

УДК 536.63

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНАТОВ $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Yb}$)

© 2023 г. Л. Т. Денисова¹, *, Л. Г. Чумилина¹, Ю. Ф. Каргин²,
Г. В. Васильев¹, В. В. Белецкий¹, В. М. Денисов¹

¹Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041 Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук, Ленинский пр., 49, Москва, 119991 Россия

*e-mail: ldenisova@sfu-kras.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022 г.

После доработки 08.02.2023 г.

Принята к публикации 10.02.2023 г.

Твердофазным синтезом из смесей оксидов Ga_2O_3 , TiO_2 и R_2O_3 обжигом на воздухе при 1273 и 1573 К получены замещенные титанаты $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}$ и Yb). По данным рентгеновской дифракции определена их кристаллическая структура. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии исследовано влияние температуры (320–1000 К) на теплоемкость синтезированных соединений. По экспериментальным данным $C_p = f(T)$ рассчитаны основные термодинамические функции и методом групповых вкладов рассчитаны стандартные значения энтальпии и энергии Гиббса образования $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}$ и Yb).

Ключевые слова: твердофазный синтез, замещенные титанаты, теплоемкость, термодинамические свойства

DOI: 10.31857/S0002337X23060088, **EDN:** EQWQUF

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени титанаты редкоземельных элементов (РЗЭ) $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ остаются в поле зрения исследователей и практиков [1–5]. Это связано с возможностями их практического применения [1, 6–8]. Для расширения областей их использования проводят допирование [2], изоморфное замещение одних РЗЭ на другие [9, 10], а также частичное замещение РЗЭ другими металлами $\text{RM-Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{M} = \text{Ga}, \text{Fe}$) [11–15]. К настоящему времени наименее исследованными являются соединения $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$. Для некоторых из них имеются сведения о кристаллической структуре и термодинамических свойствах: $\text{R} = \text{Eu}$ и Dy [16], Gd [17], Er [18], Lu [19]. Подобные данные для галлийсодержащих титанатов с другими РЗЭ в литературе отсутствуют. В то же время такие результаты необходимы для компьютерного моделирования диаграмм состояния, которые для систем $\text{R}_2\text{O}_3\text{--Ga}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ полностью не построены.

В настоящем сообщении приведены данные о кристаллической структуре и основных термодинамических функциях (изменении энтальпии, энтропии и энергии Гиббса) титанатов $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}$ и Yb).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Замещенные титанаты $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Yb}$) получали твердофазным методом. Для синтеза в качестве исходных компонентов использовали Ga_2O_3 , TiO_2 и Sm_2O_3 “ос. ч.”, Ho_2O_3 , Tm_2O_3 и Yb_2O_3 “х. ч.”. Методика синтеза описана нами ранее [16–19]. Контроль полноты твердофазного взаимодействия исходных компонентов проводили с использованием рентгенофазового анализа синтезированных образцов (дифрактометр D8 Advance фирмы Bruker, линейный детектор Vantec, CuK_α -излучение). Методика проведения дифракционного эксперимента аналогична описанной в работах [17, 19].

Высокотемпературную теплоемкость C_p полученных титанатов $\text{R GaTi}_2\text{O}_7$ измеряли на термодинамическом анализаторе STA 449 C Jupiter (NETZSCH, Германия) методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Методика экспериментов подобна описанной в работе [20]. Ошибка определения C_p не превышала 2%.

Таблица 1. Параметры элементарных ячеек и рассчитанные значения плотности титанатов

RGaTi_2O_7	$\text{SmGaTi}_2\text{O}_7$	$\text{HoGaTi}_2\text{O}_7$	$\text{TmGaTi}_2\text{O}_7$	$\text{YbGaTi}_2\text{O}_7$
$a, \text{Å}$	9.78912(7)	9.77274(6)	9.75790(6)	9.75311(3)
$b, \text{Å}$	13.64303(2)	13.53414(3)	13.48913(1)	13.46927(3)
$c, \text{Å}$	7.48341(6)	7.35214(2)	7.32101(3)	7.30318(4)
$V, \text{Å}^3$	999.43(4)	972.43(3)	963.63(4)	959.39(3)
$d, \text{г/см}^3$	5.685	6.041	6.152	6.236

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Все рефлексы на дифрактограммах однофазных образцов для всех синтезированных соединений проиндексированы в ромбической ячейке (пр. гр. *Rcnb*). Полученные данные по параметрам элементарных ячеек и рассчитанные значения плотности титанатов RGaTi_2O_7 ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Yb}$) приведены в табл. 1. Сравнить полученные нами результаты с данными других авторов не представлялось возможным вследствие их отсутствия.

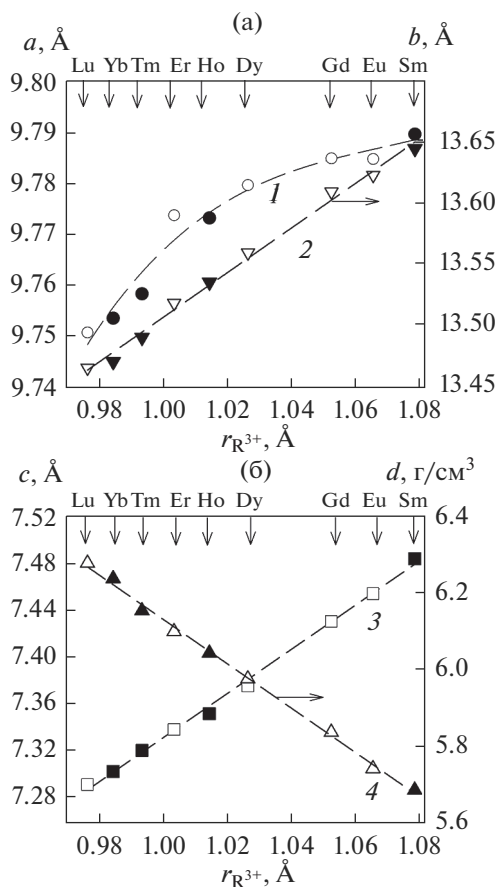


Рис. 1. Влияние значений ионных радиусов РЗЭ на параметры элементарной ячейки a (1), b (2), c (3) и плотность d (4) титанатов RGaTi_2O_7 ; темные символы – настоящая работа, светлые – [16].

Ранее было установлено, что для титанатов RGaTi_2O_7 ($\text{R} = \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}, \text{Lu}$) зависимости параметров элементарной ячейки (b, c), а также их плотности от ионных радиусов РЗЭ имеют линейный характер [16]. Аналогичная зависимость для этих титанатов наблюдается и для объема элементарных ячеек [18]. На рис. 1 и 2 показана корреляция между параметрами элементарных ячеек титанатов RGaTi_2O_7 и значениями ионных радиусов РЗЭ. На них приведены полученные данные для RGaTi_2O_7 ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}, \text{Yb}$) и результаты работ [16] и [18]. Видно, что установленные ранее закономерности для $\text{R} = \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}$ и Lu соблюдаются и для всего ряда изученных РЗЭ. Это свидетельствует о том, что полученные нами значения параметров элементарных ячеек титанатов RGaTi_2O_7 ($\text{R} = \text{Sm}, \text{Ho}, \text{Tm}$ и Yb) можно считать достаточно корректными.

Экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе, и данные [16] и [18] для b, c, V и d в зависимости от ионных радиусов РЗЭ могут быть описаны следующими уравнениями:

$$b = (11.68 \pm 0.06) + (1.82 \pm 0.05)r_{\text{R}^{3+}}, \quad (1)$$

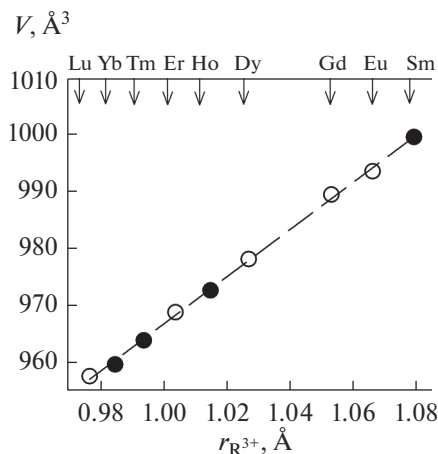


Рис. 2. Зависимость объема элементарной ячейки титанатов RGaTi_2O_7 от радиусов РЗЭ: темные символы – настоящая работа, светлые – [18].

$$c = (5.46 \pm 0.04) + (1.87 \pm 0.04)r_{R^{3+}}, \quad (2)$$

$$V = (548.16 \pm 5.46) + (418.27 \pm 5.33)r_{R^{3+}}, \quad (3)$$

$$d = (11.92 \pm 0.12) - (5.79 \pm 0.12)r_{R^{3+}}. \quad (4)$$

Коэффициенты корреляции для уравнений (1)–(4) равны соответственно 0.9969, 0.9984, 0.9994 и 0.9985. Значения ионных радиусов R^{3+} взяты из работы [21]. Следует отметить, что параметр a для титанатов $RGaTi_2O_7$ в зависимости от $r_{R^{3+}}$ меняется нелинейно. Подобное отмечено ранее [16]. Не исключено, что это связано с малым изменением параметра a ($\Delta a \approx 0.04 \text{ \AA}$), тогда как Δb и Δc составляют $\approx 0.2 \text{ \AA}$.

Из-за близости значений молярной теплоемкости титанатов $RGaTi_2O_7$ ($R = Sm, Ho, Tm, Yb$) на рис. 3 в качестве примера показано влияние температуры на теплоемкость $HoGaTi_2O_7$ и $SmGaTi_2O_7$. Видно, что в интервале температур 320–1000 К значения C_p закономерно увеличиваются, а на кривых $C_p = f(T)$ нет различного рода экстремумов (такие же данные получены для $TmGaTi_2O_7$ и $YbGaTi_2O_7$). Установлено, что полученные экспериментальные данные по теплоемкости в данном интервале температур хорошо описываются уравнением Майера–Келли [22]

$$C_p = a + bT - cT^{-2}. \quad (5)$$

Коэффициенты уравнения (5) для исследованных титанатов приведены в табл. 2. Здесь же для сравнения приведены данные [16–19].

С использованием экспериментальных данных по теплоемкости исследованных титанатов

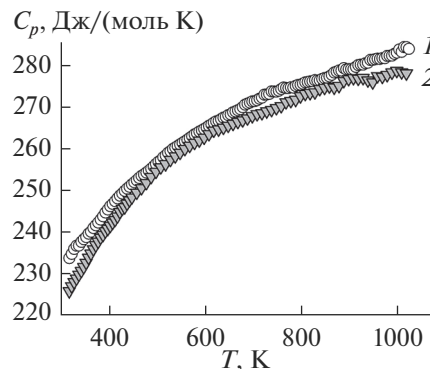


Рис. 3. Температурные зависимости молярной теплоемкости $HoGaTi_2O_7$ (1), $SmGaTi_2O_7$ (2).

(табл. 2) были рассчитаны их основные термодинамические свойства (табл. 3).

Сведений о стандартных энтальпиях $\Delta_f H_{298}^0$ и энергиях Гиббса $\Delta_f G_{298}^0$ образования замещенных титанатов $RGaTi_2O_7$ в литературе нет. Поэтому мы их рассчитали методом групповых вкладов (ГВ) [23]. Достоинством этого метода является отсутствие необходимости иметь какие-либо дополнительные данные. Полученные результаты приведены в табл. 4. Поскольку другие данные для анализируемых соединений отсутствуют, сравнение полученных результатов проведем с данными [24] для титанатов $R_2Ti_2O_7$. Видно, что в последнем случае значения $\Delta_f H_{298}^0$ несколько выше. Для оценки достоверности метода ГВ проведен расчет для незамещенных титанатов. Из данных табл. 4 следует, что максимальная ошибка не превышает 7.7%. Это

Таблица 2. Коэффициенты a, b и c уравнения (5) для титанатов (320–1000 К)

$RGaTi_2O_7$	a	b	c	r	Источник
$SmGaTi_2O_7$	262.90 ± 0.35	20.63 ± 0.40	46.99 ± 0.36	0.9991	НР*
$EuGaTi_2O_7$	259.30 ± 0.90	37.60 ± 0.90	43.96 ± 0.78	0.9988	[16]
$GdGaTi_2O_7$	266.70 ± 0.50	15.91 ± 0.50	45.39 ± 0.48	0.9992	[17]
$DyGaTi_2O_7$	255.30 ± 0.56	30.30 ± 0.60	33.93 ± 0.55	0.9990	[16]
$HoGaTi_2O_7$	254.61 ± 0.65	32.40 ± 0.70	34.14 ± 0.64	0.9987	НР
$ErGaTi_2O_7$	255.85 ± 0.43	30.90 ± 0.50	39.11 ± 0.42	0.9990	[18]
$TmGaTi_2O_7$	251.58 ± 0.57	32.50 ± 0.60	38.90 ± 0.56	0.9991	НР
$YbGaTi_2O_7$	248.29 ± 0.51	42.0 ± 0.5	36.96 ± 0.49	0.9994	НР
$LuGaTi_2O_7$	252.43 ± 0.61	25.7 ± 0.7	39.56 ± 0.59	0.9989	[19]

* Настоящая работа.

Таблица 3. Термодинамические свойства титанатов

T, K	$C_p,$ Дж/(моль К)	$H^0(T) - H^0(320 K),$ кДж/моль	$S^0(T) - S^0(320 K),$ Дж/(моль К)	$-(\Delta G/T^*),$ Дж/(моль К)
SmGaTi₂O₇				
320	223.7	—	—	—
350	231.8	6.84	20.42	0.88
400	241.9	18.70	52.7	5.33
450	249.1	30.98	81.00	12.16
500	254.5	43.57	107.5	20.39
550	258.8	56.41	132.0	29.44
600	262.3	69.44	154.7	38.94
650	265.3	82.63	175.8	48.66
700	267.8	95.96	195.5	58.45
750	270.1	109.4	214.1	68.22
800	272.1	123.0	231.6	77.89
850	274.0	136.6	248.2	87.42
900	275.7	150.4	263.8	96.79
950	277.4	164.2	278.8	106.0
1000	278.9	178.1	293.1	115.0
HoGaTi₂O₇				
320	231.6	—	—	—
350	238.1	7.05	21.05	0.91
400	246.2	19.17	53.40	5.48
450	252.3	31.64	82.77	12.46
500	257.1	44.38	109.6	20.86
550	261.1	57.34	134.3	30.06
600	264.5	70.48	157.2	39.72
650	267.6	83.78	178.5	49.58
700	270.3	97.23	198.4	59.51
750	272.8	110.8	217.1	69.40
800	275.2	124.5	234.8	79.19
850	277.4	138.3	251.6	88.84
900	279.5	152.2	267.5	98.33
950	281.6	166.3	282.7	107.6
1000	283.5	180.4	297.1	116.7
TmGaTi₂O₇				
320	224.0	—	—	—
350	231.2	6.83	20.40	0.88
400	240.3	18.63	51.90	5.32
450	247.0	30.82	80.61	12.12
500	252.3	43.31	106.9	20.30
550	256.6	56.03	131.2	29.29
600	260.3	68.96	153.6	38.73
650	263.5	82.05	174.6	48.38
700	266.4	95.30	194.2	58.11
750	269.0	108.7	212.7	67.81
800	271.5	122.2	230.2	77.41

Таблица 3. Окончание

T, K	$C_p,$ Дж/(моль К)	$H^0(T) - H^0(320 \text{ K}),$ кДж/моль	$S^0(T) - S^0(320 \text{ K}),$ Дж/(моль К)	$-(\Delta G/T^*),$ Дж/(моль К)
850	273.8	135.8	246.7	86.89
900	276.0	149.6	262.4	96.21
950	278.2	163.4	277.4	105.4
1000	280.2	177.4	291.7	114.3
YbGaTi ₂ O ₇				
320	225.6	—	—	—
350	232.8	6.88	20.55	0.89
400	242.0	18.76	52.27	5.36
450	248.9	31.04	81.19	12.20
500	254.5	43.63	107.7	20.45
550	259.2	56.48	132.2	29.51
600	263.2	69.54	154.9	39.02
650	266.8	82.79	176.1	48.76
700	270.1	96.22	196.0	58.58
750	273.2	109.8	214.8	68.37
800	276.1	123.5	232.5	78.08
850	278.9	137.4	249.3	87.66
900	281.5	151.4	265.3	97.09
950	284.1	165.6	280.6	106.3
1000	286.6	179.8	295.3	115.4

* $-\Delta G/T = [H^0(T) - H^0(320 \text{ K})]/T - [S^0(T) - S^0(320 \text{ K})]$.Таблица 4. Стандартные энтальпии и энергии Гиббса образования титанатов RGaTi₂O₇ и R₂Ti₂O₇

Соединение	$-\Delta_f H_{298}^0,$ кДж/моль	$-\Delta_f G_{298}^0,$ кДж/моль	Соединение	$-\Delta_f H_{298}^0,$ кДж/моль [24]	$-\Delta_f H_{298}^0,$ кДж/моль
SmGaTi ₂ O ₇	3267.7 ± 73.8	3062.1 ± 112.9	Sm ₂ Ti ₂ O ₇	3808.5 ± 4.8	3723.1 (−2.2)
EuGaTi ₂ O ₇	3184.4 ± 73.8	2990.1 ± 112.2	Eu ₂ Ti ₂ O ₇	3646.4 ± 9.5	3656.6 (0.3)
GdGaTi ₂ O ₇	3255.4 ± 72.7	3067.9 ± 112.2	Gd ₂ Ti ₂ O ₇	3822.5 ± 4.7	3698.5 (−3.2)
DyGaTi ₂ O ₇	3261.7 ± 74.6	3079.0 ± 112.0	Dy ₂ Ti ₂ O ₇	3849.2 ± 5.5	3711.3 (−3.6)
HoGaTi ₂ O ₇	3276.8 ± 73.3	3089.9 ± 112.0	Ho ₂ Ti ₂ O ₇	3848.4 ± 6.8	3741.3 (−2.8)
ErGaTi ₂ O ₇	3274.2 ± 73.8	3089.4 ± 112.0	Er ₂ Ti ₂ O ₇	3852.7 ± 4.5	3556.6 (−7.7)
TmGaTi ₂ O ₇	3248.1 ± 75.5	2979.5 ± 113.1	Tm ₂ Ti ₂ O ₇	3998.8 ± 3.6	3684.0 (−5.8)
YbGaTi ₂ O ₇	3234.4 ± 75.5	3044.8 ± 112.9	Yb ₂ Ti ₂ O ₇	3770.8 ± 4.2	3556.7 (−5.7)
LuGaTi ₂ O ₇	3273.8 ± 75.5	3079.9 ± 114.3	Lu ₂ Ti ₂ O ₇	3819.0 ± 8.6	3735.5 (−2.2)

Примечание. В скобках указано отклонение (%).

позволяет считать, что результаты расчетов стандартных энтальпий и энергий Гиббса для замещенных титанатов являются удовлетворительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом твердофазного синтеза получены замещенные титанаты RGaTi_2O_7 ($R = \text{Sm, Ho, Tm и Yb}$). С использованием рентгеновской дифракции установлена их кристаллическая структура. В интервале температур 320–1000 К методом дифференциальной сканирующей калориметрии измерена теплоемкость синтезированных соединений. Установлено, что зависимости $C_p = f(T)$ могут быть описаны уравнением Майера–Келли.

По экспериментальным данным рассчитаны основные термодинамические функции. Методом ГВ рассчитаны значения $\Delta_f H_{298}^0$ и $\Delta_f G_{298}^0$ титанатов RGaTi_2O_7 ($R = \text{Sm, Eu, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu}$).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссарова Л.Н., Шацкий В.М., Пушкина Г.Я. и др. Соединения редкоземельных элементов. Карбонаты, оксалаты, нитраты, титанаты. М.: Наука, 1984. 235 с.
2. Li C., Xiang H., Chen J., Fang L. Phase Transition, Dielectric Relaxation and Piezoelectric Properties of Bismuth Doped $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ Ceramics // *Ceram. Int.* 2016. V. 42. P. 1153–1158.
3. Zhang W., Zhang L., Zong H. et al. Synthesis and Characterization of Ultrafine $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{Sm, Gd, Dy, Er}$) Pyrochlore Oxides by Stearic Method // *Mater. Character.* 2010. V. 61. P. 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.materchar.2009.11.005>
4. Gao Z., Wu L., Gu W., Zhang T. et al. Anisotropic Conductivity of Ferroelectric $\text{La}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ Ceramics // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2017. V. 37. № 1. P. 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.eurceramsoc.2016.08.020>
5. Ben Amor N., Bejar M., Hussein M. et al. Synthesis, Magnetic Properties, Magnetic Entropy and Arrot Plot of Antiferromagnetic Frustrated $\text{Er}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ Compound // *Supercond. Nov. Magn.* 2012. V. 25. P. 1035–1042. <https://doi.org/10.1007/s10948-011-1344-9>
6. Суслов Д.Н. Теплоемкость и теплопроводность титаната диспрозия // *Перспективные материалы.* 2004. № 3. С. 28–30.
7. Васильева М.Ф., Герасюк А.К., Гоев А.И. и др. Высококачественные оптические покрытия для видимой и ближней ИК-областей спектра, созданные на базе новых пленкообразующих материалов – дититаната гадолиния и дититаната лютеция // *Прикл. физика.* 2007. № 8. С. 91–98.
8. Hwang D.W., Lee J.S., Li W., Oh S.H. Electronic Band Structure and Photocatalytic Activity of $\text{Ln}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{La, Pr, Nd}$) // *J. Phys. Chem. B.* 2003. V. 107. P. 4963–4970. <https://doi.org/10.1021/jp034229n>
9. Chen C., Gao Z., Yan H., Reece M.J. Crystallographic Structure and Ferroelectricity of $(\text{A}_x\text{La}_{1-x})_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ($\text{A} = \text{Sm and Eu}$) Solid Solutions with High T_c // *J. Am. Ceram. Soc.* 2016. V. 98. № 2. P. 523–530. <https://doi.org/10.1111/jacs.13970>
10. Gao Z., Shi B., Ye H. et al. Ferroelectric and Dielectric Properties of $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{Ti}_2\text{O}_7$ Ceramics // *Adv. Appl. Ceram.* 2014. V. 144. № 4. P. 191–197. <https://doi.org/10.1179/1743676114Y.0000000221>
11. Генкина Е.А., Адрианов И.И., Белоконова Е.А. и др. Синтетический $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ – новая полиморфная модификация полимигнита // *Кристаллография.* 1991. Т. 36. № 9. С. 1408–1414.
12. Петраковский Г.А., Дрокина Т.В., Великанов Д.А. и др. *Физика твердого тела.* 2012. Т. 54. № 9. С. 1701–1704.
13. Drokina T.V., Petrakovskii G.A., Molokeyev M.S. et al. Spin-Glass Magnetism in RFeTi_2O_7 ($R = \text{Lu and Tb}$) // *Phys. Procedia.* 2015. V. 312. P. 580–588. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.12.074>
14. Drokina T.V., Petrakovskii G.A., Velikanov D.A., Molokeyev M.S. X-ray and Magnetic Measurements of $\text{TmFeTi}_2\text{O}_7$ // *Solid State Phenom.* 2014. V. 215. P. 470–473. <https://doi.org/10.4028/www.scintific.net/SSP.215.470>
15. Дрокина Т.В., Петраковский Г.А., Молокеев М.С., Великанов Д.А. Синтез, кристаллическая структура и магнитные свойства соединения $\text{YbFeTi}_2\text{O}_7$ // *Физика твердого тела.* 2018. Т. 60. № 3. С. 526–530. <https://doi.org/10.21883/FIT.2018.03.45557.209>
16. Денисова Л.Т., Молокеев М.С., Каргин Ю.Ф., Рябов В.В., Чумилина Л.Г., Белоусова Н.В., Денисов В.М. Структура и термодинамические свойства титанатов $\text{DyGaTi}_2\text{O}_7$ и $\text{EuGaTi}_2\text{O}_7$ // *Неорган. материалы.* 2021. Т. 57. № 7. С. 768–775. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21070058>
17. Денисова Л.Т., Молокеев М.С., Чумилина Л.Г. и др. Теплоемкость и термодинамические функции $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ в области 320–1000 К // *Физика твердого тела.* 2021. Т. 63. № 4. С. 471–474. <https://doi.org/10.21883/FIT.2021.04.50711.261>
18. Денисова Л.Т., Молокеев М.С., Рябов В.В., Каргин Ю.Ф., Чумилина Л.Г., Денисов В.М. Кристаллическая структура и термодинамические свойства титаната $\text{ErGaTi}_2\text{O}_7$ // *Журн. неорган. химии.* 2021. Т. 66. № 4. С. 492–497. <https://doi.org/10.31857/S00444457X21040085>
19. Денисова Л.Т., Молокеев М.С., Чумилина Л.Г., Каргин Ю.Ф., Денисов В.М., Рябов В.В. Синтез, кристаллическая структура и термодинамические свойства $\text{LuGaTi}_2\text{O}_7$ // *Неорган. материалы.* 2020.

- Т. 56. № 12. С. 1311–1316.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20120052>
20. Денисова Л.Т., Иртюго Л.А., Каргин Ю.Ф., Белецкий В.В., Денисов В.М. Высокотемпературная теплоемкость $Tb_2Sn_2O_7$ // Неорганич. материалы. 2017. Т. 53. № 1. С. 71–73.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X17010043>
21. Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Inter-atomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallogr., Sect. A. 1976. V. 32. P. 751–767.
22. Maier C.G., Kelley K.K. An Equation for the Representation of High Temperature Heat Content Data // J. Am. Chem. Soc. 1932. V. 54. № 8. P. 3243–3246.
<https://doi.org/10.1021/ja01347a029>
23. Mostafa A.T.M.G., Eakman J.M., Yarbrow S.L. Prediction of Standard Heats and Gibbs Free Energies of Formation of Solid Inorganic Salts from Group Contributions // Ind. Eng. Res. 1995. V. 34. P. 4577–4582.
24. Navrotsky A., Lee W., Mielewczyk-Gryn A., Ushakov S.V. et al. Thermodynamics of Solid Phases Containing Rare Earth Oxides // J. Chem. Thermodyn. 2015. V. 88. P. 126–141.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.04.008>