

УДК 546.02

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ ^{1,2}Тушинова Ю.Л., ^{1,2}Базаров Б.Г., ¹Доржиева С.Г., ¹Логвинова А.В., ^{1,2}Базарова Ж.Г.¹ФГБУН «Байкальский институт природопользования» Сибирского отделения

Российской академии наук, Улан-Удэ, e-mail: jbaz@binm.ru;

²ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет», Улан-Удэ

Настоящая статья посвящена исследованию фазовых равновесий в субсолидусной области системы $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ методом рентгенофазового анализа. Изучена возможность твердофазного синтеза новых молибдато-вольфраматов замещением молибдат-иона на вольфрамат-ион. В системе установлено образование непрерывного ряда твердых растворов изоструктурных фаз $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_{9-x}(\text{WO}_4)_x$, принадлежащих к структурному типу $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ (тригональная сингония, пр.гр. $R\bar{3}c$). Анализ дифрактограммы синтезированного двойного вольфрамата $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ позволил сделать вывод об его изоструктурности с аналогичными молибдатами $\text{Ln}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ ($\text{Ln} = \text{La-Tb}$). Методом Ритвельда уточнена структура данного вольфрамата. Соединение кристаллизуется в тригональной сингонии с пространственной группой $R\bar{3}c$, с параметрами элементарной ячейки: $a = 9,8912(2)$, $c = 59,3776(2)$ Å, $V = 5030,9(1)$ Å³, $Z = 6$. Кристаллическая структура исследованного вольфрамата относится к структурам каркасного типа и построена из трех видов полиэдров: WO_4 -тетраэдров, ZrO_6 -октаэдров и девятивершинников LaO_9 . Средние расстояния W-O и средние значения углов O-W-O имеют близкие значения к общепринятым для координационного числа W, равного 4. Средние расстояния Zr-O близки между собой и с расстояниями Zr-O в структурах, где атом циркония находится также в октаэдрической координации. Определены оптимальные условия синтеза двойных молибдато-вольфраматов в зависимости от концентрации WO_3 в исходном образце, температуры и длительности отжига. Для увеличения степени замещения молибдат-ионов на вольфрамат-ион требуются более высокие значения температуры и продолжительности отжига. В результате варьирования условий синтеза были получены твердые растворы, вычислены параметры элементарных ячеек синтезированных фаз. При сравнении полученных значений выявлено увеличение значений a , c и V по ряду с ростом x .

Ключевые слова: кристаллическая структура, двойной вольфрамат, молибдато-вольфраматы, твердые растворы

PHASE FORMATION IN THE SYSTEM $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ ^{1,2}Tushinova Yu.L., ^{1,2}Bazarov B.G., ¹Dorzhiyeva S.G., ¹Logvinova A.V., ^{1,2}Bazarova Yu.G.¹Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, e-mail: jbaz@binm.ru;²Buryat State University, Ulan-Ude

This article is devoted to the investigation of phase equilibria in the subsolidus region of the $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ system by the way of X-ray phase analysis. The possibility of solid-phase synthesis of new molybdate-tungstates by the replacement of molybdate ion with tungstate ion is studied. The formation of a continuous series of solid solutions of the isostructural phases in the system $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_{9-x}(\text{WO}_4)_x$, belonging to the structural type $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ (trigonal system, $R\bar{3}c$) is established. Analysis of the diffractogram of the synthesized double tungstate $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ made it possible to conclude that it is isostructural with analogous molybdates $\text{Ln}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ ($\text{Ln} = \text{La-Tb}$). The structure of this tungstate is refined by Ritveld method. The compound crystallizes in the trigonal system with the space group $R\bar{3}c$, the unit cell parameters: $a = 9,8912(2)$, $c = 59,3776(2)$ Å, $V = 5030,9(1)$ Å³, $Z = 6$. The crystal structure of the investigated tungstate refers to structures of the framework type and is constructed from three types of polyhedra: WO_4 -tetrahedra, ZrO_6 -octahedra and nine-vertex LaO_9 . The average distances W-O and the average values of the O-W-O angles have similar values to the conventional values for the coordination number W equal to 4. The mean Zr-O distances are close to each other and with Zr-O distances in structures where the zirconium atom is also in octahedral coordination. Optimal conditions for the synthesis of double molybdate-tungstates were determined depending on the WO_3 concentration in the initial sample, including the temperature and annealing time. For an increase in the degree of substitution of molybdate ions to tungstate ions higher temperatures and annealing time are required. The solid solutions were obtained as a result of varying of synthesis conditions, the unit cells parameters of synthesized phases were calculated. When comparing the values obtained, we found an increase in the values of a , c , and V along a series with increasing x .

Keywords: crystal structure, double tungstate, molybdate-tungstates, solid solutions

Молибдаты, содержащие редкоземельные элементы (РЗЭ), давно привлекают внимание исследователей. В результате накоплен большой объем сведений о молибдатах с разными вариациями катионного состава с РЗЭ. Они обладают целым набором важных функциональных свойств, в том числе оптических [1–3]. В то же время комбинации различных катионов и анионов, их варьирование открывают возможности для

получения новых перспективных материалов. К примеру, получены новые сложные анионзамещенные молибдато-, арсенато- и ванадато-фосфаты разных составов [4–7]. Одним из способов поиска новых многокомпонентных фаз является изучение фазовых равновесий в соответствующих системах. При этом системы, содержащие структурные или формульные аналоги, представляют особый интерес, поскольку в них можно

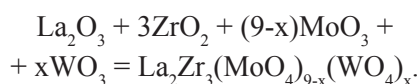
ожидать формирование широких областей твердых растворов.

Ранее было выявлено образование двойных молибдатов $\text{Ln}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$, $\text{Ln} = \text{La-Tb}$ [8] и вольфрамата $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ [9]. Настоящая работа посвящена исследованию фазовых равновесий в субсолидусной области системы $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных реагентов были использованы: La_2O_3 (99,9% осн. вещ.), ZrO_2 , полученный прокаливанием $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а.), MoO_3 (ч.д.а.), WO_3 (ч.). Реакционные смеси при исследовании твердофазных взаимодействий готовили тщательным смешиванием исходных оксидов, которые предварительно перед взвешиванием прокаливались.

Была приготовлена серия образцов, состав которых рассчитывали исходя из формулы $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_{4,9-x})(\text{WO}_4)_x$, с шагом 5 мол. %, по реакциям:



Отжиг образцов проводили в фарфоровых тиглях на воздухе в муфельной печи. Начальная температура отжига составляла 450°C . Конечная температура синтеза варьировалась в интервале $750-1000^\circ\text{C}$ в зависимости от содержания оксида вольфрама. Продолжительность изотермической выдержки варьировалась от 20 до 50 часов. В процессе синтеза образцы многократно перетирали в агатовой ступке с добавлением этилового спирта.

Достижение равновесия контролировали рентгенографически на дифрактометре Advance D8 фирмы Bruker AXS ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, графитовый монохроматор).

Параметры элементарных ячеек определяли по однозначно проиндексированным линиям порошковых рентгенограмм двойных молибдато-вольфраматов с использованием пакета программ TOPAS 4.2. Для уточнения кристаллической структуры методом Ритвельда использовался массив данных, полученный из порошковой рентгенограммы, снятой в интервале углов от 10 до 100° (2θ). Уточнение структуры методом Ритвельда проводилось в программе TOPAS 4.2.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ дифрактограммы синтезированного двойного вольфрамата $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$ позволил сделать вывод об его изоструктурности с аналогичными молибдатами

$\text{Ln}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ ($\text{Ln} = \text{La-Tb}$). Соединения кристаллизуются в тригональной сингонии с пространственной группой $R\bar{3}c$, $Z = 6$. Определение кристаллической структуры данной группы соединений было проведено на неодим-циркониевом представителе [10].

В качестве исходной модели для уточнения структуры методом Ритвельда использовали координаты атомов в структуре $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$. Результаты уточнения приведены в табл. 1–3. Кристаллическая структура исследованного вольфрамата относится к структурам каркасного типа и построена из трех видов полиэдров: WO_4 -тетраэдров, ZrO_6 -октаэдров и девятивершинников LaO_9 (рис. 1). Совпадение теоретического и экспериментального профилей рентгенограммы, которого удалось добиться в рамках данного исследования, иллюстрирует рис. 2.

Средние расстояния W-O ($\langle \text{W-O} \rangle = 1,736-1,827 \text{ \AA}$) и средние значения углов O-W-O имеют близкие к общепринятым для КЧ (W) = 4 (табл. 3) значения. Средние расстояния Zr-O, равные $2,095(2)$ и $2,097(2) \text{ \AA}$ близки между собой и с расстояниями Zr-O в структурах, где атом циркония находится также в октаэдрической координации.

Девять атомов кислорода образуют вокруг лантана трехшпачную тригональную призму с расстояниями La-O, изменяющимися в интервале $2,462(2)-2,548(2) \text{ \AA}$.

Результаты РФА образцов молибдато-вольфраматов показали, что их фазовый состав зависит от температуры отжига и содержания вольфрама. Образование однофазных молибдато-вольфраматов со структурой двойного молибдата $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ в температурном интервале $450-850^\circ\text{C}$ ограничено составами $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_{4,9-x})(\text{WO}_4)_x$ с $x \leq 2,25$. При этом для получения однофазных образцов потребовалась различная продолжительность отжига. Так, например, для образца с содержанием $x = 0,45$ необходимо затратить 15 часов при одной температуре, а для образца с $x = 1,35$ уже 50 часов при той же самой температуре. Ширина области гомогенности увеличивается до $x = 3,15$ при повышении температуры до 880°C . На дифрактограммах образцов $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_{4,9-x})(\text{WO}_4)_x$, $x \geq 4,5$, отожженных при 850°C , помимо рефлексов отражения целевой фазы присутствовали рефлексы отражения триоксида вольфрама WO_3 и поливольфрамата лантаноида $\text{La}_{10}\text{W}_{22}\text{O}_{81}$. В процессе дальнейшего ступенчатого повышения температуры до 950°C смеси полностью реагировали с образованием монофазных продуктов.

Таблица 1

Результаты уточнения структуры $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$

Характеристика	Значение
Пр. гр.	$R\bar{3}c$
Z	6
Параметры элементарной ячейки:	
a, Å	9,8912(2)
c, Å	59,3776(15)
V, Å ³	5030,9(1)
$d_{\text{выч.}}$, г/см ³	5,509

Таблица 2

Координаты базисных атомов структуры $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$

Атом	x	y	z
Nd	2/3	1/3	0,0291(2)
Zr(1)	0	0	0
Zr(2)	1/3	2/3	0,0713(3)
W(1)	0,0962(1)	0,7254(1)	0,0248(7)
W(2)	0,2798(1)	0,2798(1)	1/4
O(1)	-0,0999(1)	0,5951(1)	0,0299(1)
O(2)	0,1563(1)	0,6594(1)	0,0018(1)
O(3)	0,2101(1)	0,7356(1)	0,0494(1)
O(4)	0,1214(1)	0,9174(1)	0,0192(1)
O(5)	0,2935(1)	0,4680(1)	0,2445(1)
O(6)	0,1623(1)	0,1924(1)	0,2734(1)

Таблица 3

Основные межатомные расстояния (Å) и углы (град) в структуре $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$

W(1)-тетраэдр		W(2)-тетраэдр	
W(1)–O(1)	1,736(7)	W(2)–O(6)	1,738(5)×2
W(1)–O(2)	1,741(9)	W(2)–O(5)	1,827(2)×2
W(1)–O(3)	1,816(9)	⟨W–O⟩	1,783(4)
W(1)–O(4)	1,818(7)		
⟨W–O⟩	1,778(8)	O(6)–W(2)–O(6)	108,7(1)
		O(6)–W(2)–O(5)	107,3(1)×2
O(1)–W(1)–O(2)	108,8(1)	O(6)–W(2)–O(5)	109,8(1)×2
O(1)–W(1)–O(3)	109,4(1)	O(5)–W(2)–O(5)	113,7(1)
O(2)–W(1)–O(3)	109,4(1)	⟨O–W–O⟩	109,4(1)
O(1)–W(1)–O(4)	109,0(1)		
O(2)–W(1)–O(4)	110,7(1)	La-полиэдр	
O(3)–W(1)–O(4)	109,4(1)	La–O(1)	2,462(2)×3
⟨O–W–O⟩	109,5(1)	La–O(2)	2,512(9)×3
Zr(1)-октаэдр		La–O(6)	2,548(9)×3
Zr(1)–O(4)	2,095(3)×6	⟨La–O⟩	2,507(7)
Zr(2)-октаэдр			
Zr(2)–O(5)	2,079(9)×3		
Zr(2)–O(3)	2,115(9)×3		
⟨Zr–O⟩	2,097(9)		

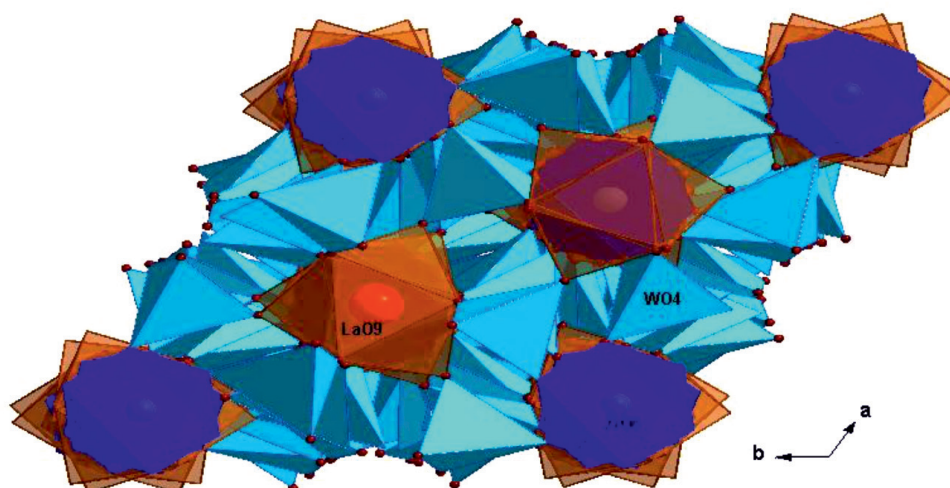


Рис. 1. Проекция структуры $La_2Zr_3(WO_4)_9$ на плоскость $[001]$

Таблица 4

Кристаллографические характеристики $La_2Zr_3(MoO_4)_{9-x}(WO_4)_x$

Состав образца	a , Å	c , Å	V , Å ³
$La_2Zr_3(MoO_4)_9$	9,8463(2)	59,097(2)	4961,8(1)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{8,55}(WO_4)_{0,05}$	9,8503(1)	59,138(2)	4969,3(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{8,1}(WO_4)_{0,9}$	9,8510(2)	59,182(2)	4973,8(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{7,65}(WO_4)_{1,35}$	9,8580(1)	59,183(2)	4980,9(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{7,2}(WO_4)_{1,8}$	9,8612(2)	59,195(2)	4985,1(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{6,75}(WO_4)_{2,25}$	9,8623(2)	59,205(2)	4987,0(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{6,3}(WO_4)_{2,7}$	9,8622(2)	59,2457(2)	4990,4(1)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{5,85}(WO_4)_{3,15}$	9,8695(2)	59,2481(2)	4998,0(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{5,4}(WO_4)_{3,6}$	9,8702(2)	59,2714(2)	5000,7(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{4,95}(WO_4)_{4,05}$	9,8706(2)	59,2714(2)	5001,2(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{4,5}(WO_4)_{4,5}$	9,8763(2)	59,3058(2)	5011,6(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{4,05}(WO_4)_{4,95}$	9,8764(2)	59,3118(2)	5011,7(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{3,6}(WO_4)_{5,4}$	9,8781(2)	59,3203(2)	5012,8(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{3,15}(WO_4)_{5,85}$	9,8807(2)	59,3405(2)	5017,2(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{2,7}(WO_4)_{6,3}$	9,8824(2)	59,3484(2)	5019,5(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{2,25}(WO_4)_{6,75}$	9,8853(2)	59,3600(2)	5028,8(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{1,8}(WO_4)_{7,2}$	9,8881(2)	59,3609(2)	5026,9(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{1,35}(WO_4)_{7,65}$	9,8890(2)	59,3669(2)	5027,3(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{0,9}(WO_4)_{8,1}$	9,8893(2)	59,3722 (2)	5028,6(2)
$La_2Zr_3(MoO_4)_{0,45}(WO_4)_{8,55}$	9,8906(2)	59,3736(2)	5030,1(2)
$La_2Zr_3(WO_4)_9$	9,8912(2)	59,3776(2)	5030,9(1)

В результате варьирования температуры и продолжительности отжига был получен ряд непрерывных твердых растворов молибдато-вольфраматов $La_2Zr_3(MoO_4)_{9-x}(WO_4)_x$. Вычисленные значения параметров элементарных

ячеек синтезированных фаз приведены в табл. 4. При сравнении полученных значений параметров элементарных ячеек можно констатировать, что наблюдается увеличение значений a , c и V по ряду.

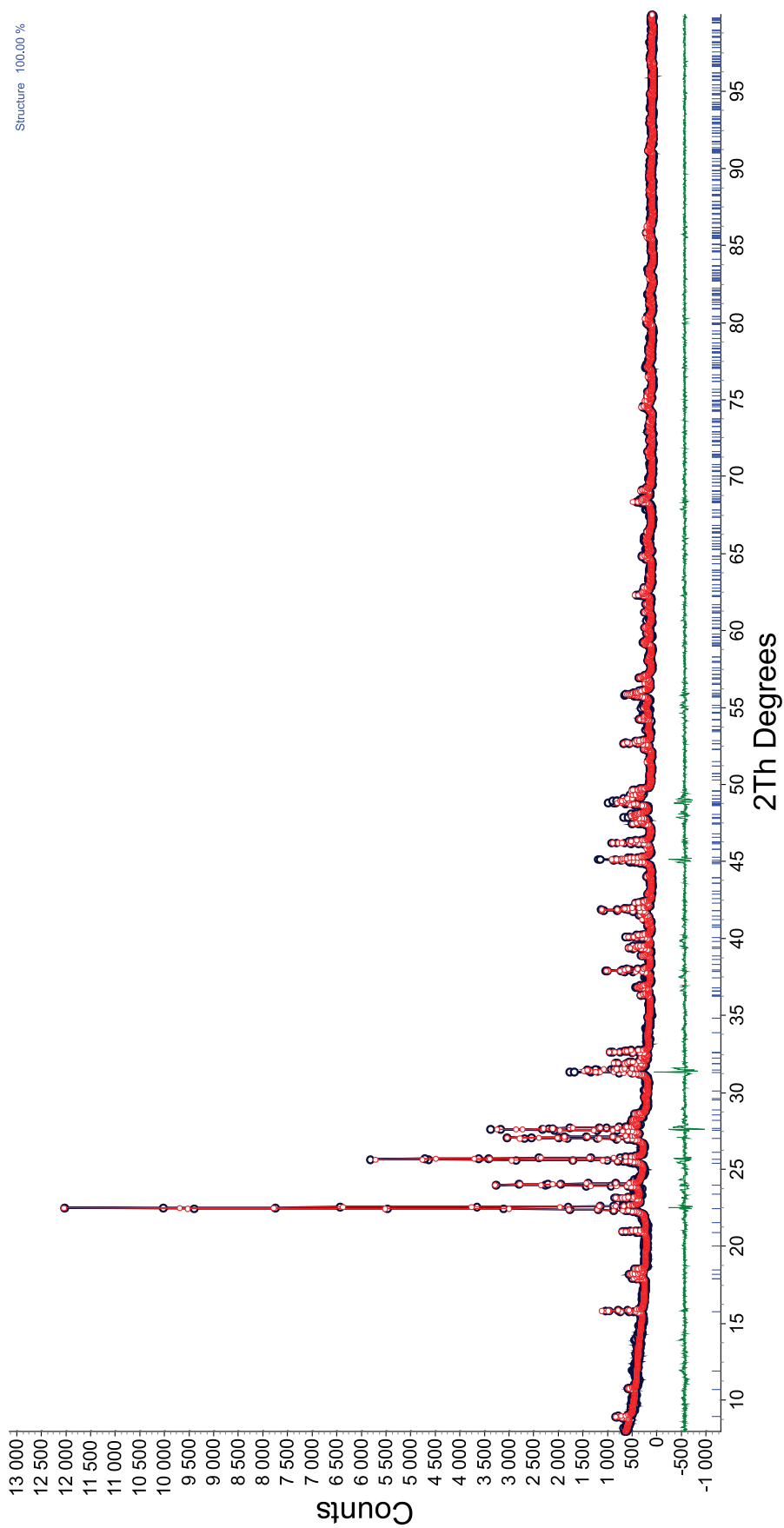


Рис. 2. Фрагменты экспериментальной, расчетной и разностной дифрактограмм для $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$

Заключение

Изучены фазовые равновесия в субсольдусной области системы $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9 - \text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$. Близость ионных радиусов ионов молибдена и вольфрама позволила получить ряд новых молибдато-вольфрамов $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_{9-x}(\text{WO}_4)_x$, принадлежащих к структурному типу $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$. Оптимизированы условия получения двойных молибдато-вольфрамов и определены их кристаллографические характеристики. Методом Ритвельда уточнена структура вольфрамата $\text{La}_2\text{Zr}_3(\text{WO}_4)_9$, кристаллизующегося в тригональной сингонии с пространственной группой $R\bar{3}c$, с параметрами элементарной ячейки: $a = 9,8912(2)$, $c = 59,3776(2) \text{ \AA}$, $V = 5030,9(1) \text{ \AA}^3$, $Z = 6$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-43-030861 p_a.

Список литературы

1. Glorieux Benoit, Jubera Véronique, Apeceixborde Arnaud, Garcia Alain. Luminescence properties of tungstates and molybdates phosphors: Illustration on $\text{ALn}(\text{MO}_4)_2$ compounds (A – alkaline cation, Ln – lanthanides, M = W, Mo) // Solid State Sciences. – 2011. – vol. 13. – P. 460–467.
2. Спектроскопия кристаллов $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$: Tm^{3+} и $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2$: Tm^{3+} – перспективных лазерных материалов / Ю.К. Воронко [и др.] // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 9. – С. 1547–1551.
3. Раскина М.В. Катион-дефицитные соединения со структурой шеелита и их свойства: дис. ... канд. хим. наук. – Москва, 2014. – 137 с.
4. Рюмин М.А. Молибдат-фосфат калия-европия / М.А. Рюмин, В.В. Пухкая, Л.Н. Комиссарова // Журнал неорганической химии. – 2010. – Т. 55, № 7. – С. 1078–1081.
5. Синтез и свойства $\text{LiZr}_2(\text{AsO}_4)_3$ и $\text{LiZr}_2(\text{AsO}_4)_x(\text{PO}_4)_{3-x}$ / В.И. Петков [и др.] // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 285.
6. Синтез и строение ванадат-фосфатов циркония и щелочных металлов / В.И. Петков [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2013. – Т. 58, № 9. – С. 1139.
7. Разработка и создание насыпных и мембранных катализаторов на основе фосфатов и молибдатов каркасного

строения / В.И. Петков [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2010. – Т. 83, № 10. – С. 1591.

8. Bazarova J.G., Tushinova Yu.L., Bazarov B.G., Dorzhieva S.G. Double molybdates of rare earth elements and zirconium // Russ. Chem. Bull. – 2017. – vol. 66, № 4. – P. 587–592.

9. Фазовые равновесия в системах $\text{Rb}_2\text{WO}_4\text{-Ln}_2(\text{WO}_4)_3\text{-Zr}(\text{WO}_4)_2$ (Ln = La, Tb) / Ю.Л. Тушинова [и др.] // Вестник БГУ. – 2015. – Вып. 3. Химия, физика. – С. 8–11.

10. Новый тип смешанного каркаса в кристаллической структуре двойного молибдата $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ / Р.Ф. Клевцова [и др.] // Журн. структур. химии. – 2000. – Т. 41, № 2. – С. 343–348.

References

1. Glorieux Benoit, Jubera Véronique, Apeceixborde Arnaud, Garcia Alain. Luminescence properties of tungstates and molybdates phosphors: Illustration on $\text{ALn}(\text{MO}_4)_2$ compounds (A – alkaline cation, Ln – lanthanides, M = W, Mo) // Solid State Sciences. 2011. vol. 13. pp. 460–467.
2. Spektroskopija kristallov $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$: Tm^{3+} i $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2$: Tm^{3+} – perspektivnyh lazernyh materialov / Ju.K. Voronko [i dr.] // Fizika tverdogo tela. 2008. T. 50, vyp. 9. pp. 1547–1551.
3. Raskina M.V. Kation-deficitnye soedinenija so strukturoj sheelita i ih svojstva: dis. ... kand. him. nauk. Moskva, 2014. 137 p.
4. Rjumin M.A. Molibdat-fosfat kalija-evropija / M.A. Rjumin, V.V. Puhkaja, L.N. Komissarova // Zhurnal neorganicheskoj himii. 2010. T. 55, no. 7. pp. 1078–1081.
5. Sintez i svojstva $\text{LiZr}_2(\text{AsO}_4)_3$ i $\text{LiZr}_2(\text{AsO}_4)_x(\text{PO}_4)_{3-x}$ / V.I. Petkov [i dr.] // Neorganicheskie materialy. 2014. T. 50, no. 3. pp. 285.
6. Sintez i stroenie vanadat-fosfatov cirkonija i shhelochnyh metallov / V.I. Petkov [i dr.] // Zhurnal neorganicheskoj himii. 2013. T. 58, no. 9. pp. 1139.
7. Razrabotka i sozdanie nasypnyh i membrannyh katalizatorov na osnove fosfatov i molibdatov karkasnogo stroenija / V.I. Petkov [i dr.] // Zhurnal prikladnoj himii. 2010. T. 83, no. 10. pp. 1591.
8. Bazarova J.G., Tushinova Yu.L., Bazarov B.G., Dorzhieva S.G. Double molybdates of rare earth elements and zirconium // Russ. Chem. Bull. 2017. vol. 66, no. 4. pp. 587–592.
9. Fazovye ravnovesija v sistemah $\text{Rb}_2\text{WO}_4\text{-Ln}_2(\text{WO}_4)_3\text{-Zr}(\text{WO}_4)_2$ (Ln = La, Tb) / Ju.L. Tushinova [i dr.] // Vestnik BGU. 2015. Vyp. 3. Himija, fizika. pp. 8–11.
10. Novyj tip smeshannogo karkasa v kristallicheskoj strukture dvojnogo molibdata $\text{Nd}_2\text{Zr}_3(\text{MoO}_4)_9$ / R.F. Klevцова [i dr.] // Zhurn. struktur. himii. 2000. T. 41, no. 2. pp. 343–348.