

УДК 546.65:549.75

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ И ПОВЕДЕНИЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ ВАНАДАТОВ КАЛЬЦИЯ, ЛАНТАНОИДОВ И ЦИРКОНИЯ СО СТРУКТУРОЙ ЦИРКОНА

© 2023 г. А. К. Корытцева¹*, А. И. Орлова¹, Н. С. Литонова¹, А. В. Нохрин¹, А. А. Мурашов¹,
К. Е. Сметанина¹, В. А. Турченко², А. И. Бескровный², Е. Ю. Боровикова³, Д. М. Коршунов⁴

¹Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022 Россия

²Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
геологический факультет, Ленинские горы, 1, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

⁴Геологический институт Российской академии наук,
Пыжевский пер, 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

*e-mail: koak@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2022 г.

После доработки 13.03.2023 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

Методом соосаждения получены простые LnVO_4 и тройные $\text{CaLnZr}(\text{VO}_4)_3$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$) ортованадаты лантаноидов; твердый раствор $\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}\text{VO}_4$, моделирующий состав фракции лантаноидов РАО, имеющие структурный тип циркона (пр. гр. $I4_1/amd$); а также LaVO_4 , кристаллизующийся в структурном типе монацита. Параметры элементарных ячеек монотонно возрастают с ростом ионного радиуса лантаноида. Колебательные спектры в средней и дальней ИК-областях свидетельствуют о понижении симметрии соединений по сравнению с классическим цирконом. Фазовая стабильность полученных соединений сохраняется до 900°C . Средние коэффициенты теплового расширения варьируются в интервале $(6-11) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ключевые слова: лантаноиды, ванадаты, циркон

DOI: 10.31857/S0002337X23060106, **EDN:** ETRZNZ

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее безопасным способом иммобилизации высокоактивных компонентов радиоактивных отходов (РАО) является использование кристаллических матриц на основе природных минералов цирконолита, пирохлора, муратаита, граната, перовскита, циркона, монацита, бритолита и др. [1]. Среди большого разнообразия соединений наиболее перспективны минералы монацита и циркона, содержащие радиоактивные изотопы и сохраняющие стабильную кристаллическую структуру в условиях сверхдлительного естественного природного облучения.

Структуры монацита и циркона изучаются в литературе в качестве матриц для иммобилизации РАО [2–4], но большая часть публикаций относится к синтезу и изучению простых фосфатов трехвалентных редкоземельных элементов со структурой монацита и циркона [4]. Вопрос о совместном включении 2-, 3- и 4-валентных элементов в эти

структуры при изоморфном замещении анионных группировок, например фосфат-иона на арсенат-, ванадат-, хромат-ионы и т.д., гораздо менее изучен [5–7].

Цель настоящей работы – получение и исследование простых ванадатов лантаноидов, а также тройных ванадатов со структурами минералов циркона и монацита, содержащих совместно с лантаноидами цирконий и кальций.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных реагентов для синтеза ванадатов использовали: гидрат оксида-хлорида циркония $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ “х. ч.”, оксиды (“х. ч.”) Nd_2O_3 , Sm_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , Dy_2O_3 , Yb_2O_3 , метаванадат аммония NH_4VO_3 “х. ч.”, карбонат кальция CaCO_3 “ч.”, мочевины $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ “ч. д. а.”, лимонную кислоту $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ “х. ч.”.

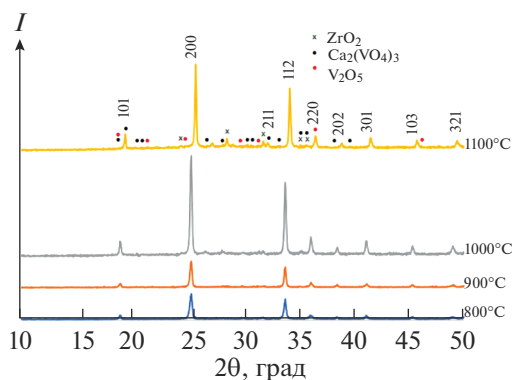


Рис. 1. Рентгенограммы шихты, подвергнутой отжигу при разных температурах синтеза $\text{CaYbZr}(\text{VO}_4)_3$.

Соединения получали методом соосаждения с помощью осадителя — метаванадата аммония. Синтез ванадатов LnVO_4 , где $\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$ и $\text{La}_{0,3}\text{Nd}_{0,5}\text{Sm}_{0,1}\text{Eu}_{0,1}\text{VO}_4$, проводили по методике [8]. Для получения ванадатов стехиометрические количества Ln_2O_3 и NH_4VO_3 растворяли в 6 Н HNO_3 , после чего упаривали расплав при постепенном нагревании до 400°C . Полученный порошок отжигали при $600, 700, 900^\circ\text{C}$ от 4 до 8 ч с промежуточным диспергированием в агатовой ступке.

Синтез тройных ванадатов $\text{CaLnZr}(\text{VO}_4)_3$, где $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$, проводили по двум методикам. В первой оксиды Ln_2O_3 , карбонат кальция, гидрат оксида-хлорида циркония, взятые в стехиометрических количествах, растворяли в HNO_3 . Далее добавляли мочевины в 10-кратном мольном избытке от суммы молей металлов и NH_4VO_3 . Дальнейшую обработку раствора и шихты проводили аналогично простым ванадатам. Во второй методике к растворенным оксидам добавляли комплексобразователь — лимонную кислоту в 3-кратном мольном избытке относительно суммарного количества металлов, осадитель NH_4VO_3 , упаривали раствор при 90°C и подвергали шихту аналогичной термообработке.

Рентгенограммы образцов при комнатной температуре регистрировали на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-6000 в фильтрованном излучении $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$). Фазовый состав идентифицировали с использованием программного обеспечения Phasax и базы данных PDF-2 [9].

Высокотемпературные ($300\text{--}1170 \text{ K}$) исследования проводили в рентгеновской камере Anton Paar HTK 1200N, установленной на дифрактометре Empyrean PANalytical, с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Сканирование проводилось при фокусировке по Брэггу–Брентано с шагом сканирования $\Delta(2\theta) = 0.023^\circ$. Время экспозиции в каждой точке составляло 240 с.

ИК-спектры в средней области были получены на FTIR-спектрометре FSM-1201 в диапазоне $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ со спектральным разрешением 2 cm^{-1} с использованием стандартной техники таблетирования с KBr. Исследования в дальней ИК-области ($650\text{--}50 \text{ cm}^{-1}$) проводили с помощью Фурье-ИК-спектрометра Vertex 80v (Bruker). Предварительно растертый материал размещали с изопропиловым спиртом, затем пипеткой наносили на полиэтиленовую пленку (HDPE) толщиной 0.55 mm . Запись спектров проводили в вакууме, режим работы — 64 сканирования на образец (щель апертуры 3 mm , разрешения спектров 4 cm^{-1}).

Микроструктуру и морфологию порошков изучали с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Vega 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового анализа (РФА) свидетельствуют об образовании при 800 и 900°C однофазных соединений LnVO_4 , где $\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$; твердого раствора $\text{La}_{0,3}\text{Nd}_{0,5}\text{Sm}_{0,1}\text{Eu}_{0,1}\text{VO}_4$ и ванадатов $\text{CaZrLn}(\text{VO}_4)_3$, где $\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$. В качестве примера на рис. 1 показаны рентгенограммы шихты, отожженной при разных температурах в ходе синтеза ванадата $\text{CaZrYb}(\text{VO}_4)_3$. После отжига при 1000°C наблюдается разложение соединения на простые ванадаты и оксиды: $3\text{CaYbZr}(\text{VO}_4)_3 = 3\text{YbVO}_4 + \text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2 + 3\text{ZrO}_2 + 2\text{V}_2\text{O}_5$.

На рис. 2 представлены рентгенограммы синтезированных ванадатов. Проведенные исследования показывают, что соединения кристаллизуются в двух структурных типах. La-содержащий ванадат кристаллизуется в структурном типе монацита (аналог LaPO_4 , пр. гр. $P2_1/n$). Положения и относительные интенсивности дифракционных максимумов для остальных продуктов идентичны между собой. Анализ полученных результатов с использованием аналога $\text{Ca}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{VO}_4$ позволил установить, что все сложные соединения характеризуются тетрагональной сингонией и относятся к структурному типу циркона (пр. гр. $I4_1/amd$). Рентгенограммы соединений, полученных в синтезах с мочевиной или с лимонной кислотой, не отличаются друг от друга.

Кристаллографические параметры соединений представлены в табл. 1. Обобщение представленных результатов свидетельствует о том, что параметры решетки ванадатов возрастают с увеличением ионного радиуса лантаноида [10], что согласуется с данными по другим ванадатам и фосфатам со структурным типом циркона [4]. Интересно отметить, что для тройных ванадатов зависимость параметров решетки от ионного радиуса менее выражена, чем для простых соединений LnVO_4 .

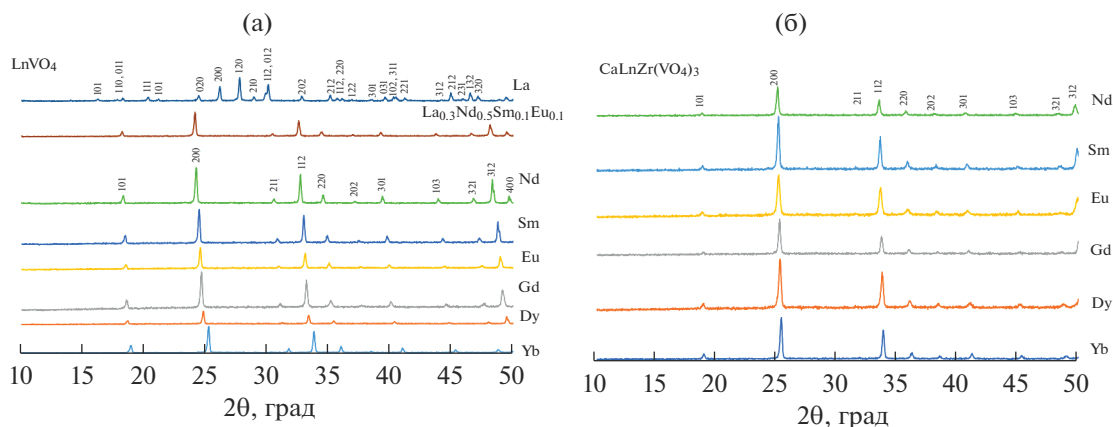


Рис. 2. Рентгенограммы ванадатов лантаноидов: LnVO_4 (а), $\text{CaLnZr}(\text{VO}_4)_3$ (б), где $\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Yb}$.

Рентгендифракционные измерения *in situ* показали, что в интервале температур 300–1170 К все образцы сохраняют свой фазовый состав, проявляя высокую устойчивость к нагреванию. В качестве примера на рис. 3 показаны рентгенограммы LaVO_4 , $\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}\text{VO}_4$ и YbVO_4 . На основании анализа зависимости параметров элементарных ячеек от температуры нагрева рассчитаны осевые и средние коэффициенты теплового расширения (КТР) (табл. 2). Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные ванадаты относятся к классу средне расширяющихся веществ. Отметим, что полученный в данной работе ванадат $\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}\text{VO}_4$ со структурой циркона имеет более низкий КТР ($\alpha_{\text{ср}} = 6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) по сравнению с твердым раствором фосфата $\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}\text{PO}_4$ со структурой монацита ($\alpha_{\text{ср}} = 9.64 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), который был получен нами ранее.

На рис. 4 представлены ИК-спектры ванадатов в средней и дальней областях. Теоретико-групповой анализ для ванадатов со структурным

типом циркона и пр. гр. $I4_1/amd$ предсказывает следующие активные ИК-колебания: $3A_{2u}$ и $4E_u$, из них внутренние колебания VO_4 -тетраэдров – 2 полосы валентных антисимметричных ν_3 ($A_{2u} + E_u$) и 2 полосы деформационных антисимметричных ν_4 -колебаний (A_{2u} и E_u). Идентификация полос в ИК-спектрах ванадатов проведена согласно [11–13]. Анализ представленных в табл. 3 результатов свидетельствует об увеличении частоты трансляционных колебаний ионов лантаноидов при уменьшении радиуса редкоземельного катиона. Спектр EuVO_4 содержит дополнительные полосы ~ 946 и $\sim 90 \text{ см}^{-1}$, что косвенно свидетельствует о присутствии примесной фазы в образце. Отсутствие сторонних пиков на рентгенограммах EuVO_4 связано, вероятно, с малым содержанием примесной фазы. Спектр твердого раствора $\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}\text{VO}_4$ в дальней ИК-области характеризуется очень широкими полосами поглощения, в которых трудно выделить четкие максимумы, что свидетельствует о резко разупорядоченном характере заполнения додекаэдра Хорда ионами лантаноидов.

Таблица 1. Параметры элементарных ячеек синтезированных ванадатов при комнатной температуре

Ln	Параметры элементарной ячейки, Å						
	LnVO_4				$\text{Ca Ln Zr}(\text{VO}_4)_3$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> = <i>b</i>	<i>c</i>	<i>V</i> , Å ³
La	6.7217	7.2833	8.3941	333.3			
Nd	7.3285	7.3285	6.4316	345.4	7.1014	6.3188	318.7
Sm	7.264	7.264	6.3861	337.0	7.0755	6.2967	315.2
Eu	7.231	7.231	6.363	332.7	7.0688	6.2932	314.5
Gd	7.2017	7.2017	6.3436	329.0	7.0600	6.2812	313.1
Dy	7.1308	7.1308	6.295	320.1	7.0369	6.2690	310.4
Yb	7.0379	7.0379	6.2459	309.4	7.0070	6.2509	306.9
$\text{La}_{0.3}\text{Nd}_{0.5}\text{Sm}_{0.1}\text{Eu}_{0.1}$	7.3485	7.3485	6.4527	348.4			

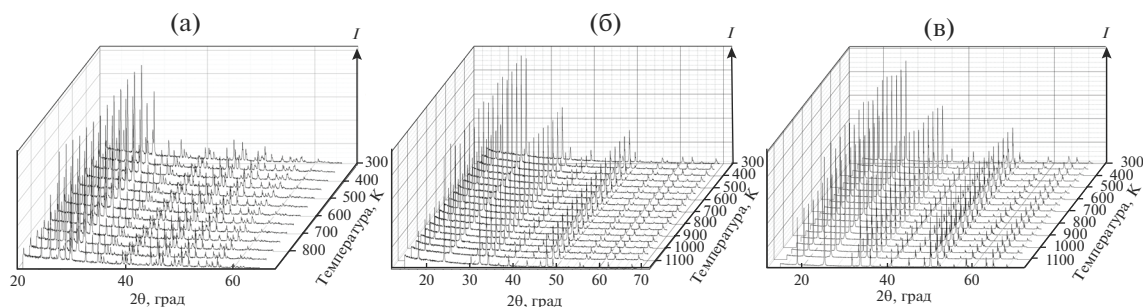


Рис. 3. Рентгенограммы, полученные при непосредственном нагревании ванадатов: YbVO₄ (а), LaVO₄ (б), La_{0.3}Nd_{0.5}Sm_{0.1}Eu_{0.1}VO₄ (в).

ИК-спектры тройных ванадатов в области валентных колебаний VO₄-ионов содержат больше максимумов, чем предсказывает анализ колебаний для структуры циркона с пр. гр. *I₄/amd*. Этот результат указывает на понижение симметрии структуры соединений типа CaLnZr(VO₄)₃ по сравнению с цирконом. В дальней ИК-области тройных ванадатов наблюдаются: расщепление полосы деформационных антисимметричных колебаний ν₄ ~ 450 см⁻¹ на два менее интенсивных пика; появление полосы поглощения при ~320 см⁻¹, относящейся к трансляционным колебаниям Zr⁴⁺ [14]; сдвиг к большим волновым числам полос трансляционных колебаний редкоземельных ионов 162–195 → 201–205 см⁻¹ (вероятно, уменьшение расстояния Ln–O); а также появление низкочастотных полос колебаний в области 50–100 см⁻¹, которые могут относиться к трансляционным колебаниям ионов Ca²⁺.

ИК-спектр LaVO₄ со структурой монацита существенно отличается от спектров остальных ванадатов. Теоретико-групповой анализ для LaVO₄ [15] показывает 33 активных ИК-колебания (16B_u и 17A_u), из них к внутренним колебаниям низкосимметричных (C₁) VO₄-тетраэдров относятся 2 полосы симметричных валентных ν₁ (A_u + B_u), 4 поло-

сы деформационных симметричных ν₂ (2A_u + 2B_u) и по 6 полос валентных и деформационных антисимметричных колебаний ν₃ и ν₄ (3A_u + 3B_u). Полосы в области 900–770 см⁻¹ относятся к внутренним валентным колебаниям VO₄, полосы в диапазоне 480–300 см⁻¹ отвечают деформационным колебаниям VO₄-тетраэдров, а более низкочастотные полосы относятся к внешним колебаниям – трансляциям атомов La, групп VO₄ как целого и либрациям VO₄-тетраэдров.

На рис. 5 представлены результаты электронно-микроскопических исследований порошков ванадатов CaYbZr(VO₄)₃ (рис. 5а, 5б), CaNdZr(VO₄)₃ (рис. 5в, 5г) и SmVO₄ (рис. 5д, 5е). Во всех порошках встречаются единичные агломераты размером 20–40 мкм (рис. 5а), состоящие из индивидуальных частиц различного размера и формы. Порошки CaYbZr(VO₄)₃ имеют ограниченную форму, размер частиц варьируется в очень широком диапазоне: от субмикронных частиц до частиц, размер которых достигает 4–5 мкм (рис. 5б). В порошках встречаются частицы вытянутой формы, длина которых в несколько раз превосходит их ширину. Форма частиц CaNdZr(VO₄)₃ (рис. 5в, 5г) близка к аналогичным параметрам для частиц CaYbZr(VO₄)₃; при этом в составе порошковых образцов CaNdZr(VO₄)₃ практически отсутствуют

Таблица 2. Осевые и средние КТР LnVO₄ при 1170 К

Ln	α _a × 10 ⁶ , К ⁻¹	α _b × 10 ⁶ , К ⁻¹	α _c × 10 ⁶ , К ⁻¹	α _{ср} × 10 ⁶ , К ⁻¹
La	9.79	6.73	15.1	10.5
Nd	3.52	3.52	10.7	5.92
Sm	4.12	4.12	8.24	5.49
Eu	4.53	4.53	11.1	6.7
Gd	4.94	4.94	11.1	6.99
Dy	4.35	4.35	11.1	6.61
Yb	5.06	5.06	10.8	7.01
La _{0.3} Nd _{0.5} Sm _{0.1} Eu _{0.1} VO ₄	4.05	4.05	10.2	6.09

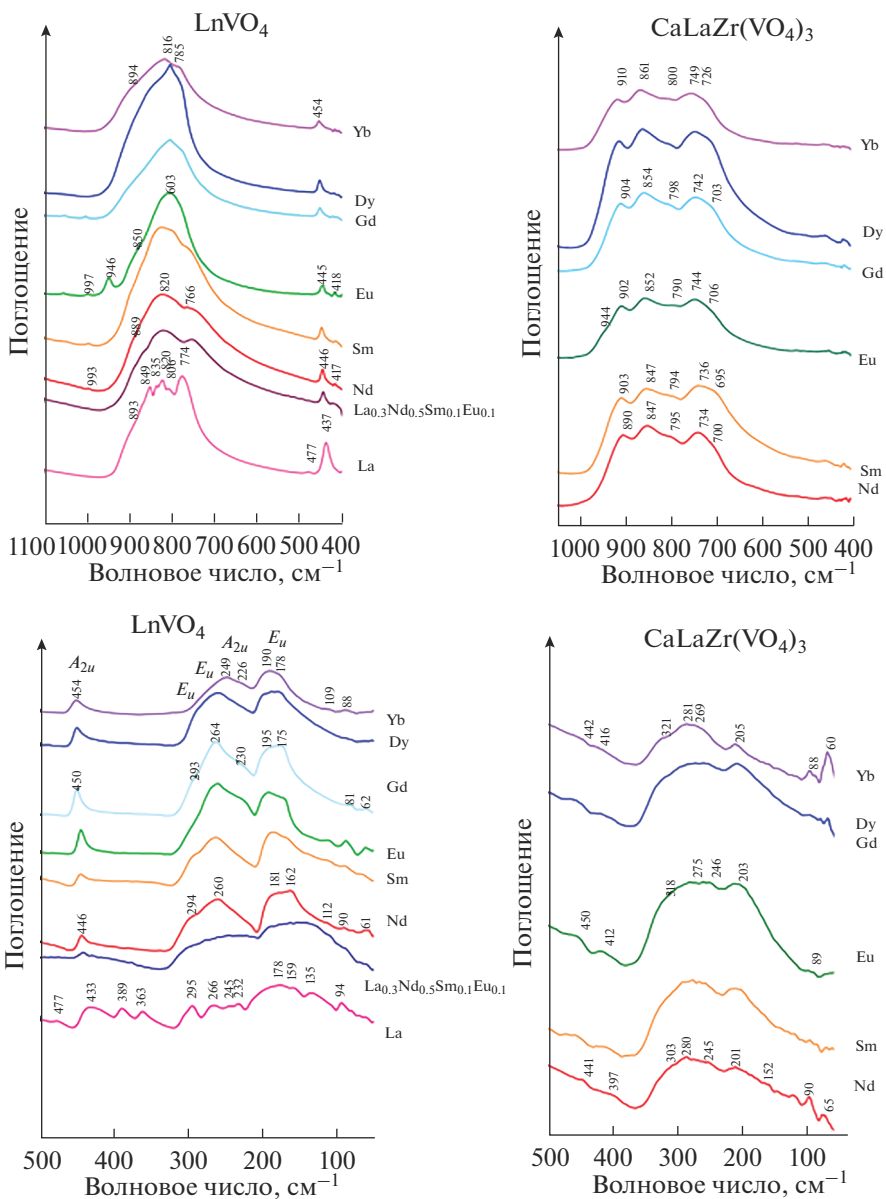


Рис. 4. ИК-спектры ванадатов LnVO₄ и CaLnZr(VO₄)₃ в средней и дальней ИК-областях.

Таблица 3. Отнесение полос в ИК-спектрах ванадатов LnVO₄

La _{0,3} Nd _{0,5} Sm _{0,1} Eu _{0,1}	ν, см ⁻¹						Мода
	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Yb	
Внутренние моды							
875	889	893	880	878	850	894	A _{2u} , ν ₃
821	820	820	803	802	800	816	E _u (LO), ν ₃
752	766	763		775	775	785	E _u (TO), ν ₃
443	446	445	445	451	451	454	A _{2u} (LO), ν ₄
	417	415	418				A _{2u} (TO), ν ₄
	294	291	295	293	288		E _u , ν ₄
Внешние моды							
	260	264	260	264	258	249	E _u , либрации VO ₄
			230	230		226	A _{2u} , трансляции Ln ³⁺ и VO ₄
	181	187	193	195	195	190	E _u (LO), трансляции Ln ³⁺ и VO ₄
	162	167	172	175	179	178	E _u (TO), трансляции Ln ³⁺ и VO ₄

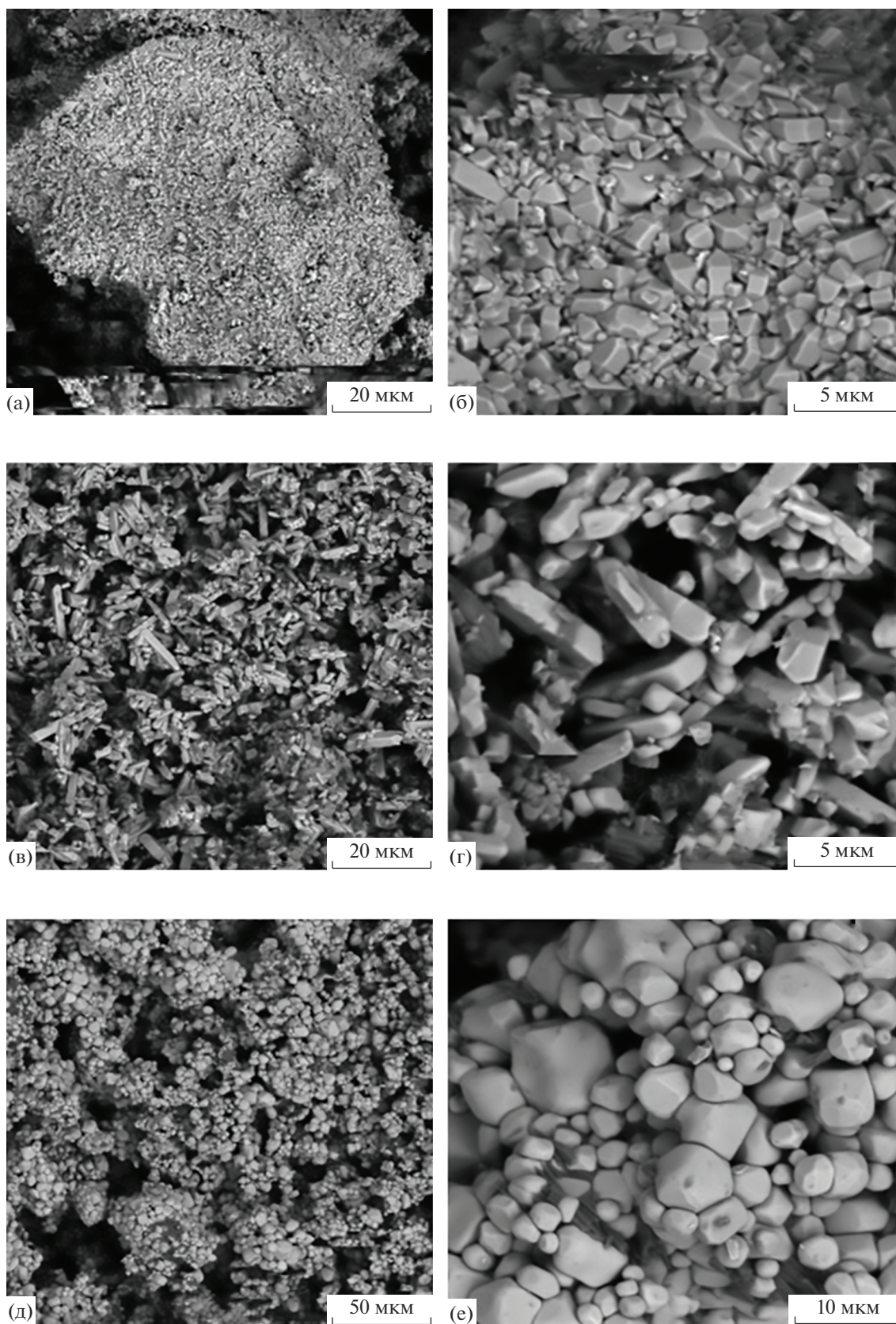


Рис. 5. Электронные микрофотографии порошков ванадатов $\text{CaYbZr}(\text{VO}_4)_3$ (а, б), $\text{CaNdZr}(\text{VO}_4)_3$ (в, г) и SmVO_4 (д, е).

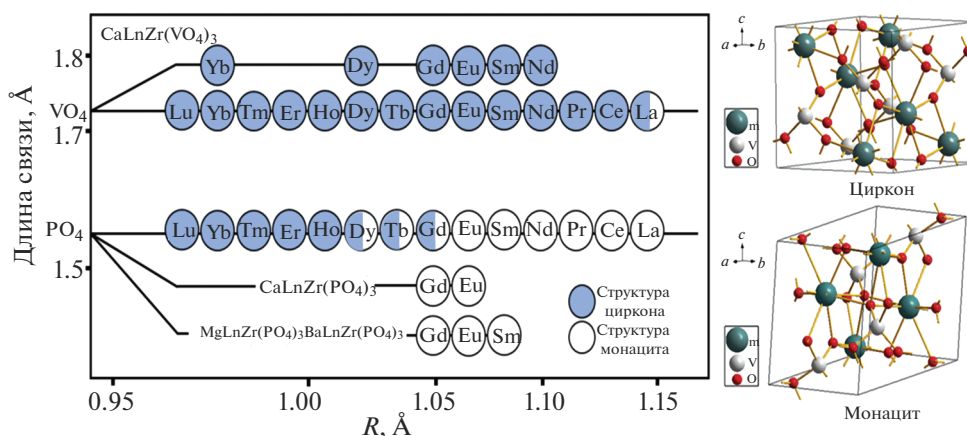


Рис. 6. Сравнение фазообразования в простых и тройных фосфатах и ванадатах лантаноидов.

мелкие субмикронные частицы, характерные для порошков $\text{CaYbZr}(\text{VO}_4)_3$. Частицы соединения SmVO_4 имеют микронный размер и близкую к сферической форму (рис. 5д, 5е). Мелкие субмикронные частицы в порошковых образцах простых ванадатов LnVO_4 отсутствуют.

Сравнение полученных данных с литературными (рис. 6) показывает, что у фосфатов Ln структурный тип зависит от радиуса катиона Ln: они кристаллизуются в типе монацита только в случае крупных катионов и в типе циркона в остальных случаях. При увеличении размера аниона от PO_4^{3-} к VO_4^{3-} граница между структурами циркона и монацита сдвигается и соединения преимущественно кристаллизуются в структуре циркона. Таким образом, полученные новые тройные ванадаты $\text{CaNdZr}(\text{VO}_4)_3$ расширяют сведения об изоморфизме 2-, 3- и 4-валентных катионов в структуре циркона, поскольку фосфаты аналогичного катионного состава кристаллизуются в структуре монацита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика соосаждения в расплаве мочевины новых тройных ванадатов кальция, циркония и лантаноидов $\text{CaZrLn}(\text{VO}_4)_3$, где Ln = Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Yb. Соединения кристаллизуются в структурном типе циркона, причем колебательные спектры свидетельствуют о возможном понижении симметрии относительно пр. гр. $I4_1/amd$. Параметры элементарных ячеек монотонно возрастают с ростом радиуса лантаноида.

Порошки LnVO_4 имеют микронный размер частиц, форма которых близка к сферической. Порошковые образцы тройных ванадатов характеризуются большим разбросом частиц по размерам, в том числе присутствием большого числа мелких субмикронных частиц. Частицы тройных ванада-

тов имеют ограниченную форму; длина частиц достигает 4–5 мкм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 21-13-00308.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlova A.I., Ojovan M.I. Ceramic Mineral Waste-Forms for Nuclear Waste Immobilization // Materials. 2019. V. 12. № 16. P. 2638.
2. Кумаев Д.Б., Волков Ю.Ф., Орлова А.И. Ортофосфаты четырехвалентных Ce, Th, U, Np и Pu со структурой монацита // Радиохимия. 2004. Т. 46. № 3. С. 195–200.
3. Ewing R., Lutze W., Weber W. Zircon: A Host-Phase for the Disposal of Weapons Plutonium // J. Mater. Res. 1995. V. 10. № 2. P. 24–246.
4. Clavier N., Podor R., Dacheux N. Crystal Chemistry of the Monazite Structure // J. Eur. Ceram. Soc. 2011. V. 31. № 6. P. 941–976.
5. Nabar M.A., Mhatre B.G. Studies on Triple Orthovanadates VIII. Synthesis and Spectrostructural Characterization of Triple Orthovanadates $\text{BaLnTh}(\text{VO}_4)_3$ (Ln = La or Pr) and $\text{BaLnCe}(\text{VO}_4)_3$ (Ln = La, Pr, Nd or Sm) // J. Alloys Compd. 2001. V. 323–324. P. 83–85.
6. Nabar M.A., Mhatre B.G., Vasaika A.P. Studies on Triple Orthovanadates. Part 3. Crystal Chemistry of the Zircon Analogues of Type $\text{M}^{\text{II}}\text{LnM}^{\text{IV}}(\text{VO}_4)_3$ (M^{II} = Ca or Pb; M^{IV} = Ce or Th; Ln = Lanthanide element) // J. Appl. Crystallogr. 1981. V. 323–324. № 5. P. 469–470.
7. Nabar M.A., Mhatre B.G. Studies on Triple Orthovanadates. IV. Crystal Chemistry of the Solid Solutions $\text{Ca}_{1-x}\text{Ba}_x\text{LaTh}(\text{VO}_4)_3$ // Inorg. Chim. Acta. 1987. V. 140. P. 165–166.
8. Chakoumakos B.C., Abraham M.M., Boatner L.A. Crystal Structure Refinements of Zircon-Type MVO_4 (M = Sc, Y, Ce, Pr, Nd, Tb, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) // J. Solid. State Chem. 1994. V. 109. P. 197–202.

9. DIFFRAC.EVA. Release 2011. Copyright Bruker AXS 2010, 2011. Version 2.0. www.bruker-axs.com.
10. Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallogr., Sect. A. 1976. V. 32. № 5. P. 751–767.
11. Zhou D., Li J., Pang L.-X., Chen G.-H., Qi Z.-M., Wang D.-W., Reaney I.M. Crystal Structure, Infrared Spectra, and Microwave Dielectric Properties of Temperature-Stable Zircon-Type (Y,Bi)VO₄ Solid-Solution Ceramics // ACS Omega, 2016. V. 1. P. 963–970.
12. Elliott R. J., Harley R. T., Hayes W., Smith, S. R. P. Raman Scattering and Theoretical Studies of Jahn-Teller Induced Phase Transitions in Some Rare-Earth Compounds // Proc. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci. 1972. V. 328. P. 217–266.
13. Vali R. *Ab initio* Vibrational and Dielectric Properties of YVO₄ // Solid. State Commun. 2009. V. 149. P. 1637–1640.
14. Borovikova E.Yu., Kurazhkovskaya V.S., Boldyrev K.N., Sukhanov M.V., Pet'kov V.I., Kokarev S.A. Vibrational Spectra and Factor-Group Analysis of Double Arsenates of Zirconium and Alkali Metal MZr₂(AsO₄)₃ (M = Li–Cs) // Vibr. Spectrosc. 2014. V. 73. P. 158–163.
15. Sun L., Zhao X., Li Y., Li P., Sun H., Cheng X., Fan W. First-Principles Studies of Electronic, Optical, and Vibrational Properties of LaVO₄ Polymorph // J. Appl. Phys. 2010. V. 108. P. 093519.