

05,04

Магнитные свойства людвигитов $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$

© 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 $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$, которые являются ферромагнетиками с температурой магнитного перехода 46 и 48 К, 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 Co_3BO_5 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 Co^{2+} , разделенных немагнитными плоскостями, образованными ионами Co^{3+} . Несмотря на это магнитная система упорядочивается при 42 К [1–3]. Магнитная структура Co_3BO_5 была определена методом дифракции нейтронов [1] и было показано, что магнитные моменты ионов ориентированы практически параллельно оси b и немного скосены в направлении оси a . Было установлено, что магнитные моменты ионов Co^{2+} в позициях 1–3 составляют $(3.1\text{--}3.8)\mu_B$, что соответствует высокоспиновому состоянию ионов Co^{2+} , тогда как магнитный момент ионов Co^{3+} в позиции 4 равен всего $0.5\mu_B$ (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 $\text{Co}_{1.7}\text{Mn}_{1.3}\text{BO}_5$ 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 $\text{Co}_{1.7}\text{Mn}_{1.3}\text{BO}_5$ 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 $\text{Co}_5\text{Ti}(\text{BO}_5)_2$ ионы кобальта представлены только в двухвалентном состоянии. Позицию 4 практически в равной степени разупорядочено 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 $\text{Co}_{2.4}\text{Ga}_{0.6}\text{BO}_5$ температура магнитного перехода снижается до 37 К, 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, по-видимому, значительно не влияет на магнитную структуру [7].

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

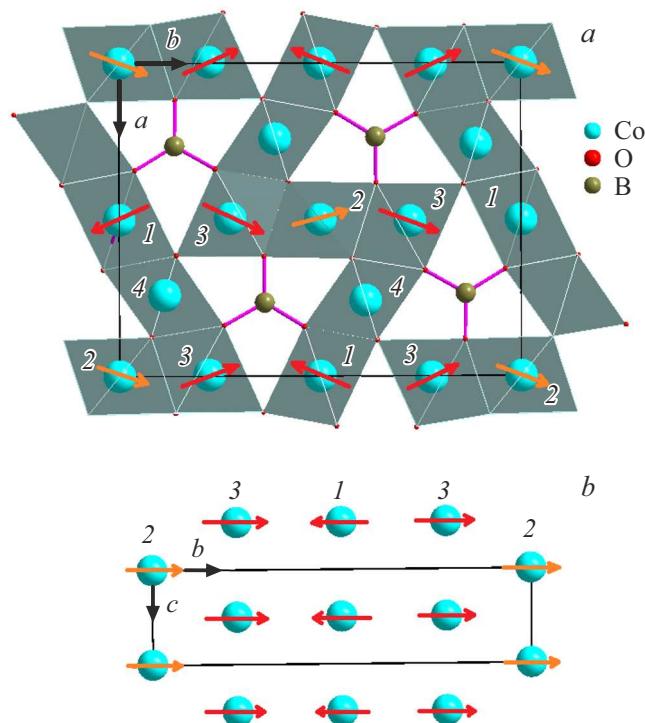


Рис. 1. *a* — магнитная структура Co_3BO_5 ; *b* — магнитное упорядочение в плоскости, которую формируют двухвалентные ионы кобальта, занимающие позиции 1, 2 и 3 [1].

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

Замещение в двухвалентной подсистеме людвигитов на основе Co_3BO_5 практически не исследовалось. Известно о существовании соединения $\text{Co}_{2.88}\text{Cu}_{0.12}\text{BO}_5$ [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^+) совершенно не характерно для меди в диэлектриках. Наиболее вероятно, что медь входит в состав $\text{Co}_{2.88}\text{Cu}_{0.12}\text{BO}_5$ в двухвалентном состоянии и так как меди в состав $\text{Co}_{2.88}\text{Cu}_{0.12}\text{BO}_5$ вошло немного, магнитная система упорядочивается так же, как в Co_3BO_5 .

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

元素 в периодической системе Менделеева и имеют схожие ионные радиусы. Известны системы, например, твердые растворы со структурой котоита $\text{Co}_x\text{Ni}_{3-x}\text{B}_2\text{O}_6$, 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 $\text{Co}_{3-x}\text{Ni}_x\text{BO}_5$, 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 $\text{Co}_{3-x}\text{Ni}_x\text{BO}_5$ 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 $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{2-x}^{2+}\text{Co}_x^{2+}\text{BO}_5$ со структурой людвигита были получены методом спонтанного зарождения из раствор-расплавной системы на основе $\text{Bi}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}-\text{B}_2\text{O}_3$, с разбавлением карбонатом Na_2CO_3 [15]. Синтезированные кристаллы черного цвета, по форме напоминают иголки. Методом энергодисперсионной микроскопии был уточнен состав двух исследуемых твердых растворов $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$, 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 $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$). В рамках первоначального расчета энергий различных катионно-упорядоченных конфигураций было показано, что ионы никеля предпочитают замещать ионы кобальта в позициях $2a$ и $4g$ [14].

3. Магнитные свойства

Магнитные свойства соединений исследовались на установке PPMS Quantum design в диапазоне температур 4–300 К при величине магнитной напряженности -90 – $+90$ кОе. 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

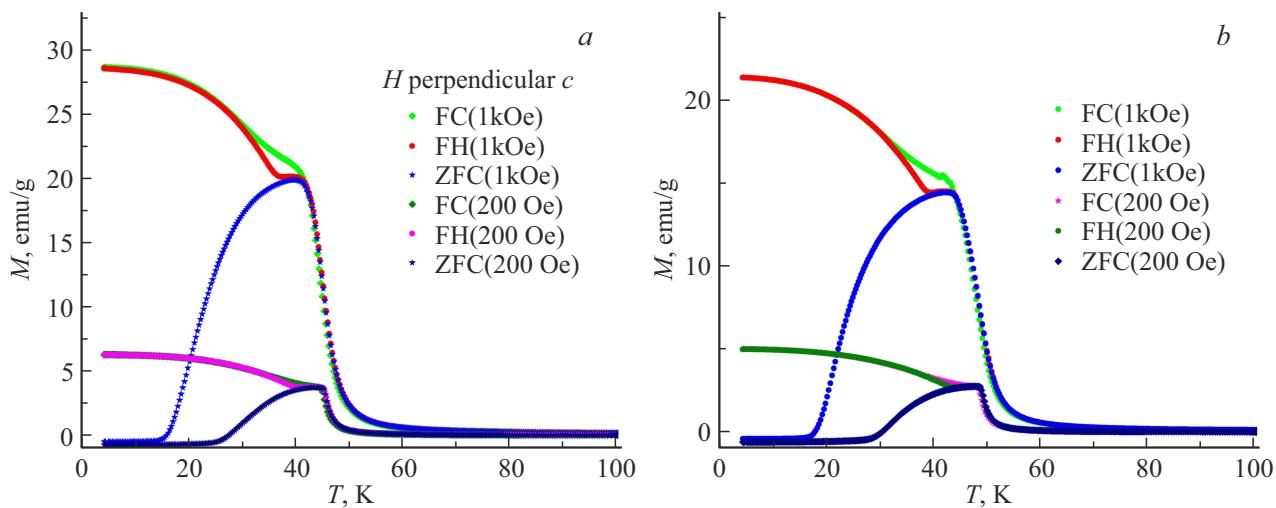


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности монокристаллов $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ (а) и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ (б) при приложении магнитного поля перпендикулярно оси c в режиме охлаждения в поле (FC), нагрева в поле (FH), и охлаждения без поля и при последующем нагреве в ненулевом поле (ZFC) для полей 200 Ое и 1 кОе.

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 Ое и 1 кОе. Как видно из рис. 2, температура магнитного упорядочения увеличивается с увеличением концентрации никеля. Вид кривых очень похож на температурные зависимости намагниченности Co_3BO_5 . При этом температурные зависимости намагниченности в разных режимах различаются в обоих исследуемых составах, также, как и в Co_3BO_5 . На кривых, измеренных в режиме охлаждения в поле (FC), нагрева в поле (FH) наблюдаются две особенности: в составе $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ при 29 и 46 К, в составе $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ при 30 и 48 К. Как и в Co_3BO_5 значительно отличается температура Кюри–Вейсса: при приложении магнитного поля вдоль оси c — $T_\theta = -508$ и -616 К, при приложении поля перпендикулярно оси c — $T_\theta = 7$ и -8 К для $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$, соответственно.

На рис. 3 представлены полевые зависимости намагниченности обоих составов при различных температурах при приложении магнитного поля вдоль и перпендикулярно оси c . Поведение полевых зависимостей намагниченности $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ аналогично поведению намагниченности в Co_3BO_5 : при приложении поля перпендикулярно оси c наблюдаются пели гистерезиса, величина коэрцитивного поля варьируется от 17 до 25 кОе; 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 $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ 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 $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$, соответственно.

4. Обсуждение результатов

Магнитные свойства замещенных составов $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ очень похожи на свойства Co_3BO_5 . Температуры магнитного упорядочения в замещенных составах несколько выше (46–48 К), чем у чистого соединения (42 К), 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 состояние при замещении в двухвалентной подсистеме, то магнитными ионами, формирующими магнитный порядок будут 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 1, 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

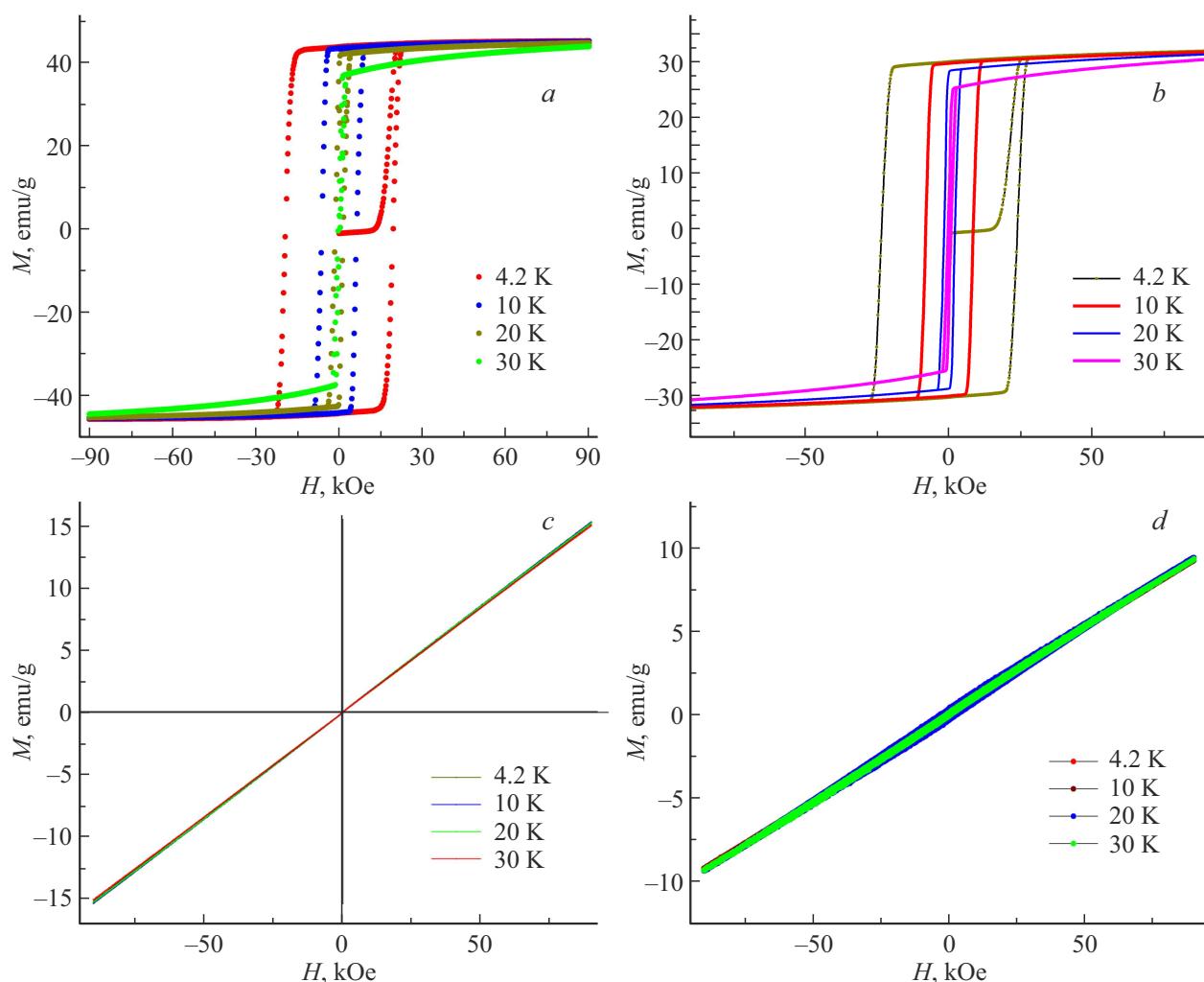


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ (a,c) и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ (b,d) при различных температурах при приложении магнитного поля перпендикулярно (a,b) и вдоль (c,d) оси c .

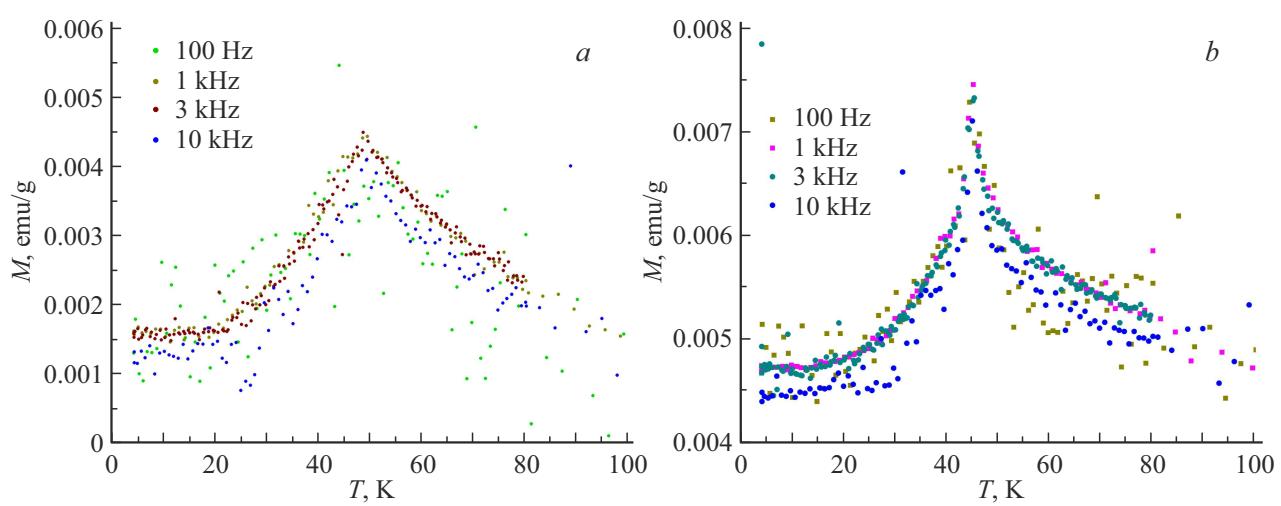


Рис. 4. Температурные зависимости ас намагниченности $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ (a) и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ (b) при приложении переменного магнитного поля различной частоты.

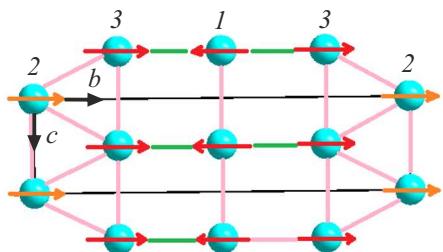


Рис. 5. Магнитное упорядочение в плоскости bc . Антиферромагнитные (зеленые линии) и ферромагнитные (розовые линии) суперобменные взаимодействия.

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

$J(\text{K})$	J_{1-1}	J_{2-2}	J_{3-3}	J_{1-3}	J_{2-3}
Co_3BO_5	3.5	3.5	3.5	-2.9	1.8
Ni_2MnBO_5	5.5	5.5	5.5	-1.8	5.5

использовать обменные взаимодействия, рассчитанные для двухвалентной подсистемы Ni_2MnBO_5 рассматривая соединение $\text{Ni}_2\text{Co}^{3+}\text{BO}_5$, так как при расчетах, предполагалось, что ионы никеля занимают позиции 1–3. Для экспериментальных составов, где содержание никеля составляет $x = 0.33$ и $x = 0.59$, соединение $\text{Ni}_2\text{Co}^{3+}\text{BO}_5$ 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 1 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 $\text{Ni}_3\text{B}_2\text{O}_6$ и $\text{Co}_3\text{B}_2\text{O}_6$, 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 склонность магнитных моментов относительно оси b , то можно оценить температуру магнитного упорядочения

в рамках модели трехподрешеточного ферримагнетика как для Co_3BO_5 , так и для $\text{Ni}_2\text{Co}^{3+}\text{BO}_5$, 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 K для Co_3BO_5 и $T_c = 38.6$, 7.3 и -1.0 K для $\text{Ni}_2\text{Co}^{3+}\text{BO}_5$. Один из корней для Co_3BO_5 ($T_c = 34.8$ K) близок к наблюдаемой температуре магнитного перехода 42 K. Также как и в эксперименте, где при увеличении концентрации никеля T_c растет, в соединении $\text{Ni}_2\text{Co}^{3+}\text{BO}_5$ T_c возрастает до 38.6 K.

5. Заключение

Исследование магнитных свойств твердых растворов $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ 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 Co_3BO_5 . Температура магнитного перехода в замещенных составах $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.33}^{2+}\text{Co}_{1.67}^{2+}\text{BO}_5$ и $\text{Co}^{3+}\text{Ni}_{0.59}^{2+}\text{Co}_{1.41}^{2+}\text{BO}_5$ возрастает до 46 и 48 K, соответственно. Оценка температуры магнитного перехода в рамках модели трехподрешеточного ферримагнетика с использованием обменных взаимодействий, полученных в рамках полузмпирической 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

- [1] 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 $FeMgBO_4$ und $FeMg_2BO_5$. 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