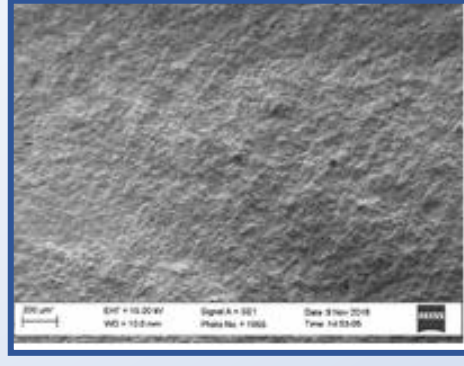
Фрактограми зразків після спікання при 1350 °С



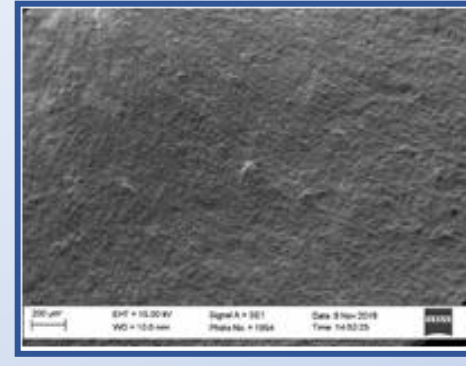
Zr(3Y)



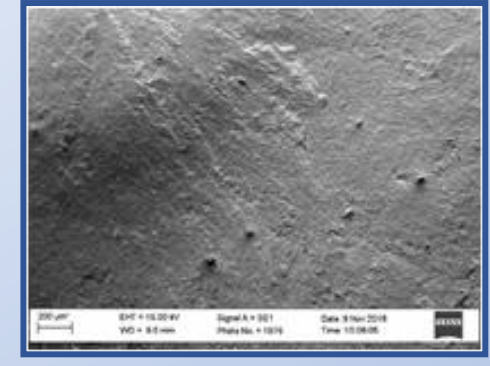
Zr(3Y2Ce)



Zr(2,5Y5Ce)



Zr(2Y8Ce)



Zr(12Ce)

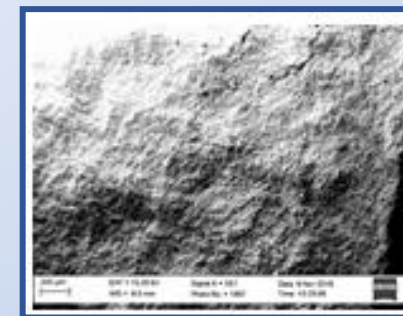
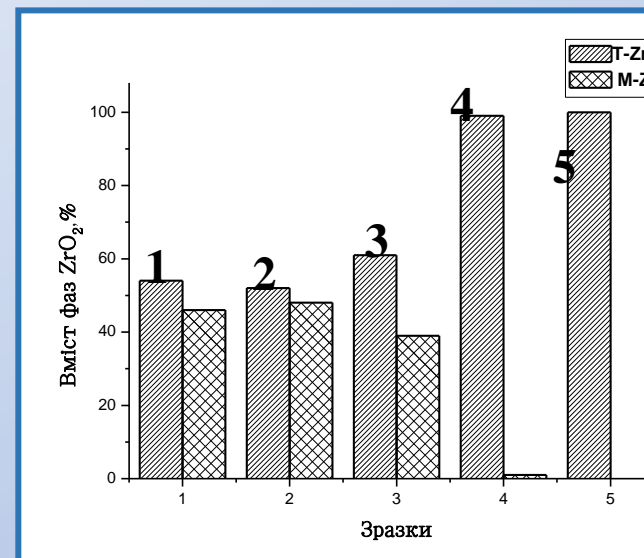
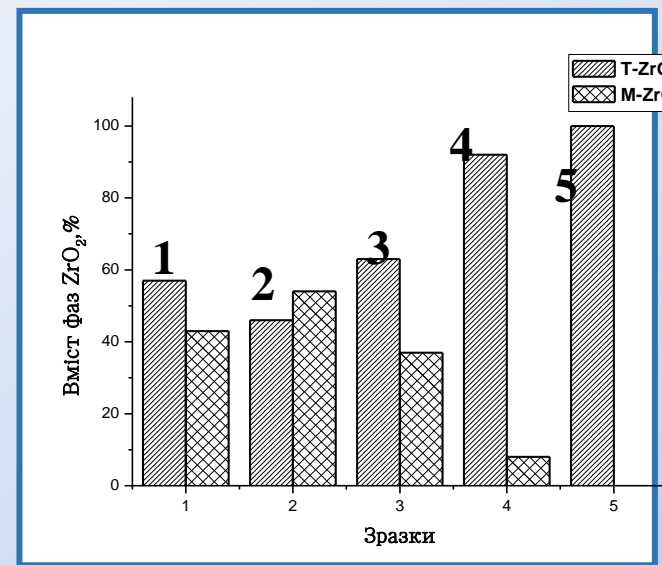
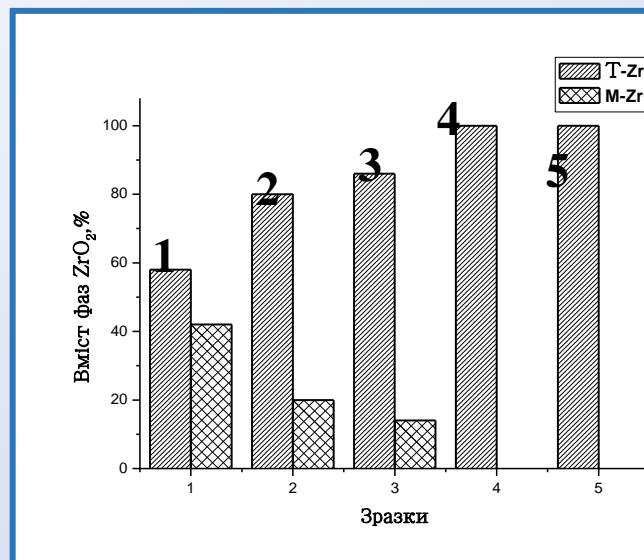
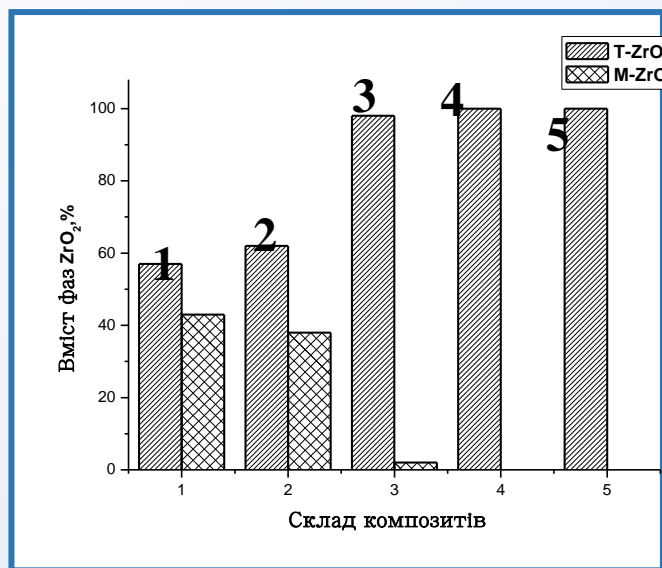
Зміна твердості по Вікерсу та критичного коефіцієнту в'язкості руйнування (K_{Ic}) зразків складів Zr(3Y), Zr(3Y2Ce), Zr(2,5Y5Ce), Zr(2Y8Ce) та Zr(12Ce) після спікання та II старіння

Зразки		HV _{300N} , ГПа		K _{Ic} , МПа м ^{0,5}	
		700, °C	850, °C	700, °C	850, °C
Zr(3Y)	Спікання	9,79	10,46	6,91	6,42
	II старіння	-	-	-	-
Zr(3Y2Ce)	Спікання	8,63	8,56	7,58	7,97
	II старіння	-	-	-	-
Zr(2,5Y5Ce)	Спікання	7,11	6,56	8,33	7,96
	II старіння	6,83	5,77	9,03	8,44
Zr(2Y8Ce)	Спікання	5,5	6,24	8,68	8,35
	II старіння	2,95	3,1	8,14	8,36
Zr(12Ce)	Спікання	5,89	5,35	8,85	8,94
	II старіння	9,96	10,42	6,96	7,25

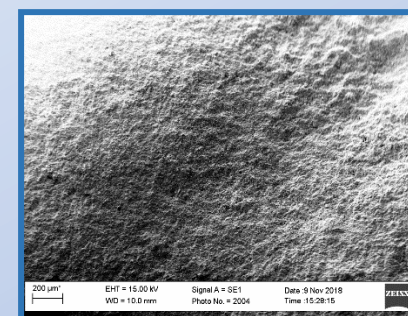
Проведені дослідження показали ефективність використання складів Zr(2Y8Ce) та Zr(12Ce) для створення матеріалів медичного призначення, що характеризуються підвищеною фазовою стабільністю у вологих умовах . **21**

Розподіл фаз в зразках після обробки в гідротермальних умовах 7 (I) та 14 (II) годин 700 °C 850 °C

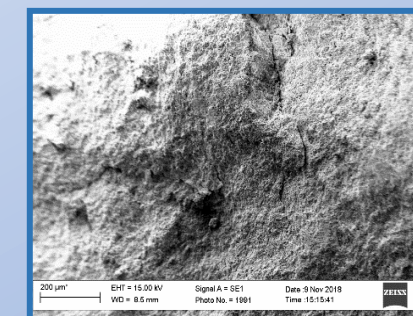
Фрактограми зразків після другого старіння



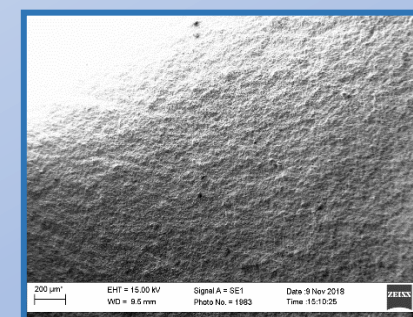
Zr(3Y)



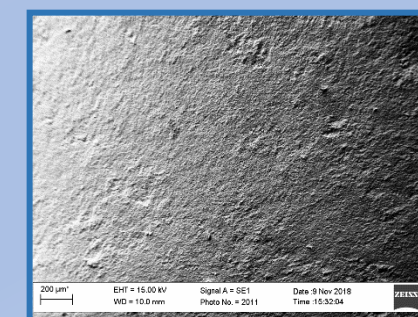
Zr(2,5Y5Ce)



Zr(3Y2Ce)



Zr(2Y8Ce)



Zr(12Ce)

1 – Zr(3Y) , 2 – Zr(3Y2Ce), 3 – Zr(2,5Y5Ce), 4 – Zr(2Y8Ce), 5 – Zr(12Ce)

Наукова новизна отриманих результатів

1. Вивчено фазові рівноваги у подвійній системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ при 1100, 1500 та 1600 °С у всьому інтервалі концентрацій. Встановлено, що для даної системи характерно утворення твердих розчинів на основі А і С кристалічних модифікацій вихідних компонентів та впорядкованої фази із структурою типу перовскиту (LaYbO_3 , R). Визначено границі областей гомогенності, що становлять: для С-фази – 98–100 мол. % Yb_2O_3 (1100–1600 °С), R-фази – 48–56 мол. % Yb_2O_3 (1100, 1500 °С), 48–54 мол. % Yb_2O_3 (1600 °С), А-фази – 4 мол. % Yb_2O_3 (1100 °С) та 9 мол. % Yb_2O_3 (1500, 1600 °С).
2. Вперше вивчені фазові рівноваги у потрійних системах $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ (Ln = Nd, Sm, Eu, Gd, Yb) при 1500 та 1600 °С у всьому інтервалі концентрацій і побудовано відповідні ізотермічні перерізи.
3. Вперше вивчено фазові рівноваги у потрійних системах $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ (Ln =Nd, Sm, Eu, Gd, Er, Yb) при 1500 та 1600 °С у всьому інтервалі концентрацій для розробки оптично прозорої лазерної кераміки на їх основі. Встановлено, що фазові рівноваги в системах на основі оксидів лантану, ітрію та Ln_2O_3 характеризуються наявністю твердих розчинів кубічної форми оксидів РЗЕ, зокрема оксиду ітрію (*ізотропна кераміка*), який не є люмінофором і фази типу перовскиту LaYO_3 , LaErO_3 , LaYbO_3 (*анізотропна кераміка*).
4. Вперше встановлено закономірності утворення твердих розчинів на основі упорядкованої фази типу перовскиту (R). Показано, що область гомогенності R-фази у потрійних системах $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ по ряду від Nd_2O_3 до Gd_2O_3 зменшується від 7 до 2 мол. % Ln_2O_3 тоді, як у системі з Yb_2O_3 утворюється неперервний ряд твердих розчинів на основі упорядкованої фази типу перовскиту, що обумовлено термодинамічною стабільністю фази LaYbO_3 у подвійній системі $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ (2040 °С). З використанням фактора толерантності за Гольдшмідтом проведено оцінку термічної стійкості твердих розчинів на основі фази LaLnO_3 в широкому інтервалі температур і концентрацій для іонів різного розміру. Показано, що утворення твердих розчинів відбувається за механізмом ізовалентного заміщення, а стійкість упорядкованих фаз і твердих розчинів визначається геометричним фактором: великі іони Nd^{3+} заміщують La^{3+} , менші іони РЗЕ церієвого ряду Sm^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} заміщують Y^{3+} і La^{3+} , тоді як іони РЗЕ ітрієвого ряду заміщують виключно Y^{3+} , що відповідає експериментальним даним.
5. Вперше гідротермальним синтезом у лужному середовищі з використанням ксерогелю одержано нанодисперсні порошки твердих розчинів на основі ZrO_2 , стабілізованого оксидами ітрію, церію та сумісно стабілізованого вказаними оксидами.
6. Вивчено вплив складу твердого розчину на основі ZrO_2 на фізико-хімічні властивості одержаних нанодисперсних та нанокристалічних порошків в процесі термічної обробки. Показано, що в порошках утворюється фаза T- ZrO_2 , здатність якої до фазового переходу метастабільний T- $\text{ZrO}_2 \rightarrow \text{M-ZrO}_2$ підвищується при збільшенні вмісту CeO_2 у складі твердого розчину на основі ZrO_2 .
7. Визначено особливості еволюції мікроструктурних складових одержаних порошків. Показано відсутність росту первинних частинок до 1150 °С.
8. Досліджено стійкість до низькотемпературної деградації властивості «старіння» матеріалів, одержаних з порошків, що термічно оброблені за різних умов. Встановлено, що оптимальна температура термічної обробки вихідних порошків – 850 °С.

Практичне значення одержаних результатів

Представлені результати вивчення фазових рівноваг у подвійних $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$, $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ і потрійних $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Yb}$) системах є довідниковим матеріалом та будуть використані для створення технологій отримання нових матеріалів функціонального призначення, зокрема лазерних матриць. Вибраний інтервал температур (1100-1600 °C) відповідає режимам спікання ізотропної та анізотропної прозорої кераміки, і тому важливо встановити чи є тверді розчини і проміжні фази стабільними в цих умовах.

Визначені закономірності зміни властивостей одержаних порошків при термічній обробці в інтервалі 400–1300 °C дозволяють прогнозувати особливості фазових перетворень в трансформаційно-зміцнених матеріалах на основі ZrO_2 конструкційного, у тому числі медичного, призначення. Отримані результати можуть бути використані для розробки матеріалів системи $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--CeO}_2$, що характеризуються підвищеними характеристиками міцності та низькотемпературною фазовою стабільністю.