

05  
**Особенности кристаллической структуры и магнитные свойства соединения  $DyFeTi_2O_7$**

© Т.В. Дрокина<sup>1,2</sup>, Г.А. Петраковский<sup>1</sup>, М.С. Молокеев<sup>1</sup>, Д.А. Великанов<sup>1,2</sup>, О.Н. Плетнев<sup>2</sup>, О.А. Баюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

E-mail: tvd@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 12 февраля 2013 г.)

Представлены результаты исследования особенностей кристаллической структуры и распределения катионов железа по позициям в соединении  $DyFeTi_2O_7$ , проведено сравнение с изоструктурным соединением  $GdGaTi_2O_7$ . Методами мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции подтвержден атомный беспорядок в распределении ионов железа  $Fe^{3+}$  по структурным позициям в  $DyFeTi_2O_7$ . Результаты магнитных измерений в низкотемпературной области показывают излом на температурной зависимости магнитного момента и его зависимость от магнитной предыстории образца. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о реализации состояния спинового стекла с температурой замерзания  $T_f = 6$  К в соединении  $DyFeTi_2O_7$ .

**1. Введение**

$DyFeTi_2O_7$  — представитель ряда соединений с общей формулой  $RM_2Ti_2O_7$  ( $M = Fe, Ga$ ;  $R$  — редкоземельные ионы). Известно, что соединения  $RFeTi_2O_7$  изоструктурны  $GdGaTi_2O_7$  [1]. Согласно результатам рентгеновского исследования соединение  $GdGaTi_2O_7$  при комнатной температуре кристаллизуется в centrosymmetric ромбической пространственной группе  $Pcnb$  [1]. На элементарную ячейку приходится восемь формульных единиц  $GdGaTi_2O_7$ . Она построена из четырех-, пяти-, шести- и восьмивершинных кислородных полиэдров: в восьмивершиннике располагается редкоземельный катион; три неэквивалентные октаэдрические позиции ( $M1, M2$  и  $M3$ ) являются смешанными (заселены совместно  $Ti$  и  $Ga$ ); тетраэдрические позиции ( $t$ ) заселены галлием, катионы  $Ga$  могут выходить из тетраэдров и заселять соседние позиции  $Ga'$  и  $Ga''$  с координацией, равной пяти ( $f$ ).

Магнитные свойства соединений  $RFeTi_2O_7$  ( $R = Sm, Gd$ ) исследованы в работах [2,3], показано формирование спин-стекольных магнитных состояний с температурами замерзания  $T_f = 7$  и  $T_f = 3$  К соответственно.

В настоящей работе сообщается о новом соединении  $DyFeTi_2O_7$  с магнитным состоянием спинового стекла. Представлены результаты рентгеновских, мессбауэровских и магнитных измерений, проведенных с целью изучения магнитных свойств и особенностей кристаллической структуры.

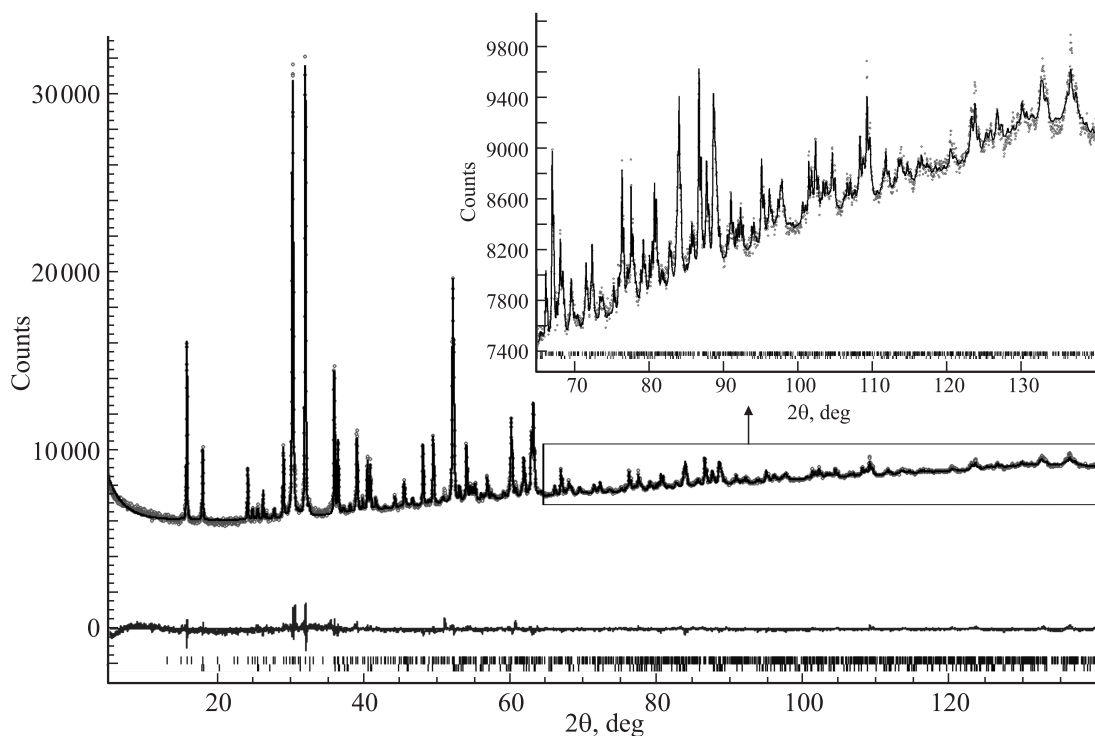
**2. Синтез образцов и техника эксперимента**

1) Приготовление образцов. Соединение  $DyFeTi_2O_7$  получено реакцией в твердой фазе из смеси

окислов  $Fe_2O_3, Dy_2O_3$  и  $TiO_2$ . Образцы в виде таблеток диаметром 10 mm и толщиной 1.5–2.0 mm подвергались высокотемпературной обработке при температуре 1250°C и нормальном давлении. Синтез проводился в четыре этапа с промежуточным мокрым помолом в спиртовой среде и повторной процедурой прессования. Химический и фазовый состав образцов контролировался методами рентгеноструктурного анализа и ядерного  $\gamma$ -резонанса, а также с помощью оптического микроскопа. В синтезированных образцах имеется примесь  $Fe_2TiO_5$  в количестве 3.4%.

2) Рентгеноструктурное исследование. Порошковая рентгенограмма  $DyFeTi_2O_7$  была получена на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker с использованием линейного детектора VANTEC и Cu-K $\alpha$  излучения.

В эксперименте использовалась методика переменной скорости сканирования (VCT) и переменного шага (VSS). Время экспозиции увеличивалось с увеличением угла  $2\theta$ , что приводило к значительному улучшению качества отснятой рентгенограммы [4–6]. Как правило, на полуширине пика (FWHM) должно укладываться пять–восемь экспериментальных точек. Однако, пики значительно уширяются с увеличением угла  $2\theta$ . Поэтому шаг может быть увеличен в высокоугловых областях  $2\theta$  с целью уменьшения временных затрат в эксперименте [7]. Далее экспериментальные данные были конвертированы в один общепринятый в рентгенографии XUE файл, содержащий координаты  $2\theta_i$ , интенсивность  $I_i$  и стандартное отклонение  $\sigma(I_i)$  для каждой экспериментальной точки. Уточнение Ритвельда, реализованное в используемой программе TOPAS 4.2 [8] учитывает стандартное отклонение каждой точки посредством введения в метод наименьших квадратов (МНК) веса для каждой точки  $w_i = 1/\sigma(I_i)^2$ . Таким образом, увеличение времени экспозиции для точки приводит



**Рис. 1.** Рентгенограмма поликристаллического соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  при комнатной температуре. Разностная рентгенограмма — нижняя кривая. Исследуемое вещество содержит 3.4% примеси состава  $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ .

к уменьшению стандартного отклонения  $\sigma(I_i)$ , и, как следствие, к большему ее весу  $w_i$  в уточнении МНК. В методике VCT происходит выравнивание между собой весов слабых высокоугловых и сильных низкоугловых рефлексов, тогда как в обыкновенном эксперименте веса неравноценны и информация о структуре, содержащаяся в высокоугловой области, теряется.

Экспериментальная рентгенограмма исследуемого образца была получена по методике VCT/VSS и разбита на четыре части:  $5\text{--}38.7^\circ$  (экспозиция в точке 3 с, шаг  $0.016^\circ$ );  $38.7\text{--}61.6^\circ$  (экспозиция в точке 9 с, шаг  $0.024^\circ$ );  $61.6\text{--}97.5^\circ$  (экспозиция в точке 15 с, шаг  $0.032^\circ$ );  $97.5\text{--}140^\circ$  (экспозиция в точке 24 с, шаг  $0.040^\circ$ ). Общее время эксперимента составило примерно 16 ч. Разбиение эксперимента на части было проведено в программе XRD Wizard [7]. Положение пиков определялось в программе EVA (2004) из программного пакета DIFFRAC-PLUS, поставляемой фирмой „Bruker“.

3) Мессбауэровские измерения. Мессбауэровские исследования проведены на спектрометре MC-1104Ем Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН при комнатной температуре с источником  $\text{Co}^{57}(\text{Cr})$  на порошках толщиной  $5\text{--}10\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$  по естественному содержанию железа. Изомерные химические сдвиги измерены относительно металлического  $\alpha\text{-Fe}$ .

4) Магнитные измерения. Магнитные измерения осуществлены на магнитометре MPMS-XL Сибирского федерального университета в интервале температур  $2\text{--}300\ \text{K}$  в магнитном поле  $500\ \text{Oe}$ .

### 3. Экспериментальные результаты

Структурные свойства образца изучены методом рентгеновской дифракции на порошках  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ . Разностная рентгенограмма представлена на рис. 1. Данные рентгеновского исследования свидетельствуют о том, что синтезированный материал  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  имеет ромбическую кристаллическую структуру, пространственная группа  $Pbcn$ .

Так как исследуемое соединение  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  изоструктурно соединению  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$  [1], то в качестве начальной модели кристаллической структуры была взята структура  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ . Заселенности позиций атомов Ti и Fe уточнялись в предположении, что позиции заняты полностью, а их тепловые параметры фиксированы. Для того чтобы суммарный заряд ячейки в результате уточнения стремился к нулю, использовалось одно мягкое ограничение в виде линейного уравнения на заселенности позиций ионов Ti:  $\text{occ}(\text{Ti}1) + \text{occ}(\text{Ti}2)/2 + \text{occ}(\text{Ti}3) = 2$ . Результаты уточнения заселенностей образца  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  представлены в табл. 1. Координаты атомов, заселенности позиций  $p$  и тепловые параметры  $B_{\text{iso}}$  соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  содержатся в табл. 2. Для сравнения в табл. 2 также приведены заселенности позиций  $p_1$  в соединении  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$  по данным работы [1].

Уточнение констант элементарной ячейки и анализ данных показали, что параметр  $a$  ( $9.8470\ \text{\AA}$ ) в  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  увеличен, а параметры  $b$  ( $13.5751\ \text{\AA}$ ) и  $c$  ( $7.3652\ \text{\AA}$ )

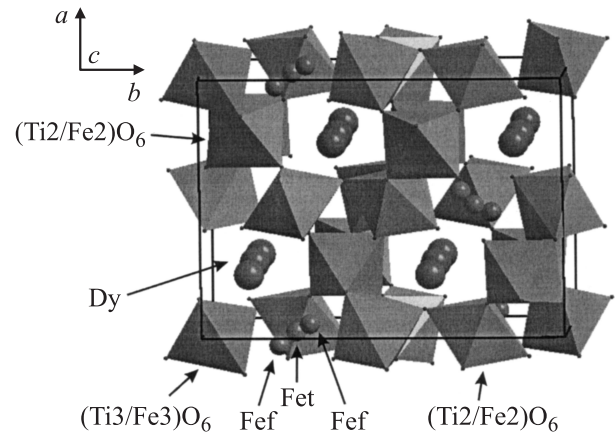
**Таблица 1.** Основные кристаллографические характеристики соединений  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ ,  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$  и параметры эксперимента

Параметр	$\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$	$\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ по данным [1]
Пространственная группа	<i>Pcnb</i>	<i>Pcnb</i>
<i>a</i> , Å	9.8470(1)	9.7804(3)
<i>b</i> , Å	13.5751(2)	13.605(1)
<i>c</i> , Å	7.3652(1)	7.4186(2)
<i>V</i> , Å <sup>3</sup>	984.54(2)	987.16(1)
<i>Z</i>	8	8
<i>D<sub>x</sub></i> , g/cm <sup>3</sup>	5.737	5.848
<i>μ</i> , mm <sup>-1</sup>	130.319	225.7
Излучение	Cu-K <sub>α</sub>	Mo-K <sub>α</sub>
2θ-интервал, °	5–140	2–70
Число рефлексов	942	6267
Число уточняемых параметров	73	—
<i>R<sub>wp</sub></i> , %	1.018	—
<i>R<sub>exp</sub></i> , %	0.573	—
<i>R<sub>p</sub></i> , %	0.979	—
<i>GOF</i> (χ)	1.775	—

Примечание. *V* — объем элементарной ячейки, *Z* — число формульных единиц в ячейке, *D<sub>x</sub>* — вычисленная плотность, *μ* — коэффициент поглощения, *R<sub>wp</sub>* — весовой профильный фактор недостоверности, *R<sub>exp</sub>* — ожидаемый фактор недостоверности, *R<sub>p</sub>* — профильный фактор недостоверности, *GOF* (χ) — качество подгонки.

уменьшены по сравнению с соединением  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ , т.е. наблюдается непропорциональное изменение параметров ромбической ячейки.

Согласно данным рентгеновского исследования, как в соединении  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ , так и в соединении  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  имеется пять неэквивалентных позиций железа (галлия). Однако опыт показывает существенную разницу в распределении титана, а соответственно и железа, в смешанных октаэдрических позициях в изоструктурных

**Рис. 2.** Кристаллическая структура соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ .

соединениях. Особенно различаются заселенности титана в позиции *M2*:  $p_1 = 0.79$  в  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$  и  $p = 0.49$  в  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ . Таким образом, кроме изменений констант решетки наблюдается изменение заселенностей железа по сравнению с галлием по смешанным катионным позициям Fe(Ga) и Ti.

Кристаллическая структура соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  представлена на рис. 2.

Всего в ячейке содержится  $0.82 \times 8 + 0.49 \times 4 + 0.87 \times 8 = 15.50$  атомов Ti и  $0.18 \times 8 + 0.51 \times 4 + 0.13 \times 8 + (0.78 \times 4 + 0.11 \times 8) = 8.52$  атомов Fe. В целом суммарную формулу с учетом стандартных отклонений можно записать в виде  $\text{DyFe}_{1.07(6)}\text{Ti}_{1.93(6)}\text{O}_7$ .

Для оценки состояния железа в  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  проведены мессбауэровские измерения при комнатной температуре. Мессбауэровский спектр (рис. 3, а) представляет собой сумму перекрывающихся квадрупольных дублетов. Для определения состава модельного спектра вычислено рас-

**Таблица 2.** Координаты атомов, заселенности позиций *p* и тепловые параметры (изотропные *B<sub>iso</sub>*, либо эквивалентные *B<sub>eq</sub>*) в  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ , а также заселенности позиций *p<sub>1</sub>* в  $\text{GdGaTi}_2\text{O}_7$ 

Атом	Кратность позиции	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	<i>B<sub>iso</sub>/B<sub>eq</sub></i>	<i>p<sub>1</sub></i> [1]
Dy(Gd)	8	0.2465(5)	0.1329(2)	0.0085(5)	1	0.75(4)	1
Ti1	8	0.2492(2)	0.3838(5)	0.487(1)	0.82(2)	1.5	0.88
Fe1(Ga)	8	0.2492(2)	0.3838(5)	0.487(1)	0.18(2)	1.5	0.12
Ti2	4	0.5	0.25	0.255(3)	0.49(6)	1.5	0.79
Fe2(Ga)	4	0.5	0.25	0.255(3)	0.51(6)	1.5	0.21
Ti3	8	0.003(1)	0.4894(7)	0.254(2)	0.87(3)	1.5	0.73
Fe3(Ga)	8	0.003(1)	0.4894(7)	0.254(2)	0.13(3)	1.5	0.27
Fet(Ga)	4	0	0.25	0.331(2)	0.78	1.5(3)	0.78
Fef(Ga)	8	0.037(6)	0.292(4)	0.185(8)	0.11	1.5(3)	0.11
O1	8	0.159(1)	0.391(1)	0.243(5)	1	1	1
O2	8	0.409(2)	0.109(2)	0.249(6)	1	1	1
O3	8	0.103(3)	0.145(1)	0.243(6)	1	1	1
O4	8	0.368(4)	0.286(3)	0.429(5)	1	1	1
O5	8	0.378(4)	0.279(3)	0.051(6)	1	1	1
O6	8	0.373(3)	0.497(2)	0.435(4)	1	1	1
O7	8	0.387(4)	0.475(2)	0.054(5)	1	1	1

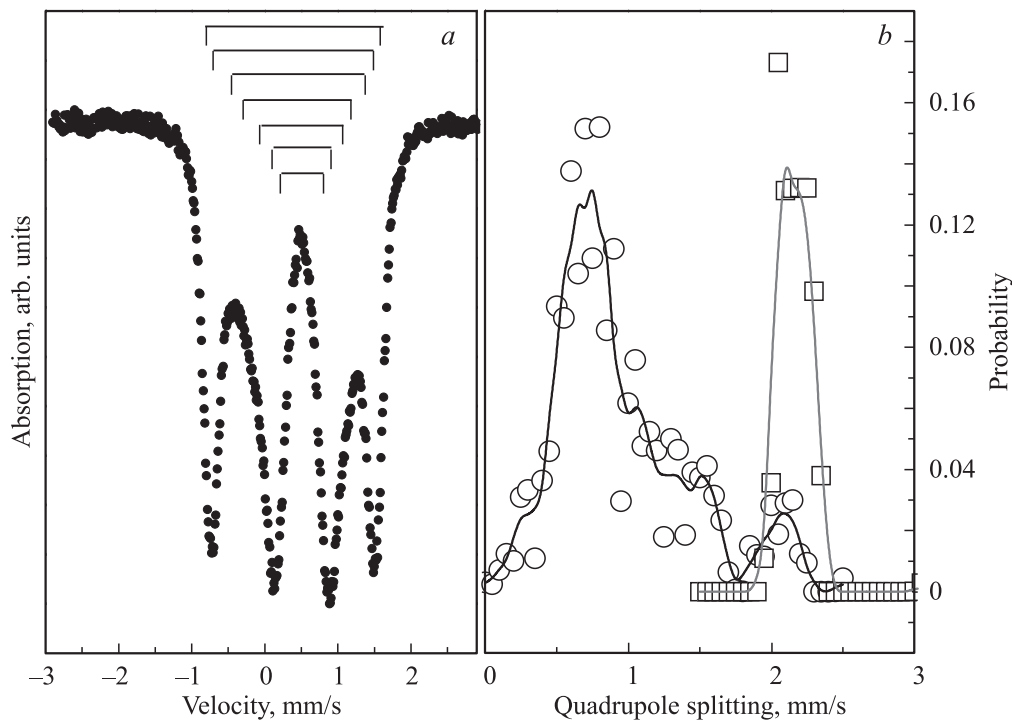


Рис. 3. *a* — Мессбауэровский спектр DyFeTi<sub>2</sub>O<sub>7</sub> при  $T = 300$  К, *b* — распределение вероятности квадрупольных расщеплений в экспериментальном спектре.

предделение вероятности квадрупольных расщеплений  $P(QS)$  в экспериментальном спектре, рис. 3, *b*. При этом в качестве исходных использованы две группы дублетов с различными химическими сдвигами. При вычислении  $P(QS)$  подгонялись амплитуды дублетов и химические сдвиги, общие для каждой группы дублетов.

Максимумы и особенности на распределении  $P(QS)$  свидетельствуют о возможных неэквивалентных позициях железа в цирконолите DyFeTi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Информация, извлеченная из распределения  $P(QS)$ , использована для построения модельного спектра, который затем подгонялся к экспериментальному спектру при варьировании всего набора сверхтонких параметров дублетов. Результат подгонки сведен в табл. 3.

Величины изомерных химических сдвигов соответствуют катионам трехвалентного железа — Fe<sup>3+</sup>. Химические сдвиги величиной  $\geq 0.3$  mm/s обычно наблюдаются для Fe<sup>3+</sup>, октаэдрически координированного по кислороду, химические сдвиги величиной  $< 0.3$  mm/s характерны для тетраэдрической координации.

Для отнесения атомов железа, обнаруженных с помощью мессбауэровской методики, к кристаллографическим позициям использованы результаты рентгеновской дифракции, а именно, заселенность позиций железом и степень искажения координационных полиэдров. Для ионных соединений искажение координационного кислородного полиэдра, окружающего рассматриваемый катион, можно оценить, в первом приближении, величиной градиента электрического поля  $V_{zz}$ , создаваемого

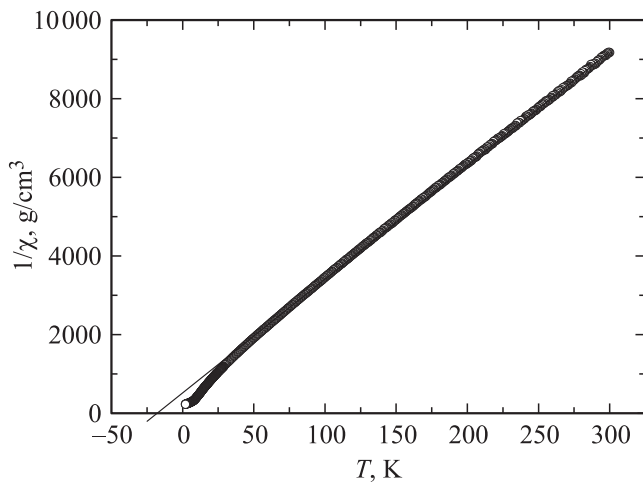
соседними ионами кислорода. Величина  $V_{zz}$  должна быть прямо пропорциональной измеряемому квадрупольному расщеплению  $QS$ . Принимаем за степень искажения  $V_{zz} \sim \Sigma(3 \cos^2 \varphi_i - 1)/r_i^3$ , где  $\varphi_i$  — угол между главной осью октаэдра и направлением на рассматриваемый ион кислорода,  $r_i$  — расстояние между центральным катионом и окружающими ионами кислорода.

Вычисленный на основе рентгеновских данных градиент приведен в столбце  $V_{zz}^R$  табл. 3 для всех пяти кристаллографических позиций решетки DyFeTi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Видна

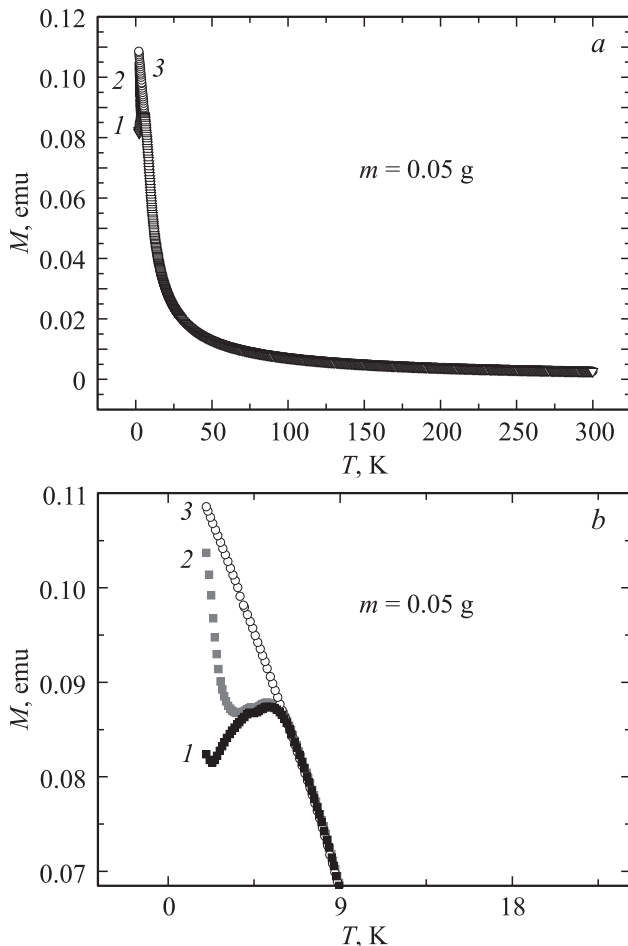
Таблица 3. Мессбауэровские параметры DyFeTi<sub>2</sub>O<sub>7</sub>

$IS$ , mm/s $\pm 0.02$	$QS$ , mm/s $\pm 0.02$	$W$ , mm/s $\pm 0.03$	$A$ , дол.% $\pm 0.03$	Позиция	$A^R$	$V_{zz}^R$
0.35	0.59	0.28	0.20	Fe3	0.23	+0.116
0.35	0.81	0.25	0.17	Fe1	0.19	-0.100
0.34	1.14	0.36	0.13	Fe2 <sub>1</sub>		
0.29	1.47	0.49	0.17	Fe2 <sub>2</sub>	0.26	-0.153
0.30	1.83	0.16	0.01	Fe2 <sub>3</sub>		
0.24	2.20	0.25	0.26	Fet	0.25	+0.248
0.23	2.37	0.18	0.06	Fef	0.07	+0.264

Примечание.  $IS$  — изомерный химический сдвиг относительно  $\alpha$ -Fe,  $QS$  — квадрупольное расщепление,  $W$  — ширина линии,  $A$  — долевая заселенность позиции железом.  $A^R$  — заселенность позиции железом, оцененная рентгеновской методикой,  $V_{zz}^R$  — градиент электрического поля, создаваемый координационным кислородным полиэдром.



**Рис. 4.** Температурная зависимость обратной восприимчивости  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ , охлаждение образца в поле  $H = 500$  Ое, асимптотическая температура Нееля  $\theta_N = -19$  К.



**Рис. 5.** Температурная зависимость магнитного момента в соединении  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  в интервале 2–300 К (а) и в области низких температур (б); 1 — охлаждение образца в нулевом магнитном поле (нижняя кривая). 2 — охлаждение в магнитном поле  $H = 500$  Ое от температуры  $T = 15$  К (средняя кривая). 3 — охлаждение образца в магнитном поле  $H = 500$  Ое от температуры  $T = 300$  К (верхняя кривая).

**Таблица 4.** Значения асимптотической температуры Нееля  $\theta_N$ , константы Кюри–Вейсса  $C$  в законе Кюри–Вейсса, расчетные и экспериментальные величины эффективного момента для соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$

Соединение	$\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$
Значение асимптотической температуры Нееля $\theta_N$ , К	–19
Константа Кюри–Вейсса $C$ , К	0.036
$\mu_{\text{eff}}^{\text{(cal)}}$ , $\mu_B$	12.13
$\mu_{\text{eff}}^{\text{(exp)}}$ , $\mu_B$	11.12

вполне удовлетворительная корреляция между  $A$  и  $A^R$ , и между  $QS$  и  $V_{zz}^R$ , на основе которой сделана идентификация „месбауэровских“ позиций железа в столбце „Позиция“. В месбауэровских спектрах обнаруживаются три позиции Fe2: Fe<sub>21</sub>, Fe<sub>22</sub> и Fe<sub>23</sub>. Это связано с хаотическим распределением катионов Ti по кристаллу. Три позиции Fe2 имеют различное число катионов Ti среди ближайших соседей. Отличие ионных радиусов Fe<sup>3+</sup> (0.67 Å) и Ti<sup>4+</sup> (0.64 Å) обуславливает изменение локального искажения на центральном катионе Fe<sup>3+</sup> при различном числе соседних ионов Ti.

Таким образом, результаты месбауэровского и рентгеновского исследований показали наличие атомного беспорядка в распределении ионов железа Fe<sup>3+</sup> в цирконолите  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ .

На рис. 4 и 5 приведены результаты измерений магнитных свойств соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ . На рис. 4 показана температурная зависимость обратной магнитной восприимчивости  $\chi^{-1}(T)$  при условии охлаждения образца  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  в поле  $H = 500$  Ое. Поведение кривой  $\chi^{-1}(T)$  в высокотемпературной области ( $T > 50$  К) можно описать законом Кюри–Вейсса. Асимптотическая температура Нееля, определяемая как точка пересечения оси  $T$  с асимптотой к кривой  $\chi^{-1}(T)$  в области высоких температур, имеет значение  $\theta_N = -19$  К и свидетельствует о преимущественно антиферромагнитном обменном взаимодействии в сложной магнитной подсистеме исследуемого образца. Константа Кюри–Вейсса  $C = 0.036$  К, что соответствует значению эффективного магнитного момента (молярное значение)  $\mu_{\text{eff}}^{\text{(exp)}} = 11.12 \mu_B$ . Расчетное значение эффективного магнитного момента формульной единицы  $\text{Dy}^{3+}\text{Fe}^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_7$ :  $\mu_{\text{eff}}^{\text{(cal)}} = 12.13 \mu_B$  ( $\mu_{\text{eff}}^{\text{(cal)}} = 5.91 \mu_B$  и  $\mu_{\text{eff}}^{\text{(cal)}} = 10.59 \mu_B$ ).

В табл. 4 приведены значения асимптотической температуры Нееля  $\theta_N$ , константы Кюри–Вейсса  $C$  в законе Кюри–Вейсса, а также расчетные и экспериментальные величины эффективного момента для соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ .

Экспериментальные данные также показывают, что температурная зависимость магнитного момента изучаемого соединения  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  зависит от условий размагничивания (рис. 5). При охлаждении образца в отсутствие магнитного поля температурная зависимость магнитного момента имеет излом при температуре

$T = 5$  К. Излом не наблюдается при охлаждении образца от температуры  $T = 300$  К в поле  $H = 500$  Ое (верхняя кривая рис. 5). Средняя кривая соответствует случаю, когда охлаждение в поле  $H = 500$  Ое осуществлялось от температуры  $T = 15$  К, соответствующей парамагнитной области исследуемого образца.

Таким образом, при низких температурах (ниже температуры замерзания  $T_f = 6$  К) имеется несколько значений магнитного момента в зависимости от условий охлаждения образца. Результаты магнитных измерений характерны для образцов с магнитным состоянием спинового стекла. По-видимому, атомный беспорядок в распределении железа в кристаллической решетке приводит к образованию при температурах ниже  $T_f$  случайно изменяющихся взаимодействий атомов и, возможно, наличие конкурирующих магнитных взаимодействий.

#### 4. Заключение

Методом твердофазной реакции синтезировано соединение  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$ . Проведены рентгеноструктурные, мессбауэровские и магнитные измерения для определения магнитного состояния цирконолита  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  и уточнения структурных особенностей.

С учетом относительных заселенностей индивидуальных позиций, кристаллохимическая формула исследуемого соединения имеет вид  $\text{DyFe}_{1.07(6)}\text{Ti}_{1.93(6)}\text{O}_7$ .

На основании экспериментальных данных, показывающих, с одной стороны, наличие атомного беспорядка в распределении ионов железа в кристаллической решетке, с другой стороны, возникновение при  $T > T_f$  магнитного момента и его рост при понижении температуры вплоть до  $T_f$  с наличием вблизи  $T_f$  излома, а также зависимость магнитных характеристик от предыстории образца с преимущественно антиферромагнитным обменным взаимодействием, можно предполагать, что в соединении  $\text{DyFeTi}_2\text{O}_7$  при температуре ниже температуры замерзания  $T_f = 6$  К реализуется магнитное состояние спинового стекла.

#### Список литературы

- [1] Е.А. Генкина, В.И. Андрианов, Е.Л. Белоконева, Б.В. Милль, Б.А. Максимов, Р.А. Тамазян. Кристаллография **36**, 1408 (1991).
- [2] Г.А. Петраковский, Т.В. Дрокина, А.Л. Шадрин, Д.А. Великанов, О.А. Баюков, М.С. Молокеев, А.В. Карташев, Г.Н. Степанов. ФТТ **53**, 1757 (2011).
- [3] Г.А. Петраковский, Т.В. Дрокина, Д.А. Великанов, О.А. Баюков, М.С. Молокеев, А.В. Карташев, А.Л. Шадрин, А.А. Мицук. ФТТ **54**, 1701 (2012).
- [4] I.C. Madsen, R.J. Hill. Adv. X-ray Anal. **35**, 39 (1992).
- [5] I.C. Madsen, R.J. Hill. J. Appl. Cryst. **27**, 385 (1994).
- [6] W.I.F. David. Abstract P2.6, NIST Spec. Publ. **846**, 210 (1992).
- [7] Diffrac-Plus Basic XRD Wizard. Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany (2002–2007).
- [8] General profile and structure analysis software for powder diffraction data. User's Manual, Bruker AXS (TOPAS V4), Karlsruhe, Germany (2008).