

СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСПИНОВЫХ ПОЛИМЕРОВ $M^I[M^{II}(\text{Hfac})L_2]$

© 2020 г. О. В. Кузнецова¹, *, Г. В. Романенко¹, А. С. Богомяков¹, В. И. Овчаренко¹

¹Международный томографический центр СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: olya@tomo.nsc.ru

Поступила в редакцию 10.01.2020 г.

После доработки 06.02.2020 г.

Принята к публикации 17.02.2020 г.

Синтезированы гетероспиновые полимерные комплексы на основе гексафторацетилацетонатов Ni(II) и Co(II) и депротонированного иминонитроксильного радикала 2-(2-гидрокси-5-нитрофенил)-4,4,5,5-тетраметил-4,5-дигидро-1*H*-имидазол-1-оксила (HL), в которых анионы $[M^{II}(\text{Hfac})L_2]^-$ (Hfac = = 1,1,1,5,5,5-гексафтор-2,4-пентандионат-ион) связаны в 1D–3D полимеры (I–V) катионами Na⁺, K⁺, Rb⁺ или Cs⁺. РСА $M^I[M^{II}(\text{Hac})L_2] \cdot n(\text{Me}_2\text{CO})$ ($n = 0–2.5$) показал, что мотив полимера определяется катионом щелочного металла (CIF files CCDC № 1974139–1974143 для I–V). По данным магнитных измерений установлено, что в твердых фазах соединений доминируют ферромагнитные взаимодействия в обменных кластерах {LML}, обуславливающие возрастание эффективного магнитного момента при понижении температуры.

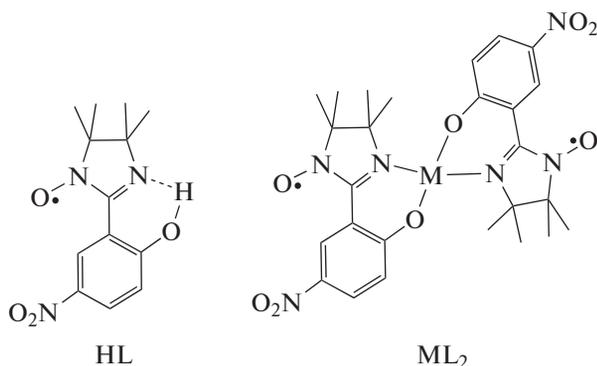
Ключевые слова: никель, кобальт, натрий, калий, рубидий, цезий, гексафторацетилацетонат, нитроксил, полимеры, рентгеноструктурный анализ, магнитные свойства

DOI: 10.31857/S0132344X20070038

Недавно было показано, что иминонитроксильный радикал 2-(2-гидрокси-5-нитрофенил)-4,4,5,5-тетраметил-4,5-дигидро-1*H*-имидазол-1-оксил (HL) при взаимодействии с пивалатами переходных металлов способен инициировать редокс-процессы, сопровождающиеся частичной восстановительной трансформацией исходного иминонитроксильного радикала и последующим образованием координационных соединений, содержащих одновременно как исходный радикал, так и продукт его восстановления – соответствующий нитрон [1, 2]. Обращало на себя внимание существование внутри образующихся моно- или полиядерных молекул ферромагнитных обменных кластеров [2, 3], что обуславливало интерес к разработке синтетических подходов, позволяющих связать ферромагнитные обменные кластеры в структуры высокой размерности, в которых потенциально возможно возникновение кооперативного упорядочения спинов. Следует отметить, что ферромагнитный обмен реализуется и в бис-хелатных молекулярных матрицах со спин-меченым шиффовым основанием $[ML_2]$ ($M = \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Co}$), не содержащих дополнительных органических лигандов [4, 5]. Однако гомолептические $[ML_2]$, во-первых, малорастворимы в органических средах, во-вторых, обладают малой акцеп-

торной способностью, необходимой для разработки синтеза структур высокой размерности. По этой причине для повышения акцепторной способности металла в $[ML_2]$ необходимо либо вводить соответствующие заместители в структуру L, либо дополнять координационную сферу металла акцепторными лигандами. Следует отметить, что в литературе имеются отдельные примеры полимерных комплексов гексафторацетилацетонатов 3*d*-металлов с нитроксильными радикалами, большинство из них проявляют свойства магнетиков, но они не содержат *s*-элементов [6–18]. Мы предприняли попытку изучения продуктов взаимодействия сильной акцепторной металло-содержащей матрицы $\{M(\text{Hfac})_2\}$ с HL. Проведенное исследование показало, что моноядерные $[M(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Hfac})_2]$, где $M = \text{Ni}$ или Co , реагируют с HL в органических средах только в присутствии щелочи. При этом в твердую фазу выделяются полимерные гетерометаллические разнолигандные комплексы, размерность которых, как оказалось, зависит от введенного в реакцию иона щелочного металла (Na, K, Rb, Cs). Эти комплексы получены в виде монокристаллов и исследованы их структуры.

В настоящей работе исследовано влияние природы щелочного металла на строение образующегося полимера. Поскольку все выделенные полимерные гетерометаллические комплексы содержат ферромагнитные обменные кластеры, высказано предположение, каким образом можно использовать данные полимеры для получения твердых фаз с кооперативным магнитным упорядочением.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали иминонитроксильный радикал 2-(2-гидрокси-5-нитрофенил)-4,4,5,5-тетраметил-4,5-дигидро-1*H*-имидазол-1-оксил (HL), синтезированный по методике [4], KOH (“х. ч.”), NaOH (“ч. д. а.”), RbOH (50%-ный раствор в H₂O, Sigma-Aldrich), CsOH (50%-ный раствор в H₂O, Sigma-Aldrich), ацетон (“ос. ч.”), гептан (эталонный) и метанол (очищенный методом перегонки перед использованием). [Co(H₂O)₂(Hfac)₂] и [Ni(H₂O)₂(Hfac)₂] получали взаимодействием [Co(H₂O)₄(OAc)₂] и [Ni(H₂O)₄(OAc)₂] с 1,1,1,5,5,5-гексафтор-2,4-пентандионом (Hfac) и KOH в воде с последующей перекристаллизацией продукта из EtOAc (“ос. ч.”).

Синтез комплекса K[Ni(Hfac)L₂] · Me₂CO (I). При комнатной температуре к раствору 0.05 г (0.1 ммоль) [Ni(H₂O)₂(Hfac)₂] в 1 мл ацетона добавляли раствор 0.055 г (0.2 ммоль) HL в 3 мл ацетона, затем раствор 0.011 г (0.2 ммоль) KOH в 0.5 мл MeOH. При этом реакционная смесь приобретала темно-коричневую окраску. Через 2 сут выпадали коричневые призматические кристаллы I, которые отфильтровывали и промывали ацетоном. Выход 0.08 г (45%).

Найдено, %: C 44.4; H 3.9; N 9.2; F 12.6.
Для C₃₄H₃₇N₆O₁₁F₆KNi
вычислено, %: C 44.5; H 4.1; N 9.2; F 12.4.

По аналогичной методике с использованием NaOH, RbOH или CsOH получали, соответственно, Na[Ni(Hfac)L₂] · Me₂CO (II), Rb[Ni(Hfac)L₂] · 2.5Me₂CO (III) и Cs[Ni(Hfac)L₂] (IV).

II: красно-коричневые кристаллы в форме призм (выход 60%).

Найдено, %: C 45.4; H 4.4; N 9.5; F 12.7.
Для C₃₄H₃₇N₆O₁₁F₆NaNi
вычислено, %: C 45.3; H 4.1; N 9.3; F 12.6.

III: тонкие красно-коричневые призматические кристаллы (выход 60%).

Найдено, %: C 42.6; H 3.7; N 8.8; F 11.5.
Для C₃₄H₃₇N₆O₁₁F₆RbNi
(частично десольватированного)
вычислено, %: C 42.4; H 3.9; N 8.7; F 11.8.

IV: призматические кристаллы коричневого цвета (выход 82%).

Найдено, %: C 39.2; H 3.2; N 8.7; F 12.3.
Для C₃₁H₃₁N₆O₁₀F₆CsNi
вычислено, %: C 39.1; H 3.3; N 8.8; F 11.9.

Синтез K[Co(Hfac)L₂] · 2.5Me₂CO (V). При комнатной температуре к раствору 0.05 г (0.1 ммоль) [Co(H₂O)₂(Hfac)₂] в 1 мл ацетона добавляли раствор 0.055 г (0.2 ммоль) HL в 3 мл ацетона, затем раствор 0.011 г (0.2 ммоль) KOH в 0.5 мл MeOH. В результате реакционная смесь окрашивалась в черный цвет. Через 2 сут выпадали сростки кристаллов, последующая перекристаллизация которых из смеси ацетон–гептан (5 : 2) приводила к образованию темно-коричневых призматических кристаллов V, которые отфильтровывали и промывали гептаном. Выход 0.049 г (50%).

Найдено, %: C 43.8; H 3.8; N 9.1; F 12.9.
Для C_{32.5}H₃₄N₆O_{10.5}F₆KCo
(частично десольватированного)
вычислено, %: C 43.9; H 3.9; N 9.5; F 12.8.

РСА. Массивы отражений от монокристаллов получены на дифрактометрах фирмы Bruker AXS-Smart Apex II и Apex Duo (поглощение учитывалось по программе SADABS, версия 2.10) [19]. Структуры решены прямыми методами, уточнены полноматричным МНК в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Положения атомов H рассчитаны геометрически и уточнены в модели “наездника”. Все расчеты по решению и уточнению структур проведены по комплексу программ SHELX. Кристаллографические характеристики соединений, детали экспериментов приведены в табл. 1, значения избранных длин связей и межатомных расстояний – в табл. 2.

Полная информация по структурам I–V содержится в Кембриджском банке структурных данных

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур I–V

Параметр	Значение				
	I	II	III	IV	V
Брутто-формула	$C_{34}H_{37}N_6O_{11}F_6KNi$	$C_{34}H_{37}N_6O_{11}F_6NaNi$	$C_{38.50}H_{46}N_6O_{12.50}F_6RbNi$	$C_{31}H_{31}N_6O_{10}F_6CsNi$	$C_{38.50}H_{46}N_6O_{12.50}F_6KCo$
<i>M</i>	917.50	901.39	1050.99	953.24	1004.84
<i>T</i> , К	240	295	240	296	240
Сингония; <i>Z</i>	$P2_1/c$; 8	$P2_12_12_1$; 8	$P2_1/c$; 8	$\bar{P}1$; 4	$P2_1/c$; 8
<i>a</i> , Å	19.7547(9)	11.0707(13)	20.196(3)	11.7373(8)	20.0833(12)
<i>b</i> , Å	24.7678(12)	21.790(2)	27.815(5)	17.2803(12)	27.830(2)
<i>c</i> , Å	19.8038(10)	34.756(3)	18.824(3)	20.1143(14)	18.9399(14)
α , град	90	90	90	98.870(4)	90
β , град	117.461(3)	90	115.913(7)	101.264(3)	116.796(4)
γ , град	90	90	90	102.339(3)	90
<i>V</i> , Å ³	8597.8(7)	8384.3(15)	9511(3)	3826.0(5)	9449.2(12)
ρ (выч.), г см ⁻³	1.418	1.428	1.468	1.655	1.413
θ Range, deg	67.234	28.278	68.229	28.173	67.768
Интервалы индексов <i>hkl</i> min/max	-22 ≤ <i>h</i> ≤ 23, -29 ≤ <i>k</i> ≤ 29, -23 ≤ <i>l</i> ≤ 22	-14 ≤ <i>h</i> ≤ 11, -27 ≤ <i>k</i> ≤ 26, -40 ≤ <i>l</i> ≤ 45	-24 ≤ <i>h</i> ≤ 24, -33 ≤ <i>k</i> ≤ 33, -22 ≤ <i>l</i> ≤ 22	-15 ≤ <i>h</i> ≤ 15, -22 ≤ <i>k</i> ≤ 22, -26 ≤ <i>l</i> ≤ 26	-23 ≤ <i>h</i> ≤ 23, -33 ≤ <i>k</i> ≤ 33, -21 ≤ <i>l</i> ≤ 22
Число измеренных/независимых отражений	104203/15167	45894/19330	131996/16581	64338/18624	133941/16914
<i>R</i> _{int}	0.1694	0.0711	0.0586	0.0616	0.1012
Число отражений с <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)	6328	9282	12172	10922	9748
Число параметров	1063	1152	1273	1148	1345
GOOF	0.865	0.805	1.127	0.851	1.012
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>))	0.0601/0.1449	0.0456/0.0773	0.0755/0.1642	0.0343/0.0663	0.0823/0.2233
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (все данные)	0.1443/0.1850	0.1188/0.0919	0.1013/0.1807	0.0739/0.0760	0.1346/0.2774
Δρ _{max} /Δρ _{min} , e/Å ³	0.423/−0.607	0.277/−0.292	0.759/−0.693	0.645/−0.431	0.680/−0.532

Таблица 2. Значения избранных длин связей и межатомных расстояний для I–V

Связь	<i>d</i> , Å				
	I	II	III	IV	V
M(II)–O	2.009(3)–2.071(4)	2.019(3)–2.075(3)	2.009(3)–2.083(4)	2.003(2)–2.070(2)	2.022(4)–2.124(5)
M(II)–N	2.101(3)–2.115(4)	2.097(4)–2.120(4)	2.082(4)–2.111(4)	2.115(2)–2.128(2)	2.127(4)–2.150(4)
M(I)–O	2.679(3)–3.069(4)	2.287(5)–2.813(6)	2.805(3)–3.179(5)	3.002(2)–3.362(2)	2.692(4)–3.268(5)
Cs–F				3.341(15)–3.443(14)	
N–O	1.258(5)–1.267(5)	1.265(6)–1.272(6)	1.259(6)–1.269(7)	1.262(3)–1.270(4)	1.255(6)–1.273(7)
M(II)⋯M(I)	3.684(2), 3.700(1)	3.331(2), 3.353(2)	3.857(1), 3.871(1)	4.0127(6), 4.0751(6)	3.703(2), 3.708(2)

(CCDC № 1974139–1974143; deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Магнитную восприимчивость (χ) поликристаллических образцов измеряли на SQUID-магнетометре MPMSXL (Quantum Design) в интервале 2–310 К в магнитном поле 5 кЭ. Парамагнитные составляющие χ определяли с учетом диамагнитного вклада, оцененного из констант Паскаля. Эффективный магнитный момент ($\mu_{\text{эфф}}$) вычисляли по формуле $\mu_{\text{эфф}} = [3k\chi T / (N_A \mu_B^2)]^{1/2}$, где N_A , μ_B и k – число Авогадро, магнетон Бора и постоянная Больцмана соответственно. Анализ экспериментальной зависимости магнитной восприимчивости от температуры проводили с использованием изотропного спин-гамильтониана вида $H = -2\sum J_{ij} S_i S_j$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что взаимодействие $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{Hfac})_2]$ с HL в смеси ацетон–метанол происходит только в присутствии KOH. При этом кристаллизуется комплекс I. В аналогичных условиях с использованием NaOH, RbOH, CsOH были получены II, III и IV соответственно, содержащие фрагменты $\{\text{Ni}(\text{Hfac})\text{L}_2\}$ (рис. 1). В твердой фазе эти соединения объеди-

нены катионами щелочных металлов в полимерные структуры. Кроме того, в кристаллической структуре могут присутствовать молекулы ацетона, связанные с катионом щелочного металла. Окружение атома Ni во всех соединениях – незначительно искаженный октаэдр, образованный двумя O_{Hfac} и донорными атомами O_L и N_L , с расстояниями Ni–O 2.009(3)–2.083(4) Å и Ni–N 2.082(4)–2.128(4) Å (табл. 2). Длины связей N–O в нитроксильной группе L типичны для иминонитроксилов: 1.255(6)–1.273(7) Å [20].

Окружение атомов щелочных металлов различно (рис. 2). В соединении I для атома K – это семивершинник, образованный четырьмя атомами O_{NO_2} от нитрогрупп двух L, двумя мостиковыми O_L от двух других L и атомом O молекулы ацетона (K–O 2.679(3)–3.069(4) Å). С учетом всех этих связей в структуре формируются полимерные цепи (рис. 2а).

Соединение II имеет такой же состав, как и I, с аналогичным окружением атомов щелочного металла (Na–O 2.287(5)–3.032(5) Å), но при этом в структуре формируются не цепи, а слои (рис. 2б).

Полимерные цепи образуют и структуру III (рис. 2в). В ней окружение атомов Rb – восьми-

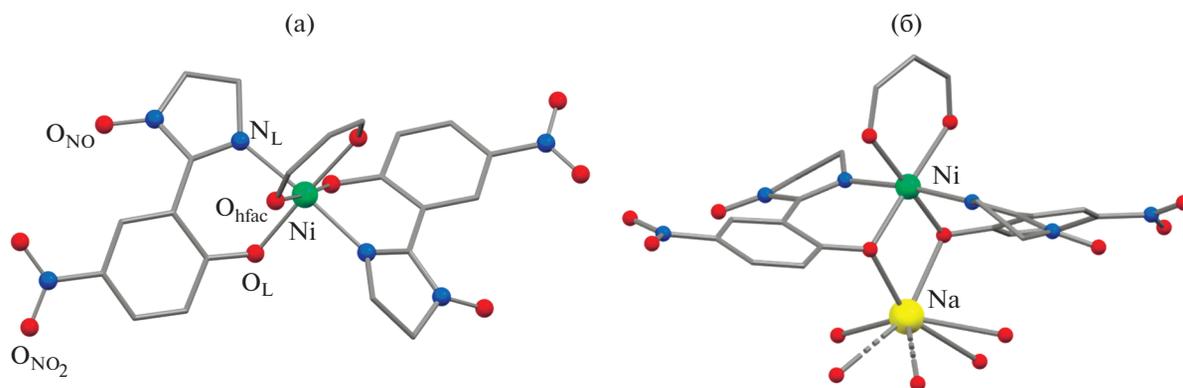


Рис. 1. Строение координационного аниона $[\text{Ni}(\text{Hfac})\text{L}_2]^-$ (а) и фрагмент структуры II (б). Здесь и далее: атомы N – ● и O – ●, CF_3 , CH_3 -группы и атомы H не показаны; пунктиром выделены связи, участвующие в образовании полимерной структуры.

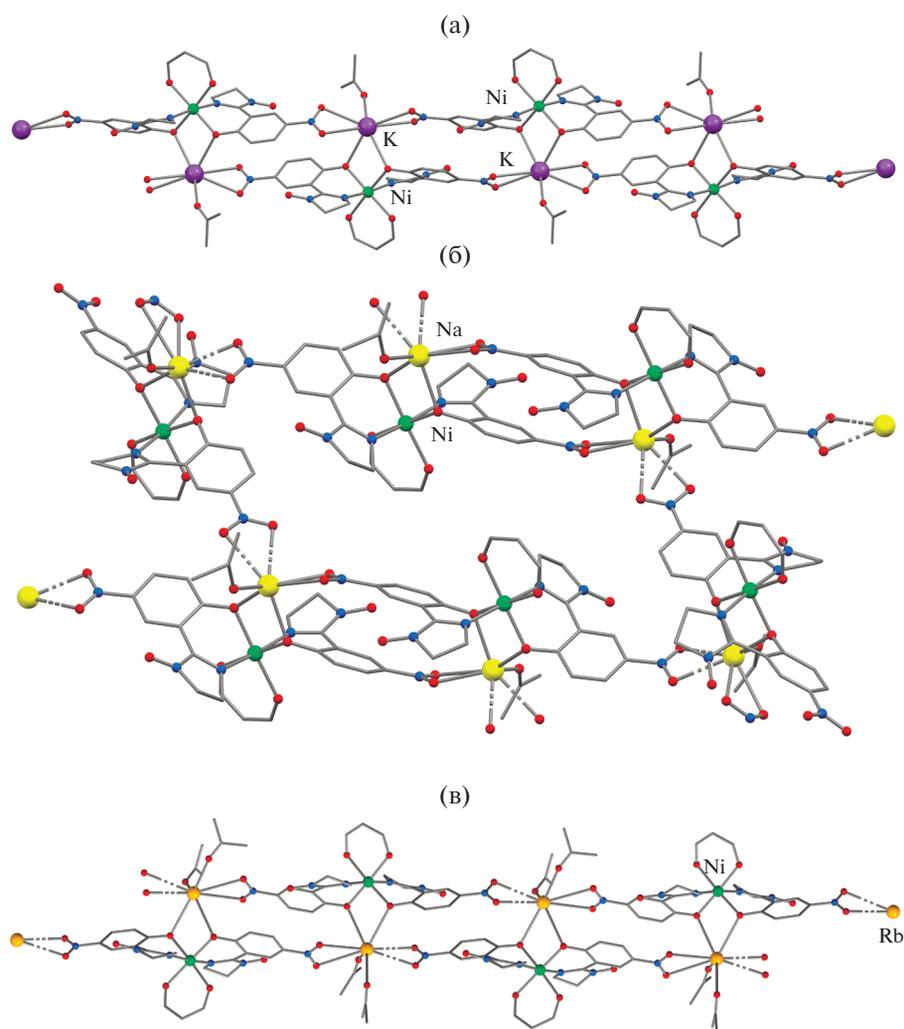


Рис. 2. Строение слоя в I (а), II (б) и цепей III (в).

вершинник из атомов кислорода O_{NO_2} , O_L и двух молекул ацетона ($Rb-O$ 2.805(3)–3.179(5) Å). Кроме того, между цепочками располагаются сольватные молекулы ацетона. Такое же строение и состав имеет V.

В окружение атома Cs в IV входят атомы O (3.002(2)–3.362(2) Å) и F (3.341(15)–3.443(14) Å), образуя неправильный девятивершинник (рис. 3в). С учетом всех этих контактов структуру можно рассматривать как каркас (рис. 3).

Исследование магнитных свойств полученных разнометалльно-разнолигандных комплексов показало наличие ферромагнитных обменных взаимодействий между спинами парамагнитных центров. Значения $\mu_{эфф}$ при 300 К несколько выше теоретических чисто спиновых (3.74 и 4.58 μ_B для комплексов Ni(II) и Co(II) соответственно) и возрастают при понижении температуры (рис. 4). Этот результат находится в согласии с данными кван-

тово-химических расчетов, показавших, что координация иминонитроксила посредством атома N парамагнитного фрагмента благоприятна для реализации обменных взаимодействий ферромагнитного характера [21–33]. Анализ экспериментальных зависимостей $\mu_{эфф}(T)$ для исследованных соединений проводили с использованием модели обменно-связанного тримера (спин-Гамильтониан $H = -2J(S_{L1}S_M + S_MS_{L2})$) для фрагментов $\{M(Hfac)L_2\}$. Уменьшение значения $\mu_{эфф}$ при низких температурах обусловлено более слабыми межкластерными обменными взаимодействиями антиферромагнитного характера и/или расщеплением в нулевом поле, которые учитывали в приближении молекулярного поля. Оптимальные значения g -фактора иона металла (g_M) и параметров обменного взаимодействия (J и \mathcal{J}), полученные из анализа экспериментальных зависимостей $\mu_{эфф}(T)$, приведены в табл. 3, значение g -фактора нитроксилов фиксировали равным 2.

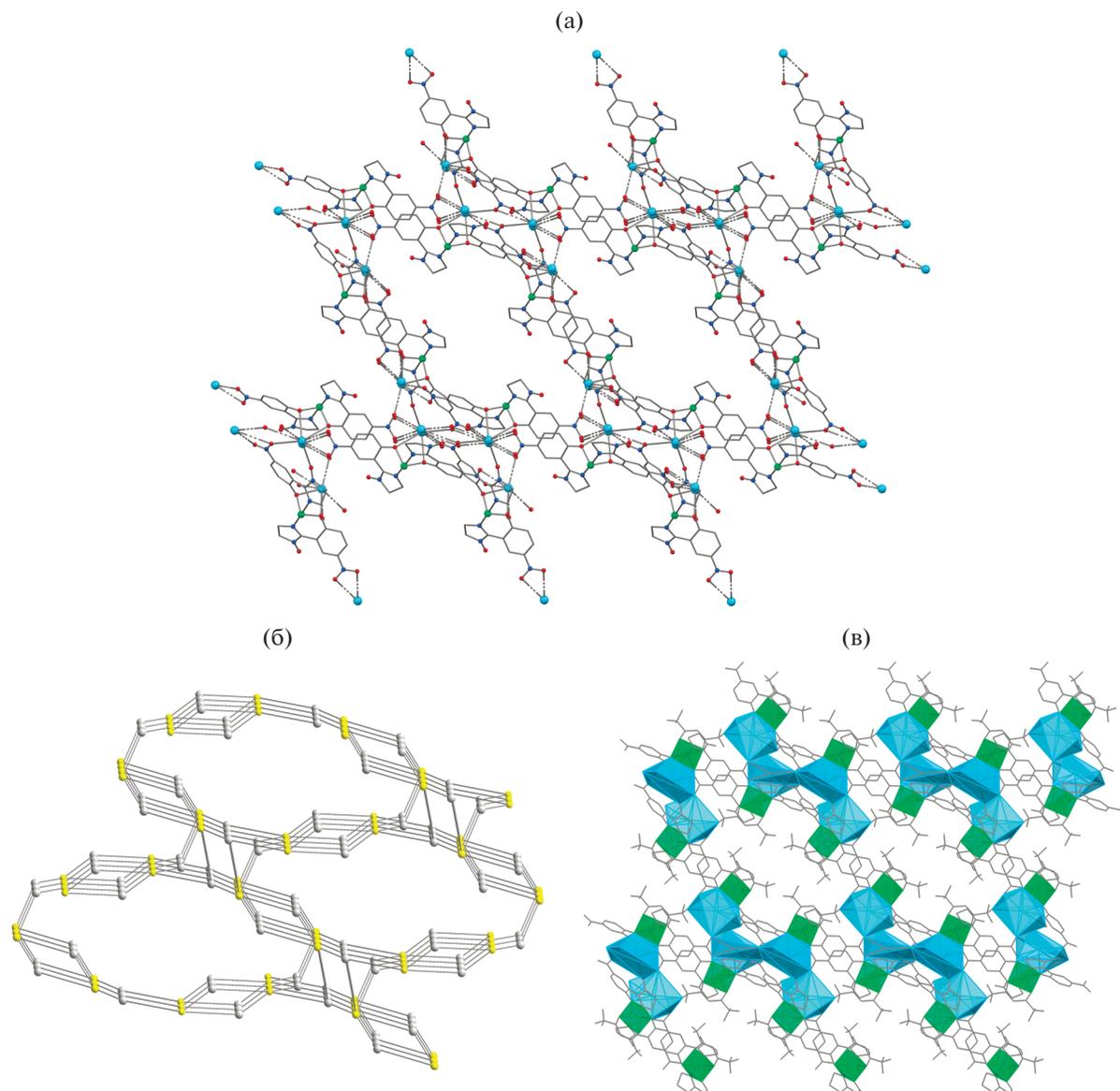


Рис. 3. (а) Фрагмент каркаса в IV (Hfac-лиганды не показаны, Cs — ●, Ni — ●); (б) схематическое представление каркаса: центры парамагнитных лигандов — ● и биядерных фрагментов {Ni...Cs} — ●; (в) изображение каркаса в полиэдрическом представлении для атомов металла.

Таблица 3. Оптимальные значения g -фактора иона металла (g_M) и параметров обменного взаимодействия (J и zJ'), полученные из анализа экспериментальных зависимостей $\mu_{эфф}(T)$

Соединение	g_M	$J, \text{см}^{-1}$	$zJ', \text{К}$
I	2.24	72	-0.17
II	2.26	70	-0.34
III	2.18	58	-0.51
IV	2.32	56	-0.10
V	2.17	60	-0.54

Таким образом, проведенное исследование показало, что гексафторацетонаты Ni(II) и Co(II) реагируют со спин-меченым основанием Шиффа HL в органических средах в присутствии щелочи. Реакция приводит к кристаллизации из раствора разнолигандных гетерометаллических полимерных комплексов. Тип образующейся полимерной структуры определяется ионом щелочного металла — слой в случае Na, цепи для K, Rb и каркас в случае Cs. В твердой фазе всех соединений ферромагнитные обменные взаимодействия между парамагнитными центрами локализованы главным образом в обменных кластерах {LML}. Поскольку

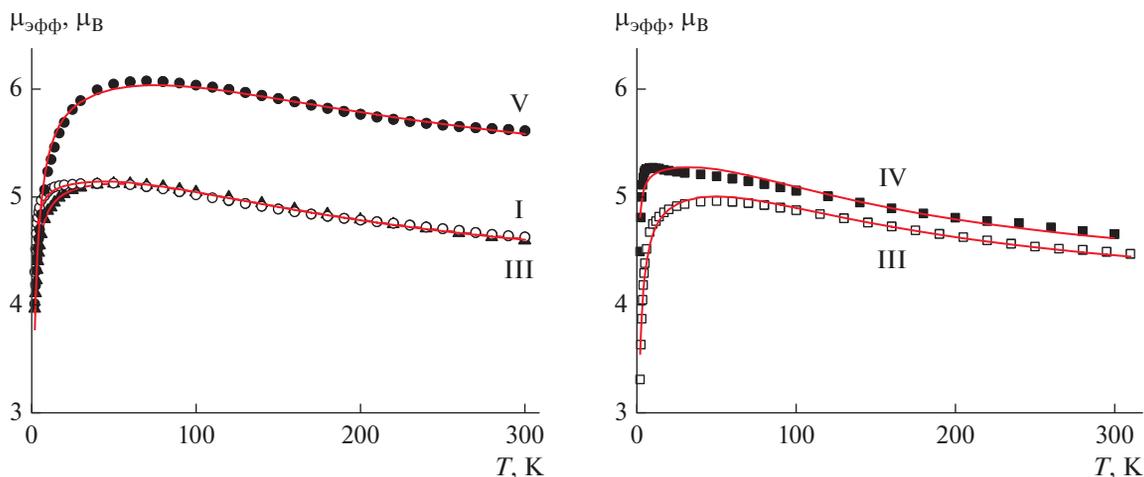


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $\mu_{\text{эфф}}(T)$ для I, II, III, IV и V. Сплошные линии – теоретические кривые.

значения ферромагнитного обмена достаточно велики (табл. 3), представляется целесообразным заменить в составе выделенных соединений щелочные металлы на парамагнитные ионы переходных металлов. Такое исследование мы планируем провести в будущем: в случае, если это удастся реализовать, можно надеяться на получение новой группы гетероспиновых комплексов, способных к кооперативному магнитному упорядочению.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-04002) и Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-5027.2018.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ovcharenko V., Kuznetsova O., Fursova E. et al. // Inorg. Chem. 2014. V. 53. P. 10033.
- Кузнецова О.В., Фурсова Е.Ю., Романенко Г.В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2016. № 5. С. 1167 (Kuznetsova O.V., Fursova E.Yu., Romanenko G.V. et al. // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. № 5. P. 1167).
- Ovcharenko V., Kuznetsova O., Fursova E. et al. // Crystals. 2015. V. 5. P. 634.
- Tretyakov E., Eltsov I., Fokin S. et al. // Polyhedron. 2003. V. 22. P. 2499.
- Ельцов И.В. Дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2004.
- Caneschi A., Gatteschi D., Laugier J. et al. // Inorg. Chem. 1988. V. 27. P. 1553.
- Luneau D., Rey P., Laugier J. et al. // Inorg. Chem. 1992. V. 31. P. 3578.
- Yoshitomo O., Takashi N., Takayuki I. // Chem. Lett. 2009. V. 38. № 7. P. 740.
- Yoshitomo O., Norio I., Takashi N., Takayuki I. // Bull. Chem. Soc. Jpn. 2010. V. 83. № 6. P. 716.
- Cassaro R.A.A., Reis S.G., Araujo T.S. et al. // Inorg. Chem. 2015. V. 54. P. 9381.
- Ishii N., Okamura Y., Chiba S. et al. // Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 24.
- Wang J., Li J.-N., Zhang S.-L. et al. // Chem. Commun. 2016. V. 52. P. 5033.
- Ishii N., Ishida T., Nogami T. // Inorg. Chem. 2006. V. 45. P. 3837.
- Caneschi A., Gatteschi D., Lalioti N. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2001. V. 40. P. 1760.
- Caneschi A., Gatteschi D., Renard J.P. et al. // Inorg. Chem. 1989. V. 28. P. 2940.
- Caneschi A., Gatteschi D., Lalioti N. et al. // Dalton Trans. 2000. P. 3907.
- Vaz M.G.F., Allão R.A., Akpinar H. et al. // Inorg. Chem. 2012. V. 51. P. 3138.
- Catala L., Wurst K., Amabilino D.B., Veciana J. // J. Mater. Chem. 2006. V. 16. P. 2736.
- Sheldrick G.M. SADABAS. Program for Empirical X-ray Absorption Correction. Bruker AXS, 1990–2007.
- Третьяков Е.В., Овчаренко В.И. // Успехи химии. 2009. Т. 78. № 11. С. 1051 (Tretyakov E.V., Ovcharenko V.I. // Russ. Chem. Rev. 2009. V. 78. № 11. P. 971).
- Малиновская С.А., Шчастьев П.В., Мусин Р.Н., Икорский В.Н. // Журн. структур. химии. 1993. Т. 34. № 3. С. 70 (Malinovskaya S.A., Schastnev P.V., Musin R.N., Ikorsky V.N. // J. Struct. Chem. 1993. V. 34. P. 398).
- Musin R.N., Schastnev P.V., Malinovskaya S.A. // Inorg. Chem. 1992. V. 31. P. 4118.
- Овчаренко И.В., Шведенков Ю.Г., Мусин Р.Н., Икорский В.Н. // Журн. структур. химии. 1999. № 1. Т. 40. № 1. С. 36 (Ovcharenko I.V., Shvedenkov Yu.G., Musin R.N., Ikorskii V.N. // J. Struct. Chem. 1999. V. 40. № 1. P. 29).

24. *Cogne A., Laugier J., Dominique L., Rey P.* // Inorg. Chem. 2000. V. 39. P. 5510.
25. *Marvilliers A., Pei Y., Boquera J.C. et al.* // Chem. Commun. 1999. P. 1951.
26. *Зуева Е.М., Третьяков Е.В., Фокин С.В. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2016. Т. 3. С. 666 (*Zueva E.M., Tretyakov E.V., Fokin S.V. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. P. 666).
27. *Oshio H., Yamamoto M., Ito T. et al.* // Inorg. Chem. 2001. V. 40. № 22. P. 5518.
28. *Luneau D., Rey P., Laugier J. et al.* // Inorg. Chem. 1992. V. 31. № 17. P. 3578.
29. *Yamamoto Y., Suzukia T., Kaizaki S.* // Dalton Trans. 2001. P. 1566.
30. *Li C., Zhang J., Li L.* // Transition Met. Chem. 2015. V. 40. P. 631.
31. *Ishida T., Adachi K., Kawata S. et al.* // Polyhedron. 2007. V. 26. P. 2013.
32. *Lanfranc de Panthou F., Luneau D., Musin R. et al.* // Inorg. Chem. 1996. V. 35. P. 3484.
33. *Петров П.А., Романенко Г.В., Шведенков Ю.Г. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2004. Т. 53. № 1. С. 98 (*Petrov P.A., Romanenko G.V., Shvedenkov Yu.G. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2004. V. 53. P. 99).