05,04

# Магнитные свойства людвигитов $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$ и $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$

© С.Н. Софронова, Е.В. Еремин, Е.М. Мошкина, А.В. Селянина

Институт физики им. Л.В. Киренского, обособленное структурное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

E-mail: ssn@iph.krasn.ru

Поступила в Редакцию 8 августа 2025 г. В окончательной редакции 25 августа 2025 г. Принята к публикации 11 сентября 2025 г.

Исследованы твердые растворы  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$  и  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$  которые являются ферримагнетиками с температурой магнитного перехода 46 и 48 K, соответственно. Показано, что замещение двухвалентных ионов кобальта в людвигите  $Co_3BO_5$  на ионы никеля практически не влияет на магнитные свойства: температуры магнитного упорядочения близки, поведение температурных и полевых зависимостей намагниченности схоже с поведением намагниченности в  $Co_3BO_5$ . Ионы трехвалентного кобальта, вероятно, остаются в низкоспиновом состоянии, а характер обменных взаимодействий магнитных ионов не меняется.

Ключевые слова: людвигиты, магнитный фазовый переход, косвенные обменные взаимодействия.

DOI: 10.61011/FTT.2025.09.61623.227-25

### 1. Введение

Людвигит Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub> выделяется среди других людвигитов тем, что, во-первых, ионы кобальта в нем находятся в двух валентных состояниях — двухвалентном и трехвалентном, а во-вторых, трехвалентный ион кобальта находится в низкоспиновом состоянии со спином равным нулю. Из четырех неэквивалентных позиций, три позиции (1, 2 и 3 на рис. 1) заняты  $Co^{2+}$ , а одна позиция (4 на рис. 1) —  $Co^{3+}$ . Кристаллическая структура и распределение магнитных и немагнитных ионов кобальта таковы, что соединение можно представить как состоящее из магнитных плоскостей, содержащих ионы Со<sup>2+</sup>, разделенных немагнитными плоскостями, образованными ионами Со<sup>3+</sup>. Несмотря на это магнитная система упорядочивается при 42 К [1–3]. Магнитная структура Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub> была определена методом дифракции нейтронов [1] и было показано, что магнитные моменты ионов ориентированы практически параллельно оси b и немного скошены в направлении оси а. Было установлено, что магнитные моменты ионов  $Co^{2+}$  в позициях 1-3составляют  $(3.1-3.8)\mu_{\rm B}$ , что соответствует высокоспиновому состоянию ионов  $Co^{2+}$ , тогда как магнитный момент ионов  $Co^{3+}$  в позиции 4 равен всего  $0.5\mu_{\rm B}$ (рис. 1).

В настоящее время известно достаточно много гетеровалентных людвигитов на основе  $Co_3BO_5$ . Проведены исследования соединений, в которых ионы кобальта замещены разновалентными ионами с ненулевым спином, такими как марганец, медь, железо [4,5], и со спинами, равными нулю в основном состоянии — галлий, олово, титан, магний [6–11]. Практически во всех указанных выше соединениях замещение происходило в трехвалентной подсистеме.

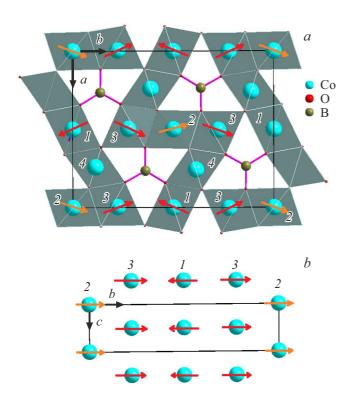
В соединении  $Co_{1.7}Mn_{1.3}BO_5$  оба магнитных иона (кобальт и марганец) могут быть как в двухвалентном,

так и в трехвалентном состоянии. Несмотря на то, что практически половина ионов кобальта замещена ионами марганца, магнитный переход в состояние спинового стекла в  $\mathrm{Co}_{1.7}\mathrm{Mn}_{1.3}\mathrm{BO}_5$  наблюдается при 41 К. Ионы марганца распределены по всем позициям в разных валентных состояниях, однако позиция 4 является предпочтительной [5]. Вероятно, присутствие в позиции 4 магнитного иона усиливает конкуренцию обменных взаимодействий, что препятствует установлению дальнего магнитного порядка.

В соединении  $Co_5Ti(BO5)_2$  ионы кобальта представлены только в двухвалентном состоянии. Позицию 4 практически в равной степени разупорядоченно заселяют ионы титана и кобальта. Позиция 1 также занята ионами титана и кобальта в пропорции 0.075:0.175 [6]. При температуре 19 К система переходит в состояние спинового стекла. В этом соединении ионы двухвалентного кобальта, занимающие позицию 4, также усиливают конкуренцию, что препятствует установлению дальнего порядка.

В отличие от других составов, в  $Co_{2.4}Ga_{0.6}BO_5$  температура магнитного перехода снижается до 37 K, однако, дальний магнитный порядок сохраняется. Ионы галлия имеют валентность  $3^+$  и предпочтительно занимают позицию 4, замещая трехвалентные ионы кобальта. Магнитный момент ионов кобальта лежит в плоскости ab. Так как в  $Co_3BO_5$  трехвалентные ионы кобальта находятся в низкоспиновом состоянии и их магнитный момент равен нулю, их замещение на немагнитный галий, повидимому, значительно не влияет на магнитную структуру [7].

В твердых растворах  $\mathrm{Co}_{3-x}\mathrm{Cr}_x\mathrm{BO}_5$  исследования намагниченности показали, что замещение ионов кобальта на ионы хрома резко увеличивает температуру магнитного перехода с 42 К для недопированного соединения



**Рис. 1.** a — магнитная структура  $Co_3BO_5$ ; b — магнитное упорядочение в плоскости, которую формируют двухвалентные ионы кобальта, занимающие позиции 1, 2 и 3 [1].

до  $115\,\mathrm{K}$  для соединения с максимальной концентрацией  $\mathrm{Cr}\ (x=0.9)\ [12]$ . Последнее значение является самой высокой температурой дальнего магнитного упорядочения, зарегистрированной на сегодняшний день для людвигитов на основе  $\mathrm{Co_3BO_5}$ . Замещение изменяет основную магнитную структуру соединения, переходя из ферримагнитного состояния (при низких концентрациях  $\mathrm{Cr}\$ ) в антиферромагнитное состояние (при высоких концентрациях  $\mathrm{Cr}\$ ). Кроме этого, при концентрации ионов  $\mathrm{Cr}\$ 6 более  $\mathrm{0.5}\$ ,  $\mathrm{Co}^{3+}\$ из низкоспинового состояния переходит в высокоспиновое.

Замещение в двухвалентной подсистеме людвигитов на основе  $\mathrm{Co_3BO_5}$  практически не исследовалось. Известно о существовании соединения  $\mathrm{Co_{2.88}Cu_{0.12}BO_5}$  [4], в котором температура магнитного упорядочения изменяется незначительно с 42 до 43 К. Авторы предполагали, что медь замещает ионы трехвалентного кобальта в позиции 4 и имеет трехвалентное состояние. Однако следует отметить, что трехвалентное состояние (3<sup>+</sup>) совершенно не характерно для меди в диэлектриках. Наиболее вероятно, что медь входит в состав  $\mathrm{Co_{2.88}Cu_{0.12}BO_5}$  в двухвалентном состоянии и так как меди в состав  $\mathrm{Co_{2.88}Cu_{0.12}BO_5}$  вошло немного, магнитная система упорядочивается так же, как в  $\mathrm{Co_3BO_5}$ .

В нашей работе мы исследуем влияние замещения ионов кобальта на ионы никеля в двухвалентной подсистеме на магнитные свойства соединений  ${\rm Co}_{3-x}{\rm Ni}_x{\rm BO}_5$ . Никель в оксиборатах встречается в двухвалентном состоянии, кроме этого, никель и кобальт — это соседние

элементы в периодической системе Менделеева и имеют схожие ионные радиусы. Известны системы, например, твердые растворы со структурой котоита  $Co_xNi_{3-x}B_2O_6$ , где происходит изоструктурное замещение ионов никеля на кобальт, а так как у этих ионов разная одноионная анизотропия, то, например, в котоитах направление оси легкого намагничивания изменяется [13]. Интересно проследить за эволюцией магнитных свойств в людвигитах  $Co_{3-x}Ni_xBO_5$ , при замещении ионов кобальта на никель: будут ли оставаться трехвалентные ионы кобальта в низкоспиновом состоянии, как будут ориентироваться магнитные моменты ионов.

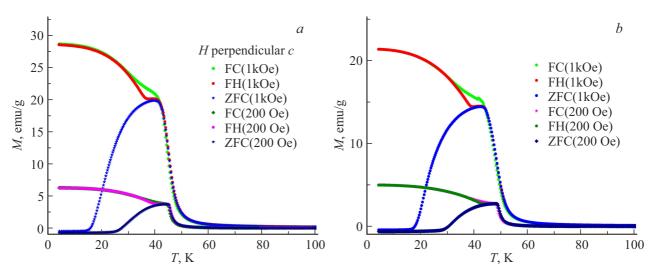
Ранее нами были выполнены ростовые эксперименты с целью получения ряда твердых растворов  $Co_{3-x}Ni_xBO_5$  и были получены два состава с x=0.33 и x=0.66 [14]. В данной работе мы представляем подробное исследование магнитных свойств полученных соединений.

# 2. Состав и кристаллическая структура

Два состава  $Co^{3+}Ni_{2-x}^{2+}Co_{x}^{2+}BO_{5}$  со структурой людвигита были получены методом спонтанного зарождения из раствор-расплавной системы на основе  $Bi_2Mo_3O_{12}-B_2O_3$ , с разбавлением карбонатом Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> [15]. Синтезированные кристаллы черного цвета, по форме напоминают иголки. Методом энергодисперсионной микроскопии был уточнен состав двух исследуемых твердых растворов  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$  и  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$ , определена кристаллическая структура Pbam (55) и параметры решетки (a = 9.2855(7) Å, b = 11.9893(9) Å, c = 2.9908(2) Å и a = 9.244(5) Å, b = 12.049(5) Å, c = 2.9966(14) Å, соответственно для  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$  и  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$ ). В рамках первопринципного расчета энергий различных катионноупорядоченных конфигураций было показано, что ионы никеля предпочитают замещать ионы кобальта в позициях 2а и 4g [14].

#### 3. Магнитные свойства

Магнитные свойства соединений исследовались на установке PPMS Quantum design в диапазоне температур  $4-300\,\mathrm{K}$  при величине магнитной напряженности  $-90-+90\,\mathrm{kOe}$ . Монокристаллические образцы, как уже отмечалось, были похожи на иголки. Интенсивный рост иголок идет вдоль наиболее короткого кристаллографического направления. Кристаллографическая ось c совпадает с направлением иголки, однако, поперечные размеры полученных образцов не позволяют ориентировать их относительно кристаллографических направлений a и b. Измерения температурных и полевых зависимостей намагниченности проводилось в двух направлениях: вдоль и перпендикулярно оси c. На рис. 2 представлены температурные зависимости намагниченности монокристаллов двух составов, при



**Рис. 2.** Температурные зависимости намагниченности монокристаллов  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$  (*a*) и  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$  (*b*) при приложении магнитного поля перпендикулярно оси *c* в режиме охлаждения в поле (FC), нагрева в поле (FH), и охлаждения без поля и при последующем нагреве в ненулевом поле (ZFC) для полей 200 Ое и 1 kOe.

приложении магнитного поля вдоль и перпендикулярно оси c в режиме охлаждения в поле (FC), нагрева в поле (FH), и охлаждения без поля с последующим нагревом в ненулевом поле (ZFC) для полей 200 Oe и 1 kOe. Как видно из рис. 2, температура магнитного упорядочения увеличивается с увеличением концентрации никеля. Вид кривых очень похож на температурные зависимости намагниченности Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub>. При этом температурные зависимости намагниченности в разных режимах различаются в обоих исследуемых составах, также, как и в Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub>. На кривых, измеренных в режиме охлаждения в поле (FC), нагрева в поле (FH) наблюдаются две особенности: в составе  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$ при 29 и 46 K, в составе  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$  при 30 и 48 К. Как и в Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub> значительно отличается температура Кюри-Вейсса: при приложении магнитного поля вдоль оси c —  $T_{\theta} = -508$  и  $-616\,\mathrm{K}$ , при приложении поля перпендикулярно оси  $c-T_{\theta}=7$  и  $-8\,\mathrm{K}$  для  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_{5}}$  и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_{5}}$ , соответ-

На рис. З представлены полевые зависимости намагниченности обоих составов при различных температурах при приложении магнитного поля вдоль и перпендикулярно оси c. Поведение полевых зависимостей намагниченности  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.47}^{2+}BO_5}$  и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5}$  аналогично поведению намагниченности в  $\mathrm{Co_3BO_5}$ : при приложении поля перпендикулярно оси c наблюдаются пели гистерезиса, величина коэрцитивного поля варыруется от 17 до 25 kOe; при приложении поля вдоль оси c намагниченность практически линейна и в области магнитного упорядочения наклон кривых не изменяется в зависимости от температуры.

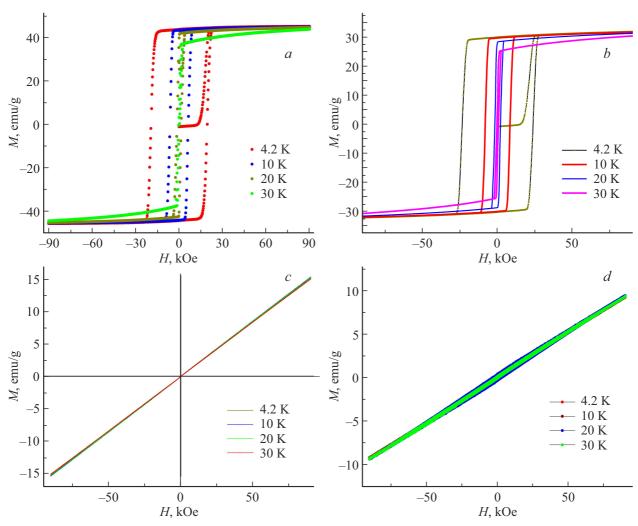
На рис. 4 представлены температурные зависимости ac намагниченности  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5$  и  $Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$  при приложении переменного магнитного поля различной частоты. Как видно из рис. 4,

в отличие от dc намагниченности на кривых в обоих составах наблюдается только одна особенность, которая не смещается по температуре в зависимости от частоты приложенного поля: при 48 и 46 К в  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_{5}}$  и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_{5}}$ , соответственно.

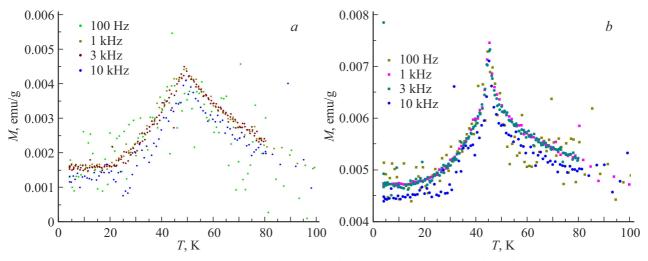
# 4. Обсуждение результатов

Магнитные свойства замещенных составов  $Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5 \hspace{0.5cm} \text{и} \hspace{0.5cm} Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5$ похожи на свойства Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub>. Температуры магнитного упорядочения в замещенных составах несколько выше  $(46-48 \, {\rm K})$ , чем у чистого соединения  $(42 \, {\rm K})$ , то есть внедрение ионов никеля хоть и немного, но усиливает магнитный порядок. Если отталкиваться от предположения, что трехвалентные ионы кобальта, занимающие позицию 4 (см. рис. 1) находятся в низкоспиновом состоянии со спином 0 (то есть являются немагнитными) и не меняют свое спиновое состоянии при замещении в двухвалентной подсистеме, то магнитными ионами, формирующими магнитный порядок буду только двухвалентные ионы кобальта и никеля (в замещенных составах).

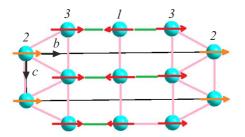
В наших предыдущих работах мы оценивали обменные взаимодействия в рамках косвенной обменной связи как для  $Co_3BO_5$  [12], так и для других соединений со структурой людвигита, содержащих ионы никеля в позициях I, 2 и 3 (см. рис. 1), например, в соединении  $Ni_2MnBO_5$  [16]. В случае, если в позиции 4 находится магнитный ион, в структуре людвигита можно выделить 11 различных обменных взаимодействий. В рассматриваемых нами соединениях в позиции 4 находится немагнитный ион, таким образом остается всего 5 обменных взаимодействий в двухвалентной подсистеме. Эти обменные взаимодействия приведены в таблице для соединений  $Co_3BO_5$  и  $Ni_2MnBO_5$  [1,16]. Мы можем



**Рис. 3.** Полевые зависимости намагниченности  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5}$  (a,c) и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5}$  (b,d) при различных температурах при приложении магнитного поля перпендикулярно (a,b) и вдоль (c,d) оси c.



**Рис. 4.** Температурные зависимости ас намагниченности  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_5}$  (a) и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_5}$  (b) при приложении переменного магнитного поля различной частоты.



**Рис. 5.** Магнитное упорядочение в плоскости bc. Антиферромагнитные (зеленые линии) и ферромагнитные (розовые линии) суперобменные взаимодействия.

Обменные взаимодействия ионов в позициях k и l  $(J_{k-l})$  в двухвалентной подсистеме людвигитов  ${\rm Co_3BO_5}$  и  ${\rm Ni_2MnBO_5}$  [1,16]

J(K)	$J_{1-1}$	$J_{2-2}$	$J_{3-3}$	$J_{1-3}$	$J_{2-3}$
Co <sub>3</sub> BO <sub>5</sub>	3.5	3.5	3.5	-2.9	1.8
Ni <sub>2</sub> MnBO <sub>5</sub>	5.5	5.5	5.5	-1.8	5.5

использовать обменные взаимодействия, рассчитанные для двухвалентной подсистемы  $Ni_2MnBO_5$  рассматривая соединение  $Ni_2Co^{3+}BO_5$ , так как при расчетах, предполагалось, что ионы никеля занимают позиции I-3. Для экспериментальных составов, где содержание никеля составляет x=0.33 и x=0.59, соединение  $Ni_2Co^{3+}BO_5$  является предельным случаем замещения ионов кобальта ионами никеля в двухвалентной подсистеме.

Как видно из таблицы, полное замещение ионов кобальта ионами никеля в двухвалентной подсистеме не изменяет характер обменных взаимодействий: ферромагнитные взаимодействия остаются ферромагнитными и усиливаются, а антиферромагнитные взаимодействия между ионами в позициях I и 3, хотя несколько ослабевают, но остаются антиферромагнитными.

Таким образом, даже при полном замещении двухвалентной подсистемы можно ожидать, что магнитный порядок останется тем же, что и в  $Co_3BO_5$ , в том случае, если трехвалентные ионы кобальта останутся в низкоспиновом состоянии. Однако может измениться направление магнитных моментов, как это наблюдается в изоструктурных котоитах  $Ni_3B_2O_6$  и  $Co_3B_2O_6$ , в которых ионы никеля и кобальта также в двухвалентном состоянии, поскольку спин-орбитальное взаимодействие ионов никеля и кобальта разное. Однако размер образцов не позволил нам провести ориентационные измерения, разделив направления b и a. Мы не можем определить, насколько изменилась ориентация магнитных моментов в плоскости ab.

Так как магнитная ячейка  $Co_3BO_5$  совпадает с кристаллографической и магнитные ионы занимают три неэквивалентных позиции, если не учитывать скошенность магнитных моментов относительно оси b, то можно оценить температуру магнитного упорядочения

в рамках модели трехподрешеточного ферримагнетика как для  $Co_3BO_5$ , так и для  $Ni_2Co^{3+}BO_5$ , если предположить, что магнитное упорядочение при замещении кобальта ионами никеля не изменяется [17]. Для оценки мы использовали обменные взаимодействия из таблицы. Для трехподрешеточного ферримагнетика кубическое уравнение для определения  $T_c$  дает три корня:  $T_c = 34.8$ , 17.5 и 0.2 К для  $Co_3BO_5$  и  $T_c = 38.6$ , 7.3 и -1.0 К для  $Ni_2Co^{3+}BO_5$ . Один из корней для  $Co_3BO_5$  ( $T_c = 34.8$  К) близок к наблюдаемой температуре магнитного перехода 42 К. Также как и в эксперименте, где при увеличении концентрации никеля  $T_c$  растет, в соединении  $Ni_2Co^{3+}BO_5$   $T_c$  возрастает до 38.6 К.

#### Заключение

Исследование магнитных свойств твердых растворов  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{2+}Co_{1.67}^{2+}BO_{5}}$  и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_{5}}$  показало, что замещение двухвалентных ионов кобальта на ионы никеля практически не влияет на магнитные свойства, поведение температурных и полевых зависимостей намагниченности схоже на поведением намагниченностей в Со<sub>3</sub>ВО<sub>5</sub>. Температура магнитного перехода в замещенных составах  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.33}^{12+}Co_{1.67}^{2+}BO_{5}}$  и  $\mathrm{Co^{3+}Ni_{0.59}^{2+}Co_{1.41}^{2+}BO_{5}}$ возрастает до 46 и 48 К, соответственно. Оценка температуры магнитного перехода в рамках модели трехподрешеточного ферримагнетика с использованием обменных взаимодействий, полученных в рамках полуэмпирической модели косвенной обменной связи, качественно согласуется с экспериментальными данными: усиление ферромагнитных взаимодействий  $J_{1-1}, J_{2-2}, J_{3-3}$  и  $J_{2-3}$ при замещении ионов кобальта на ионы никеля приводит к небольшому увеличению температуры магнитного перехода, несмотря на ослабление антиферромагнитных взаимодействий  $J_{1-3}$ .

## Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности, проект № 23-12-20012 (https://rscf.ru/project/23-12-20012/).

#### Благодарности

Работа выполнена на оборудовании Красноярского регионального центра коллективного пользования.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

 D.C. Freitas, C.P.C. Medrano, D.R. Sanchez, R.M. Nuñez, J.A.R. Velamazán, M.A. Continentino. Phys. Rev. B 94, 174409 (2016).

- [2] D.C. Freitas, M.A. Continentino, R.B. Guimarães, J.C. Fernandes, J. Ellena, L. Ghivelder. Phys. Rev. B 77, 184422 (2008).
- [3] Н.Б. Иванова, А.Д. Васильев, Д.А. Великанов, Н.В. Казак, С.Г. Овчинников, Г.А. Петраковский, В.В. Руденко. ФТТ 49, 4, 618 (2007).
- [4] N.B. Ivanova, N.V. Kazak, Y.V. Knyazev, D.A. Velikanov, A.D. Vasiliev, L.N. Bezmaternykh, M.S. Platunov. Low Temp. Phys. 39, 709 (2013).
- [5] Y.V. Knyazev, N.B. Ivanova, N.V. Kazak, M.S. Platunov, L.N. Bezmaternykh, D.A. Velikanov, A.D. Vasiliev, S.G. Ovchinnikov, G.Y. Yurkin. J. Magn. Magn. Mater. 324, 923 (2012).
- [6] D.C. Freitas, R.B. Guimarães, D.R. Sanchez, J.C. Fernandes, M.A. Continentino, J. Ellena, A. Kitada, H. Kageyama, A. Matsuo, K. Kindo, G.G. Eslava, L. Ghivelder. Phys. Rev. B 81, 024432 (2010).
- [7] Н.Б. Иванова, М.С. Платунов, Ю.В. Князев, Н.В. Казак, Л.Н. Безматерных, А.Д. Васильев, С.Г. Овчинников, В.И. Нижанковский. ФТТ **54**, *11*, 2080 (2012).
- [8] M.A.V. Heringer, D.L. Mariano, D.C. Freitas, C. Baggio-Saitovitch, M.A. Continentino, D.R. Sanchez. Phys. Rev. Mater. 4, 064412 (2020).
- [9] C.P.C. Medrano, D.C. Freitas, D.R. Sanchez, C.B. Pinheiro, G.G. Eslava, L. Ghivelder, M.A. Continentino. Phys. Rev. B 91, 054402 (2015).
- [10] A. Utzolino, K. Bluhm. Z. Naturforsch. 51 b, 305 (1996).
- [11] S. Sofronova, I. Nazarenko. Cryst. Res. Technol. 52, 1600338 (2017).
- [12] D.L. Mariano, D.R. Sanchez, D.C. Freitas, C. Salazar Mejia, S.N. Sofronova, M.A. Continentino, L.F. Cohen, L. Ghivelder. J. Alloys Compd. 1036, 181497 (2025).
- [13] S.N. Sofronova, D.A. Velikanov, E.M. Moshkina, A.V. Chernyshev. Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 88, 1, 47 (2024).
- [14] С.Н. Софронова, А.В. Чернышев, А.Д. Васильев, А.В. Шабанов. ФТТ 66, 10, 1736 (2024).
- [15] A. Wiedenmann. Untersuchungen zum magnetischen Verhalten von quasi-1 dimensionalen Spinglassystemen FeMgBO<sub>4</sub> und FeMg<sub>2</sub>BO<sub>5</sub>. Hamburg (1979).
- [16] E. Moshkina, S. Sofronova, A. Veligzhanin, M. Molokeev, I. Nazarenko, E. Eremin, L. Bezmaternykh. J. Magn. Magn. Mater. 402, 69 (2016).
- [17] S. Krupicka. Physik der Ferrite und der verwandten magnetischen Oxide. Academis, Prag. (1973). 780 p.

Редактор А.Н. Смирнов