

ТЕПЛОЕМКОСТЬ:  
ЭКСПЕРИМЕНТ И РАСЧЕТ

УДК 544.31

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ДОПИРОВАННЫХ ГАДОЛИНИЕМ  
СОЕДИНЕНИЙ  $Ba(La,Gd)_2WO_7$

© 2022 г. Д. Б. Гоголь<sup>a,\*</sup>, Ш. Т. Таймасова<sup>a</sup>, М. Р. Бисенгалиева<sup>a</sup>,  
Д. Т. Садырбеков<sup>a,b</sup>, Д. А. Кайкенов<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Институт проблем комплексного освоения недр, Караганда, 100019 Казахстан

<sup>b</sup>Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Караганда, 100028 Казахстан

\*e-mail: d.gogol@ipkon.kz

Поступила в редакцию 20.03.2022 г.

После доработки 21.03.2022 г.

Принята к публикации 25.03.2022 г.

Твердофазным методом синтезированы образцы в системах тройных оксидов на основе бария, лантана, гадолиния и вольфрама с общей формулой  $Ba(La,Gd)_2WO_7$ . Путем полнопрофильного расчета рентгеновских дифрактограмм уточнены параметры элементарных ячеек и оценено содержание дополнительных фаз. Методом адиабатической калориметрии исследована зависимость теплоемкости образцов от гелиевой области температур (4.25–325 К) и зарегистрированы аномалии, обусловленные наличием допирующего элемента. В экспериментальные значения теплоемкости внесена поправка на содержание примесных соединений. На основе экспериментальных данных выделена решеточная составляющая теплоемкости для определения величин изменения энтропии и энтальпии в области аномалий и рассчитаны термодинамические функции соединений в интервале 5–320 К. Определены стандартные значения термодинамических функций  $Ba(La_{1-x}Gd_x)_2WO_7$ : при  $x = 0.01$ , 0.03 и 0.05:  $C_{p,298.15}^\circ = 190.9 \pm 1.5$ ,  $198.6 \pm 1.5$  и  $207.0 \pm 1.5$  Дж/(моль К),  $S_{298.15}^\circ = 221.3 \pm 12.9$ ,  $229.6 \pm 13.3$  и  $229.1 \pm 13.4$  Дж/(моль К),  $H_{298.15}^\circ - H_0^\circ = 34161 \pm 1379$ ,  $35389 \pm 1430$  и  $35511 \pm 1429$  Дж/моль соответственно.

**Ключевые слова:** тройные оксиды, редкоземельные элементы, лантан, низкотемпературная теплоемкость, адиабатическая калориметрия

**DOI:** 10.31857/S0044453722090102

Вследствие особенной электронной конфигурации атомов редкоземельных элементов (РЗЭ) соединения и материалы на их основе обладают различными перспективными свойствами, высоко востребованными в современной технологии. Среди соединений РЗЭ со структурой пироклора и производными от них имеются сегнетоэлектрики, магнетики, полупроводники и сверхпроводники. При разработке современных материалов с участием РЗЭ широко применяется допирование атомами лантаноидов, что позволяет значительно расширить диапазон перспективных свойств таких материалов.

Гадолиний – один из лантаноидов, который обеспечивает наличие разнообразных функциональных свойств у соединений, в состав которых он входит. Эти соединения проявляют преимущественно оптические и люминесцентные свойства [1–3], диэлектрические свойства в микроволновом диапазоне [4], а также транспортные и

другие свойства [5, 6]. В проявлении подобных свойств важную роль играет строение используемой матрицы, т.е. кристаллическая структура допируемых соединений.

Кристаллическая структура соединений  $Ba-La_2WO_7$  и  $SrLa_2WO_7$  исследована в работах [7, 8], в которых они рассматриваются как перспективные материалы для радиоэлектронной промышленности. Соединения на основе  $BaLa_2WO_7$  – достаточно эффективные люминофоры, которые обладают оптической активностью при допировании атомами различных лантаноидов [9–13]. Также эти соединения проявляют хорошие диэлектрические свойства в микроволновом диапазоне [14]. Тем не менее, термодинамические свойства подобных соединений, как правило, остаются малоизученными.

В настоящей работе выполнен синтез и проведены исследования термодинамических свойств

допированных соединений с теоретическими формулами  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ , где  $x$  – стехиометрический коэффициент, зависящий от мольных соотношений компонентов. Мольные соотношения, выбранные для синтеза данных соединений, соответствовали 1, 3 и 5 мол. % оксида  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  по отношению к содержанию оксида лантана  $\text{La}_2\text{O}_3$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза образцов с теоретическими формулами  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$  при  $x = 0.01, 0.03$  и  $0.05$  в качестве исходных веществ использовали карбонат стронция  $\text{SrCO}_3$ , карбонат бария  $\text{BaCO}_3$ , оксид вольфрама (VI)  $\text{WO}_3$ , оксид лантана  $\text{La}_2\text{O}_3$ , оксид гадолиния  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . Реактивы, использованные при получении конечных соединений, соответствовали степеням чистоты “х.ч.” – для оксидов редкоземельных металлов, “ч.” – для карбонатов бария и стронция, “ч.д.а.” – для оксида вольфрама. Оксиды щелочно-земельных и редкоземельных металлов перед синтезом дополнительно прокаливали при  $900^\circ\text{C}$  в течение 2 ч для удаления избыточной влаги и поглощенного углекислого газа.

Для проведения синтеза использовали классический твердофазный метод получения сложных оксидов. Навески исходных реагентов, взятые в стехиометрических соотношениях, тщательно перетерли в агатовой ступке. Затем полученную смесь реактивов отжигали при  $700^\circ\text{C}$  в течение 10–12 ч в фарфоровых тиглях в атмосфере воздуха с целью связывания оксида вольфрама.

Далее полученные прекурсоры перетерли в агатовой ступке и прокаливали в алундовых тиглях в атмосфере воздуха в 3 этапа в течение 6–7 ч каждый с последовательным повышением температуры: при  $900^\circ\text{C}$  – 6 ч, при  $1000^\circ\text{C}$  – 6 ч, и завершающий отжиг при  $1200^\circ\text{C}$  в три приема по 7 ч каждый. После каждой стадии прокаливания спеченный продукт тщательно растирали в агатовой ступке.

Экспериментальные измерения дифрактограмм синтезированных образцов выполняли на дифрактометре Shimadzu XRD-6000 при комнатной температуре ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, геометрия съемки на отражение, диапазон углов  $2\theta$  от  $10^\circ$  до  $60^\circ$ , шаг  $0.02^\circ$ ). Обработку полученных дифрактограмм, обнаружение известных фаз и поиск структурных соединений проводили с использованием программы Match! Version 2.3 [15] и базы данных порошковой дифракции PDF-2 [16]. Моделирование теоретических и разностных дифрактограмм и уточнение параметров элементарных ячеек на основе данных для подобранных изоструктурных соединений проводили с использованием программы Powder Cell version 2.4 [17].

Параметры кристаллической структуры определяли при последовательном уточнении сначала общих параметров дифрактограммы, потом размеров элементарной ячейки и формы пиков, и затем оптимизации атомных позиций.

Измерения теплоемкости образцов  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$  проводили от температуры жидкого гелия методом адиабатической калориметрии на низкотемпературной теплофизической установке фирмы “Тегма” [18]. Навеска образцов составляла от 1.26 до 1.53 г. Титановые контейнеры с образцами вакуумировали, заполняли газообразным гелием и уплотняли с помощью индиевой прокладки. Шаг измерений составлял от 0.3 до 3 К в зависимости от диапазона температур, интервал измерений 4.2–320 К. Измерения теплоемкости производили в нескольких повторных сериях как в гелиевой, так и в азотной области температур. Общий температурный интервал измерений проходили несколько раз, в области температур до 20 К теплоемкость измеряли не менее 3 раз.

При обработке измеренных данных использовали сплайн-аппроксимацию экспериментальных значений теплоемкости полиномами 3-й степени вида:  $C_p = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$ . Ниже температуры 5 К значения теплоемкости экстраполировали к абсолютному нулю в соответствии с полиномом нечетной степени:  $C_p = aT^3 + bT^5$ . Перекрытие экспериментальных точек в областях смены полиномов составляло не менее 3–4 точек.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рентгенофазовый анализ показал, что основная часть образцов соответствует соединению  $\text{BaLa}_2\text{WO}_7$  (PDF-2 № 00-039-0083) [7, 8], которое кристаллизуется в моноклинной сингонии (пространственная группа  $P112_1/b$ ). В качестве примесей с небольшим содержанием в образцах обнаружены побочно образовавшийся вольфрамат бария  $\text{BaWO}_4$  (PDF-2 № 01-085-0588) и остатки непрореагировавшего оксида лантана  $\text{La}_2\text{O}_3$  (PDF-2 № 01-083-1349). Соотношения между обнаруженными побочными примесями находятся приблизительно в равных мольных количествах, что свидетельствует об отсутствии нестехиометрии в целевых соединениях. Наличия каких-либо других примесей не обнаружено.

На основании полученных данных проведенного рентгенофазового анализа образцов для исследованных образцов проводили дальнейший полнопрофильный анализ и уточнение кристаллического строения с более точным определением содержания примесных фаз. В табл. 1 представлены результаты уточнения кристаллической структуры синтезированных соединений методом полнопрофильного анализа. Эксперимен-

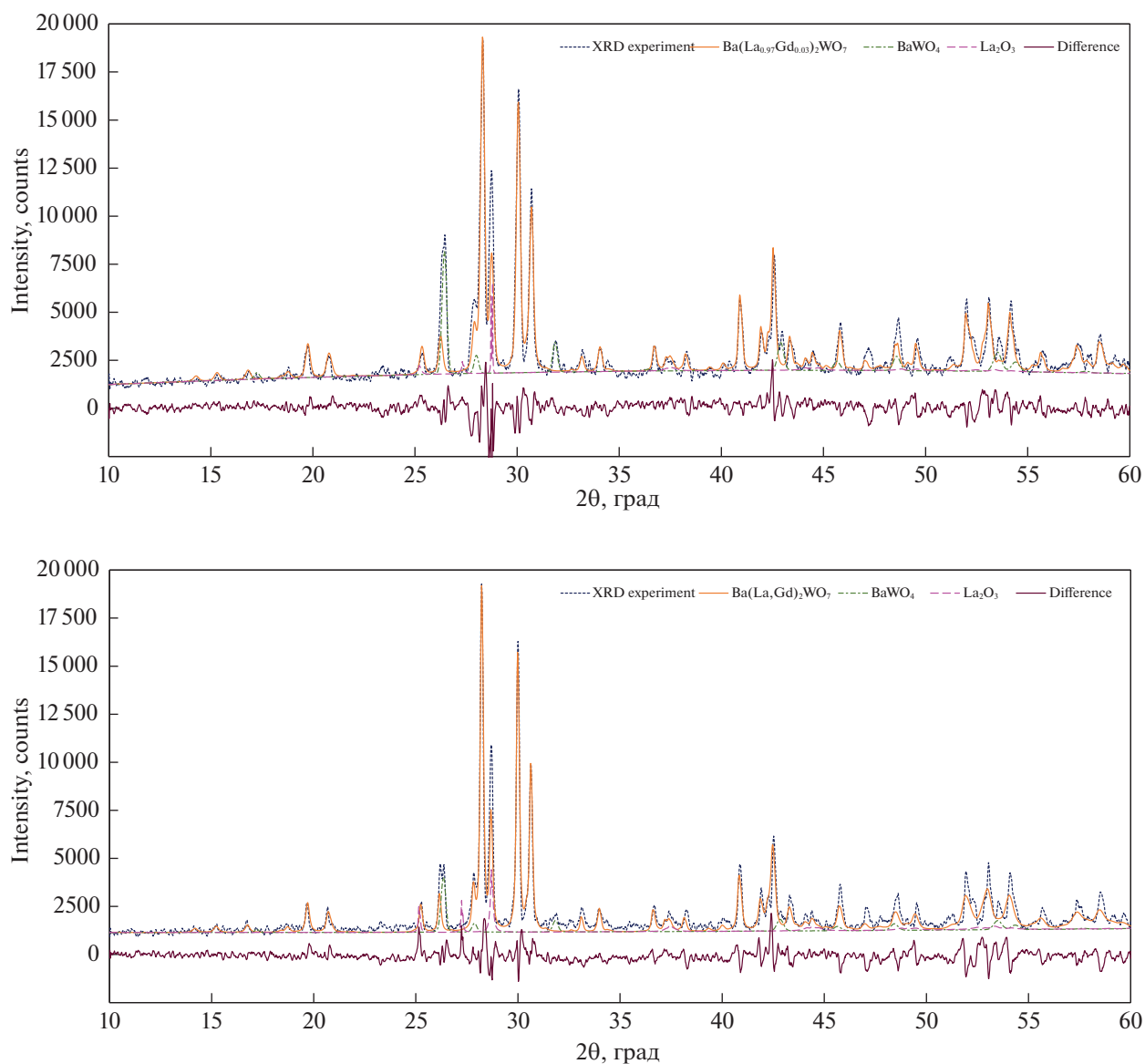
**Таблица 1.** Параметры кристаллической структуры образцов  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ 

$x$	Параметры элементарной ячейки, Å				Факторы недостоверности, %	
	$a$	$b$	$c$	$\Gamma$	$R_p$	$R_{wp}$
0.01	8.8577(14)	12.8737(18)	5.8268(9)	105.127(15)°	10.88	14.81
0.03	8.8577(14)	12.8738(18)	5.8276(9)	105.128(15)°	10.06	13.05
0.05	8.8577(14)	12.8739(18)	5.8298(9)	105.128(15)°	11.55	15.35

тальный, теоретический и разностный профили соединений представлены на рис. 1.

Уточненные в результате проведения полно-профильного анализа содержания примесей вольфрамата бария и оксида лантана в образцах составляют по 13.2, 10.9 и 7.5 мол. % для образцов

с  $x = 0.01, 0.03$  и  $0.05$ , откуда следует, что содержание основной фазы в образцах составляет 84.76, 87.71 и 91.84 мас. % соответственно. При этом содержание примесей составляет 8.26, 6.24 и 4.99 мас. %  $\text{BaWO}_4$  и 6.98, 5.98 и 3.26 мас. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  соответственно.

**Рис. 1.** Экспериментальная, теоретическая и разностная дифрактограммы соединений  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ .

С учетом определенных массовых долей примесей в образцах в экспериментально полученные значения теплоемкости образцов вводили поправку на содержание в них побочных фаз. Корректировку производили в предположении, что общая теплоемкость образцов, содержащих основную фазу и примеси, определяется аддитивным сложением их удельных теплоемкостей пропорционально массовой доле каждого компонента. Из экспериментально полученных значений теплоемкости образцов устраняли избыточную теплоемкость, возникающую вследствие содержания в них побочных фаз. Истинную теплоемкость целевого соединения вычисляли как разность между экспериментальными значениями удельной теплоемкости образцов и известными удельными теплоемкостями вольфрамата бария и оксида лантана [19, 20], умноженными на соответствующие массовые доли примесей. При вычитании поправок на теплоемкость примесных фаз внесенные при этом в определение теплоемкости основной фазы погрешности суммировали как дополнительные вклады к погрешностям экспериментально определенных значений теплоемкостей образцов, пропорционально массовому содержанию примесей.

Общий вид температурных зависимостей теплоемкости, полученных в результате калориметрических измерений образцов представлен на рис. 2. При температурах ниже 10 К зарегистрированы аномальные отклонения от обычного хода теплоемкости, связанные с наличием ионов  $Gd^{3+}$  в кристаллической структуре соединений. Аномалии имеют вид пологих пиков небольшой интенсивности в интервале от 4 до 7 К.

Аномальную составляющую теплоемкости вычисляли путем преобразования и вычитания решеточной составляющей из общей теплоемкости в соответствии с уравнениями [21]:

$$\frac{C_L}{T^3} = K \left( 1 - \frac{C_L}{3Rn} \right)^m,$$

$$\ln \left( \frac{C_L}{T^3} \right) = m \ln \left( 1 - \frac{C_L}{3Rn} \right) + \ln K.$$

Для выделенных решеточных и аномальных составляющих теплоемкости получили сглаженные зависимости (рис. 3). Уравнения этих зависимостей использовали для расчета изменений энтальпии и энтропии в наблюдаемых аномальных переходах.

Появление аномалий теплоемкости связано с наличием магнитных взаимодействий в образцах, вызванных присутствием атомов гадолиния. Природный гадолиний состоит из семи изотопов, из которых два ( $^{155}Gd$  и  $^{157}Gd$ ) имеют полуцелый спин  $3/2$ , что обуславливает наличие магнитных свойств у его соединений. Магнитные моменты

атомов в соединениях такого рода упорядочиваются при низких температурах, когда отсутствуют возмущения от теплового движения. Полученные значения изменений энтальпии и энтропии в переходах у исследованных образцов составляют от 0.09 до 0.70 Дж/моль и от 0.017 до 0.133 Дж/(моль К) соответственно, с погрешностью, определенной на уровне  $\pm 15\%$ . Величины изменения энтропии в наблюдаемых превращениях значительно меньше, чем теоретическое значение  $R \ln 2$ , что обусловлено замещением только части атомов лантана на атомы гадолиния при допировании соединений. При пересчете на 1 моль атомов гадолиния величины изменения термодинамических функций в аномалиях составляют от 9.1 до 14.0 Дж/моль для изменения энтальпии и от 1.69 до 2.66 Дж/(моль К) для энтропии.

В соединении  $Ba(La_{0.95}Gd_{0.05})_2WO_7$  заметно наличие еще одного пологого пика аномальной теплоемкости в интервале от 6 до 12 К, что может указывать на появление в этом образце дополнительных взаимодействий, связанных с увеличением содержания гадолиния, в дополнение к упорядочению магнитных моментов.

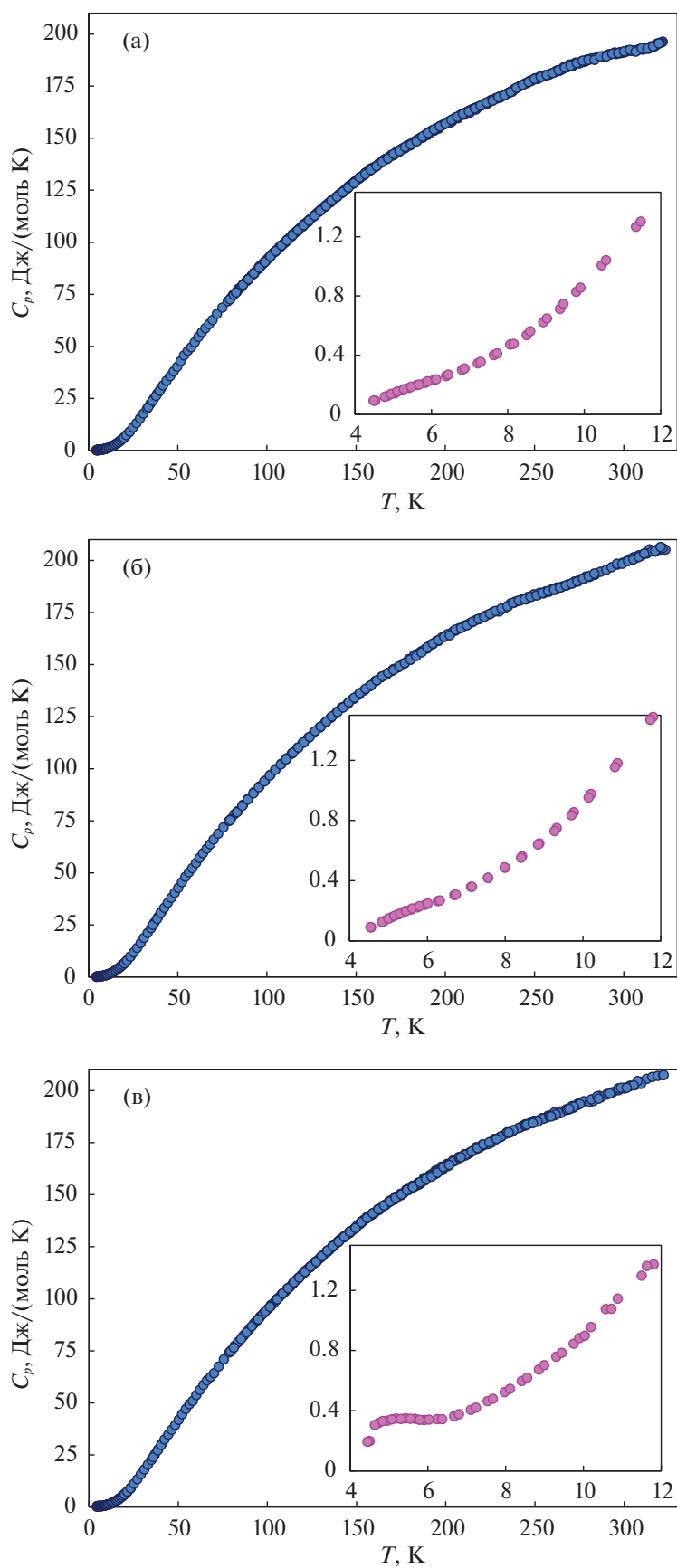
Величины основных термодинамических функций энтропии  $S^\circ$  и изменения энтальпии  $H_T^\circ - H_0^\circ$  для синтезированных соединений определяли по коэффициентам аппроксимирующих полиномов с помощью следующих выражений:

$$S_T^\circ = \int_0^T \frac{C_p}{T} dT = a_0 \ln T + \sum_{n=1}^3 \frac{a_n T^n}{n},$$

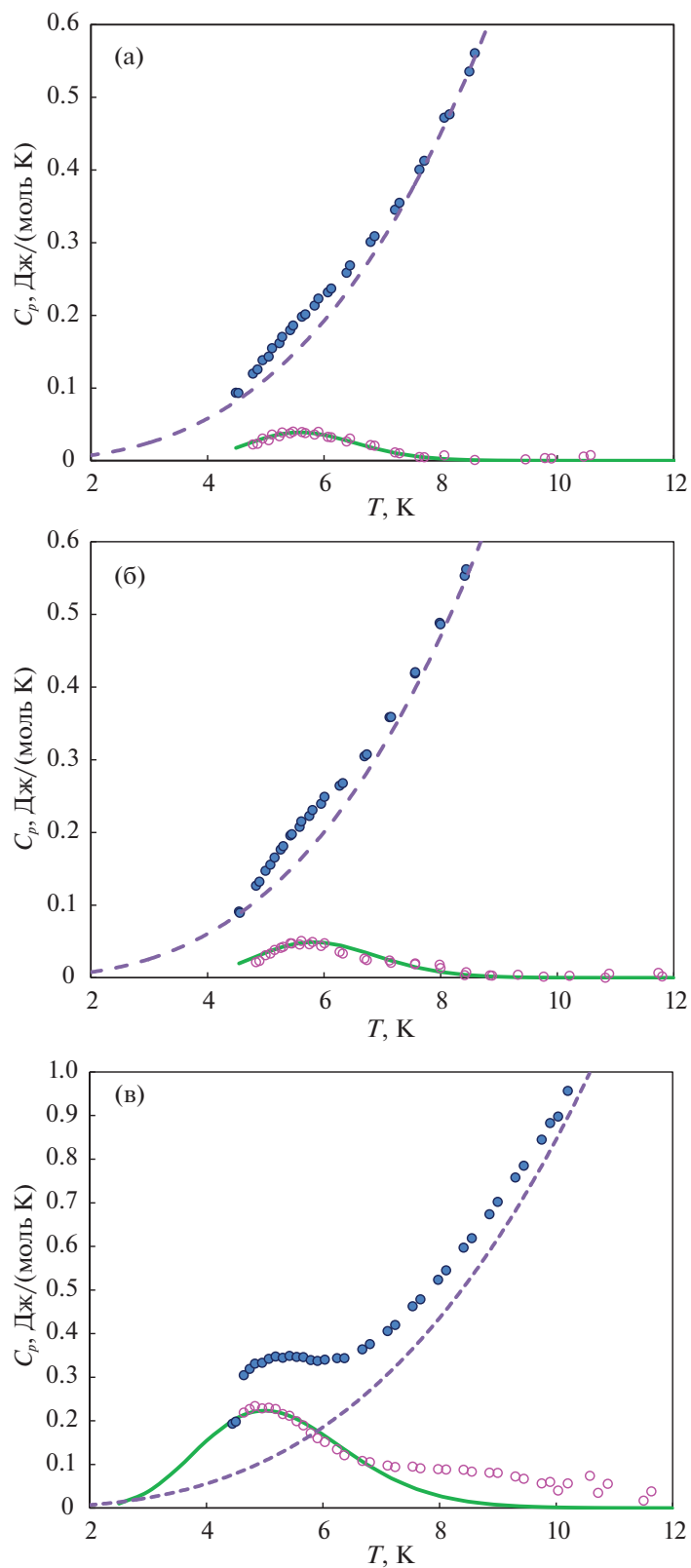
$$H_T^\circ - H_0^\circ = \int_0^T C_p dT = \sum_{n=0}^3 \frac{a_n T^{n+1}}{n+1}.$$

Вычисленные значения термодинамических функций исследованных соединений в интервале температур 5–300 К представлены в табл. 2 вместе с соответствующими погрешностями. Погрешности измерений определяли на основе разброса экспериментальных точек от сглаженной кривой в пределах 95%-го доверительного интервала (рис. 4) с учетом поправок на содержание примесей, систематических и других погрешностей.

Таким образом, в результате твердофазного синтеза получены соединения на основе бария, вольфрама и редкоземельных элементов лантана и гадолиния. Исследованы их структурные и термодинамические свойства. Произведен рентгенофазовый анализ образцов, определены содержания примесных фаз, параметры элементарной ячейки и атомные позиции синтезированных образцов. Измерена теплоемкость от температуры жидкого гелия, при этом обнаружены низкотемпературные аномалии, наличие которых связано с изменениями в магнитной структуре образцов,



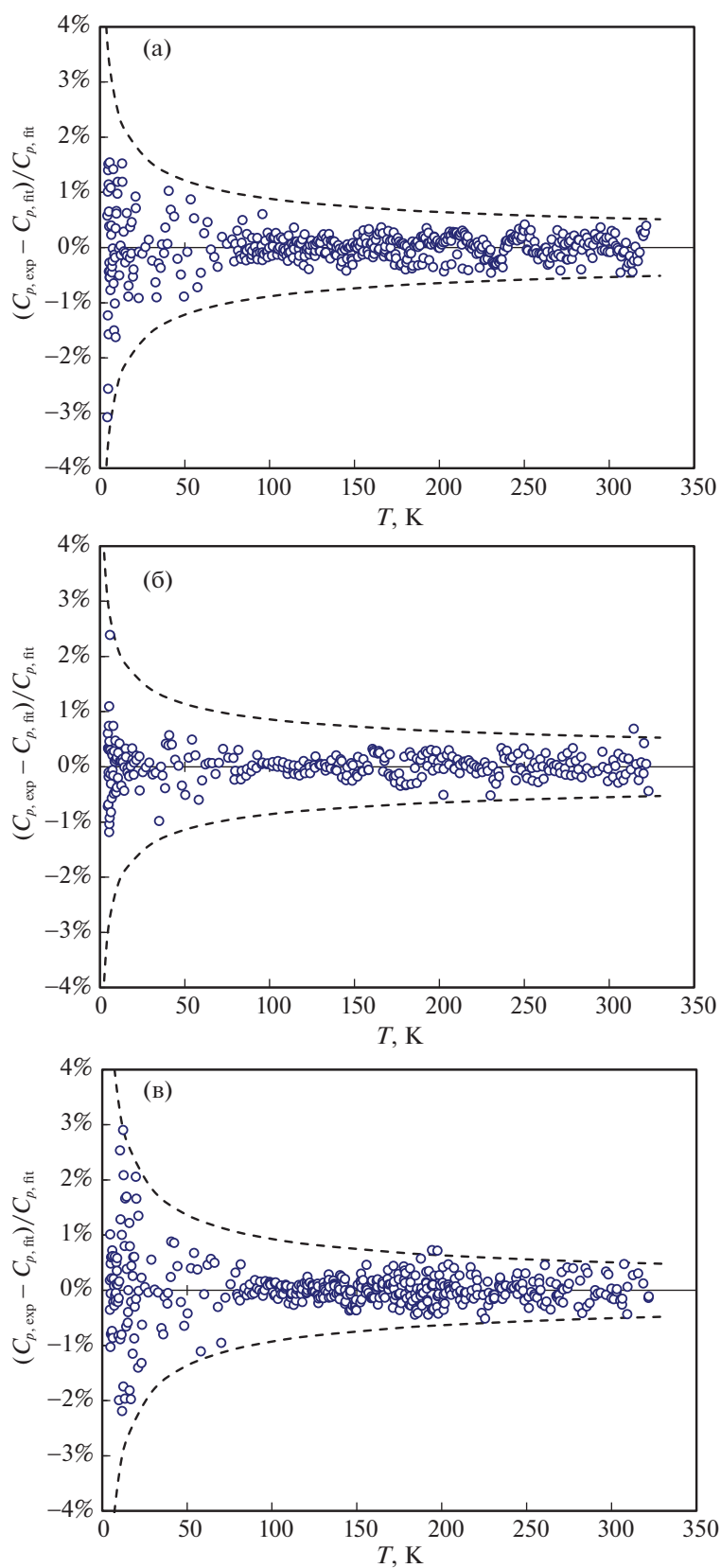
**Рис. 2.** Экспериментальная мольная теплоемкость исследованных соединений  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ ;  $x = 0.01$  (а), 0.03 (б) и 0.05 (в).



**Рис. 3.** Общая (заштрихованные кружки), аномальная (незаштрихованные кружки), решеточная (пунктирная линия) и сглаженная аномальная (сплошная линия) теплоемкости соединений  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ ;  $x = 0.01$  (а),  $0.03$  (б) и  $0.05$  (в).

Таблица 2. Термодинамические функции допированных гадолинием соединений  $Ba(La_{1-x}Gd_x)_2WO_7$ 

T, К	x = 0.01			x = 0.03			x = 0.05		
	$C_p^\circ$	$S^\circ$	$H_T^\circ - H_0^\circ$	$C_p^\circ$	$S^\circ$	$H_T^\circ - H_0^\circ$	$C_p^\circ$	$S^\circ$	$H_T^\circ - H_0^\circ$
	Дж/(моль К)		Дж/моль	Дж/(моль К)		Дж/моль	Дж/(моль К)		Дж/моль
5	0.140	0.037	0.146	0.145	0.037	0.147	0.354	0.176	0.587
10	0.875	0.307	2.291	0.915	0.322	2.409	0.907	0.510	3.153
15	2.826	0.983	10.95	2.958	1.031	11.49	2.746	1.174	11.66
20	6.210	2.228	32.98	6.461	2.327	34.44	6.060	2.387	33.13
25	10.89	4.089	75.14	11.32	4.267	78.34	10.77	4.209	74.40
30	16.57	6.566	143.5	17.19	6.838	149.3	16.68	6.686	142.8
35	22.74	9.591	242.0	23.51	9.965	251.1	22.78	9.711	241.3
40	28.76	13.02	370.8	29.85	13.52	384.5	29.02	13.16	370.8
45	34.76	16.75	529.6	36.18	17.40	549.6	35.31	16.94	531.6
50	40.81	20.73	718.5	42.47	21.54	746.2	41.58	20.99	723.9
55	46.77	24.90	937.4	48.59	25.87	973.9	47.54	25.23	946.6
60	52.53	29.22	1186	54.49	30.35	1232	53.39	29.62	1199
65	58.05	33.64	1462	60.15	34.94	1518	59.08	34.12	1480
70	63.34	38.14	1766	65.61	39.60	1833	64.62	38.70	1790
75	68.43	42.68	2095	70.88	44.31	2174	70.02	43.34	2126
80	73.32	47.26	2450	75.99	49.04	2541	75.29	48.03	2490
85	78.04	51.84	2828	80.97	53.80	2934	80.44	52.75	2879
90	82.59	56.43	3230	85.83	58.57	3351	85.48	57.49	3294
95	87.11	61.02	3654	90.57	63.34	3792	90.22	62.24	3733
100	91.48	65.60	4101	95.15	68.10	4256	94.82	66.99	4196
110	99.82	74.72	5058	103.9	77.58	5252	103.6	76.44	5188
120	107.7	83.74	6096	112.2	86.98	6333	112.0	85.82	6267
130	115.2	92.66	7211	120.0	96.27	7494	119.9	95.09	7426
140	122.4	101.5	8399	127.5	105.4	8732	127.6	104.3	8664
150	129.5	110.2	9659	134.7	114.5	10043	134.8	113.3	9976
160	135.8	118.7	10986	141.1	123.4	11422	141.4	122.2	11357
170	141.6	127.1	12373	147.0	132.1	12863	147.3	131.0	12801
180	146.9	135.4	13816	152.6	140.7	14361	152.8	139.6	14302
190	151.9	143.5	15310	158.0	149.1	15914	158.2	148.0	15857
200	156.8	151.4	16854	163.5	157.3	17522	163.5	156.2	17466
210	161.2	159.1	18445	168.1	165.4	19181	168.6	164.3	19127
220	165.6	166.7	20079	172.3	173.3	20883	173.3	172.3	20837
230	169.8	174.2	21756	176.3	181.1	22626	177.6	180.1	22592
240	173.9	181.5	23475	179.9	188.7	24408	181.6	187.7	24389
250	177.8	188.7	25234	183.2	196.1	26224	185.1	195.2	26223
260	181.4	195.7	27031	185.9	203.3	28069	188.3	202.5	28090
270	184.9	202.6	28863	188.7	210.4	29941	191.6	209.7	29989
273.15	185.8	204.8	29447	189.7	212.6	30537	192.6	211.9	30594
280	187.5	209.4	30725	192.0	217.3	31845	194.9	216.7	31922
290	189.5	216.0	32611	195.6	224.1	33783	198.1	223.6	33886
298.15	190.9 ± ± 1.5	221.3 ± ± 12.9	34161 ± ± 1379	198.6 ± ± 1.5	229.6 ± ± 13.3	35389 ± ± 1430	200.7 ± ± 1.5	229.1 ± ± 13.4	35511 ± ± 1429
300	191.2	222.5	34514	199.2	230.8	35757	201.2	230.4	35883
310	193.0	228.8	36435	202.5	237.4	37766	204.2	237.0	37911
320	195.1	234.9	38375	205.3	243.9	39806	207.1	243.6	39968



**Рис. 4.** Разброс экспериментальных значений теплоемкости относительно сглаженной кривой для исследованных соединений  $\text{Ba}(\text{La}_{1-x}\text{Gd}_x)_2\text{WO}_7$ ;  $x = 0.01$  (а),  $0.03$  (б) и  $0.05$  (в).



вызванными присутствием допирующих атомов гадолиния.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках грантового финансирования научных и научно-технических проектов Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2021–2023 гг. (ИРН проекта AP09259070).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meng Q., Hua R., Chen B. et al. // J. Nanosci. Nanotechnol. 2011. V. 11. № 1. P. 182.  
<https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3078>
2. Demiaï A., Derbal M., Guerbous L., Rekik B. // Opt. Mater. 2017. V. 65. № C. P. 137.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.10.026>
3. Keil J.-N., Paulsen C., Rosner F. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. № 26. P. 9225.  
<https://www.doi.org/10.1039/d1dt00795e>
4. Yoon S.-O., Hong C.-B., Kim S. // J. Electroceramics. 2018. V. 41. № 1–4. P. 16.  
<https://doi.org/10.1007/s10832-018-0144-z>
5. Haugrud R. // Solid State Ionics. 2007. V. 178. № 7–10. P. 555.  
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2007.01.004>
6. Zhang X., Li Y., Li C. et al. // Mater. Des. 2021. V. 205. P. <https://www.doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109722>
7. Kovba L.M., Lykova L.N., Balashov V.L. // Russ. J. Inorg. Chem. 1985. V. 30. № 2. P. 311.
8. Fu W.T., IJdo D.J.W., Bontenbal A. // J. Solid State Chem. 2013. V. 201. P. 128.  
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2013.01.042>
9. Choi S., Park B.-Y., Jung H.-K. et al. // J. Korean Phys. Soc. 2010. V. 57. № 1. P. 169.  
<https://doi.org/10.3938/jkps.57.169>
10. Yan S.-A., Wang J.-W., Chang Y.-S. et al. // Opt. Mater. 2011. V. 34. № 1. P. 147.  
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.07.028>
11. Yan S.-A., Chang Y.-S., Hwang W.-S., Chang Y.-H. // J. Lumin. 2012. V. 132. № 8. P. 1867.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.02.007>
12. Deng Y., Yi S., Huang J. et al. // Mater. Res. Bull. 2014. V. 57. P. 85.  
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.05.035>
13. Hussain S.K., Yu J.S. // Mater. Res. Bull. 2017. V. 95. P. 229.  
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.07.031>
14. Zhou X., Zhou H., Wu Q. et al. // J Mater Sci: Mater Electron. 2020. V. 31. № 13. P. 10819.  
<https://doi.org/10.1007/s10854-020-03633-y>
15. Bernardo E. // J. Non-Cryst. Solids. 2008. V. 354. № 9. P. 3486.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2008.03.021>
16. Faber J., Fawcett T. // Acta Cryst. B. 2002. V. 58. P. 325.  
<https://doi.org/10.1107/S0108768102003312>
17. Kraus W., Nolze G. // J. Appl. Cryst. 1996. V. 29. P. 301.  
<https://doi.org/10.1107/S0021889895014920>
18. Bissengaliyeva M.R., Gogol D.B., Taymasova Sh.T. et al. // J. Chem. Eng. Data. 2011. V. 56. № 2. P. 195.  
<https://doi.org/10.1021/je100658y>
19. Musikhin A.E., Bespyatov M.A., Shlegel V.N., Safonova O.E. // J. Alloys Compd. 2019. V. 802. P. 235.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.197>
20. Justice B.H., Westrum E.F. // J. Chem. Phys. 1963. V. 67. № 2. P. 339.  
<https://doi.org/10.1021/j100796a031>
21. Melia T.P., Merrifield R. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1970. V. 32. P. 2573.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1902\(70\)80304-9](https://doi.org/10.1016/0022-1902(70)80304-9)