

УДК 546.66

ПОЛУЧЕНИЕ И СТРОЕНИЕ НОВЫХ ОРТОФОСФАТОВ $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ ($A = K, Rb; R = Ga, Gd, Dy, Ho, Er, Yb$) СО СТРУКТУРОЙ МИНЕРАЛА ЛАНГБЕЙНИТА

© 2022 г. А. К. Корытцева^{1, *}, А. И. Орлова¹, С. В. Нагорнова¹, Н. А. Седова¹, А. И. Бескровный²¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603022 Россия²Лаборатория им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*e-mail: koak@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2021 г.

После доработки 13.01.2022 г.

Принята к публикации 14.01.2022 г.

Новые ортофосфаты состава $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ ($A = K, Rb; R = Ga, Gd, Dy, Ho, Er, Yb$) получены путем твердофазного взаимодействия, охарактеризованы методами ИК-спектроскопии, рентгеновской дифракции. Установлено, что они кристаллизуются в структуре минерала лангбейнита (пр. гр. $P2_13$), параметр кубической элементарной ячейки возрастает с ростом ионного радиуса лантаноида. Методом порошковой дифракции нейтронов выполнено уточнение структуры $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$: катионы калия и диспрозия разупорядочены по каркасным позициям структуры. Полученные соединения представляют интерес в качестве кристаллических однофазных минералоподобных матриц для долговременной изоляции от биосферы опасных радионуклидов.

Ключевые слова: лангбейнит, галлий, тантал, лантаноиды, фосфаты, твердофазный синтез, рентгеновская дифракция, нейтронография, ИК-спектроскопия, кристаллическая структура

DOI: 10.31857/S0002337X22040066

ВВЕДЕНИЕ

Фосфаты со структурой природного минерала лангбейнита (природный аналог $K_2Mg_2(SO_4)_3$, кубическая сингония, пр. гр. $P2_13$) образуют большое семейство природных аналогов [1, 2]. Эта структура обладает октаэдро-тетраэдрическим каркасом и объемными полостями в соответствии с кристаллохимической формулой $(M1)^{(9)}(M2)^{(6-12)}[L_2^{(6)}(PO_4)_3]$, где L и M – каркасные и некаркасные позиции соответственно, в которых могут размещаться катионы с к. ч. в соответствующих кислородных полиэдрах, равными 6 и 9 или 12 [3]. Система ортофосфатов такого строения характеризуется широким изоморфизмом катионов и анионов, благодаря которому возможно включение в состав этих соединений разных по природе катионов в степенях окисления от 1+ до 5+ с образованием твердых растворов. Интерес к таким фосфатам определяется их оптическими [4, 5], магнитными свойствами [6], высокой термической и химической стабильностью, способностью к иммобилизации опасных радионуклидов [7–9].

Информация об известных фосфатах, относящихся к структурному типу лангбейнита, представлена нами ранее в обзорах [10, 11]. Из нее следует, что такие изоструктурные фосфаты могут содержать катионы: Na, Rb, Cs, Tl; Mg, Ca, Sr, Ba, Pb, Mn, Co, Ni, Cu, Zn; Al, Ti(III), V, Cr, Ga, Y, Rh, In, La, Ln = Ce–Lu; Ti(IV), Zr, Hf, Nb, Ta [11]. Обращает на себя внимание тот факт, что в литературе мало сведений о фосфатах пентавалентных элементов. В частности, синтезированы и исследованы соединения вида $K_2R_{0.5}C_{1.5}(PO_4)_3$, где $R = Al, Cr, Fe, Y, In; C = Nb, Ta$ [12, 13], а также твердые растворы $K_2Tb_{1.5-x}Ta_{0.5}(PO_4)_3:xEu^{3+}$ ($x = 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.10$) [14] и $K_2Dy_{1.5-x}Eu_xTa_{0.5}(PO_4)_3$ ($x = 0–1.5$) [15]. Кроме научного интереса к структурно-химическим исследованиям фосфатов пентавалентных элементов, в частности тантала, имеется ряд практических задач, где результаты таких работ могут быть полезными. В связи с тем, что тантал используется в ядерно-энергетических системах в качестве материалов теплообменников, а оксид тантала используется в атомной технике для варки стекла, поглощающего γ -излучение, возникают проблемы их утилизации – пере-

работки совместно с другими опасными компонентами отходов в устойчивые химические формы. Такие отходы содержат, как правило, также и лантаноиды (продукты деления, поглотители нейтронов). Как показано в [10], роль кристаллических (керамических) матриц, пригодных для долговременного хранения и захоронения подобных отходов ядерных технологий, могут выполнять материалы со структурой лангбейнита.

Целью данной работы является изучение возможности получения и строения фосфатов вида $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ ($A = K, Rb, Cs$; $R = Ga, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных реагентов использовали KCl (“Вектон”, 99.5%), $RbCl$ (“Вектон”, 99.5%), $CsCl$ (“Вектон”, 99.5%), $NH_4H_2PO_4$ (“Вектон”, 99.8%), Ta_2O_5 (“Вектон”, 99.9%), Sm_2O_3 (“Ланхит”, 99.99%), Eu_2O_3 (“Ланхит”, 99.99%), Gd_2O_3 (“Ланхит”, 99.99%), $Dy(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (Merck, 99.9%), $Ho(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ (Merck, 99.9%), Er_2O_3 (“Ланхит”, 99.99%), Yb_2O_3 (“Ланхит”, 99.99%), Lu_2O_3 (Merck, 99.9%). Фосфаты получали твердофазным методом. Стехиометрические смеси исходных реагентов тщательно диспергировали и выдерживали при температуре $450^\circ C$ в течение 3 ч. Полученные продукты повторно диспергировали в агатовой ступке и далее ступенчато отжигали при 600, 800, 880, $900^\circ C$ в течение суток и при $970^\circ C$ в течение 12 ч. В промежутках между стадиями диспергирование повторяли.

Исследование образцов методом рентгенофазового анализа выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 в CuK_α -фильтрованном излучении ($\lambda = 1.54048 \text{ \AA}$) при комнатной температуре в диапазоне углов отражения 2θ от 10° до 50° , со скоростью записи 1 град/мин. Систематические ошибки за счет геометрических факторов были устранены внесением поправки. Фазовый состав идентифицировали с использованием базы данных PDF-2 [16].

ИК-спектры полученных соединений регистрировали на спектрофотометре SPECORD 751R в диапазоне волновых чисел $1400\text{--}400 \text{ см}^{-1}$. Образцы для съемки представляли собой тонкодисперсные пленки, которые готовили путем нанесения суспензии образца в изопропиловом спирте на подложку KBr с последующим высушиванием.

Нейтронogramмы порошков, помещенных в цилиндрические контейнеры диаметром 10 мм, регистрировали на времяпролетном дифрактометре ДРВ, установленном на импульсном реак-

торе ИБР-2 (Дубна, РФ) [17]. Съемку выполняли при комнатной температуре. Уточнение структуры методом Ритвельда проводили с использованием программы Mria [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные соединения представляли собой поликристаллические порошки белого цвета для соединений галлия, гадолиния, диспрозия, иттербия; желтого цвета для соединений гольмия, розового цвета для соединений эрбия.

Данные ИК-спектроскопии свидетельствуют о принадлежности полученных соединений к классу ортофосфатов. На спектрах соединений (рис. 1) присутствуют все полосы поглощения, которые могут быть представлены в соответствии с теорией групп для фосфорного тетраэдра в кристаллической решетке с пр. гр. $P2_13$ ($800\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ – валентные колебания связи PO , $450\text{--}650 \text{ см}^{-1}$ – деформационные колебания связи PO).

Данные РФА показали образование однофазных продуктов $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$, где $A = K, Rb$; $R = Ga, Gd, Dy, Ho, Er, Yb$. На рис. 2 в качестве примера представлены рентгенограммы некоторых синтезированных фосфатов. Для всех полученных продуктов положение и относительная интенсивность дифракционных максимумов на рентгенограммах были идентичны.

По результатам выполненного аналитического индицирования с использованием аналога $K_2GdZr(PO_4)_3$ [19] все продукты характеризовались кубической сингонией и относились к структурному типу лангбейнита (пр. гр. $P2_13$). Кристаллографические параметры представлены в табл. 1. Видно, что параметр кубической элементарной ячейки возрастает с увеличением ионного радиуса лантаноида (к. ч. = 6), взятого по системе радиусов Шеннона [20]. Это согласуется с данными [8] по цирконийсодержащим фосфатам со структурой лангбейнита $K_2LnZr(PO_4)_3$ ($Ln = Ce\text{--}Yb, Y$). При этом параметр a для танталсодержащих фосфатов $K_2Ln_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ выше (табл. 1), чем для их циркониевых аналогов $K_2LnZr(PO_4)_3$ для всех производных калия (рис. 3), т. к. у первых доля более крупного катиона лантаноида в расчете на одну формульную единицу выше, чем у вторых. Если сравнивать Ln -содержащие фосфаты структурного типа лангбейнита с Ln -содержащими фосфатами структурных типов монацита и ксенотима [21], то у всех элементарная ячейка увеличивается с ростом радиуса лантаноида. Рассматривая эти каркасные структуры как построенные из полиэдров, связанных по вершинам (лангбейни-

ты) и ребрам (монациты), можно заметить, что они достаточно легко расширяются при заселении LnO_x -полиэдров с к. ч. = 6 и к. ч. = 9 более крупными катионами.

Установленная температура синтеза однофазных продуктов составила 800°C для производных калия и 900°C для производных рубидия (табл. 1). Недавно описанный в [15] порошкообразный фосфат $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ был получен твердофазной реакцией при 950°C . Мы полагаем, что использование нами низкотемпературной орторомбической модификации оксида тантала повлияло на кинетику твердофазного взаимодействия и привело к снижению температуры синтеза вещества на 150°C .

В образцах с Sm, Eu и Lu для $A = \text{K}, \text{Rb}$ присутствовали фазы соответствующих простых фосфатов самария, европия и лютеция в соизмеримых с целевыми фазами количествах, причем фазовая картина сохранялась и при температуре 970°C . Cs-содержащие кристаллические соединения $\text{Cs}_2\text{Sm}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{Cs}_2\text{Eu}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ получить не удалось. Вероятно, это связано с тем, что цезий улетучивался при температуре реакции, приводя к нарушению стехиометрии и невозможности образования соединения заданного состава. Таким образом, в состав полученных соединений входят только лантаноиды иттриевой группы, поскольку обладают меньшими ионными радиусами по сравнению с представителями цериевой группы [20]. При этом содержание лантаноидов в расчете на формульную единицу составляет 34–35 мас. % в случае производных калия и 30–32 мас. % для производных рубидия.

С применением метода Ритвельда по данным порошковой нейтронографии было выполнено (табл. 2) уточнение структуры фосфата $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$. На рис. 4 представлена нейтронограмма указанного фосфата. Рассчитанные позиционные и тепловые параметры для фосфата $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ приведены в табл. 3, а значения межатомных расстояний и валентных углов фосфата $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ – в табл. 4. В качестве стартовой модели для уточнения структурных характеристик $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ были использованы данные для $\text{K}_2\text{PrZr}(\text{PO}_4)_3$ [8]. При обработке спектра допускалась возможность перемешивания атомов Dy и Ta по двум M-позициям каркаса с учетом того, что сумма заселенностей каждого из них равна единице. Фрагмент структуры представлен на рис. 5.

Согласно полученным данным, Dy и Ta занимают позиции каркаса, обозначенные в табл. 4 как (Dy/Ta)1 и (Dy/Ta)2. Они координируются

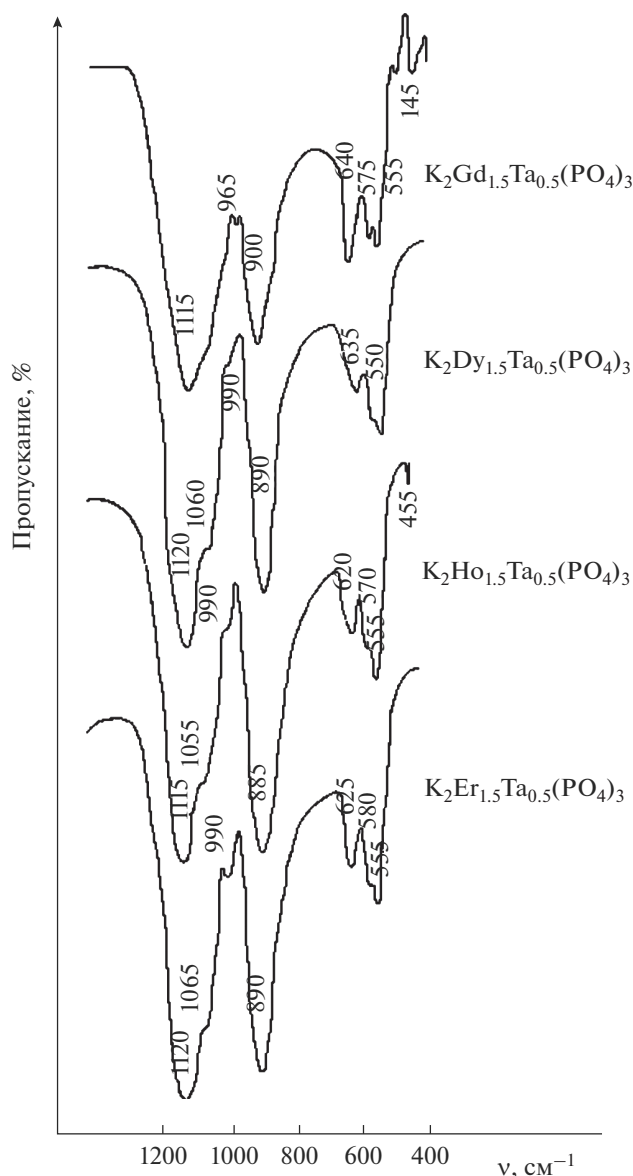


Рис. 1. ИК-спектры синтезированных соединений.

шестью атомами кислорода с образованием октаэдров $(\text{Dy/Ta})\text{O}_6$. Подобное разупорядоченное распределение по катионным позициям наблюдается в $\text{K}_2\text{Tb}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ [14]. В соединении $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$, полученном ранее в работе [15], подобная структурная особенность не обнаружена. Это может быть связано с тем, что в [15] структуру уточняли по данным рентгеновской дифракции, где указанные катионы Dy и Ta трудно различимы по рассеянию. Применение в данной работе для соединения $\text{K}_2\text{Dy}_{1.5}\text{Ta}_{0.5}(\text{PO}_4)_3$ метода дифракции нейтронов имеет преимущество перед рентгеновской дифракцией, поскольку амплитуды

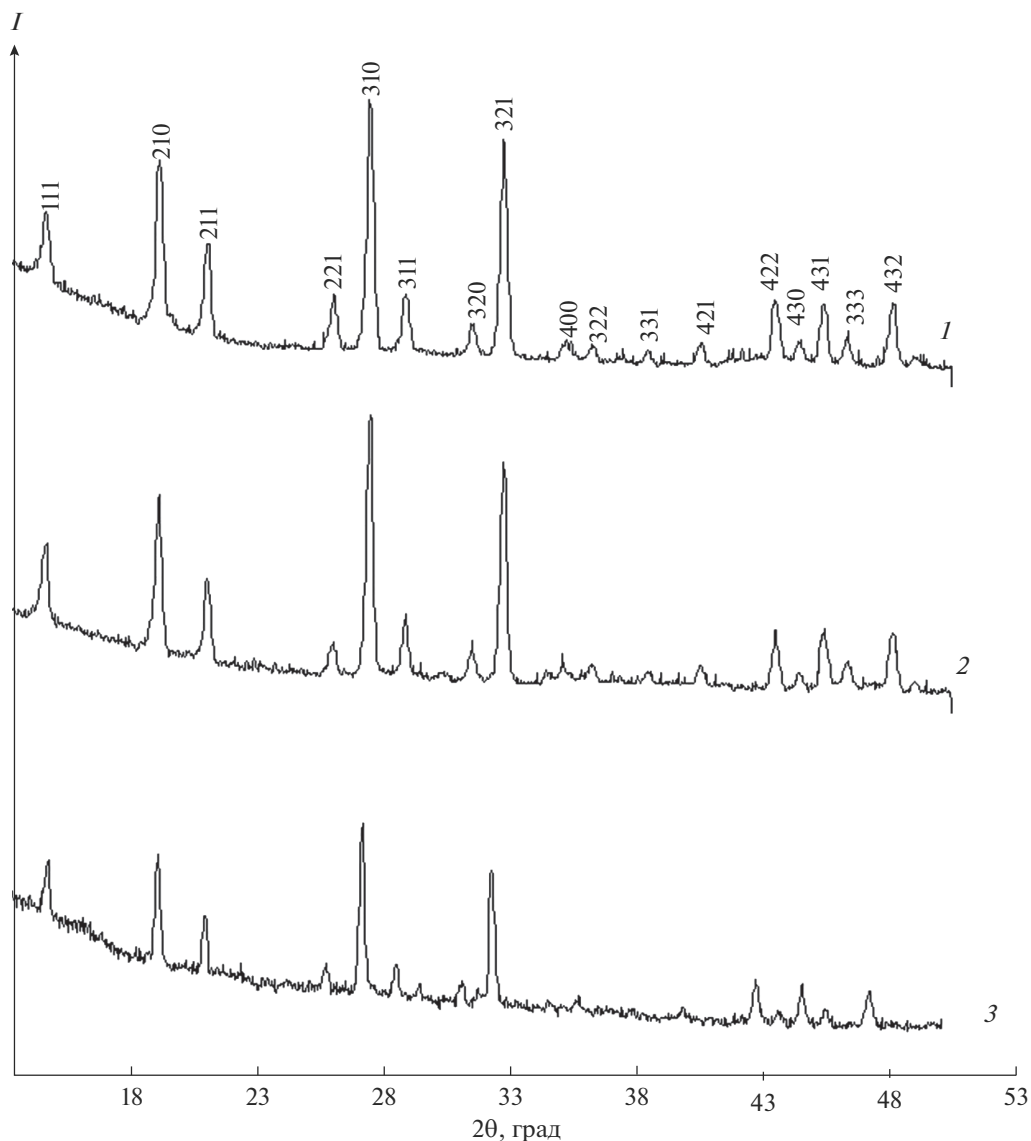


Рис. 2. Рентгенограммы порошков синтезированных соединений: $K_2Er_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ (1), $K_2Ho_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ (2), $K_2Gd_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ (3).

Таблица 1. Условия синтеза и кристаллографические параметры фосфатов $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ (A = K, Rb; R = Ga, Gd, Dy, Ho, Er, Yb)

Формула	Содержание лантаноида в фосфате, мас. %	Температура синтеза, °C	Параметры элементарной ячейки		Формула	Содержание лантаноида в фосфате, мас. %	Температура синтеза, °C	Параметры элементарной ячейки	
			a, Å	V, Å ³				a, Å	V, Å ³
K-содержащие производные				Rb-содержащие производные					
$K_2Ga_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$		800	9.825(3)	948.4(1)					
$K_2Gd_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	34.2	800	10.430(7)	1134.6(3)	$Rb_2Gd_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	30.2	880	10.44(4)	1139(2)
$K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	35.0	800	10.345(2)	1107.1(1)	$Rb_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	30.9	900	10.44(8)	1140(5)
$K_2Ho_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	35.3	800	10.325(3)	1100.7(1)	$Rb_2Ho_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	31.2	900	10.43(7)	1136(9)
$K_2Er_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	35.6	800	10.317(3)	1098.1(5)	$Rb_2Er_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	31.5	900	10.36(9)	1114(8)
					$Rb_2Yb_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$	32.2	900	10.36(3)	1112(9)

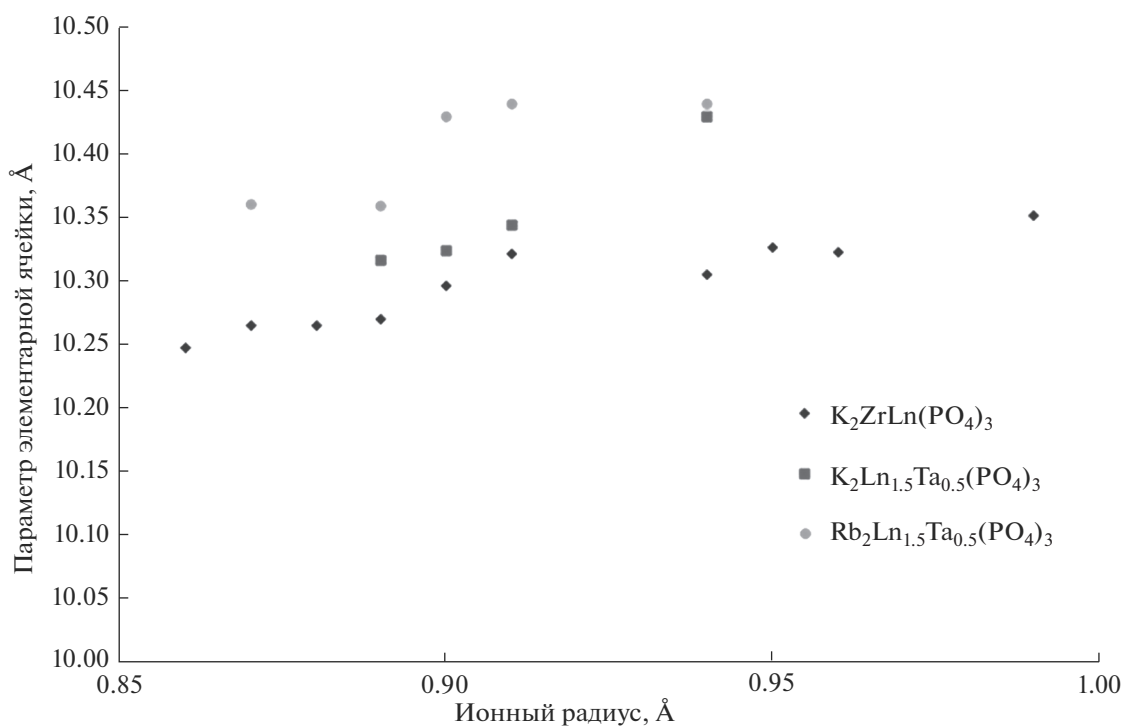


Рис. 3. Зависимость параметров элементарной ячейки от радиуса лантаноида.

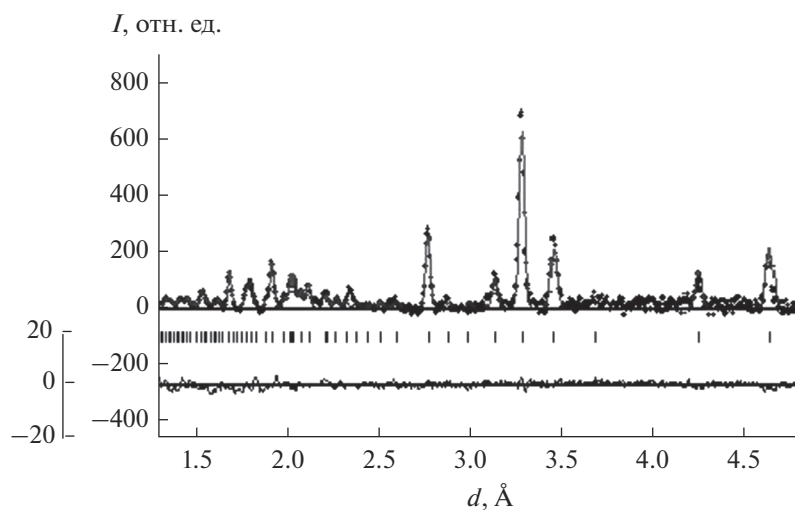


Рис. 4. Нейтронограмма фосфата $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$: теоретический и экспериментальный спектры, расчетное положение рефлексов.

когерентного рассеяния нейтронов для Dy и Ta существенно различаются между собой [22].

Несмотря на сложность вхождения в однотипные позиции каркаса катионов Dy и Ta, значительно различающихся по ионным радиусам (0.912 Å для Dy с к. ч. = 6 и 0.64 Å для Ta с к. ч. = 6) и электронному строению, факт существования со-

единения $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ подчеркивает гибкость лангбейнитового каркаса в отношении включения (адаптации в структуре) различных по природе катионов. Октаэдры (Dy/Ta) O_6 значительно деформированы: длина связей (Dy/Ta)–O варьируется от 2.12 до 2.47 Å и в среднем равна 2.36 Å. Это несколько больше длин связей

Таблица 2. Экспериментальные параметры и результаты уточнения кристаллической структуры $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$

Сингония	Кубическая
Пр. гр.	$P2_13$ (№ 198)
a , Å	10.3142(1)
V , Å ³	1097.3(2)
Z	4
Цвет	Белый
d , Å	0.97–4.76
Число рефлексов	164
R_{exp}	4.02
R_{wp}	2.59
R_p	3.78
χ^2	2.56
Число уточняемых параметров	39

(Dy/Ta)–O (2.18 Å) в $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ [15] и (Tb/Ta)–O (2.161 Å) в $K_2Tb_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ [14], но находится в соответствии с длинами связей Ta–O (от 1.87 до 2.45 Å) и Dy–O (от 2.34 до 2.45 Å) в сложном оксиде $DyTa_7O_{19}$ [23].

PO_4 -тетраэдры изолированы друг от друга, но посредством общих атомов кислорода они соединены с (Dy/Ta)-октаэдрами в соотношении 3 : 2 в расчете на одну формульную единицу, образуя димер. Соединение полиэдров за счет только общих кислородных вершин (но не ребер и/или граней) делает каркас очень гибким: с одной стороны, допускает значительную деформацию обоих полиэдров, а с другой – позволяет сохранять октаэдро-тетраэдрический димер как характерный фрагмент лангбейнитового каркаса. Эти димеры сочленяются и образуют трехмерную вязь, содержащую крупные межкаркасные эллипсоидально-

Таблица 3. Заселенности позиций (w), координаты и тепловые факторы $B_{\text{изо}}$ катионов в структуре $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$

Атом	Позиция	w	x	y	z	$B_{\text{изо}}$
K(1)	$4a$	1	0.0507	0.0507	0.0507	4
K(2)	$4a$	1	0.3138	0.3138	0.3138	0.3
Dy/Ta(1)	$4a$	0.75/0.25	0.5795	0.5795	0.5795	0.3
Dy/Ta(2)	$4a$	0.75/0.25	0.8554	0.8854	0.8554	0.38
P	$12b$	3	0.6051	0.4552	0.2442	0.24
O1	$12b$	4	0.6518	0.4996	0.3701	0.44
O2	$12b$	4	0.7124	0.4239	0.1696	0.17
O3	$12b$	4	0.5423	0.3013	0.2748	0.18
O4	$12b$	4	0.5887	0.6042	0.1659	0.15

Таблица 4. Межатомные расстояния (Å) и валентные углы в структуре $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$

КО ₉ -полиэдры				РО ₄ -тетраэдры			
K1–O2	2.8×3	K2–O1	2.41×3			O1–P–O2	104.3
K1–O3	2.85×3	K2–O2	2.42×3	P–O1	1.4	O2–P–O3	107.7
K1–O4	3.24×3	K2–O4	3.8×3	P–O2	1.47	O1–P–O4	99.7
$\langle K-O \rangle$	2.96°	$\langle K-O \rangle$	2.88°	P–O3	1.76	O2–P–O3	100.7
				P–O4	1.76	O2–P–O4	148.2
				$\langle P-O \rangle$	1.60°	O3–P–O4	91.47
(Dy/Ta)1–O1	2.45×3	(Dy/Ta)2–O3	2.47×3			$\langle O-P-O \rangle$	108.7°
(Dy/Ta)1–O2	2.36×3	(Dy/Ta)2–O4	2.12×3				
$\langle\langle Dy/Ta \rangle\rangle$ 1–O	2.41°	$\langle\langle Dy/Ta \rangle\rangle$ 2–O	2.30°				

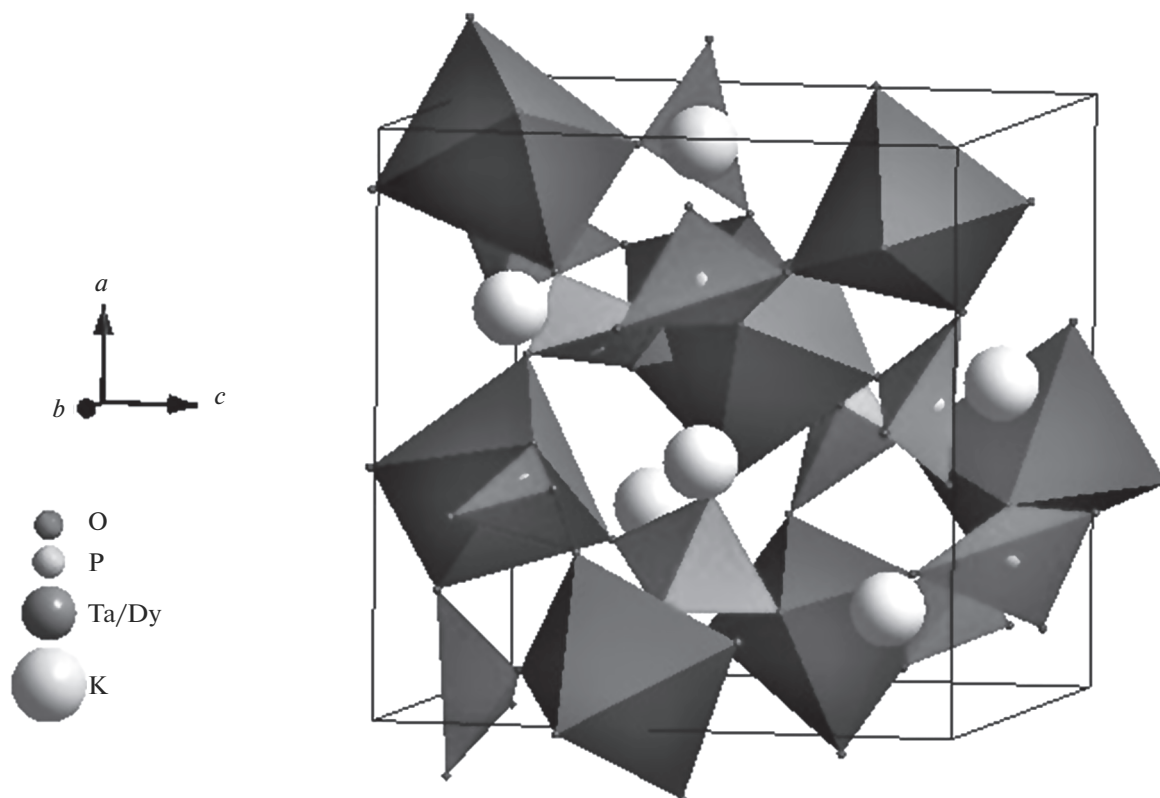


Рис. 5. Фрагмент структуры $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$.

го вида полости, полностью заселенные катионами К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазной реакции при 800 и 900°C получены новые соединения тантала, лантаноидов иттриевой группы и галлия состава $A_2R_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ ($A = K, Rb$; $R = Ga, Gd, Dy, Ho, Er, Yb$). Использование низкотемпературной модификации оксида тантала позволило снизить температуру синтеза $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ на 150°C по сравнению с данными [15].

Уточнение структуры $K_2Dy_{1.5}Ta_{0.5}(PO_4)_3$ по данным порошковой дифракции нейтронов показало разупорядоченный характер распределения Dy и Ta по позициям каркаса.

Данные фосфаты могут рассматриваться как перспективные однофазные минералоподобные матрицы-кандидаты, способные включать в свой состав компоненты, образующиеся при переработке отходов ядерных технологий, в частности фракции редкоземельных элементов, для изоляции их от биосферы.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 21-13-00308).

Авторы благодарят В.С. Куражковскую за снятие ИК-спектров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benmoussa A., Borel M.M., Grandin A., Leclaire A., Raveau B. Langbeinite, a Host Lattice for "V₃O" Clusters: The Trivalent Vanadium Phosphate $K_{11}V_{15}P_{18}O_{73}$ // *J. Solid State Chem.* 1992. V. 97. № 2. P. 314–318. [https://doi.org/10.1016/0022-4596\(92\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0022-4596(92)90039-X)
2. Kasthuri Rangan K., Gopalakrishnan J. New Titanium-Vanadium Phosphates of Nasicon and Langbeinite Structures, and Differences between the Two Structures toward Deintercalation of Alkali Metal // *J. Solid State Chem.* 1994. V. 109. № 1. P. 116–121. <https://doi.org/10.1006/jssc.1994.1080>
3. Сизова П.Г., Блинов В.А., Воронков А.А., Илюхин В.В., Белов Н.В. Уточненная структура $Na_4Zr_2(SiO_4)_3$ и ее место в ряду смешанных каркасов с общей формулой $M_2(TO_4)_3$ // *Кристаллография.* 1981. Т. 26. № 2. С. 293–300.
4. Carvajal J.J., Aznar A., Solé R., Gavalda Jna., Massons J., Solans X., Aguiló M., Díaz F. Growth and Structural Char-

- acterization of $Rb_2Ti_{1.01}Er_{0.99}(PO_4)_3$ // Chem. Mater. 2003. V. 15. № 1. P. 204–211.
<https://doi.org/10.1021/cm020806t>
- Jiao M., Lv W., Lü W., Zhao Q., Shao B., You H. Optical Properties and Energy Transfer of a Novel $KSrSc_2(PO_4)_3: Ce^{3+}/Eu^{2+}/Tb^{3+}$ Phosphor for White Light Emitting Diodes // Dalton Trans. 2015. V. 44. P. 4080–4087.
 - Lajmi B., Hidouri M., Wattiaux A., Fournés L., Darriet J., Ben Amara M. Crystal Structure, Mössbauer Spectroscopy, and Magnetic Properties of a New Potassium Iron Oxyphosphate $K_{11}Fe_{15}(PO_4)_{18}O$ Related to the Langbeinite-Like Compounds // J. Alloys Compd. 2003. V. 361. № 1–2. P. 77–83.
[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00412-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00412-2)
 - Orlova A.I., Trubach I.G., Kurazhkovskaya V.S., Pertier P., Salvadó M.A., García-Granda S., Khainakov S.A., Garcia J.R. Synthesis, Characterization, and Structural Study of $K_2FeZrP_3O_{12}$ with the Langbeinite Structure // J. Solid State Chem. 2003. V. 173. № 2. P. 314–318.
[https://doi.org/10.1016/S0022-4596\(03\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4596(03)00101-4)
 - Трубач И.Г., Бескровный А.И., Орлова А.И., Орлова В.А., Куражковская В.С. Синтез и исследование новых фосфатов вида $K_2LnZr(PO_4)_3$ ($Ln = Ce–Yb, Y$) со структурой лангбейнита // Кристаллография. 2004. Т. 49. № 4. С. 692–696.
 - Орлова А.И., Орлова В.А., Бучирин А.В., Бескровный А.И. Цезий и его аналоги рубидий, калий в ромбоэдрических [тип $NaZr_2(PO_4)_3$] и кубических [тип лангбейнита] фосфатах. 1. Кристаллохимические исследования // Радиохимия. 2005. Т. 47. № 3. С. 203–212.
 - Orlova A.I., Ojovan M.I. Ceramic Mineral Waste-Forms for Nuclear Waste Immobilization // Materials. 2019. V. 12. P. 2638–2683.
<https://doi.org/10.3390/ma12162638>
 - Орлова А.И., Корытцева А.К., Логинова Е.Е. Семейство фосфатов со структурой лангбейнита. Кристаллохимический аспект иммобилизации радиоактивных отходов // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 1. С. 48–57.
 - Орлова А.И., Корытцева А.К., Борцова Е.В., Нагорнова С.В., Казанцев Г.Н., Самойлов С.Г., Банкрашков А.В., Куражковская В.С. Фосфаты тантала и ниобия каркасного строения. Кристаллохимическое моделирование, синтез и исследование новых соединений // Кристаллография. 2006. Т. 51. № 3. С. 391–399.
 - Затовский И.В., Слободяник Н.С., Ущипивская Т.Н., Огородник И.В., Бабарик А.А. Синтез сложных фосфатов со структурой лангбейнита из растворов в расплавах // Журн. прикл. химии. 2006. Т. 79. № 1. С. 12–17.
 - Xue Y.-L., Zhao D., Zhang S.-R., Li Y.-N., Fan Y.-P. A New Disordered Langbeinite-Type Compound, $K_2Tb_{1.5}Ta_{0.5}P_3O_{12}$, and Eu^{3+} -Doped Multicolour Light-Emitting Properties // Acta Crystallogr. 2019. V. 75. P. 213–220.
 - Zhang S., Zhao D., Dai Sh., Lou H., Zhang R. Energy Transfer, Superior Thermal Stability and Multi-Color Emitting Properties of Langbeinite-Type Solid-Solution Phosphor $K_2Dy_{1.5-x}Eu_xTa_{0.5}(PO_4)_3$ // J. Rare Earths. 2021. V. 39. № 8. P. 921–929.
<https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.07.003>
 - DIFFRAC.EVA. Release 2011. Copyright Bruker AXS 2010, 2011. Version 2.0. www.bruker-axs.com
 - Балагуров А.М., Бескровный А.И., Журавлев В.В., Миронова Г.М., Бобриков И.А., Неов Д., Шеверёв С.Г. Дифрактометр для исследований переходных процессов в реальном времени на импульсном источнике нейтронов ИБР-2 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. V. 10. № 5. С. 3–16.
 - Zloказов V.B., Chernyshev V.I. MRJA – a Program for a Full Profile Analysis of Powder Multiphase Neutron-Diffraction Time-of-Flight (Direct and Fourier) Spectra // J. Appl. Crystallogr. 1992. V. 25. № 3. P. 447–451.
<https://doi.org/10.1107/S0021889891013122>
 - Wulff H., Guth U., Loescher B. The Crystal Structure of $K_2REZr(PO_4)_3$ ($RE = Y, Gd$) Isotypic with Langbeinite // Powder Diffr. 1992. V. 7. P. 103–106.
 - Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallogr., Sec. A. 1976. V. 32. № 5. P. 751–767.
<https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
 - Ni Y., Hughes J.M., Mariano A.N. Crystal Chemistry of the Monazite and Xenotime Structures // Am. Mineral. 1995. V. 80. P. 21–26.
 - Sears V.F. Neutron Scattering Lengths and Cross Sections // Neutron News. 1992. V. 3. № 3. P. 26–27.
<https://doi.org/10.1080/10448639208218770>
 - Guo G.-C., Zhuang J.-N., Wang Y.-G., Chen J.-T., Zhuang H.-H., Huang J.-S., Zhan Q.-E. Dysprosium Tantalum Oxide, $DyTa_7O_{19}$ // Acta Crystallogr. 1996. V. 52. P. 5–7.