

Синтез и свойства соединения $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ с фрустрированными магнитными взаимодействиями

© Т.В. Дрокина, М.С. Молокеев, О.А. Баюков, Д.А. Великанов, А.М. Воротынов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
Красноярск, Россия

E-mail: tvd@iph.krasn.ru

Поступила в Редакцию 23 июня 2025 г.

В окончательной редакции 16 июля 2025 г.

Принята к публикации 17 июля 2025 г.

Проведены исследования структурных, статических магнитных и резонансных свойств нового магнетика $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$, полученного методом твердофазного синтеза из исходных оксидов Li_2CO_3 , Fe_2O_3 , MgO и V_2O_5 . Особенности тригональной кристаллической структуры $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ со смешанными катионами $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в одной позиции с симметрией, описываемой нецентросимметричной пространственной группой $P1$, допускают существование конкурирующих магнитных обменных взаимодействий с высоким уровнем магнитных фruстраций. Обнаружена зависимость статической магнитной восприимчивости от условий охлаждения образца, характерная для спин-стекольного магнитного состояния.

Ключевые слова: новые неорганические соединения, многокомпонентные ванадаты, кристаллическая структура, магнитные свойства.

DOI: 10.61011/FTT.2025.08.61319.167-25

1. Введение

Ванадаты, в том числе с общей формулой $AMe\text{Fe}_2(\text{VO}_4)_3$, где A — одновалентные щелочноzemельные элементы ($A = \text{Li}, \text{Na}$), Me — двухвалентные элементы ($Me = \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Mn}$), являются оксидными соединениями с центросимметрической и нецентросимметрической триклиническими структурами [1–4], обуславливающими появление конкурирующих обменных взаимодействий в магнитной подсистеме, что привлекает к ним интерес как с точки зрения фундаментальной физики, так и возможных приложений. Доступность введения различных катионов двухвалентных металлов в кристаллическую решетку многокомпонентных ванадатов делает их также объектом для поиска новых магнитных материалов. Это послужило мотивацией к получению соединения $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$. В настоящей статье приведены результаты исследования структурных, резонансных и магнитных свойств нового соединения $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$.

2. Синтез образцов и техника эксперимента

Образцы $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ получены реакцией в твердой фазе из стехиометрической смеси порошкообразных окислов высокой чистоты Li_2CO_3 , Fe_2O_3 , MgO , V_2O_5 с отжигами при температуре 640 °C в течение 24 h на воздухе. Химический и фазовый состав синтезированных образцов контролировался методом рентгеноструктурного анализа.

Порошковая рентгенограмма $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ отснята при комнатной температуре на дифрактометре Наоуан DX-2700BH (оборудование Красноярского регионального центра научно-исследовательского оборудования Федерального исследовательского центра „Красноярский научный центр СО РАН“) с излучением $\text{CuK}\alpha$ и линейным детектором. Размер шага 2θ составлял 0.01°, время счета — 0.2 s на шаг.

Спектры электронного магнитного резонанса сняты на спектрометре Bruker Elexsys E580 в X-диапазоне ($\nu = 9 \text{ GHz}$) и интервале температур 110–300 K. При записи спектров использованы следующие параметры: мощность СВЧ — 0.63 mW, амплитуда модуляции — 0.7 G, частота модуляции — 10 kHz, ширина развертки магнитного поля — 5 kG, время развертки — 40 s.

Спектры ядерного гамма-резонанса регистрировались на спектрометре MC-1104Ем Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН при комнатной температуре с источником $\text{Co}^{57}(\text{Rh})$ на порошковых поглотителях массой 5–1 mg, накрывающей площадь 1 cm², поестественному содержанию железа. Величины химических сдвигов приведены относительно $\alpha\text{-Fe}$.

Исследование статических магнитных свойств $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ проведено на СКВИД-магнитометре оригинальной конструкции Института физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН [5]. Статические магнитные характеристики измерены в интервале температур 4–300 K в двух режимах: охлаждение образца без магнитного поля (ZFC) и в магнитном поле (FC).

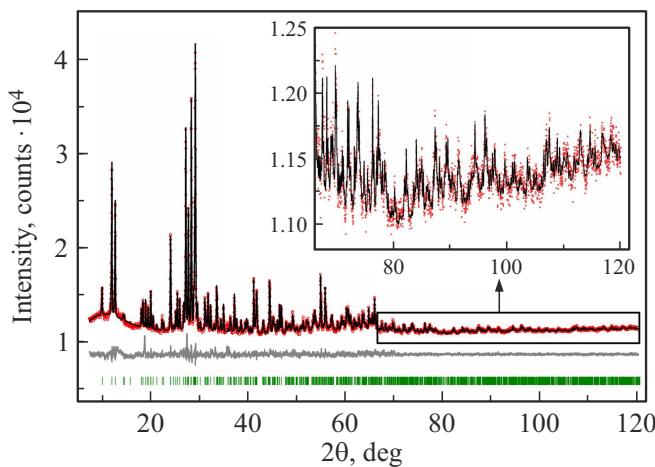


Рис. 1. Рентгенограмма поликристаллического соединения $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при температуре $T = 300$ К. Разностная рентгенограмма — нижняя кривая.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Данные структурных исследований

Изучение структуры $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ проводилось методами рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии.

На рис. 1 показана порошковая рентгенограмма $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$, полученная при комнатной температуре. Практически все рефлексы были проиндексированы триклинной ячейкой с параметрами, близкими к таковым у $\text{NaFe}_3(\text{VO}_4)_3$ [6], поэтому именно эта структура была использована в качестве исходной. Два независимых иона Na были замещены на ионы Li , а все шесть позиций ионов Fe были заселены ионами Fe/Mg с уточняемыми заселеностями позиций с учетом того, что сумма заселенностей в каждой позиции равна 1. Координаты $\text{Li}1$ не уточнялись, что требуется для фиксации начала координат в полярной группе $P1$. Уточнение Ритвельда реализовано при помощи программы TOPAS 4.2 [7]. Результаты уточнения приведены в табл. 1 и рис. 1.

Координаты атомов в кристаллической структуре, заселенность позиций и тепловые параметры представлены в табл. 2.

Основные длины связей в кристаллической структуре $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при температуре $T = 300$ К показаны в табл. 3.

Структура соединения изображена на рис. 2. Химическая формула соединения, основанная на результатах уточнения структуры $\text{Li}_2\text{Mg}_{0.9(1)}\text{Fe}_{2.1(1)}(\text{VO}_4)_3$, близка к предполагаемой из синтеза.

Из анализа результатов рентгеноструктурного исследования следует, что соединение $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ кристаллизуется в триклинной структуре. Симметрия структуры кристалла описывается нецентросимметрич-

Таблица 1. (a , b , c , α , β , γ — параметры элементарной ячейки; V — объем ячейки; 2θ — интервал измерения; факторы недостоверности: R_{wp} — весовой профильный, R_p — профильный, R_B — интегральный; χ^2 — качество подгонки) и результаты уточнения кристаллической структуры $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при температуре $T = 300$ К

Параметр	Значение
Пространственная группа	$P1$
a , Å	6.7226(1)
b , Å	8.0825(2)
c , Å	9.8059(2)
α , deg	106.040(1)
β , deg	104.445(1)
γ , deg	101.779(1)
V , Å ³	474.05(2)
Z	2
2θ-интервал, deg	5–120
Число рефлексов	1419
Число уточненных параметров	166
R_{wp} , %	1.08
R_p , %	0.92
R_B , %	0.37
χ^2	1.69

ной пространственной группой $P1$. Элементарная ячейка содержит две формульные единицы ($Z = 2$). Катионы железа в кристаллической решетке распределены по шести неэквивалентным узлам и смешаны с катионами магния. Смешанные позиции $\text{Fe}^{3+}/\text{Mg}^{2+}$ имеют различное окружение анионами кислорода, образующих октаэдры (6 атомов кислорода) и тригональные бипирамиды (5 атомов кислорода). Четыре позиции имеют октаэдрическое кислородное окружение, а две — окружение в виде тригональной бипирамиды. Образования $(\text{Fe}_i^{3+}/\text{Mg}_i^{2+})\text{O}_j$ связаны между собой посредством общих вершин и формируют бесконечные цепи $(\dots - (\text{Fe}^{3+}1/\text{Mg}^{2+}1) - (\text{Fe}^{3+}2/\text{Mg}^{2+}2) - (\text{Fe}^{3+}5/\text{Mg}^{2+}5) - (\text{Fe}^{3+}4/\text{Mg}^{2+}4) - (\text{Fe}^{3+}3/\text{Mg}^{2+}3) - (\text{Fe}^{3+}6/\text{Mg}^{2+}6) - \dots)$,

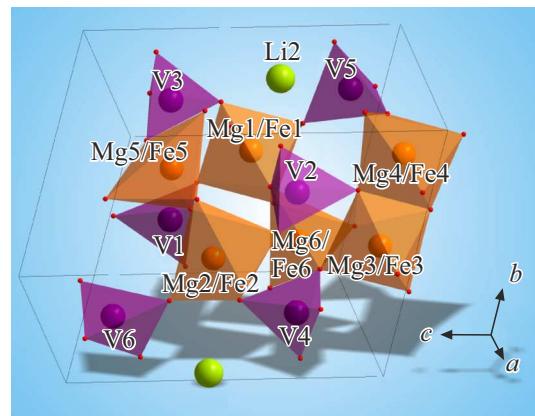


Рис. 2. Кристаллическое строение $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$.

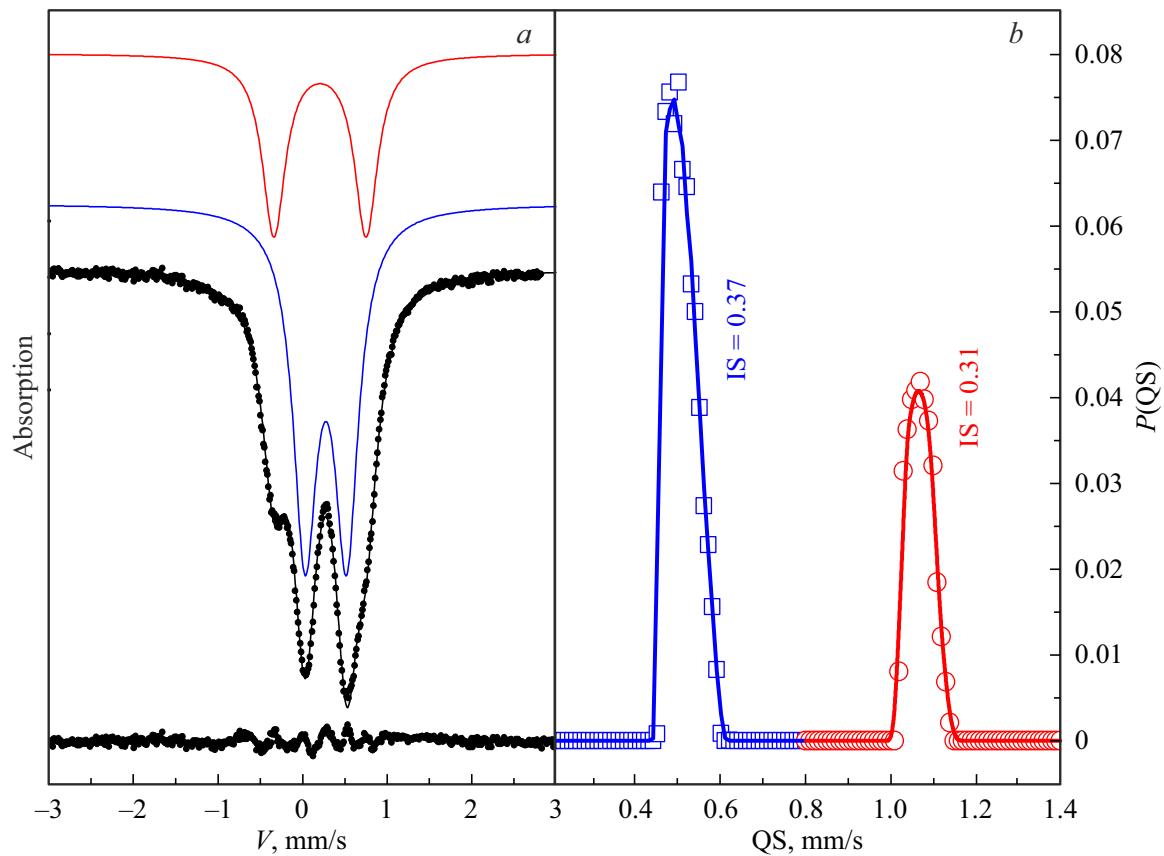


Рис. 3. *a* — мёссбауэровский спектр $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$, измеренный при комнатной температуре. Цветными линиями обозначены компоненты спектра, параметры которых приведены в табл. 4. Внизу показана разность между экспериментальным и вычисленным спектрами. *b* — распределение вероятности квадрупольных расщеплений в экспериментальном спектре, на основе которого сформирован модельный спектр для подгонки к экспериментальному.

тянувшиеся вдоль направления **a–c**. Цепочки соединены друг с другом тетраэдрическими анионными комплексами $(\text{VO}_4)^{3-}$, образуя двумерный слой, который находится в плоскости, основанной на двух векторах **a–c** и **b**. Слои, объединенные связками VO_4 , формируют трехмерную структуру. Каналы структуры заполнены катионами Na^+ , занимающими две неэквивалентные кристаллографические позиции.

Можно ожидать, что структурный беспорядок в распределении катионов железа в $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ оказывает влияние на магнитные свойства соединения.

Зарядовый состав соединения имеет вид: $\text{Li}^+\text{Mg}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{V}^{5+}\text{O}_4^{2-})_3$. Из-за смешения в элементарной кристаллической ячейке в одной и той же позиции катионов железа Fe^{3+} и магния Mg^{2+} реализуется состояние локального нарушения зарядовой нейтральности.

Для изучения состояния катионов железа в ванадате $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ использован метод, основанный на эффекте Мёссбауэра. Спектр ядерного гамма-резонанса при комнатной температуре в $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ показан на рис. 3. Мёссбауэровский спектр представляет собой сумму двух дублетов. Параметры спектра приведены в табл. 4.

Из анализа данных мёссбауэрской спектроскопии следует, что катионы железа в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ находятся в высокоспиновом состоянии Fe^{3+} ($S = 5/2, 3\text{d}^5$) и распределены по двум неэквивалентным по окружению атомами кислорода позициям. Позиции катионов железа имеют химические сдвиги $IS = 0.37$ и 0.31 mm/s относительно $\alpha\text{-Fe}$ и квадрупольные расщепления $QS = 0.47$ и 1.04 mm/s , принадлежащие октаэдрическим и бипирамидальным кислородным окружениям соответственно. Заселенность позиций железа с октаэдрическим кислородным окружением в два раза превышает заселенность позиций с бипирамидальным окружением.

3.2. Результаты исследования $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ методом ЭПР

Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ изучены на частоте 9 GHz в интервале температур 110–300 K во внешнем магнитном поле H до 7000 Oe. На рис. 4, *a* приведен спектр ЭПР при комнатной температуре. На рис. 4, *b* показан результат подгонки экспериментального спектра ЭПР двумя кривыми поглощения лоренцевой формы 1 и 2.

Таблица 2. Координаты атомов, изотропные тепловые параметры B_{iso} и заселенность позиций (Occ.) в кристаллической структуре $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при $T = 300$ К

Атом	x/a	y/b	z/c	$B_{\text{iso}}, \text{\AA}^2$	Occ.
Li1	0.9894	0.0242	0.5534	0.5(18)	1
Li2	0.25(3)	0.90(2)	0.393(17)	0.5(18)	1
Fe1	0.13(2)	0.550(17)	0.398(14)	0.5(7)	0.870(96)
Mg1	0.13(2)	0.550(17)	0.398(14)	0.5(7)	0.130(96)
Fe2	0.88(2)	0.445(17)	0.609(14)	0.5(7)	0.646(88)
Mg2	0.88(2)	0.445(17)	0.609(14)	0.5(7)	0.354(88)
Fe3	0.46(2)	0.298(16)	0.990(13)	0.5(6)	0.93(10)
Mg3	0.46(2)	0.298(16)	0.990(13)	0.5(6)	0.07(10)
Fe4	0.55(2)	0.712(16)	0.013(13)	0.5(8)	0.415(99)
Mg4	0.55(2)	0.712(16)	0.013(13)	0.5(8)	0.585(99)
Fe5	0.79(2)	0.778(16)	0.795(13)	0.5(6)	0.825(76)
Mg5	0.79(2)	0.778(16)	0.795(13)	0.5(6)	0.175(76)
Fe6	0.23(2)	0.220(17)	0.197(14)	0.5(7)	0.488(77)
Mg6	0.23(2)	0.220(17)	0.197(14)	0.5(7)	0.512(77)
V1	0.38(2)	0.388(17)	0.659(14)	0.50(17)	1
V2	0.60(2)	0.584(16)	0.330(13)	0.50(17)	1
V3	0.28(2)	0.829(16)	0.730(14)	0.50(17)	1
V4	0.73(2)	0.148(17)	0.263(14)	0.50(17)	1
V5	0.09(2)	0.782(17)	0.127(13)	0.50(17)	1
V6	0.92(2)	0.232(17)	0.887(13)	0.50(17)	1
O1	0.42(2)	0.423(18)	0.850(15)	0.5(3)	1
O2	0.54(2)	0.563(19)	0.126(15)	0.5(3)	1
O3	0.33(3)	0.491(19)	0.356(15)	0.5(3)	1
O4	0.63(3)	0.539(19)	0.662(15)	0.5(3)	1
O5	0.27(3)	0.815(18)	0.568(16)	0.5(3)	1
O6	0.73(3)	0.207(18)	0.455(16)	0.5(3)	1
O7	0.47(3)	0.213(19)	0.164(15)	0.5(3)	1
O8	0.49(3)	0.758(19)	0.824(15)	0.5(3)	1
O9	0.15(2)	0.243(17)	0.012(15)	0.5(3)	1
O10	0.87(2)	0.691(17)	0.997(15)	0.5(3)	1
O11	0.17(3)	0.443(18)	0.554(16)	0.5(3)	1
O12	0.85(3)	0.525(19)	0.414(15)	0.5(3)	1
O13	0.04(2)	0.758(18)	0.748(14)	0.5(3)	1
O14	0.99(3)	0.274(17)	0.251(15)	0.5(3)	1
O15	0.32(3)	0.05(2)	0.827(15)	0.5(3)	1
O16	0.67(3)	0.938(18)	0.200(15)	0.5(3)	1
O17	0.36(3)	0.19(2)	0.566(17)	0.5(3)	1
O18	0.64(3)	0.791(19)	0.430(17)	0.5(3)	1
O19	0.15(2)	0.000(17)	0.231(14)	0.5(3)	1
O20	0.78(2)	1.004(18)	0.734(15)	0.5(3)	1
O21	0.26(3)	0.747(17)	0.027(14)	0.5(3)	1
O22	0.77(2)	0.315(17)	0.985(15)	0.5(3)	1
O23	0.11(2)	0.653(18)	0.254(15)	0.5(3)	1
O24	0.96(2)	0.309(17)	0.731(15)	0.5(3)	1

ных частиц фазы гематита при внедрении двухвалентных катионов магния. Данное предположение подтверждается также особенностями хода температурных зависи-

Таблица 3. Основные длины связей в кристаллической структуре $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ при $T = 300$ К

Связь	Длина, Å	Связь	Длина, Å
Li1—O6	2.66(11)	Mg4—O1 ^{vi}	2.28(15)
Li1—O17 ⁱ	2.53(10)	Mg4—O2	1.85(15)
Li1—O18 ⁱⁱ	2.47(11)	Mg4—O8 ^{vi}	1.95(17)
Li1—O20 ⁱⁱ	2.53(11)	Mg4—O10 ^{vi}	2.21(14)
Li1—O24	2.56(11)	Mg4—O16	2.04(16)
Li2—V5	2.38(19)	Mg4—O21	2.11(14)
Li2—O5	1.98(19)	Fe5—O4	1.91(15)
Li2—O17 ⁱⁱⁱ	2.32(18)	Fe5—O8	2.14(14)
Li2—O19 ⁱⁱⁱ	2.03(17)	Fe5—O10	2.26(16)
Li2—O23	1.92(17)	Fe5—O13 ⁱ	1.88(14)
Fe1—O3	1.66(14)	Fe5—O20	2.08(13)
Fe1—O5	2.16(16)	Mg5—O4	1.91(15)
Fe1—O11	1.95(16)	Mg5—O8	2.14(14)
Fe1—O12 ^{iv}	1.90(14)	Mg5—O10	2.26(16)
Fe1—O14 ^{iv}	2.15(15)	Mg5—O13 ⁱ	1.88(14)
Fe1—O23	1.82(16)	Mg5—O20	2.08(13)
Mg1—O3	1.66(14)	Fe6—O3	2.16(16)
Mg1—O5	2.16(16)	Fe6—O7	1.76(14)
Mg1—O11	1.95(16)	Fe6—O9	1.83(17)
Mg1—O12 ^{iv}	1.90(14)	Fe6—O14 ^{iv}	1.92(14)
Mg1—O14 ^{iv}	2.15(15)	Fe6—O19	1.89(13)
Mg1—O23	1.82(16)	Mg6—O3	2.16(16)
Fe2—O4	2.10(15)	Mg6—O7	1.76(14)
Fe2—O6	1.96(16)	Mg6—O9	1.83(17)
Fe2—O11 ⁱ	2.12(15)	Mg6—O14 ^{iv}	1.92(14)
Fe2—O12	2.16(17)	Mg6—O19	1.89(13)
Fe2—O13 ⁱ	2.38(14)	V1—O1	1.76(18)
Fe2—O24	1.88(15)	V1—O4	1.84(14)
Mg2—O4	2.10(15)	V1—O11	1.77(16)
Mg2—O6	1.96(16)	V1—O17	1.59(15)
Mg2—O11 ⁱ	2.12(15)	V2—O2	1.89(17)
Mg2—O12	2.16(17)	V2—O3	1.91(14)
Mg2—O13 ⁱ	2.38(14)	V2—O12	1.87(14)
Mg2—O24	1.88(15)	V2—O18	1.62(15)
Fe3—O1	1.92(15)	V3—O5	1.55(18)
Fe3—O2 ^v	2.06(15)	V3—O8	1.77(15)
Fe3—O7 ^v	200(16)	V3—O13	1.62(13)
Fe3—O9 ^v	2.15(14)	V3—O15 ⁱⁱⁱ	1.67(15)
Fe3—O15	2.06(16)	V4—O6	1.80(19)
Fe3—O22	2.05(14)	V4—O7	1.99(15)
Mg3—O1	1.92(15)	V4—O14	1.88(14)
Mg3—O2 ^v	2.06(15)	V4—O16 ⁱⁱ	1.57(14)
Mg3—O7 ^v	200(16)	V5—O10 ^{vii}	1.58(16)
Mg3—O9 ^v	2.15(14)	V5—O19 ⁱⁱⁱ	1.68(14)
Mg3—O15	2.06(16)	V5—O21	1.66(15)
Mg3—O22	2.05(14)	V5—O23	1.83(15)
Fe4—O1 ^{vi}	2.28(15)	V6—O9 ^{viii}	1.68(15)
Fe4—O2	1.85(15)	V6—O20 ⁱⁱ	1.89(16)
Fe4—O8 ^{vi}	1.95(17)	V6—O22	1.67(15)
Fe4—O10 ^{vi}	2.21(14)	V6—O24	1.86(16)
Fe4—O16	2.04(16)	O1—O2 ^v	2.47(19)
Fe4—O21	2.11(14)	O1—O8	2.75(14)

На рис. 5 приведены температурные зависимости интенсивности I (a), резонансного поля H_{res} (b) и ширины линии dH (c) для подгоночных кривых 1 и 2.

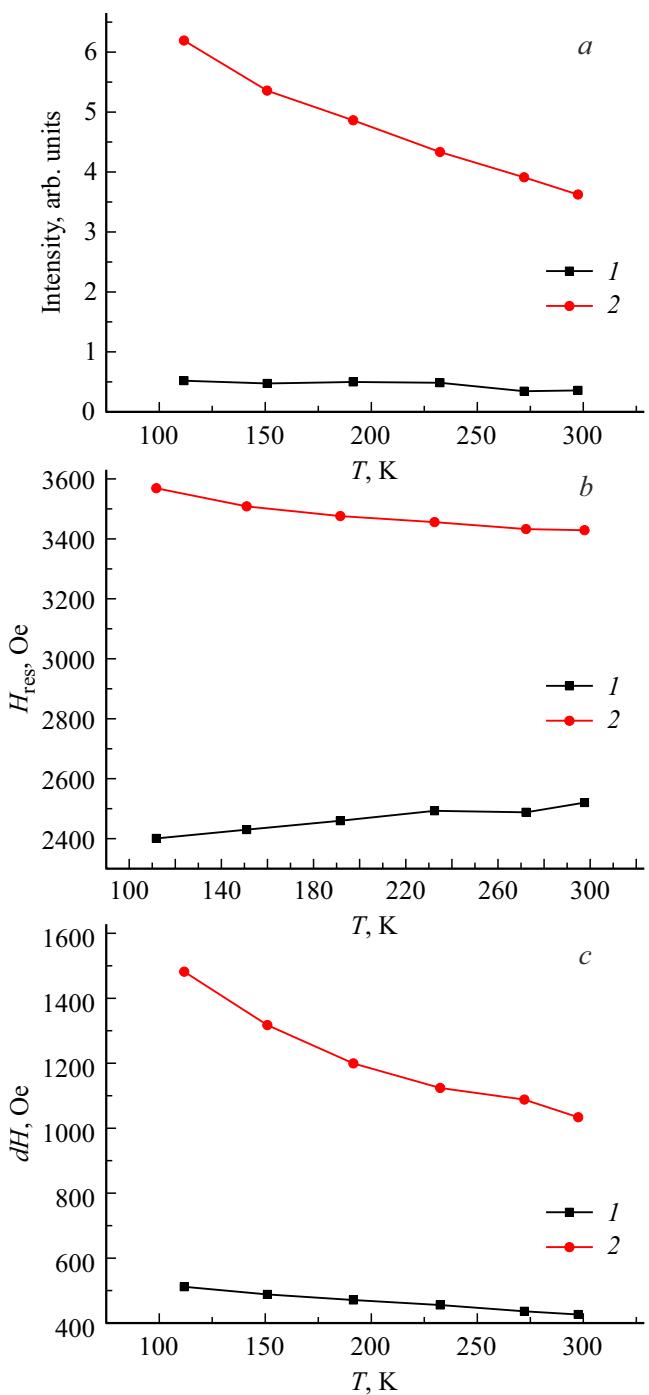
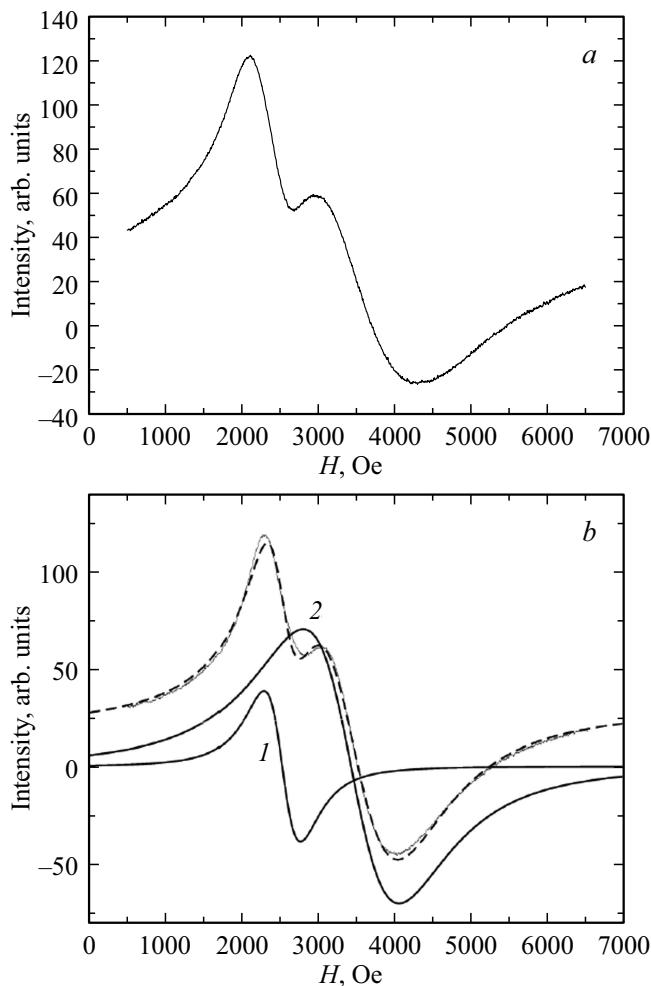
Из анализа ЭПР-данных следует, что сигнал 2 обусловлен основной матрицей $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$. Интенсивность этого сигнала на порядок выше интенсивности сигнала 1. Линия 1, вероятно, связана с образованием в процессе синтеза малого количества суперпарамагнит-

Таблица 4. Мёссбауэровские параметры ^{57}Fe в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$: IS — изомерный химический сдвиг относительно $\alpha\text{-Fe}$, QS — квадрупольное расщепление, W — ширина линии поглощения, A — заселенность неэквивалентных позиций железа

IS, mm/s ± 0.01	QS, mm/s ± 0.02	W , mm/s ± 0.02	A , at.% ± 0.05	Позиция
0.37	0.47	0.32	0.66	$\text{Fe}^{3+}(6)$
0.31	1.04	0.31	0.34	$\text{Fe}^{3+}(5)$

мостей резонансного поля: уменьшение величины резонансного поля сигнала 1 при понижении температуры, тогда как резонансное поле сигнала 2 практически не зависит от температуры.

При $T = 297.8$ К величины фактора расщепления Ланде для кривых 2 и 1 составляют $g(2) = 1.978$ и $g(1) = 2.692$ соответственно.



3.3. Результаты статических магнитных измерений $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$

Магнитная подсистема $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ образована магнитными катионами железа Fe^{3+} ($S = 5/2$). Металлы магний Mg^{2+} и ванадий V^{5+} не магнитны. Таким образом, магнитные свойства литий-магниевого ванадата определяют четыре высокоспиновых катиона железа,

которые совместно с катионами магния занимают шесть неэквивалентных позиций в кристаллической решетке.

На рис. 6 приведены температурные зависимости магнитной восприимчивости χ и обратной магнитной восприимчивости χ^{-1} , измеренные в магнитном поле $H = 100$ Ое (масса образца $M = 0.060$ г).

Из эксперимента следует, что парамагнитная восприимчивость $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ в области температур 40–300 К следует закону Кюри–Вейсса с асимптотической температурой Нееля $\theta = -97$ К. Отрицательное значение θ свидетельствует о преобладающей роли антиферромагнитных обменных взаимодействий между катионами Fe^{3+} в магнитной подсистеме образца.

В области температур с линейной температурной зависимостью обратной магнитной восприимчивости соединение $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ является парамагнетиком с молярным значением эффективного магнитного момента $\mu_{\text{eff(ex)}} = 8.57 \mu_B$. Расчетное значение эффективного магнитного момента формульной единицы $\mu_{\text{eff(calс.)}} = 8.36 \mu_B$.

Ход температурной зависимости магнитного момента в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ в области низких температур (ниже

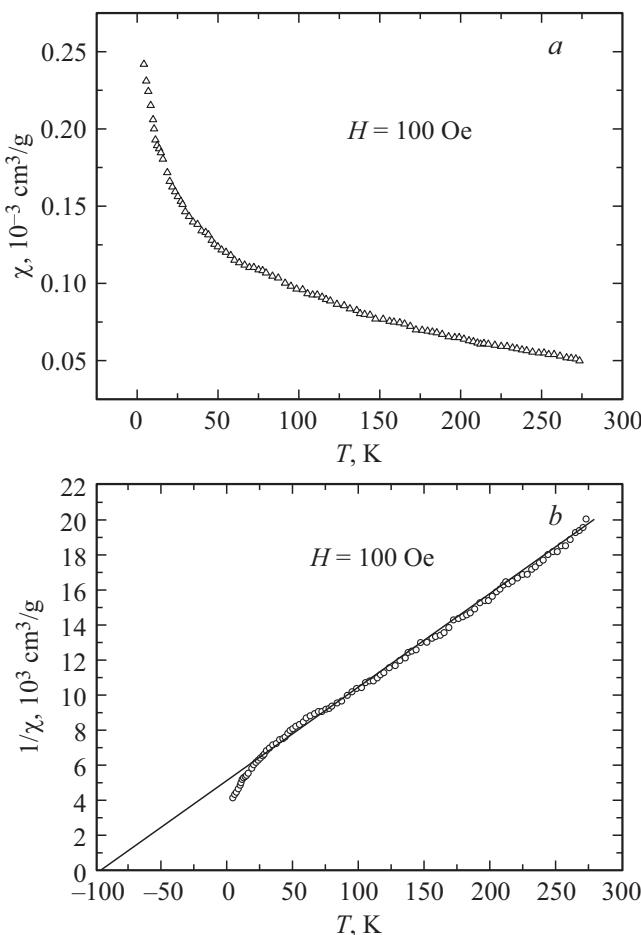


Рис. 6. Температурные зависимости магнитной восприимчивости χ и обратной магнитной восприимчивости χ^{-1} в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$, измеренные в магнитном поле $H = 100$ Ое. Масса образца $M = 0.060$ г.

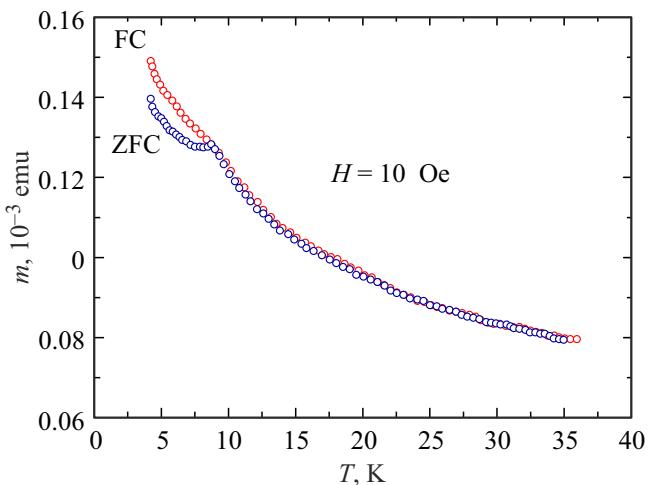


Рис. 7. Температурные зависимости магнитного момента m в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ при охлаждении образца во внешнем магнитном поле $H = 10$ Ое (FC) и без поля (ZFC). Измерение проведено в магнитном поле $H = 10$ Ое. Температура расхождения кривых ZFC и FC $T_F = 8.8$ К.

температуры $T_F = 8.8$ К), как показано на рис. 7, зависит от условий охлаждения образца во внешнем магнитном поле $H = 10$ Ое (FC) и без поля (ZFC), что является одной из характеристик магнитного состояния спинового стекла [8,9].

В результате беспорядочного распределения магнитных катионов железа Fe^{3+} и немагнитных катионов магния Mg^{2+} по шести неэквивалентным узлам в кристаллической решетке $\text{LiMgFe}_2(\text{VO}_4)_3$ следует ожидать присутствия существенных магнитных фruстраций. Уровень магнитных фruстраций f можно оценить, используя соотношение $f \approx |\theta|/T_c$, где T_c — критическая температура, ниже которой устанавливается магнитный порядок [10,11]. Для соединения $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ уровень магнитных фruстраций $f \approx 11$.

4. Заключение

Новое магнитное соединение $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ получено твердофазным синтезом из исходных оксидов Li_2CO_3 , Fe_2O_3 , MgO и V_2O_5 . Исследованы структурные, статические магнитные свойства, проведена характеристика материала с помощью спектроскопии Мёссбауэра и электронного парамагнитного резонанса.

Результаты исследования являются экспериментальным доказательством наличия в $\text{LiMgFe}_2\text{V}_3\text{O}_{12}$ существенных магнитных фruстраций, вызванных беспорядочным распределением магнитных катионов железа Fe^{3+} , смешанных с немагнитными катионами магния Mg^{2+} , по шести неэквивалентным узлам тригональной кристаллической решетки, описываемой пространственной группой $P1$.

Благодарности

Авторы благодарят Красноярский региональный центр коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН за предоставленное оборудование для исследования структурных свойств и измерений ЭПР-характеристик.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках научной тематики Госзадания Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Т.В. Дрокина, Г.А. Петраковский, О.А. Баюков, А.М. Воротынов, Д.А. Великанов, М.С. Молохеев. ФТТ **58**, 10, 1913 (2016). [T.V. Drokina, G.A. Petrakovskii, O.A. Bayukov, A.M. Vorotynov, D.A. Velikanov, M.S. Molokeev. Phys. Solid State **58**, 10, 1981 (2016).]
- [2] Т.В. Дрокина, Г.А. Петраковский, О.А. Баюков, М.С. Молохеев, А.М. Воротынов, С.И. Попков, Д.А. Великанов. ФТТ **62**, 2, 247 (2020). [T.V. Drokina, G.A. Petrakovskii, O.A. Bayukov, M.S. Molokeev, A.M. Vorotynov, S.I. Popkov, D.A. Velikanov. Phys. Solid State **62**, 2, 297 (2020).]
- [3] Т.В. Дрокина, Д.А. Великанов, О.А. Баюков, М.С. Молохеев, Г.А. Петраковский. ФТТ **63**, 6, 754 (2021). [T.V. Drokina, D.A. Velikanov, O.A. Bayukov, M.S. Molokeev, G.A. Petrakovskii. Phys. Solid State **63**, 5, 802 (2021).]
- [4] Т.В. Дрокина, М.С. Молохеев, О.А. Баюков, Д.А. Великанов, А.М. Воротынов, Г.А. Петраковский. ФТТ **66**, 8, 1363 (2024).
- [5] D.A. Velikanov. Inorg. Mater. Appl. Res. **11**, 4, 801 (2020).
- [6] F.D. Martin, H. Müller-Buschbaum. Z. Naturforschung B **50**, 1, 51 (1995).
- [7] Bruker AXS TOPAS V4: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. User's Manual. Bruker AXS, Karlsruhe, Germany (2008).
- [8] И.Я. Коренблит, Е.Ф. Шендер. УФН **157**, 2, 267 (1989). [I.Ya. Korenblit, E.F. Shender. Sov. Phys. — Uspekhi **32**, 2, 139 (1989).]
- [9] J.A. Mydosh. Spin-Glasses: An Experimental Introduction, Taylor and Francis, New York (1993).
- [10] A.P. Ramirez. Annu. Rev. Mater. Sci. **24**, 453 (1994).
- [11] J.E. Greedan. J. Mater. Chem. **11**, 1, 37 (2001).

Редактор Е.В. Толстякова