

А. Ф. СЕЛЕВИЧ, А. И. ЛЕСНИКОВИЧ

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ФОСФАТОВ ТУЛИЯ В СИСТЕМЕ $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$

В настоящей работе продолжены систематические исследования взаимодействия в системах $M_2O_3-P_2O_5-H_2O$ (M – трехвалентный металл) с применением метода тонкого слоя (МТС) [1] в интервале температур, охватывающем поля кристаллизации фосфатов различной степени гидратированности и конденсации аниона: от кристаллогидратов кислых монофосфатов до полифосфатов и ультрафосфатов. К настоящему времени с применением МТС детально исследована кристаллизация фосфатов в системах для $M^{III} = Mn, Fe, Ga, In, Cr, V, Yb, Lu, Pr, Nd$ [1–10], для которых построены поля кристаллизации стабильных фаз и установлена последовательность кристаллизации фосфатов соответствующих металлов с повышением температуры и/или уменьшением влагосодержания исходных смесей. Предварительные результаты получены для остальных редкоземельных металлов [11, 12], а также для Al и Tl [13, 14]. Следует отметить, что МТС был разработан для изучения фазовых равновесий в вязких, трудно кристаллизующихся системах, содержащих летучий компонент (в нашем случае – H_2O). Как показали выполненные ранее предварительные исследования [11], именно к такому типу относится и система $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$.

К настоящему времени в системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$ установлено образование относительно небольшого количества фосфатов тулия [15–17]. Среди них ультрафосфат TmP_5O_{14} (форма II) [18], полифосфат $Tm(PO_3)_3$ (форма С) [19], монофосфаты $TmPO_4 \cdot 3H_2O$ и $TmPO_4$ [20, 21]. Учитывая большое количество новых фосфатов иттербия и лютеция, полученных в ходе исследования фазовых равновесий в системах $Yb_2O_3-P_2O_5-H_2O$ и $Lu_2O_3-P_2O_5-H_2O$ методом тонкого слоя [7, 10], а также близость химических свойств Tm , Yb и Lu , можно с большой вероятностью ожидать, что применение МТС к системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$ позволит помимо выявления общих закономерностей кристаллизации синтезировать также и новые фосфаты тулия.

Цель настоящей работы – исследование фазовых равновесий в системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$ в интервале температур 20–300 °С в смеси с «умеренным» избытком фосфорной кислоты ($P_2O_5 : Tm_2O_3 = 5 : 1$), выявление общих закономерностей кристаллизации фосфатов тулия, а также определение условий получения и идентификация новых соединений.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Фазовые равновесия в открытой системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$ в интервале температур 20–300 °С (мольное соотношение в смеси $P_2O_5 : Tm_2O_3 = 5 : 1$) исследованы с применением МТС [1]. В качестве исходных реагентов использовали $Tm(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ х. ч. и H_3PO_4 ($\rho = 1,7$) квалификации х. ч. Исходную смесь помещали в широкие плоскодонные тигли из кварца или стеклоуглерода и выдерживали при комнатной температуре до прекращения фазовых изменений, что контролировали с помощью рентгенофазового (РФА; дифрактометр HZG 4A, Германия; CuK_α -излучение, Ni-фильтр) и микрокристаллооптического анализа (оптический микроскоп ERGAVAL, Германия). Затем температуру повышали с шагом 25 °С и повторяли наблюдения. Для проведения РФА образующиеся вещества отделяли от маточного раствора (расплава) водой или водно-ацетоновой смесью и сушили на воздухе до постоянного веса.

Для идентификации новых соединений использовали РФА (порошковые рентгенограммы записывали в интервале углов $5^\circ \leq 2\theta \leq 50^\circ$ со скоростью 1 град/мин с использованием кремниевого стандарта, для индексирования порошкограмм использовали программу TREOR90 [22]), количественную и качественную бумажную хроматографию, синхронный термический анализ (NETZSCH STA449 Jupiter, Германия) и химический анализ согласно [10]. Содержание фосфора определяли колориметрически в виде желтого ванадомолибдофосфатного комплекса, тулия – комплексонометрически обратным титрованием избытка ЭДТА сульфатом цинка по методике, аналогичной определению алюминия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали исследования, схема процессов, происходящих в системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$, аналогична схеме для ранее изученных систем $Yb_2O_3-P_2O_5-H_2O$ и $Lu_2O_3-P_2O_5-H_2O$ [7, 10]. В табл. 1 приведены температурные режимы кристаллизации фосфатов тулия, установленные в ходе изучения фазовых равновесий в системе $Tm_2O_3-P_2O_5-H_2O$ с применением МТС. Ниже дано описание фосфатов тулия, кристаллизующихся в системе в порядке уменьшения влагосодержания и/или повышения температуры смесей.

$TmH_3(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$. Дигидрат кислого монофосфата тулия кристаллизуется при 20 °С из разбавленных растворов и/или при относительной влажности порядка 100 % в виде тонких скошенных призм. Сравнение его дифрактометрических характеристик с аналогичными данными ранее синтезированных $YbH_3(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ и $LuH_3(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$ [7, 10] указывает на сходство кристаллического строения соединений. В условиях экспе-

рифта $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ является метастабильной фазой и по мере приближения системы к равновесному состоянию постепенно растворяется, а в реакционной смеси появляются кристаллы нового вещества.

Таблица 1

Фосфаты тулия, кристаллизующиеся в системе $\text{Tm}_2\text{O}_3\text{--P}_2\text{O}_5\text{--H}_2\text{O}$

$t, ^\circ\text{C}$	Стабильная фаза	Метастабильная фаза
300	$\text{Tm}(\text{PO}_3)_3\text{--II}$	–
275		–
250		$\text{Tm}(\text{PO}_3)_3\text{--C}$
225		
200		
175	TmHP_2O_7	–
150		–
125	$\text{Tm}_3\text{H}_5(\text{PO}_4)_2(\text{P}_2\text{O}_7)_2$	–
100	$\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2$	–
75		–
50		–
20		$\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$

Таблица 2

Индексированные дифрактометрические данные $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$

hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$	hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$
2 0 0	9,91	9,91	8,92	100	6 0 1	36,36	36,36	2,469	1
1 1 0	13,77	13,77	6,43	<1	1 1 2	36,51	36,52	2,459	1
0 0 1	16,30	16,30	5,43	<1	7 1 0	37,61	37,60	2,390	5
–2 0 1	17,89	17,89	4,95	2	–7 1 1	39,14	39,13	2,300	1
4 0 0	19,89	19,89	4,46	35	8 0 0	40,41	40,42	2,230	3
1 1 1	21,93	21,93	4,05	1	3 1 2	40,51	40,51	2,25	3
–4 0 1	23,99	23,99	3,707	20	4 0 2	41,19	41,19	2,190	2
0 2 0	25,84	25,85	3,445	1	–8 0 1	41,57	41,57	2,171	5
3 1 1	27,00	26,99	3,300	10	1 2 2	–	43,23	–	–
4 0 1	27,55	27,55	3,235	3	7 1 1	43,24	43,25	2,091	3
5 1 0	28,14	28,15	3,169	2	6 2 1	45,16	45,15	2,006	<1
6 0 0	30,04	30,03	2,972	5	8 0 1	46,04	46,05	1,970	2
–6 0 1	32,24	32,24	2,774	8	–5 2 2	47,18	47,18	1,925	2
6 1 0	32,77	32,78	2,731	1	9 1 0	47,71	47,71	1,905	9
5 1 1	34,45	34,45	2,601	5	6 0 2	48,37	48,37	1,880	2
7 0 0	–	35,19	–	–	–9 1 1	48,46	48,46	1,877	2
–1 1 2	35,20	35,20	2,548	1	–8 0 2	49,12	49,12	1,853	3
–4 2 1	35,56	35,55	2,523	1	9 0 1	51,15	51,15	1,784	4

$\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Стабильной фазой при 20 °С является полугидрат кислого монофосфата тулия, кристаллы которого имеют форму удлиненных скошенных призм. Индексированные дифрактометрические данные

соединения приведены в табл. 2. $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ кристаллизуется в моноклинной сингонии с параметрами элементарной ячейки: $a = 18,011(1)$, $b = 6,888(2)$, $c = 5,485(1)$ Å; $\beta = 97,93(1)^\circ$ (критерии достоверности результатов индексирования: $M_{20} = 37$, $F_{20} = 61$, $M_{30} = 28$, $F_{30} = 50$, $M_{34} = 27$, $F_{34} = 50$). Как и в случае дигидратов, дифракционные характеристики $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и изотипных солей иттербия [7] и лутеция [10] также очень близки, что предполагает их изоструктурность.

Таблица 3

Индексированные дифрактометрические данные $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2$

hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}$, Å	I , %	hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}$, Å	I , %
0 0 1	9,90	9,91	8,92	100	-2 1 3	33,86	33,87	2,645	3
0 1 1	16,24	16,26	5,45	4	1 2 2	–	34,96	–	–
-2 0 1	17,41	17,37	5,09	3	-2 2 2	34,98	34,97	2,563	3
0 0 2	19,88	19,89	4,46	40	-4 1 1	35,24	35,23	2,545	1
-1 0 2	–	19,90	–	–	4 1 0	35,78	35,77	2,508	1
2 0 1	20,92	20,93	4,24	<1	-3 1 3	–	37,39	–	–
2 1 0	–	20,93	–	–	2 0 3	37,41	37,41	2,402	3
-2 1 1	21,68	21,68	4,10	<1	4 1 1	39,10	39,10	2,302	1
1 0 2	23,08	23,08	3,850	50	2 1 3	39,72	39,71	2,267	6
-2 0 2	–	23,10	–	–	1 3 0	40,19	40,19	2,242	2
0 1 2	–	23,76	–	–	0 0 4	40,40	40,41	2,231	8
-1 1 2	23,77	23,76	3,740	1	-2 2 3	40,96	40,97	2,202	4
2 1 1	24,64	24,64	3,610	15	-5 0 1	–	40,98	–	–
0 2 0	25,91	25,90	3,436	2	0 1 4	42,58	42,58	2,122	15
0 2 1	27,80	27,79	3,207	3	-2 1 4	–	42,60	–	–
2 0 2	–	28,47	–	–	4 0 2	–	42,60	–	–
-3 0 2	28,49	28,49	3,130	5	4 2 0	–	42,60	–	–
0 0 3	30,02	30,03	2,974	3	0 3 2	–	44,40	–	–
-2 0 3	31,19	31,19	2,865	10	-1 3 2	44,41	44,41	2,038	<1
2 1 2	–	31,35	–	–	4 1 2	44,68	44,69	2,027	1
-2 2 1	–	31,35	–	–	2 3 1	44,91	44,92	2,017	1
-3 1 2	31,37	31,37	2,849	35	1 3 2	46,05	46,05	1,969	1
-1 1 3	32,25	32,25	2,774	1	2 2 3	–	46,06	–	–
1 0 3	32,82	32,83	2,727	5	-2 3 2	–	46,06	–	–
4 0 0	33,22	33,23	2,695	1	2 0 4	47,17	47,17	1,925	6

$\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2$. При повышении температуры до 50°C вышеописанный полугидрат растворяется, а в смеси появляются иглоподобные кристаллы фосфата состава $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2$. Как показал анализ его дифрактометрических данных (табл. 3), вещество изоструктурно с аналогичными солями Yb и Lu [7, 10] и кристаллизуется в моноклинной сингонии с параметрами элементарной ячейки: $a = 11,011(3)$, $b = 6,876(2)$, $c = 9,117(2)$ Å; $\beta = 101,90(2)^\circ$ (критерии достоверности результатов индексирования: $M_{20} =$

28, $F_{20} = 43$, $M_{30} = 22$, $F_{30} = 38$, $M_{34} = 22$, $F_{34} = 39$). $TmH_3(PO_4)_2$ является стабильной фазой вплоть до 100 °С.

$Tm_3H_5(PO_4)_2(P_2O_7)_2$. Смешанный по аниону кислый монофосфат-дифосфат тулия кристаллизуется при 125 °С в форме объемных скошенных призм. Ранее выполненный предварительный анализ его дифрактограммы [23] позволил определить параметры тригональной элементарной ячейки $Tm_3H_5(PO_4)_2(P_2O_7)_2$: $a = 6,9092(2)$, $c = 17,593(1)$ Å; $Z = 2$. Вещество изоструктурно с аналогичными фосфатами иттербия [7] и лютеция [10] и также является стабильной фазой при 125 °С.

$Tm_2O_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n < 1$). При повышении температуры до 150 °С $Tm_3H_5(PO_4)_2(P_2O_7)_2$ медленно растворяется и в смесях появляются кристаллы в виде тонких прямоугольных призм, принадлежащих кислому конденсированному фосфату состава $Tm_2O_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n < 1$). В табл. 4 приведены индексированные дифрактометрические данные этого соединения, на основании которых вычислены параметры его орторомбической ячейки: $a = 12.007(2)$, $b = 6.898(2)$, $c = 6.876(1)$ Å (критерии достоверности результатов индексирования: $M_{20} = 34$, $F_{20} = 44$, $M_{29} = 30$, $F_{29} = 49$). К сожалению, на данном этапе из-за высокой химической стабильности соединения нам не удалось однозначно установить его анионный состав, что будет сделано в дальнейшем. Отметим лишь, что, судя по предварительным данным бумажной хроматографии, синтезированный $Tm_2O_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n < 1$), вероятно, является смешанным по аниону кислым дифосфатом-тетрафосфатом тулия.

Следует отметить, что полученные нами кристаллографические характеристики $TmH_3(PO_4)_2 \cdot 0,5H_2O$, $TmH_3(PO_4)_2$, $Tm_3H_5(PO_4)_2(P_2O_7)_2$ и $Tm_2O_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n < 1$) являются предварительными. Окончательные данные будут получены в ходе выполнения полного рентгеноструктурного анализа этих соединений.

$Tm(PO_3)_3$ –С. В условиях эксперимента $Tm_2O_3 \cdot 2P_2O_5 \cdot nH_2O$ ($n < 1$) является стабильной фазой и при 175 °С. Однако при повышении температуры до 200 °С в системе отмечается ряд превращений. По мере растворения кристаллов вышеописанного соединения в смеси появляются новые кристаллы, имеющие форму скошенных призм и принадлежащие известному соединению – полифосфату $Tm(PO_3)_3$ (форма С) [19]. Вещество принадлежит к обширному семейству полифосфатов трехвалентных металлов $M(PO_3)_3$ –С ($M = Al, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Ga, Y, Mo, Rh, In, Nd-Lu, Tl$) [17]. Оно является метастабильной фазой в широком интервале температур (табл. 1) и при длительном выдерживании смесей выше 200 °С постепенно растворяется в маточном расплаве. В смеси при этом образуются кристаллы в форме удлинённых скошенных призм, принадлежащих

новому соединению – среднему полифосфату тулия состава $\text{Tm}(\text{PO}_3)_3$ (форма II).

Таблица 4

Индексированные дифрактометрические данные $\text{Tm}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{P}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n < 1$)

hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$	hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$
0 0 1	12,87	12,86	6,88	25	1 1 3	42,19	42,19	2,140	10
2 0 0	14,74	14,74	6,00	100	2 1 3	44,24	44,25	2,046	2
2 0 1	19,62	19,61	4,52	75	6 0 0	45,28	45,28	2,001	30
0 0 2	25,90	25,89	3,440	30	5 2 0	–	46,02	–	–
1 2 0	26,86	26,87	3,317	35	5 0 2	46,06	46,07	1,969	4
3 1 1	28,85	28,85	3,092	10	6 1 0	–	47,26	–	–
0 1 2	28,98	28,99	3,079	10	6 0 1	47,28	47,27	1,921	4
1 1 2	29,94	29,95	2,982	30	0 3 2	–	47,53	–	–
4 1 0	32,51	32,50	2,752	90	3 1 3	47,54	47,54	1,911	7
4 0 1	–	32,52	–	–	5 2 1	47,98	47,98	1,895	7
3 2 0	34,30	34,29	2,612	2	6 1 1	49,18	49,19	1,851	2
4 1 1	35,08	35,09	2,556	4	4 0 3	–	50,03	–	–
3 2 1	36,78	36,77	2,442	10	2 3 2	50,05	50,04	1,821	15
1 2 2	37,67	37,66	2,386	7	4 3 1	51,77	51,77	1,764	7
0 3 0	39,15	39,14	2,299	5	4 1 3	51,86	51,87	1,762	8
4 0 2	39,84	39,83	2,261	3	6 0 2	52,91	52,90	1,729	10
4 2 1	41,98	41,97	2,150	8	3 3 2	53,05	53,05	1,725	10
2 0 3	–	42,17	–	–	0 4 0	–	53,06	–	–

$\text{Tm}(\text{PO}_3)_3$ –II. Полифосфат $\text{Tm}(\text{PO}_3)_3$ –II является стабильной фазой в интервале температур 200–300 °С. Его индексированные дифрактометрические данные приведены в табл. 5. Полифосфат изоструктурен с известными соединениями семейства $\text{Ln}(\text{PO}_3)_3$ –II ($\text{Ln} = \text{Lu}, \text{Er}, \text{Y}$) [10, 24, 25]. Показано, что вещество кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/m$, параметры элементарной ячейки: $a = 10,886(1)$, $b = 9,647(1)$, $c = 6,948(1)$ Å; $\beta = 91,69(1)^\circ$; $Z = 4$ (критерии достоверности результатов индексирования: $M_{20} = 38$, $F_{20} = 86$, $M_{30} = 32$, $F_{30} = 83$, $M_{53} = 19$, $F_{53} = 67$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом тонкого слоя изучены фазовые равновесия в открытой системе Tm_2O_3 – P_2O_5 – H_2O в интервале температур 20–300 °С и соотношении реагентов $\text{P}_2\text{O}_5 : \text{Tm}_2\text{O}_3 = 5 : 1$. Определены условия получения семи фосфатов тулия, шесть из которых получены впервые. Показано, что при уменьшении влагосодержания смесей и/или повышении температуры в интервале 20–300 °С в системе Tm_2O_3 – P_2O_5 – H_2O последовательно кристаллизуются $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (метастаб.), $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, $\text{TmH}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Tm}_3\text{H}_5(\text{PO}_4)_2(\text{P}_2\text{O}_7)_2$, $\text{Tm}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{P}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n < 1$), $\text{Tm}(\text{PO}_3)_3$ –C

(метастаб.), и $\text{Tm}(\text{PO}_3)_3\text{-II}$. Определены основные кристаллографические характеристики полученных соединений.

Таблица 5

Индексированные дифрактометрические данные $\text{Tm}(\text{PO}_3)_3\text{-II}$

hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$	hkl	$2\theta_{\text{выч}}$	$2\theta_{\text{эксп}}$	$d_{\text{эксп}}, \text{Å}$	$I, \%$
0 0 1	12,74	12,74	6,95	3	-2 2 2	35,49	35,49	2,527	9
-1 0 1	14,92	14,92	5,93	2	4 0 1	35,77	35,78	2,508	1
1 0 1	15,33	15,32	5,78	10	2 2 2	36,23	36,22	2,477	10
0 1 1	15,71	15,71	5,64	55	-4 1 1	—	36,30	—	—
2 0 0	16,28	16,28	5,44	5	3 0 2	36,32	36,31	2,472	10
0 2 0	18,38	18,38	4,82	15	4 1 1	37,02	37,01	2,426	6
2 1 0	18,71	18,71	4,74	25	0 4 0	37,26	37,25	2,411	10
-2 0 1	20,43	20,42	4,34	6	4 2 0	37,94	37,94	2,370	2
-2 1 1	—	22,42	—	—	-1 3 2	—	38,86	—	—
0 2 1	22,43	22,42	3,961	30	0 0 3	38,87	38,87	2,315	3
2 1 1	22,96	22,97	3,870	20	1 3 2	39,19	39,20	2,297	1
-1 2 1	23,76	23,75	3,742	5	0 4 1	39,52	39,52	2,278	15
1 2 1	24,02	24,01	3,702	3	-1 0 3	—	39,53	—	—
2 2 0	24,66	24,65	3,607	100	-3 2 2	—	40,01	—	—
0 0 2	25,64	25,63	3,472	65	0 1 3	—	40,02	—	—
3 1 0	26,22	26,23	3,396	1	1 0 3	40,03	40,02	2,251	9
-1 0 2	26,70	26,69	3,336	4	1 4 1	—	40,50	—	—
1 0 2	27,16	27,16	3,281	8	4 2 1	40,52	40,51	2,225	4
-3 0 1	27,39	27,38	3,254	1	2 4 0	40,91	40,90	2,204	10
-1 1 2	28,29	28,28	3,152	20	3 2 2	40,98	41,00	2,201	10
1 1 2	28,73	28,72	3,105	20	-4 0 2	41,54	41,53	2,172	1
3 1 1	29,57	29,58	3,019	1	2 3 2	42,00	42,01	2,150	1
-2 0 2	30,10	30,09	2,967	2	5 1 0	42,54	42,55	2,123	1
0 3 1	30,60	30,61	2,919	1	-2 1 3	43,00	43,01	2,102	2
-2 1 2	31,51	31,52	2,837	1	4 3 0	43,54	43,54	2,077	8
0 2 2	31,72	31,72	2,819	1	-1 2 3	43,92	43,92	2,060	8
2 3 0	—	32,31	—	—	2 1 3	—	43,93	—	—
2 1 2	32,33	32,32	2,767	10	5 0 1	—	43,93	—	—
4 0 0	32,91	32,90	2,719	6	1 2 3	44,37	44,37	2,040	5
3 2 1	33,76	33,76	2,653	5	5 1 1	44,98	44,97	2,014	—
4 1 0	34,22	34,22	2,618	7	-4 3 1	45,24	45,25	2,003	10
-2 3 1	34,67	34,67	2,585	5	-3 0 3	—	45,84	—	—
-4 0 1	—	35,04	—	—	4 3 1	45,85	45,85	1,978	10
2 3 1	35,05	35,05	2,558	15	3 3 2	46,29	46,28	1,960	5

ЛИТЕРАТУРА

1. Селевич А. Ф., Лесникович А. И. // Журн. неорган. химии. 1994. Т. 39, № 8. С. 1386–1390.
2. Селевич А. Ф., Лесникович А. И. // Журн. неорган. химии. 1995. Т. 40, № 5. С. 849–852.

3. Селевич А. Ф., Лесникович А. И. // Журн. неорган. химии. 1995. Т. 40, № 11. С. 1907–1913.
4. Селевич А. Ф., Ляхов А. С., Лесникович А. И. // Журн. неорган. химии. 2000. Т. 45, № 2. С. 305–313.
5. Selevich A. F., Ivashkevich L. S., Lyakhov A. S., Lesnikovich A. I. // Phosphorus Res. Bull. 2001. Vol. 12. P. 91–98.
6. Selevich A. F., Lyakhov A. S., Lesnikovich A. I. // Phosphorus Res. Bull. 2002. Vol. 13. P. 231–234.
7. Selevich A., Khurs K., Lyakhov A., Lesnikovich A. // Phosphorus Res. Bull. 2005. Vol. 19. P. 234–239.
8. Селевич А. Ф., Лесникович А. И. // Свиридовские чтения: Сб. ст. Вып. 3. Минск, 2007. С. 98–102.
9. Селевич А. Ф., Лесникович А. И. // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. науч. тр.: материалы XX междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, 2–4 октября 2007 г.). Минск: Беларус. наука, 2008. С. 148–154.
10. Селевич А. Ф., Ивашкевич Д. О., Лесникович А. И. // Свиридовские чтения: Сб. ст. Вып. 5. Минск, 2009. С. 72–79.
11. Selevich A. F., Lyakhov A. S., Lesnikovich A. I. // Phosphorus Res. Bull. 1999. Vol. 10. P. 171–176.
12. Селевич А. Ф., Ляхов А. С., Лесникович А. И. // Свиридовские чтения: Сб. ст. Вып. 2. Минск, 2005. С. 51–56.
13. Selevich A. F., Lesnikovich A. I. // Phosphorus Res. Bull. 1996. Vol. 6. P. 277–280.
14. Selevich A. F., Lyakhov A. S. // The 6th International Symposium on Inorganic Phosphate Materials: Book of abstracts. La Rochelle, France, 2008. P. 0–7.
15. Литвин Б. Н., Маслобоев В. А. Редкоземельные фосфаты. Л., 1989. 208 с.
16. Averbuch–Pouchot M.–T., Durif A. Topics in phosphate chemistry. Singapore, 1996. 404 p.
17. Durif A. Crystal chemistry of condensed phosphates. New York, 1995. 408 p.
18. Bagieu–Beucher M., Tranqui D. // Bull. Soc. franc. minér. cristallogr. 1970. Т. 93. № 5–6. P. 505–508.
19. Мельников П. П., Комиссарова Л. Н., Бутузова Т. А. // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. 1981. Т. 17, № 11. С. 2110–2112.
20. Кузнецов В. Г., Петушкова С. М., Тананаев И. В. // Журн. неорган. химии. 1969. Т. 14. № 10, С. 2753–2757.
21. Krstanovic J. R. // Acta Crystallogr. 1958. Vol. 11. P. 896–897.
22. Werner P. E., Eriksson L., Westdahl M. // J. Appl. Crystallogr. 1985. Vol. 18. P. 367–379.
23. Selevich A. F., Ivashkevich L. S., Khurs K. I., Lesnikovich A. I. // Phosphorus Res. Bull. 2003. Vol. 16. P. 27–32.
24. Дорохова Г. И., Карнов О. Г. // Кристаллография. 1984. Т. 29, № 4. С. 677–680.
25. Graia M., Driss A., Jouini T. // Solid State Sci. 2003. Vol. 5. P. 393–402.