

УДК 541.49:546.74

36-ЯДЕРНЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НИКЕЛЯ(II) С МАЛОНАТ-АНИОНАМИ И ВНУТРЕННИМИ АКВАКАТИОНАМИ МАГНИЯ И НАТРИЯ

© 2021 г. Е. Н. Зорина-Тихонова^{1, *}, А. В. Вологжанина², К. А. Бабешкин¹, Н. Н. Ефимов¹, П. В. Дороватовский³, М. А. Кискин¹, А. А. Сидоров¹, И. Л. Еременко^{1, 2}

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: ezorinatikhonova@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 21.10.2020 г.

Методом автоклавного синтеза получен новый диметилмалонатный анионный комплекс $\{Ni_{36}(H_2O)_{12}(OH)_{20}(HMe_2Mal)(Me_2Mal)_{29}@[Mg(H_2O)_6]\}^{5-}$ (Me_2Mal^{2-} – дианион диметилмалоновой кислоты), содержащий внутренний аквагидратированный ион $[Mg(H_2O)_6]^{2+}$ и внешний катион $[Mg_3(OH)(H_2O)_{10}(C_2H_5OH)_3]^{5+}$. Соединение, кристаллы которого выделены из реакционной смеси и охарактеризованы методом РСА, имеет формулу $[Mg_3(OH)(H_2O)_{10}(C_2H_5OH)_3]\{Ni_{36}(H_2O)_{12}(OH)_{20}(HMe_2Mal)(Me_2Mal)_{29}@[Mg(H_2O)_6]\} \cdot 25H_2O$ (I) (CIF file CCDC № 2038910). Из этанольно-ацетонитрильного раствора получен новый анионный комплекс $\{Ni_{36}(H_2O)_{12}(OH)_{19}(O)(Cbdc)_{30}@-[Na(H_2O)_6]\}^{8-}$ ($Cbdc^{2-}$ = дианион циклобутан-1,1-дикарбоновой кислоты), содержащий внутренний аквагидратированный ион $[Na(H_2O)_6]^+$ и внешнесферные катионы тетрабутиламмония. Выделенные из реакционной смеси кристаллы охарактеризованы РСА и соответствуют формуле $(NBu_4)_3\{Ni_{36}(H_2O)_{12}(OH)_{19}(O)(Cbdc)_{30}@[Na(H_2O)_6]\}$ (CIF file CCDC № 2038909) (II). Найдено, что магнитное поведение комплекса I обусловлено конкурирующими ферро- и антиферромагнитными обменными взаимодействиями между парамагнитными ионами никеля(II).

Ключевые слова: полиядерные комплексы *d*-металлов, карбоксилаты никеля(II), диметилмалонаты, циклобутан-1,1-дикарбоксилаты

DOI: 10.31857/S0132344X21030099

Ранее мы показали, что синтез гомометаллических соединений никеля(II) с анионами диметилмалоновой кислоты и органическими катионами (триэтиламмоний, тетрабутиламмоний) приводит к формированию молекулярных сферических 36-ядерных полианионных соединений [1, 2]. Использование в качестве катиона атомов калия в сочетании с 18-краун-6 или атомов серебра(I) ведет к формированию соединений полимерного строения [3, 4]. В соединении с атомами калия в качестве простейшего фрагмента выступает 36-ядерный полианион [3], а с атомами серебра(I) наблюдается образование 2D-структуры на основе бисхелатных фрагментов $\{Ni(Me_2Mal)_2\}^{2-}$, $[Ag_2Ni(H_2O)_2(Me_2Mal)_2]_n$ [4]. Также известны гетерометаллические комплексы никеля(II) с анионами циклобутан-1,1-дикарбоновой кислоты (H_2Cbdc), например слоистый Ni(II)-Ag(I) полимер, аналог вышеупомянутого 2D полимера [4],

ионный комплекс $[Ni(H_2O)_6][Cu(Cbdc)_2(H_2O)]$ и 1D-полимер $[Ni(VO)(Cbdc)_2(EtOH)_2(H_2O)_3]_n$ [5].

В настоящей работе представлены разные методы химического конструирования карбоксилатных анионных полиядерных фрагментов, содержащих ионы никеля(II), натрия или магния и дианионы диметилмалоновой (H_2Me_2Mal) или циклобутан-1,1-дикарбоновой кислот. Изучено строение этих молекул и их магнитное поведение (для диметилмалонатного соединения), а также рассмотрено влияние на строение анионов $\{Ni_{36}\}^{n-}$ присутствие разных по заряду внутренних катионов $[M(H_2O)_6]^{n+}$ ($n = 1$ или 2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез комплексов I и II проводили на воздухе с использованием этилового спирта (96%), ацетонитрила (99%), дистиллированной воды и ком-

мерчески доступных реагентов: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Химмед, “ч.”), $\text{Ni}(\text{OAc})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Riedel-de-Haën, 98%), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Реахим, “ч.”), $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich, 98%), NBu_4OH (40%-водный раствор, Alfa Aesar), NaOH (Химмед, “ч.”), $\text{H}_2\text{Me}_2\text{Mal}$ (Sigma-Aldrich, 98%), H_2Cbdc (Sigma-Aldrich, 99%).

Синтез $[\text{Mg}_3(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_{10}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})_3]\{\text{Ni}_{36}(\text{H}_2\text{O}-\text{кO})_{12}(\mu_3-\text{OH})_{20}(\mu_4-\text{HMe}_2\text{Mal}-\text{к}^2\text{O}, \text{O}')(\mu_4-\text{Me}_2\text{Mal}-\text{к}^2\text{O}, \text{O}')_{23}(\mu_4-\text{Me}_2\text{Mal})_6\} @ [\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6] \cdot 25\text{H}_2\text{O}$ (I). Навески $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.187 г, 0.7 ммоль), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.175 г, 0.7 ммоль), $\text{H}_2\text{Me}_2\text{Mal}$ (0.188 г, 1.4 ммоль) и $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0.269 г, 1.4 ммоль) в смеси вода/этанол (5/2 мл) помещали в автоклав с тефлоновым вкладышем, предварительно отфильтровав выпавший осадок BaSO_4 . Выдерживали 72 ч при 100°C . Образовавшиеся светло-зеленые кристаллы, пригодные для РСА, отделяли от маточного раствора декантацией, промывали холодным EtOH и сушили на воздухе. Выход соединения I 0.045 г (31% в расчете на исходное количество никеля (II)).

Найдено, %: С 23.45; Н 5.01.
Для $\text{C}_{144}\text{H}_{356}\text{Ni}_{36}\text{O}_{197}\text{Mg}_4$ ($M = 7451.09$)
вычислено, %: С 23.21; Н 4.82.

ИК-спектр (НПВО; ν , cm^{-1}): 3540 ср, 3365 ср, 2983 ср, 2944 сл, 1589 с, 1534 с, 1461 с, 1430 с, 1345 с, 1189 ср, 1138 ср, 936 сл, 893 ср, 840 ср, 787 ср, 732 с, 614 с, 559 ср, 500 ср, 458 с, 444 с, 430 с.

Синтез $(\text{NBu}_4)_8\{\text{Ni}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{12}(\mu_3-\text{OH})_{19}(\mu_3-\text{O})(\mu_4-\text{Cbdc}-\text{к}^2\text{O}, \text{O}')_{24}(\mu_4-\text{Cbdc})_6\} @ [\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]$ (II). Навески 40%-ного водного раствора гидроксида тетрабутиламмония (3.120 г раствора, 4.8 ммоль) и H_2Cbdc (0.347 г, 2.4 ммоль) растворяли в этаноле, добавляли 0.30 г (1.2 ммоль) $\text{Ni}(\text{OAc})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.01 г (0.25 ммоль) NaOH . Реакционную смесь перемешивали при нагревании ($T = 50^\circ\text{C}$) в течение часа. Полученный раствор (45 мл) светло-зеленого цвета концентрировали до 20 мл, добавляли 10 мл ацетонитрила, выдерживали на воздухе при температуре 20°C . Образовавшиеся через сутки кристаллы II, пригодные для РСА, отфильтровывали и высушивали на воздухе при $T = 20^\circ\text{C}$. Выход II 0.057 г (19% в расчете на исходное количество никеля(II)).

Найдено, %: С 41.23; Н 5.96; N 1.43.
Для $\text{C}_{308}\text{H}_{523}\text{N}_8\text{O}_{158}\text{NaNi}_{36}$ ($M = 9002.86$)
вычислено, %: С 41.09; Н 5.86; N 1.24.

ИК-спектр (НПВО; ν , cm^{-1}): 3544 ср, 2963 ср, 2941 ср, 2876 сл, 1594 с, 1548 с, 1450 с, 1413 с, 1355 с, 1257 ср, 1242 ср, 1167 ср, 1099 ср, 1015 ср, 948 ср,

903 ср, 854 ср, 798 ср, 751 с, 683 ср, 633 ср, 533 ср, 479 ср, 460 ср, 417 с.

РСА. Экспериментальный набор отражений для комплекса I получен на дифрактометре Bruker APEX II (двухкоординатный CCD детектор, MoK_α -излучение, $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор). Поглощение учтено эмпирически по программе SADABS [6]. Структуры решены по программе SHELXT [7]. Все неводородные атомы локализованы в разностных синтезах электронной плотности и уточнены по F_{hkl}^2 (SHELXL-14 [8] и OLEX2 [9]). Набор интенсивностей для комплекса II получен на станции K4.4 “БЕЛОК” Курчатова источника синхротронного излучения (НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, РФ) ($\lambda = 0.9699 \text{ \AA}$, детектор RAYONIX CCD 165) при $100.0(2) \text{ K}$. Поглощение учтено эмпирически по программе SCALA [10].

За исключением двух метильных групп в структуре I и четырех неупорядоченных циклобутановых групп в кристалле II, неводородные атомы полиядерного аниона уточнены в анизотропном приближении. Также при уточнении тепловых параметров некоторых атомов в структуре I использованы команды SIMU, ISOR и EADP, при уточнении катионов и разупорядоченных анионов в структуре II – команды DFIX, RIGU и EADP. Атомы водорода найдены геометрически и уточнены в изотропном приближении в модели жесткого тела, с $U_{\text{iso}}(\text{H}) = 1.5U_{\text{eq}}(X_i)$ для метильных групп и молекул воды, или $1.2U_{\text{eq}}(X_i)$ для остальных атомов, где $U_{\text{eq}}(X_i)$ – эквивалентные тепловые параметры атомов, с которыми связан атом водорода. В структуре I присутствуют разупорядоченные молекулы растворителя, вклад которых в интенсивность отражений оценен с помощью программы SQUEEZE/PLATON [11].

Кристаллографические характеристики и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 1.

Координаты атомов, величины тепловых параметров и список всех отражений для исследованных структур депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2038910 (I), 2038909 (II); deposit@ccdc.cam.ac.uk или <http://www.ccdc.cam.ac.uk/structures>).

Магнитное поведение комплекса I исследовали методом статической магнитной восприимчивости на магнетометре PPMS-9 (QuantumDesign) в диапазоне 2–300 К в постоянном магнитном поле напряженностью 5 кЭ. Все исследования магнитного поведения проводили на поликристаллическом измельченном образце, запаянном в полиэтиленовый пакет и замороженном в минеральном масле для предотвращения ориентации кристаллитов под действием магнитного поля. Парамагнитную составляющую магнитной вос-

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

Параметр	Значение	
	I	II
<i>T</i> , К	120	100
Сингония	Кубическая	Моноклинная
Пр. гр.	$Pm\bar{3}n$	$P2_1/c$
<i>Z</i>	2	2
<i>a</i> , Å	25.4062(6)	23.060(5)
<i>b</i> , Å	25.4062(6)	26.521(5)
<i>c</i> , Å	25.4062(6)	35.047(5)
β , град	90	92.23(3)
<i>V</i> , Å ³	16399(1)	21417(7)
ρ (выч.), г см ⁻³	1.510	1.395
μ , см ⁻¹	21.16	35.65
<i>F</i> (000)	7710	9408
$2\theta_{\max}$, град	59	77
Число измеренных отражений	87919	200691
Число независимых отражений	3828	44897
Число отражений с $I > 2\sigma(I)$	2758	23377
Количество уточняемых параметров	219	2218
$R_1, wR_2 (I > 2\sigma(I))$	0.083, 0.2023	0.1013, 0.1842
R_1, wR_2 (по всем данным)	0.1151, 0.2200	0.1822, 0.2120
GOOF	1.240	1.208
Остаточная электронная плотность (min/max), e Å ⁻³	-2.797/2.774	-1.226/2.549

приимчивости (χ) определяли с учетом диамагнитного вклада образца, минерального масла и держателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллы соединения $[Mg_3(OH)(H_2O)_{10}(C_2H_5OH)_3]\{Ni_{36}(H_2O-kO)_{12}(\mu_3-OH)_{20}(\mu_4-NMe_2Mal-k^2O, O')(\mu_4-Me_2Mal-k^2O, O')_{23}(\mu_4-Me_2Mal)_6@[Mg(H_2O)_6]\} \cdot 25H_2O$ (I) получены автоклавным методом, кристаллы комплекса $(NBu_4)_8\{Ni_{36}(H_2O)_{12}(\mu_3-OH)_{19}(\mu_3-O)(\mu_4-Cbdc-k^2O, O')_{24}(\mu_4-Cbdc)_6@[Na(H_2O)_6]\}$ (II) – кристаллизацией на воздухе.

Проведенное рентгеноструктурное исследование соединений I и II показало, что они, как и ранее изученные полиядерные диметилмалонаты никеля(II) и кобальта(II), содержат 36 атомов металла (24 “внутренних” и 12 “внешних”), шесть тетрадентатных μ_4 -мостиковых и 24 тридентатных μ_4 -мостиковых малонат-анионов, а также μ_3 -мостиковые гидроксогруппы, атомы водорода в которых направлены внутрь полиядерного аниона, и координированные “внешними” атомами

металла(II) молекулы воды (рис. 1) [1–3, 12]. Следует отметить, что соединение II является прямым доказательством того, что подобные полианионные карбоксилатные 36-ядерные соединения с ионами 3*d*-металлов (по крайней мере, Co(II) и Ni(II)) и анионами замещенных малоновых кислот характерны не только для диметилмалонатных производных, но и для других малонатных анионов, например анионов циклобутан-1,1-дикарбоновой кислоты.

Элементарная ячейка соединения I близка к таковой для ранее полученного комплекса никеля(II) с анионами диметилмалоновой кислоты и катионами триэтиламония $(NEt_3)_3[Ni_{36}(H_2O)_{12.25}(OH)_{20}(HMe_2Mal)_4(Me_2Mal)_{20}(Me_2Mal)_6@(NEt_3)] \cdot 39H_2O$ (пр. гр. $Pm\bar{3}m$, $a = b = c \approx 25.4$ Å [1]). В обоих случаях независимая часть кристаллической ячейки содержит два независимых атома металла, 1.5 независимых аниона дикарбоновой кислоты, два гидроксоаниона и молекулу воды, а также инкапсулированный и внешнесферный катионы и молекулы некоординированной воды. Вместе с тем строение катионов, формально занимающих

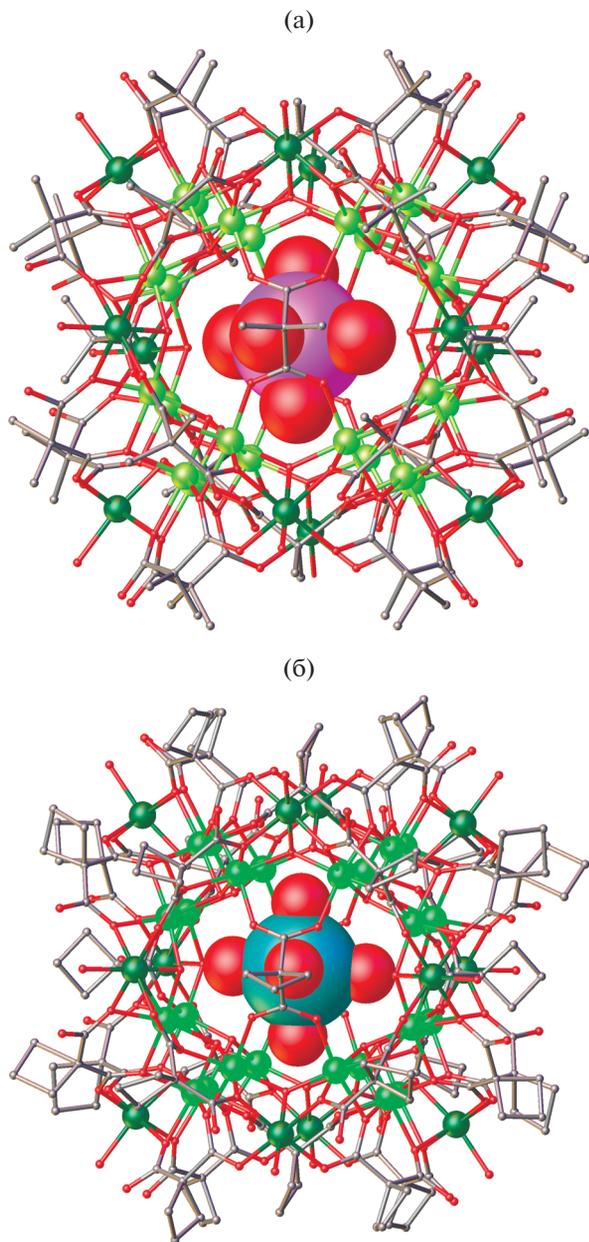


Рис. 1. Молекулярное строение полиядерных анионов в I (а) и II (б). Атомы водорода не показаны, “внешние” атомы металла темнее “внутренних”. Инкапсулированные катионы $[\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ — одно из положений (а), $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]^+$ (б) изображены в виде ван-дер-ваальсовых сфер).

эквивалентные позиции, существенно отличается. Электронную плотность внутри аниона в I можно интерпретировать как разупорядоченный за счет высокой симметрии кристалла по четырем положениям катион $[\text{Mg}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, участвующий в образовании водородных связей с атомами кислорода диметилмалонат-анионов, образующих внутреннюю полость.

Интерпретация химического состава внешне-сферного катиона затруднена тем, что он находится в частном положении. Электронная плотность в позиции $(0.75 : 0.5 : 0)$, которую можно считать атомом кислорода, находится в окружении четырех более тяжелых атомов на расстоянии $1.98(1) \text{ \AA}$, связанных, в свою очередь, с рядом других легких атомов. Таким образом, центральный фрагмент катиона можно интерпретировать как тетраядерный катион $[\text{Mg}_4(\mu_4\text{-O})]^{6+}$ или разупорядоченный по четырем положениям трехъядерный катион состава $[\text{Mg}_3(\mu_3\text{-O})]^{4+}$, $[\text{Mg}_3(\mu_3\text{-OH})]^{5+}$ или $[\text{Mg}_3(\mu_3\text{-H}_2\text{O})]^{6+}$. Соображения электронейтральности свидетельствуют в пользу гексакатионов, но ранее структурно-охарактеризованные тетраядерные катионы $[\text{Mg}_4(\mu_4\text{-O})]^{6+}$ имеют расположение атомов металла в форме тетраэдра, в центре которого расположен оксо-анион, а в рассматриваемой структуре атомы металла расположены по вершинам бисфеноида. В случае трехъядерного катиона уточнение с частично-заселенной позицией атома магния дает более низкое значение факторов расходимости и тепловые эллипсоиды атомов металла, близкие к таковым для атомов углерода и кислорода в структуре. В целом трехъядерный катион имеет треугольное расположение атомов металла с мостиковым атомом кислорода, расположенным над их плоскостью. Координационное окружение атомов магния дополнено концевой молекулой спирта и четырьмя молекулами воды (рис. 2). Таким образом, согласно данным РСА, внешнесферный катион имеет предположительно состав $[\text{Mg}_3(\mu_3\text{-H}_2\text{O})(\mu_2\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})_3]^{6+}$ или $[\text{Mg}_3(\mu_3\text{-OH})(\mu_2\text{-H}_2\text{O})_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})_3]^{5+}$. В последнем случае оценить, какая из OH-групп полиядерного аниона “приобретает” протон и становится молекулой воды, практически невозможно, однако рентгеноструктурные данные комплекса I, а также ранее синтезированных 36-ядерных соединений никеля(II) [1–3], также свидетельствуют о том, что заряд аниона может варьироваться.

Комплекс II кристаллизуется в моноклинной сингонии и содержит в независимой части ячейки половину аниона, четыре внешнесферных катиона тетрабутиламмония, как и большинство ранее полученных комплексов. Вместе с тем внутренняя полость аниона содержит инкапсулированный катион $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]^+$, участвующий в образовании водородных связей с шестью μ_4 -связанными анионами H_2Cbdc (рис. 3), что позволяет приписать аниону заряд $[\text{An}]^{8-}$ с учетом инкапсулированного катиона ($[\text{An}@[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]]^{8-}$). Длины связей в гексаквакатионе изменяются от $2.308(10)$ до $2.333(9) \text{ \AA}$, углы меняются в интервале $87.0(5)^\circ$ – $91.0(5)^\circ$.

Для соединения I проведены измерения магнитных свойств в температурном диапазоне 2–

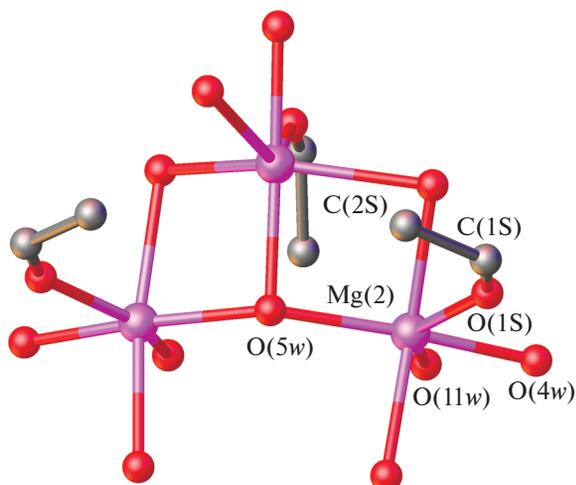


Рис. 2. Строение катиона $[\text{Mg}_3(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_{10}(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})_3]^{5+}$ в соединении I.

300 К в магнитном поле напряженностью 5 кЭ. Значение $\chi_M T$ для I при 300 К, равное $39.0 \text{ см}^3 \text{ К моль}^{-1}$, соответствует ожидаемому для 36 невзаимодействующих ионов никеля(II) со спином $S = 1$ и $g = 2.08$. С понижением температуры величина $\chi_M T$ монотонно возрастает до максимума $87.9 \text{ см}^3 \text{ К моль}^{-1}$ при 6 К, последующее понижение температуры сопровождается резким снижением величины $\chi_M T$ с минимальным значением $46.5 \text{ см}^3 \text{ К моль}^{-1}$ при 2 К (рис. 4). Такое магнитное поведение в области 300–6 К обусловлено реализацией доминирующих ферромагнитных обменных взаимодействий между ионами никеля(II) во фрагментах $\{\text{Ni}_3(\mu_3\text{-OH})(\mu\text{-OR})_3\}$, что ранее показано на примере молекулярных комплексов никеля(II) [13–21]. Падение $\chi_M T$ связано с присутствием антиферромагнитных обменов и эффектом Зеемана. Ход кривой $\chi_M T(T)$ совпадает с ранее описанной для комплекса $(\text{NBu}_4)_8[\text{Ni}_{36}(\text{H}_2\text{O})_{12}(\text{OH})_{20}(\text{Me}_2\text{Mal})_{30}] \cdot 6\text{H}_2\text{O} \cdot 2\text{EtOH}$, в котором нет внутренних катионных внедрений [2] и для которого были определены значения обменных взаимодействий.

Таким образом, получены новые карбоксилатные анионные комплексы никеля(II) с 36-ядерным металлоостовом и внутренними аквакатионами с различным зарядом. Можно полагать, что независимо от метода синтеза (автоклавный или растворный), а также от природы карбоксилатных дианионов ($\text{Me}_2\text{Mal}^{2-}$ или Cbdc^{2-}) формирование таких частиц вполне вероятно и в других подобных реакционных системах. Наличие полости в 36-ядерных полианионах позволяет инкапсулировать в нее аквакатионы натрия или магния или сольватные молекулы, что

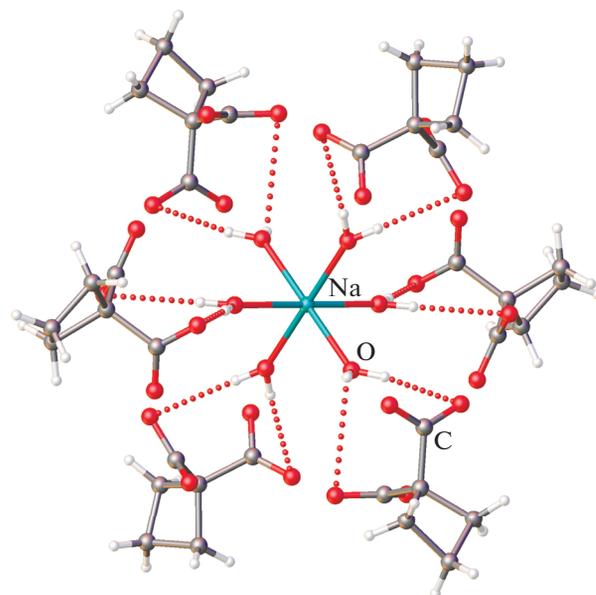


Рис. 3. Водородные связи между инкапсулированным катионом $[\text{Na}(\text{H}_2\text{O})_6]^+$ и полиядерным анионом в II.

подтверждают данные рентгеноструктурных экспериментов монокристаллов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

ИК-спектроскопия и элементный анализ выполнены на оборудовании ЦКП ФМИ ИОНХ РАН, функционирующего при поддержке государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований. Рентгеновские данные для комплекса I получены с использованием оборудования Центра исследования строения молекул ИНЭОС РАН.

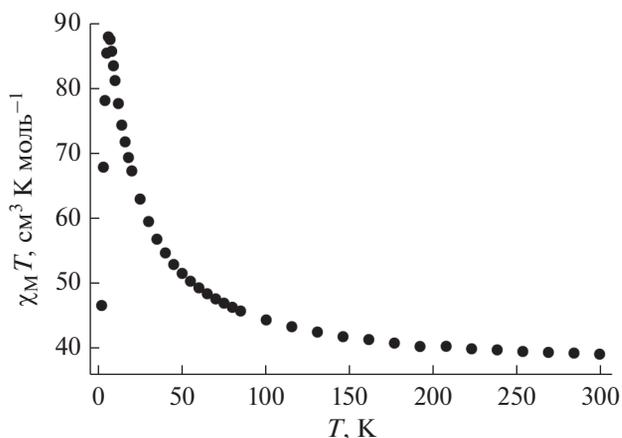


Рис. 4. Температурная зависимость $\chi_M T$ комплекса I в постоянном магнитном поле 5 кЭ в интервале 2–300 К.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-73-10181).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологжанина А.В., Зорина-Тихонова Е.Н., Матюхина А.К. и др. // Коорд. химия. 2017. Т. 43. № 12. С. 703 (Vologzhanina A.V., Zorina-Tikhonova E.N., Matyukhina A.K. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2017. V. 43. P. 801).
<https://doi.org/10.1134/S1070328417120107>
2. Zorina-Tikhonova E.N., Gogoleva N.V., Sidorov A.A. et al. // Polyhedron. 2017. V. 130. P. 67.
3. Зорина-Тихонова Е.Н., Гоголева Н.В., Сидоров А.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2015. № 3. С. 636 (Zorina-Tikhonova E.N., Gogoleva N.V., Sidorov A.A. et al. // Russ. Chem. Bull. (Int.Ed.). 2015. V. 64. P. 636).
4. Зорина-Тихонова Е.Н., Гоголева Н.В., Александров Е.В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 3. С. 759 (Zorina-Tikhonova E.N., Gogoleva N.V., Aleksandrov E.V. et al. // Russ. Chem. Bull. (Int. Ed.). 2016. V. 6. P. 759).
5. Bazhina E.S., Gogoleva N.V., Aleksandrov G.G. et al. // Chem. Select. 201. V. 3. P. 13765.
6. Sheldrick G.M. SADABS. Program for Empirical X-ray Absorption Correction. Bruker-Nonius, 1990–2004.
7. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
8. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
9. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. № 2. P. 339.
10. Winn M.D., Ballard C.C., Cowtan K.D. et al. // Acta. Crystallogr. D. 2011. V. 67. № 4. P. 235.
11. Spek A.L. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. № 1. P. 9.
12. Zorina E.N., Zauzolkova N.V., Sidorov A.A. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2013. V. 396. P. 108.
13. Ghosh A.K., Shatruk M., Bertolasi V. et al. // Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 13894.
14. Ferguson A., Lawrence J., Parkin A. et al. // Dalton Trans. 2008. № 45. P. 6409.
15. Costes J.P., Novitchi G., Vendier L. et al. // Comptes Rendus Chimie. 2012. V. 15. P. 849.
16. Ghisolfi A., Monakhov K.Yu., Pattacini R. et al. // Dalton Trans. 2014. V. 43. P. 7847.
17. Paine T.K., Rentschler E., Weyhermuller T., Chaudhuri P. // Eur. J. Inorg. Chem. 2003. P. 3167.
18. Karmakar S., Khanra S. // CrystEngComm. 2014. V.16. P. 2371.
19. Mandal D., Hong C.S., Kim H.C. et al. // Polyhedron. 2008. V. 27. P. 2372.
20. Boskovic C., Rusanov E., Stoeckli-Evans H., Güdel H.U. // Inorg. Chem. Commun. 2002. V.5. P. 881.
21. Mukherjee P., Drew M.G.B., Tangoulis V. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2009. V. 12. P. 929.