

УДК 546.302;54.022

КООРДИНАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРЫ Ni(II) С ТИОФЕНОВЫМИ ЛИГАНДАМИ: СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

© 2021 г. В. А. Дубских¹, А. А. Лысова¹, Д. Г. Самсоненко¹, А. Н. Лавров¹,
Д. Н. Дыбцев¹*, В. П. Федин¹

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: dan@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 12.04.2021 г.

Два новых металл-органических координационных полимера $[\text{Ni}(\text{Btdc})(\text{Bipy})(\text{H}_2\text{O})_2]$ (I) и $[\text{Ni}(\text{azobipy})(\text{H}_2\text{O})_4](\text{Btdc})$ (II) (H_2Btdc = 2,2'-битиофен-5,5'-дикарбоновая кислота, Bipy = 4,4'-бипиридил, azobipy = 4,4'-азобипиридил) были получены в сольватотермальных условиях. Структура и состав соединений установлены с помощью монокристалльного рентгеноструктурного анализа (CCDC № 2068945 (I), 2068946 (II)) и подтверждены методами рентгенофазового, элементного и термогравиметрического анализов и ИК-спектроскопией. Структура I представляет собой редкий пример взаимного переплетения сетчатых мотивов в двух независимых направлениях. Соединение II имеет ионную природу и состоит из чередующихся катионных $[\text{Ni}(\text{azobipy})(\text{H}_2\text{O})_4]^{2+}$ и анионных Btdc^{2-} фрагментов. Для соединения I были проведены измерения магнитной восприимчивости и эффективного магнитного момента в диапазоне температур 1.77–300 К в магнитных полях до 10 кЭ. Значение $\mu_{\text{эфф}}$ составляет 3.08 μ_{B} при 300 К, что близко к чисто спиновому значению для изолированного высокоспинового иона Ni^{2+} с $S = 1$ (2.83 μ_{B}) с учетом вклада орбитального момента. При температурах $T < 10$ К наблюдается слабые антиферромагнитные взаимодействия между ионами Ni^{2+} .

Ключевые слова: металл-органические координационные полимеры, рентгеноструктурный анализ, магнитные свойства

DOI: 10.31857/S0132344X21100029

Интерес к химии металл-органических координационных полимеров (МОКП) в последние несколько десятилетий обусловлен наличием у этого класса соединений уникальных функциональных свойств, которые можно тонко настраивать за счет комбинирования различных органических лигандов и ионов (или кластеров) металлов [1–4]. Один из способов функционализации МОКП — это использование мостиковых лигандов, содержащих гетероатом, в частности атом серы. Было показано, что относительно высокая электронная плотность и поляризуемость атома серы улучшает сорбционные и люминесцентные характеристики таких координационных полимеров [5–10]. Кроме того, представляет интерес исследование магнитных свойств МОКП на основе таких лигандов [11] и парамагнитных катионов металлов, в частности Ni(II). На данный момент опубликовано всего несколько работ, в которых обсуждаются магнитные свойства МОКП на основе ионов Ni^{2+} и тиофен-2,5-дикарбоновой кислоты (H_2Tdc). В ряде работ [12–14] сообщается об антиферромагнитных обменных взаимодействиях между ионами Ni^{2+} в

тиофенсодержащих координационных полимерах внутри строительных блоков $\{\text{Ni}_2\}$ или $\{\text{Ni}_3\}$, и дальнейшего магнитного упорядочения в этих соединениях не наблюдается. В [15] сообщается об одномерном координационном полимере $[\text{Ni}(\text{Tdc})(\text{Pen})_2]$ (Pen = 1,3-диаминопропан) со значением эффективного магнитного момента ($\mu_{\text{эфф}}$) при 300 К равным 2.62 μ_{B} . В [16] синтезирован трехмерный каркас с изолированными атомами никеля. Падение $\mu_{\text{эфф}}$ при $T < 25$ К говорит о наличии антиферромагнитных взаимодействий, которые, по словам авторов, происходят через карбоксилатные лиганды. О соединениях с более длинными гетероциклическими лигандами тиофенового ряда с исследованными магнитными свойствами не сообщалось.

В настоящей работе впервые синтезированы никель(II)-органические координационные полимеры с использованием 2,2'-битиофен-5,5'-дикарбоновой кислоты (H_2Btdc), установлено их кристаллическое строение и изучены магнитные свойства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез H_2Btdc проводили по методике, описанной в [17]. Остальные исходные вещества и растворители использовали в виде коммерчески доступных реактивов без дополнительной очистки.

Синтез $[Ni(Btdc)(Bipy)(H_2O)_2]$ (I). 29.1 мг (0.1 ммоль) $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, 25.4 мг (0.1 ммоль) H_2Btdc и 15.6 мг (0.1 ммоль) 4,4'-бипиридила (**Bipy**), 2.5 мл N,N-диметилформамида (**ДМФА**), 2.5 мл воды и 5.5 мкл ледяной уксусной кислоты герметизировали в реакторе из тефлона и нагревали в стальном автоклаве при 110°C в течение 48 ч. Полученные кристаллы зеленого цвета промывали **ДМФА** (3 × 5 мл) и сушили на воздухе. Выход 23 мг (46%). Состав и структура продукта определяли с помощью **РСА**.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3639 сл, 3391 ш.сл, ($\nu_s(O-H)$); 1609 ср, 1547 ср ($\nu_{as}(C=O)$), 1512 ср ($\gamma(C-C)$); 1435 ср, 1414 ср, 1372 с $\nu_s(C=O)$; 1217 ср, 1121 сл, 1100 сл, 1070 сл, 1038 сл, 1009 сл, 887 сл, 814 с, 777 с ($\delta_{oop}(C-H)$); 752 сл, 733 сл, 671 сл, 648 ср, 633 ср, 600 ср, 567 ср, 519 с, 471 сл, 438 ср.

Найдено, %: C 47.4; H 3.1; N 5.7.
 Для $C_{20}H_{16}N_2O_4S_2Ni$
 вычислено, %: C 47.7; H 3.2; N 5.6.

Синтез $[Ni(azobipy)(H_2O)_4](Btdc)$ (II). 58.2 мг (0.2 ммоль) $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, 50.8 мг (0.2 ммоль) H_2Btdc и 36.8 мг (0.2 ммоль) 4,4'-азобипиридила (**azobipy**), 2.5 мл **ДМФА**, 2.5 мл воды и 22 мкл ледяной уксусной кислоты герметизировали в реакторе из тефлона и нагревали в стальном автоклаве при 110°C в течение 48 ч. Полученные кристаллы красного цвета промывали **ДМФА** (3 × 5 мл) и сушили на воздухе. Выход 108 мг (81%). Состав и структура продукта определяли с помощью **РСА**.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3291 ш.ср ($\nu_s(O-H)$); 1603 ср, 1564 с $\nu_{as}(C=O)$; 1514 ср ($\gamma(C-C)$); 1439 с ($\nu_s(C=O)$); 1420 ср, 1366 с $\nu_s(C=O)$; 1225 сл, 1190 сл, 1117 сл, 1038 ср, 1038 ср, 1022 сл, 885 ср, 845 ср, 827 ср, 781 с $\delta_{oop}(C-H)$; 696 ср, 648 ср, 575 с, 554 ср, 532 сл, 521 сл, 498 сл, 461 сл.

Найдено, %: C 42.2; H 3.6; N 9.9.
 Для $C_{20}H_{20}N_4O_8S_2Ni$
 вычислено, %: C 42.3; H 3.6; N 9.9.

ИК-спектры в диапазоне 4000–400 cm^{-1} регистрировали в таблетках с KBr на Фурье-спектрометре Scimitar FTS 2000. Термогравиметрический анализ (**TGA**) проводили на термоанализаторе NETZSCH TG 209 F1 при линейном нагревании образцов в атмосфере He со скоростью 10 град min^{-1} . Элементный анализ (**ЭА**) выполняли на

CHN-анализаторе VarioMICROcube. Данные РФА получали на порошковом дифрактометре Shimadzu XRD 7000S ($CuK\alpha$ -излучение, $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$ (I) и $CoK\alpha$, $\lambda = 1.78897 \text{ \AA}$ (II)).

Измерения намагниченности поликристаллических образцов проводили с помощью магнитометра Quantum Design MPMS-XL SQUID в диапазоне 1.77–300 К при магнитных полях до 10 кЭ. Температурные зависимости намагниченности ($M(T)$) измеряли при нагреве образца после его охлаждения либо в нулевом магнитном поле, либо в заданном магнитном поле, а также при охлаждении образца. Для определения парамагнитной составляющей молярной магнитной восприимчивости ($\chi_p(T)$) температурно-независимый диамагнитный вклад (χ_d) и возможную намагниченность ферромагнитных микропримесей ($\chi_{FM}(T)$) оценивали и вычитали из измеренных значений суммарной молярной восприимчивости ($\chi = M/H$). В то время как χ_d вычисляли с использованием аддитивной схемы Паскаля, ($\chi_{FM}(T)$), если таковая имеется, определяли по измеренным изотермическим зависимостям $M(H)$ и данным $M(T)$, взятым при различных магнитных полях. Для определения $\mu_{эфф}$ ионов Ni^{2+} парамагнитную восприимчивость $\chi_p(T)$ анализировали с использованием зависимости Кюри–Вейса $\chi_p(T) = N_A \mu_{эфф}^2 / 3k_B(T - \theta)$, где N_A и k_B – числа Авогадро и Больцмана соответственно. Влияние на магнитную восприимчивость расщепления в нулевом поле уровней ионов Ni^{2+} оценивали с использованием подходов, описанных в [18].

РСА. Дифракционные данные для монокристалла I получены при 100 К на синхротронной станции “БЕЛОК” Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, используя двухкоординатный детектор Rayonix SX165 CCD ($\lambda = 0.79313 \text{ \AA}$, ω -сканирование с шагом 1.0°). Интегрирование, учет поглощения, определение параметров элементарной ячейки проводили с использованием пакета программ XDS [19]. Дифракционные данные для монокристалла II получены при 140 К на автоматическом дифрактометре Agilent Xcalibur, оснащенный двухкоординатным детектором AtlasS2 (графитовый монохроматор, $\lambda(MoK\alpha) = 0.71073 \text{ \AA}$, ω -сканирование с шагом 0.25°). Интегрирование, учет поглощения, определение параметров элементарной ячейки проводили с использованием пакета программ CrysAlisPro [20]. Структуры расшифрованы с использованием программы SHELXT [21] и уточнены полноматричным МНК в анизотропном (за исключением атомов водорода) приближении с использованием программы SHELXL [22]. Позиции атомов водорода органических лигандов рассчитаны геометрически и уточнены по модели “наездника”. Кристаллографические данные и детали дифракционных

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур I и II

| Параметр | Значение | |
|--|---|--|
| | I | II |
| <i>M</i> | 503.18 | 567.23 |
| Сингония | Моноклинная | Моноклинная |
| Пр. гр. | <i>C2</i> | <i>C2/c</i> |
| <i>a</i> , Å | 19.623(3) | 6.6198(2) |
| <i>b</i> , Å | 11.197(2) | 12.8425(5) |
| <i>c</i> , Å | 14.907(2) | 26.0359(8) |
| α , град | 90 | 90 |
| β , град | 103.80(3) | 93.747(3) |
| γ , град | 90 | 90 |
| <i>V</i> , Å ³ | 3180.8(9) | 2208.70(13) |
| <i>Z</i> | 6 | 4 |
| ρ (выч.), г/см ³ | 1.576 | 1.706 |
| μ , мм ⁻¹ | 1.548 | 1.126 |
| <i>F</i> (000) | 1548 | 1168 |
| Размер кристалла, мм | 0.07 × 0.05 × 0.03 | 0.17 × 0.11 × 0.10 |
| Область сканирования по θ , град | 1.57–31.00 | 3.14–28.98 |
| Диапазон индексов <i>hkl</i> | –25 ≤ <i>h</i> ≤ 25, –14 ≤ <i>k</i> ≤ 14, –17 ≤ <i>l</i> ≤ 19 | –8 ≤ <i>h</i> ≤ 9, –9 ≤ <i>k</i> ≤ 15, –33 ≤ <i>l</i> ≤ 32 |
| Число измеренных/независимых отражений | 23003/7131 | 5115/2442 |
| <i>R</i> _{int} | 0.0299 | 0.0124 |
| Число отражений с <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>) | 7014 | 2271 |
| GOOF | 1.086 | 1.050 |
| <i>R</i> -факторы (<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)) | <i>R</i> ₁ = 0.0380, <i>wR</i> ₂ = 0.1076 | <i>R</i> ₁ = 0.0284, <i>wR</i> ₂ = 0.0724 |
| <i>R</i> -факторы (по всем отражениям) | <i>R</i> ₁ = 0.0387, <i>wR</i> ₂ = 0.1088 | <i>R</i> ₁ = 0.0310, <i>wR</i> ₂ = 0.0736 |
| Остаточная электронная плотность (max/min), e/Å ³ | 0.566/–0.675 | 1.562/–0.243 |

экспериментов приведены в табл. 1. Полные таблицы межатомных расстояний и валентных углов, координаты атомов и параметры атомных смещений депонированы в Кембриджский банк структурных данных (CCDC № 2068945 (I), 2068946 (II); <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Монокристаллы соединения [Ni(Btdc)(Vipy)(H₂O)₂] (I) были получены нагреванием Ni(NO₃)₂ · 6H₂O, H₂Btdc и Vipy в смеси растворителей ДМФА–вода (1 : 1 по объему) с небольшим добавлением ледяной уксусной кислоты при 110°C. Согласно данным РСА, соединение I кристаллизуется в моноклинной сингонии с пространственной группой симметрии *C2* с *Z* = 6. Независимая часть структуры содержит один катион Ni²⁺, один анион Btdc²⁻, одну молекулу Vipy и две

молекулы воды. Атом Ni(1) находится в октаэдрическом окружении, создаваемым двумя атомами азота двух лигандов Vipy в аксиальных положениях, двумя атомами кислорода двух карбоксильных групп двух лигандов Btdc²⁻ и двумя атомами кислорода координированных молекул воды в экваториальных положениях (рис. 1а). Для катиона Ni(1) КЧ равно 6. Длины связей Ni–N составляют 2.069(6) и 2.090(6) Å, а Ni–O находятся в интервале от 2.043(3) до 2.086(3) Å. Каждый катион никеля(II) соединен с четырьмя другими катионами через две мостиковые молекулы Vipy и два мостиковых аниона Btdc²⁻, что приводит к образованию двухмерных сетчатых структур (рис. 1б) с квадратной топологией и размерами ячеек 7 × 9 Å. Расстояния между плоскостями соседних параллельных сеток соответствуют ~9.7 Å. Интересно, что данные сетки расположены в трех разных ориентациях, параллельных оси *c*, что приводит к

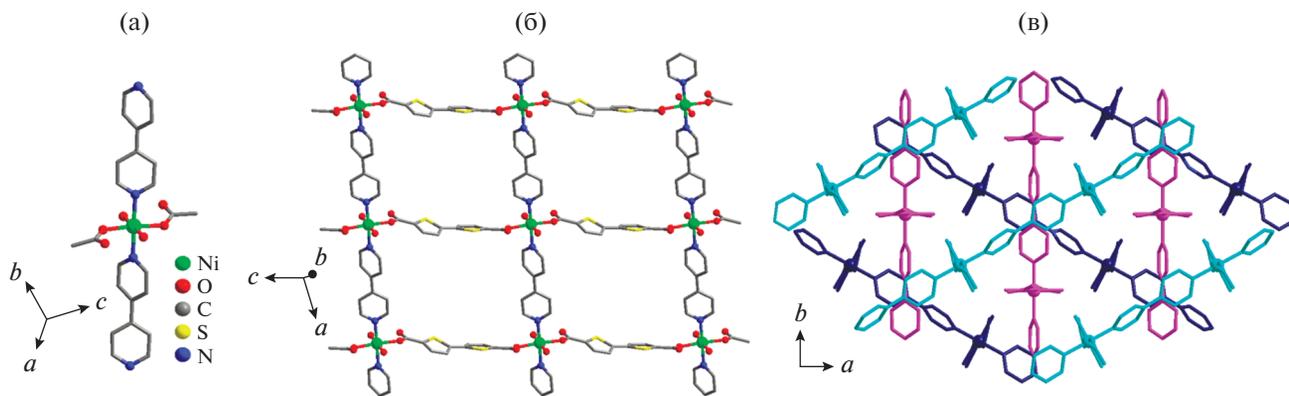


Рис. 1. Структура координационного полимера I: строение вторичного строительного блока (а); фрагмент слоя (б); схема взаимного переплетения координационных сеток в структуре супрамолекулярного каркаса (в). Атомы водорода не показаны для ясности.

взаимному переплетению всех сеток координационного полимера с образованием супрамолекулярного каркаса (рис. 1в). Таким образом, кристаллическая структура I, построенная на основе слоистых мотивов, не может быть разрушена без разрыва химических связей и является трехмерным поликатенаном. Следует отметить, что взаимопрорастание по типу поликатенанов в слоистых МОКП встречается достаточно редко и представляет интерес с точки зрения направленного дизайна координационных и супрамолекулярных соединений [23–25].

Соединение $[\text{Ni}(\text{azobipy})(\text{H}_2\text{O})_4](\text{Btdc})$ (II) было синтезировано нагреванием эквимольной смеси $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, H_2Btdc и azobipy в смеси растворителей ДМФА–вода (1 : 1 по объему) с небольшим добавлением ледяной уксусной кислоты при 110°C . По данным РСА, соединение II кристаллизуется в моноклинной сингонии с пространственной группой симметрии $C2/c$ с $Z = 4$. Независимая часть структуры содержит один катион Ni^{2+} , одну молекулу azobipy , четыре молекулы воды и один анион Btdc^{2-} (рис. 2а). Атом $\text{Ni}(1)$ находится в окружении, создаваемым двумя атомами азота двух лигандов azobipy в аксиальных положениях и четырьмя атомами кислорода четырех координированных молекул воды в экваториальных положениях. Для катиона $\text{Ni}(1)$ КЧ равно 6, а координационный полиэдр имеет форму октаэдра. Длины связей $\text{Ni}-\text{N}$ составляют 2.0971(15) и 2.0972(15) Å, а $\text{Ni}-\text{O}$ находятся в интервале от 2.0443(13) до 2.1144(13) Å. С помощью молекул azobipy атомы $\text{Ni}(1)$ соединяются в положительно заряженные полимерные цепочки, тянущиеся вдоль кристаллографической оси c . Анионы Btdc^{2-} служат в качестве противоионов. В результате цепочки $[\text{Ni}(\text{azobipy})(\text{H}_2\text{O})_4]^+$ образуют положительно заряженные слои, параллельные плоскости ac , которые чередуются с отрицательно заряженными слоями, состоящими

из анионов Btdc^{2-} , что обеспечивает общий нейтральный заряд кристаллического соединения (рис. 2б).

Данные РФА для порошковых образцов I и II полностью соответствуют теоретически рассчитанным дифрактограммам и подтверждают фазовую чистоту полученных соединений (рис. 3). По данным ТГА, соединение I стабильно до $T \approx 100^\circ\text{C}$, далее происходит небольшая потеря массы (~8%), связанная с удалением двух координированных молекул воды. Масса координационного полимера остается постоянной вплоть до $T \approx 340^\circ\text{C}$, после чего происходит его термолит. Соединение II имеет ступень потери массы (~12%) в диапазоне $140\text{--}180^\circ\text{C}$, также связанную с удалением четырех координированных молекул воды. При температуре выше 230°C происходит постепенное разложение координационного полимера (рис. 4).

ИК-спектр соединения I содержит полосы, характерные для деформационных внеплоскостных колебаний связи $\text{C}-\text{N}$ при 777 см^{-1} , а также полосы валентных симметричных и асимметричных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в карбоксилатных группах при 1372 и 1547 см^{-1} соответственно. Широкая полоса при 3391 см^{-1} относится к валентным колебаниям связи $\text{O}-\text{H}$ в молекуле воды. В ИК-спектре соединения II имеется полоса при 781 см^{-1} , относящаяся к деформационным внеплоскостным колебаниям связи $\text{C}-\text{N}$, а также полосы, характерные для валентных симметричных и асимметричных колебаний связи $\text{C}=\text{O}$ в карбоксилатных группах при 1439 и 1564 см^{-1} соответственно. Широкая полоса средней интенсивности при 3291 см^{-1} соответствует валентным колебаниям связи $\text{O}-\text{H}$ в молекуле воды.

Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости ($\chi_p(T)$) соединения I были измерены в диапазоне $1.77\text{--}300\text{ К}$ при магнитных полях до 10 кЭ . Магнитная восприимчивость

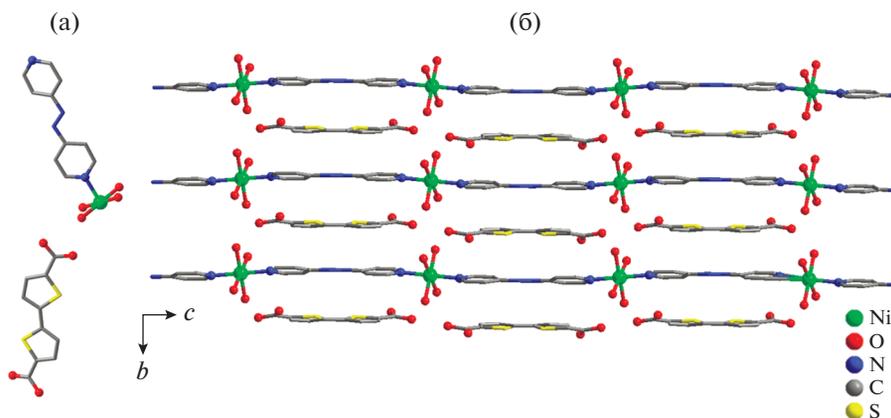


Рис. 2. Структура координационного полимера II: строение независимой части (а); вид кристаллической упаковки (б). Атомы водорода не показаны для ясности.

координационного полимера постепенно увеличивалась с понижением температуры до минимальной доступной температуры 1.77 К, что вполне ожидаемо для парамагнитного соединения, содержащего ионы Ni^{2+} . После вычитания диамагнитного вклада, χ_d , рассчитанного с использованием аддитивной схемы Паскаля, из общей магнитной восприимчивости оставшийся парамагнитный компонент $\chi_p(T)$ был нанесен на график как $1/\chi_p$ в зависимости от температуры (рис. 5). Практически во всем температурном диапазоне кривая $1/\chi_p(T)$ близка к линейной, следуя парамагнитной зависимости Кюри–Вейса $\chi_p(T) = N_A \mu_{\text{эфф}}^2 / 3k_B(T - \theta)$ с $\theta \approx 1-1.5$ К. Рассчитанный $\mu_{\text{эфф}}$ для соединения I составляет $3.08 \mu_B$ при 300 К, что близко к чисто спиновому значению ($2.83 \mu_B$) для изолированного высоко-

спинового иона Ni^{2+} с $S = 1$. Избыток величины обусловлен вкладом орбитального момента в магнитный момент иона никеля. Резкое снижение значения $\mu_{\text{эфф}}$ при температурах $T < 10$ К может быть связано как с расщеплением уровней ионов в нулевом поле, ожидаемым для ионов Ni^{2+} со спином $S = 1$, так и с наличием слабого антиферромагнитного обменного взаимодействия между ионами. Следующий по важности после обменного диполь-дипольный механизм межионного взаимодействия не оказывает в данном случае определяющего влияния. Диполь-дипольное взаимодействие имеет характерный масштаб энергий $(g\mu_B)^2/r^3$ (r = расстояние между магнитными ионами), который для ионов Ni^{2+} с $S = 1$ при имеющихся в структуре МОКП расстояниях в десятки раз меньше наблюдающихся значений θ . Попытки численного описания температурной зависимости $\mu_{\text{эфф}}$ с использованием подходов, описанных в

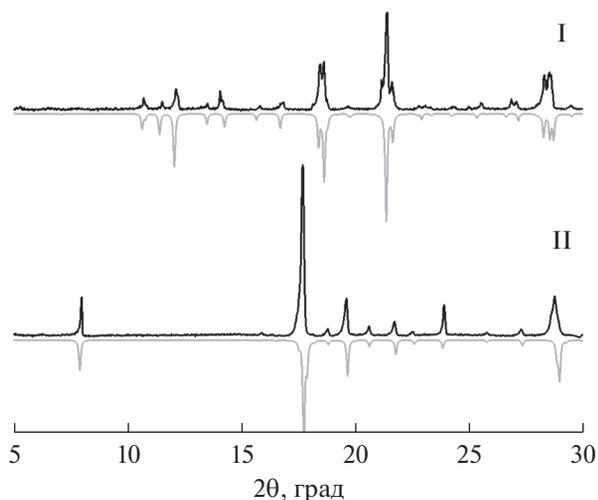


Рис. 3. Сравнение экспериментальной (черный) и теоретической (серый) порошковых дифрактограмм для соединений I и II.

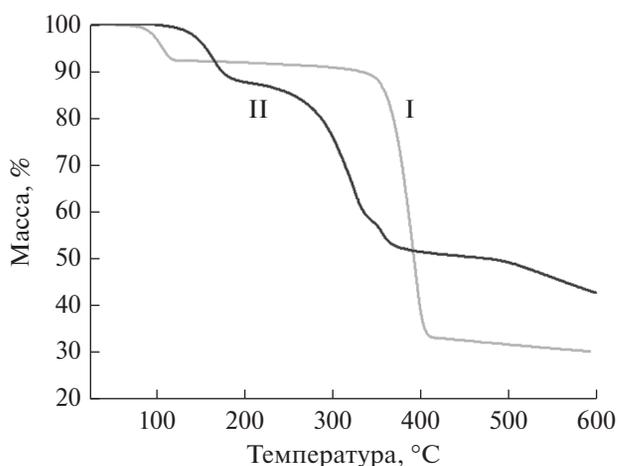


Рис. 4. Термогравиметрические кривые для соединений I (серый) и II (черный).

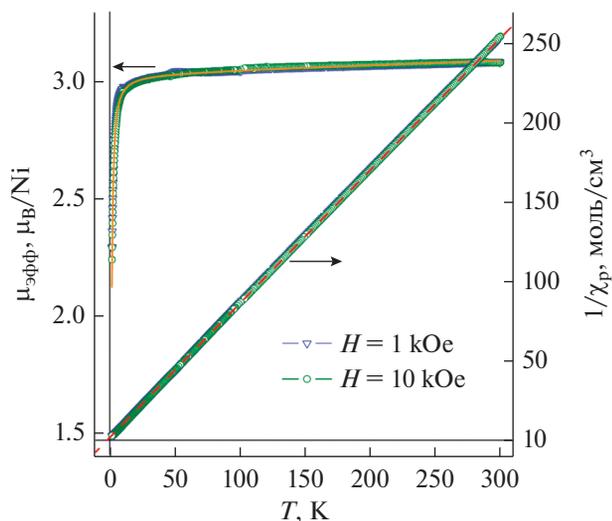


Рис. 5. Температурная зависимость $1/\chi_p$ и $\mu_{\text{эфф}}$ на один ион никеля для соединения I. Магнитное поле $H = 1$ и 10 кЭ. Прерывистой линией показано формальное описание кривой $1/\chi_p(T)$ зависимостью Кюри–Вейса, тонкой сплошной линией изображены результаты аппроксимации зависимости $\mu_{\text{эфф}}(T)$ с учетом расщепления уровней ионов Ni^{2+} в нулевом поле и межионного обменного взаимодействия.

[18], показали, что хорошее согласие с экспериментом можно получить только при учете обоих факторов: расщепления в нулевом поле и антиферромагнитного обменного взаимодействия. На рис. 5 тонкой сплошной линией показаны результаты аппроксимации со значениями коэффициента расщепления $D/k_B \approx 4.8$ К и обменного межмолекулярного взаимодействия $zJ \approx -0.16$ К, где z – магнитное координационное число ионов Ni^{2+} . Полученное значение D характерно для комплексов Ni(II) [18].

Механизмы обменного взаимодействия в соединении I не очевидны. Внутри слоя парамагнитные центры разделены длинными органическими лигандами Vtdc^{2-} и Vпу на расстояния 14.9 и 11.3 Å соответственно, что делает невозможным обменное взаимодействие между ионами Ni^{2+} в рамках одного слоя. Но поскольку координационный полимер I является взаимопроросшим, то расстояние между ионами Ni^{2+} , относящимися к разным слоям, сокращается до 6.9 Å, что, по-видимому, приводит к формированию путей для слабого антиферромагнитного взаимодействия.

Таким образом, синтезированы и полностью охарактеризованы два новых металл-органических координационных полимера на основе ионов Ni^{2+} . Для соединения I проведены измерения магнитной восприимчивости и эффективного магнитного момента.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 18-13-00203, <https://rscf.ru/project/18-13-00203/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou H.-C., Kitagawa S. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. P. 5415.
2. Yuan S., Feng L., Wang K. et al. // Adv. Mater. 2018. P. 1704303.
3. Schneemann A., Bon V., Schwedler I. et al. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. P. 6062.
4. Stock N., Biswas S. // Chem. Rev. 2012. V. 112. P. 933.
5. Demakov P.A., Volynkin S.S., Samsonenko D.G. et al. // Molecules. V. 25. 4396.
6. Bolotov V.A., Kovalenko K.A., Samsonenko D.G. et al. // Inorg. Chem. 2018. V. 57. P. 5074.
7. Lysova A.A., Samsonenko D.G., Dorovatovskii P.V. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. P. 17260.
8. Hua C., D'Alessandro D.M. // Cryst. Growth Des. 2017. V. 17. P. 6262.
9. Zhao J., Shi X., Li G. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2012. V. 383. P. 185.
10. Ding B., Hua C., Kepert C. et al. // Chem. Sci. 2019. V. 10. P. 1392.
11. Dubskikh V.A., Lysova A.A., Samsonenko, D.G. et al. // Molecules. 2021. V. 26. 1269.
12. Demessence A., Mesbah A., François M. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2009. V. 25. P. 3713.
13. Lu K., Ma D.-Y., Sakiyama H. // Inorg. Chem. Commun. 2018. V. 91. P. 39.
14. Alexander D.S., Robert L.L. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2016. V. 642. P. 966.
15. Yeşilel O.Z., İlker İ., Şahin E. // J. Inorg. Organomet. Polym. Mater. 2011. V. 21. P. 103.
16. Dong J.-L., Zhu P.-Y., Du J.-Q. et al. // RSC Adv. 2019. V. 9. P. 17560.
17. Dubskikh V.A., Lysova A.A., Samsonenko D.G. et al. // J. Struct. Chem. 2020. V. 61. P. 1800.
18. Boča R. // Coord. Chem. Rev. 2004. V. 248. P. 757.
19. Kabsch W. // Acta Crystallogr. D. 2010. V. 66. P. 125.
20. CrysAlisPro Software system. Version 1.171.40.84a. 2020.
21. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
22. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
23. Batten S.R., Robson R. // Angew. Chem. Int. Ed. 1998. V. 37. P. 1460.
24. Wang K., Lv B., Wang Z. // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 411.
25. Verma G., Butikofer S., Kumar S. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. V. 12. P. 18715.