

УДК 541.49:548.736

**СТРУКТУРА МНОГОЯДЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПИВАЛАТА Ni(II)
С БУТАНДИОЛОМ****Г.В. Романенко, О.В. Кузнецова, Е.Ю. Фурсова, В.И. Овчаренко***Институт "Международный томографический центр" СО РАН, Новосибирск*

E-mail: romanenko@tomo.nsc.ru

Статья поступила 10 мая 2013 г.

Методом рентгеноструктурного анализа установлена структура многоядерных комплексов $[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_7(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{O})(\text{HPiv})_4]$, $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2(\text{Piv})_{16}(\text{OH})_8(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})_2]\} \cdot \text{HPiv}$, $\{[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})_2]_4(\text{Piv})_4\}$ и $\{\text{K}[\text{Ni}_2\text{L}_2(\text{Piv})_3]\}_\infty$, где $\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH}$ — 1,4-бутандиол, HPiv — пивалиновая кислота и L — анион нитроксильного радикала 2,2,5,5-тетраметил-4-(3',3',3'-трифтор-2'-окси-1'-пропенил)-3-имидазолин-1-оксила.

Ключевые слова: никель(II), полиядерные соединения, пивалаты, бутандиол, рентгеноструктурный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов получения гетероспиновых молекулярных магнетиков служит взаимодействие многоядерных соединений металлов со свободными нитроксильными радикалами (НР) [1—16]. Данный синтетический подход предполагает выполнение ряда условий. Чтобы ввести НР в реакцию с многоядерным комплексом, последний должен хорошо растворяться в органических растворителях. Кроме того, ионы металла, включенные в многоядерный остов, должны обладать высокой акцепторной способностью, чтобы координировать слабые доноры — атомы О нитроксильных групп [17—19]. И наконец, требуется наличие в исходном многоядерном фрагменте легко замещаемых терминальных лигандов [3]. Таким образом, обсуждаемый подход — многостадийный процесс [4, 5, 13]. Изучая иные возможности синтеза многоядерных гетероспиновых соединений, мы исследовали взаимодействие хорошо растворимых в органических растворителях $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с $\text{NiL}_2(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})$, где $\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH}$ — 1,4-бутандиол, HPiv — пивалиновая кислота и L — спин-меченый анион 4-(3',3',3'-трифтор-1'-пропенил-2'-оксиато)-2,2,5,5-тетраметил-3-имидазолин-1-оксил. В ходе проведенных экспериментов было зафиксировано образование многоядерных соединений $[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_7(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{O})(\text{HPiv})_4]$ (**I**), $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2(\text{Piv})_{16}(\text{OH})_8(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})_2]\} \cdot \text{HPiv}$ (**II**), $\{[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})_2]_4(\text{Piv})_4\}$ (**III**) и $\{\text{K}[\text{Ni}_2\text{L}_2(\text{Piv})_3]\}_\infty$ (**IV**), строение которых описывается в настоящей работе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные реагенты $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ и $\text{NiL}_2(\text{HOС}_4\text{H}_8\text{OH})$ получали по известным методикам [4, 20]. Для **I** найдена методика синтеза, позволяющая воспроизводимо получать соединение в достаточном количестве. Она заключается во взаимодействии $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с 1,4-бутандиолом в смеси ацетон/гептан в присутствии небольшой добавки HPiv . В отсутствие

*Кристаллографические данные, детали рентгеноструктурного эксперимента
и значения избранных длин связей (d , Å)*

Параметр	Соединение			
	$[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_7] \times (\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{O}) \times (\text{HPiv})_4$, I	$\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2(\text{Piv})_{16}(\text{OH})_8(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})_2]\} \cdot \text{HPiv}$, II	$\{[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})_2]_4 \times (\text{Piv})_4\}$, III	$\{\text{K}[\text{Ni}_2\text{L}_2(\text{Piv})_3]\}_\infty$, IV
Формула	$\text{C}_{59}\text{H}_{116}\text{Ni}_6\text{O}_{28}$	$\text{C}_{95}\text{H}_{182}\text{K}_4\text{Ni}_{12}\text{O}_{52}$	$\text{C}_{200}\text{H}_{408}\text{Ni}_{24}\text{O}_{100}$	$\text{C}_{35}\text{H}_{53}\text{F}_6\text{KN}_4\text{Ni}_2\text{O}_{10}$
Мол. масса	1625,78	3017,14	5822,28	960,33
Температура, К	296	240	293	296
Пр. гр.; Z	$P2_1/m$; 2	$C2/c$; 4	$I4/m$; 2	$P-1$; 4
a , Å	14,072(2)	32,4559(16)	28,911(4)	17,4083(8)
b , Å	23,878(3)	17,5377(9)	28,911(4)	19,6802(9)
c , Å	14,393(2)	28,9630(13)	20,990(4)	20,5154(9)
α , град.				79,814(3)
β , град.	90,939(11)	102,004(3)		79,357(3)
γ , град.				64,558(3)
V , Å ³	4835,4(13)	16125,3(14)	17545(5)	6200,0(5)
$\rho_{\text{выч}}$, г/см ³	1,117	1,243	1,102	1,029
μ , см ⁻¹	1,756	1,536	1,316	0,731
Обл. сканир. по θ , град.	3,07—60,00	1,44—28,04	1,85—27,97	1,75—28,36
I_{hkl} изм. / незав.	31927 / 7195	66769 / 19187	41749 / 10723	101653 / 30171
R_{int}	0,0725	0,1205	0,0538	0,1166
N	508	766	505	1045
GOOF	1,134	0,860	0,800	0,854
$R_1 / wR_2 (I_{hkl} > 2\sigma_I)$	0,0939 / 0,2631	0,0748 / 0,2054	0,0518 / 0,1379	0,0879 / 0,2345
R_1 / wR_2	0,1282 / 0,2911	0,2480 / 0,2620	0,1375 / 0,1520	0,1906 / 0,2536
Связь	d	d	d	d
Ni—O(μ^3)	2,013(4)—2,022(4)	2,004(4)—2,065(5)	2,007(3)—2,037(1)	
Ni—O(μ^4)	2,118(5)—2,134(4)	2,104(4)—2,156(4)	2,005(3)—2,035(1)	
Ni—O _{Piv}	1,994(5)—2,091(5)	2,001(6)—2,197(5)	1,985(3)—2,042(3)	1,986(4)—2,147(4) ^b
Ni—O _{HPiv}	2,109(5)—2,127(5)	2,061(4)—2,224(4) ^a	2,156(4)—2,159(4)	
Ni—O _{OH}	2,088(5)—2,097(4)	2,049(5)	2,067(3)—2,085(3)	2,029(5)—2,063(4) ^c
Ni—Ni	2,719(2)	2,797(1)	2,7817(10)	
	2,955(2)	2,956(1)—2,957(1)	2,9624(8)	
	2,964(2)		2,9624(8)	
K—O		2,652(5)—2,959(5)		2,634(4)—2,735(4)

^a Ni—O_{CO₃}.^b Ni—O_L.^c Ni—N.

HPiv из реакционной смеси воспроизводимо с выходом порядка 15—20 % выделялся **II**. Единичные кристаллы **I**, **III** и **IV** образовывались в ходе самопроизвольного испарения растворов реагентов, взятых в соотношении 1/1, в смеси ацетон/гептан.

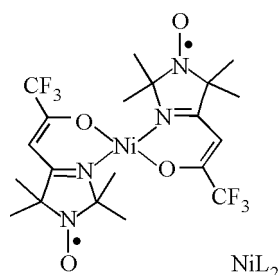
Рентгеноструктурное исследование монокристаллов комплексов проведено на дифрактометре SMART APEX II CCD (Bruker AXS) (MoK α , $\lambda = 0,71073$ Å для **II—IV** и CuK α , $\lambda = 1,54178$ Å для **I**; поглощение учитывалось по программе Bruker SADABS, версия 2.10). Струк-

туры решены прямым методом и уточнены полноматричным МНК в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Положения атомов Н рассчитаны геометрически, их уточнение проводили изотропно в приближении жесткой группы. Все расчеты по решению и уточнению структур проводили по комплексу программ Bruker Shelxtl Version 6.14. Структуры всех соединений содержат сольватные молекулы, положения которых удалось уточнить только для **II**. В остальных случаях они были исключены из уточнения (процедура SQUEEZE программы PLATON [21]).

Кристаллографические характеристики исследованных соединений и некоторые детали эксперимента приведены в таблице. CIF-файлы, содержащие полную информацию по исследованным структурам, депонированы в Кембриджский банк данных (CCDC 938739—938742) на сайте www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Недавно сообщалось о синтезе многоядерных разнолигандных комплексов Ni(II), содержащих одновременно как Piv, так и hfac-анионы [4, 5], которые были получены взаимодействием $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с $\text{Ni}(\text{hfac})_2(\text{H}_2\text{O})_2$ в органических средах и затем введены в реакцию с НР [6]. В настоящей работе описаны структуры комплексов, образующихся при взаимодействии $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ со спин-меченым енаминокетонатом Ni(II) $\text{NiL}_2(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})$. По сравнению с $\text{Ni}(\text{hfac})_2$ молекулы NiL_2 содержат хелатные узлы, к которым аннелированы парамагнитные органические циклы. Учитывая определенную близость в топологии молекул $\text{Ni}(\text{hfac})_2$ и NiL_2 , а также хорошую растворимость $\text{NiL}_2(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})$ в органических растворителях, можно было допустить образование гетероспиновых соединений и в реакции $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с $\text{NiL}_2(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})$, что было основным стимулом для проведения настоящего исследования.



Поскольку многоядерные пивалаты переходных металлов принадлежат к числу лабильных и стереохимически нежестких соединений, при их получении возможно образование различных по составу и структуре комплексов, ряд из которых бывает крайне сложно выделить в индивидуальном виде [22—24], что существенно затрудняет последующее выявление структурной топологической связи [2, 3]. По этой причине мы исследовали даже единичные кристаллы, образовавшиеся в указанной синтетической системе. В результате удалось определить структуру многоядерных комплексов $[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_7(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{O})(\text{HPiv})_4]$ (**I**), $\{[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6 \times (\text{HOC}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})_2]_4(\text{Piv})_4\}$ (**III**) и $\{\text{K}[\text{Ni}_2\text{L}_2(\text{Piv})_3]\}_\infty$ (**IV**), а также $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2(\text{Piv})_{16}(\text{OH})_8(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})_2]\} \cdot \text{HPiv}$ (**II**), представляющего собой продукт гидролиза $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$.

При синтезе **I** небольшая добавка НРив при взаимодействии $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с 1,4-бутандиолом позволяла избежать гидролиза $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$. В ее отсутствие из реакционной смеси воспроизводимо выделялся **II**.

Все исследованные соединения, за исключением **IV**, молекулярные. Фрагменты молекулы **I** (рис. 1), содержащие $\{\text{Ni}1-\text{Ni}2-\text{Ni}3\}$ и $\{\text{Ni}1'-\text{Ni}2'-\text{Ni}3'\}$, связаны зеркальной плоскостью. По этой причине центральный $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ фрагмент депротонированной мостиковой молекулы бутандиола разупорядочен по двум положениям; на рис. 1 показано одно из них. Фигуру,

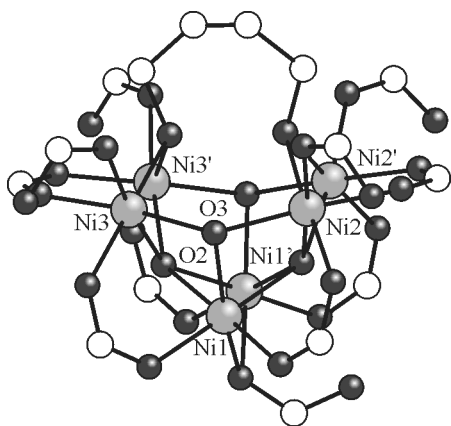


Рис. 1. Строение молекулы $[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_7(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{O})(\text{HPiv})_4]$ (I) (атомы Н и *t*-Bu группы не показаны)

вершины которой в молекулах **I** образуют атомы Ni, можно представить как трехгранную призму. Расстояние для самого короткого ребра Ni1—Ni1', стягиваемого мостиковым атомом О одного из Piv, равно 2,719(2) Å, для Ni2—Ni3 и Ni1—Ni3 — 2,955(2) и 2,964(2) Å, для Ni2—Ni2' и Ni3—Ni3' — 3,012(2) и 3,014(2) Å соответственно. Окружение каждого атома Ni дополняется до октаэдрического донорными атомами О двух μ_3 -ОН (2,013(4)—2,034(4) Å), двух μ_4 -ОН групп (2,118(5)—2,169(5) Å), атомами О бидентатных Piv (1,994(5)—2,091(5) Å) и монодентатно координированных молекул HPiv (2,109(5)—2,127(5) Å). В целом строение 6-ядерной молекулы **I** близко к таковому для ранее исследованного $[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_8(\text{HPiv})_4]$ [2].

Ранее было показано, что гидролиз $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$, например, при его перекристаллизации из этилацетата на воздухе приводит к образованию $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2\text{Piv}_{16}(\text{OH})_8(\text{H}_2\text{O})_2]\} \times (\text{EtOAc})_4 \cdot \text{EtOAc}$ [4], особенностью которого служит включение в состав полиядерного фрагмента двух μ_6 -мостиковых карбонат-анионов. По этой же причине добавление бутандиола к раствору $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ в смеси ацетон/гептан на воздухе привело к образованию 12-ядерного карбонатсодержащего комплекса **II**. Его строение представлено на рис. 2. Оно практически идентично описанному ранее $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2\text{Piv}_{16}(\text{OH})_8(\text{H}_2\text{O})_2](\text{EtOAc})_4\}$ с той разницей, что в **II** в окружении атомов К отсутствуют молекулы этилацетата, а окружение "концевых" атомов Ni вместо атомов О молекул воды дополняют атомы О молекул бутандиола. Расстояния Ni—О в **II** лежат в диапазоне 1,982(4)—2,224(4), К—О 2,652(5)—2,957(1) Å.

Как отмечалось в экспериментальной части, в ходе самопроизвольного испарения растворов $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ и $\text{NiL}_2(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})$ наряду с **I** были выделены кристаллы комплекса **III**, строение 24-ядерной молекулы которого приведено на рис. 3, а. Молекула **III** имеет симметрию C_{4h} и фактически представляет собой тетрамер, в котором 6-ядерные фрагменты связаны нетривиальными мостиковыми группировками $\{(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})_2\text{Piv}\}$. Нам не удалось обнаружить информацию о подобном мостиковом анионе в базе данных Кембриджского кристаллографического центра [25]. Внутри этих группировок пивалат-анионы удерживаются вблизи мостиковых молекул бутандиола водородными связями (расстояния О...О составляют 2,657(4) и 2,674(4) Å).

Собственно 6-ядерные фрагменты **III** (см. рис. 3, б) $\{\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO}) \times (\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})_2\}$ близки по строению к таковым в **I** (см. рис. 1). Металлоостов — трехгранная

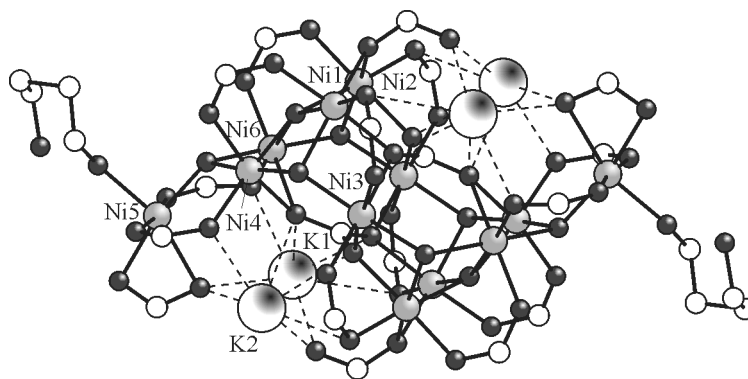


Рис. 2. Строение молекулы $\{\text{K}_4[\text{Ni}_{12}(\text{CO}_3)_2(\text{Piv})_{16}(\text{OH})_8(\text{HOC}_4\text{H}_8\text{OH})_2]\}$ (II) (атомы Н и *t*-Bu группы не показаны)

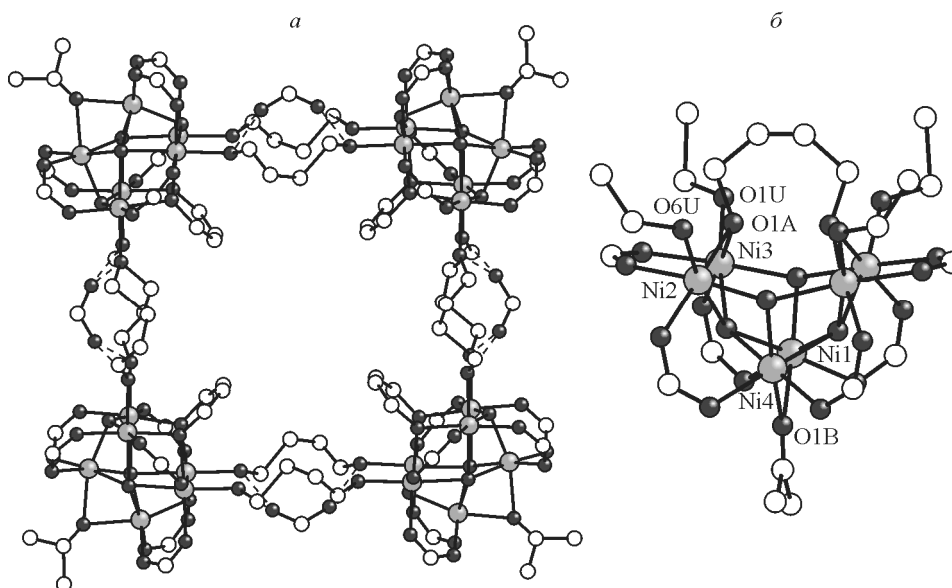


Рис. 3. Строение 24-ядерной молекулы $\{[\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})_2]_4(\text{Piv})_4\}$ (**III**) (а) и ее 6-ядерного фрагмента $\{\text{Ni}_6(\text{OH})_4(\text{Piv})_6(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{O})(\text{Me}_2\text{CO})(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})_2\}$ (б) (атомы Н и *t*-Bu группы не показаны)

призма, над плоскостями двух боковых граней которой располагаются группы $\mu_4\text{-OH}$; две группы $\mu_3\text{-OH}$ лежат в основаниях призмы. Те координационные позиции, которые в **I** занимали атомы О монодентатно координированных молекул HPiv , в **III** занимают атомы О бутандиолов мостиковых группировок $\{(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})_2\text{Piv}\}$. Одно из ребер призмы в молекулах **III** стягивает атом О мостикового ацетона, тогда как в **I** эту функцию выполнял атом О пивалат-аниона. Расстояния $\text{Ni}\dots\text{Ni}$ и $\text{Ni}-\text{O}$ в **III** близки к таковым в **I**: $\text{Ni}\dots\text{Ni}$ 2,7817(10)—3,0639(8) Å, $\text{Ni}-\text{O}$ 1,985(3)—2,159(3) Å.

В изучаемой синтетической системе было также зарегистрировано образование полимера **IV**, фрагмент слоя которого показан на рис. 4. В слое присутствуют два типа сходных по строению двухъядерных фрагментов $\{\text{Ni}_2\text{L}_2\text{Piv}_3\}$, в каждом из которых два атома Ni связаны двумя бидентатно-мостиковыми и одним тридентатным мостиково-циклическим Piv. Окружение каждого атома Ni дополняют бидентатно координированные анионы нитроксильного радикала L. При этом у одной половины атомов Ni (Ni1 и Ni2) КЧ равно 5, у другой — 6 (Ni3 и Ni4). Расстояния $\text{Ni}-\text{O}$ лежат в интервале 1,986(4)—2,147(4) Å, $\text{Ni}-\text{N}$ 2,029(5)—2,063(4) Å. Атомы К сшивают фрагменты $\{\text{Ni}_2\text{L}_2\text{Piv}_3\}$ в слое; расстояния $\text{K}-\text{O}_{\text{NO}}$ равны 2,634(4)—2,681(4) Å, $\text{K}-\text{O}_{\text{Piv}}$ и $\text{K}-\text{O}_{\text{L}}$ 2,692(4)—2,735(4) Å.

Таким образом, рентгеноструктурное исследование продуктов, образующихся при взаимодействии $\text{KNi}_4\text{Piv}_7(\text{OH})_2(\text{EtOH})_6$ с $\text{NiL}_2(\text{HO}_2\text{C}_4\text{H}_8\text{OH})$ показало, что реакция приводит к образованию разных кристаллических фаз, среди которых может присутствовать гетероспиновый комплекс переходного металла с нитроксильным радикалом.

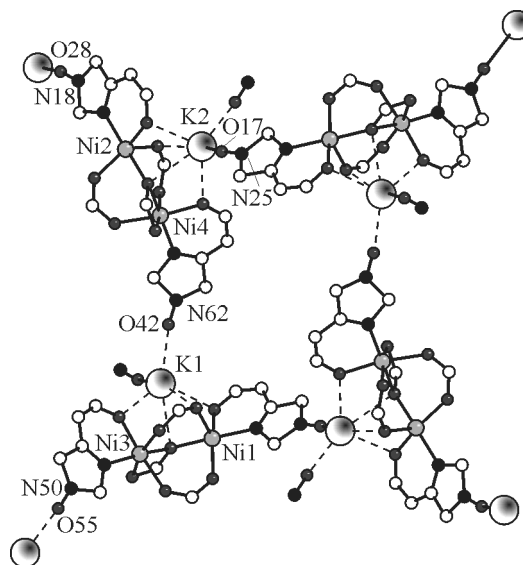


Рис. 4. Фрагмент слоя в структуре $\{\text{K}[\text{Ni}_2\text{L}_2(\text{Piv})_3]\}_\infty$ (**IV**) (атомы Н, CH_3 , CF_3 и *t*-Bu группы не показаны)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-03-00027, 12-03-31118, 12-03-00010 и 13-03-12401), Министерства образования и науки РФ (соглашение 8436), Президиума РАН и СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ovcharenko V., Fursova E., Romanenko G., Ikorskii V.* // *Inorg. Chem.* – 2004. – **43**. – P. 3332 – 3334.
2. *Ovcharenko V., Fursova E., Romanenko G., Eretenko I., Tretyakov E., Ikorskii V.* // *Inorg. Chem.* – 2006. – **45**. – P. 5338 – 5350.
3. *Фурсова Е.Ю., Овчаренко В.И.* // *Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*. – 2009. – **ЛIII**, № 1. – С. 23 – 32.
4. *Фурсова Е.Ю., Кузнецова О.В., Овчаренко В.И., Романенко Г.В., Богомяков А.С.* // *Изв. АН. Сер. хим.* – 2008. – № 6. – С. 1175 – 1182.
5. *Кузнецова О.В., Фурсова Е.Ю., Овчаренко В.И., Романенко Г.В., Богомяков А.С.* // *Изв. АН. Сер. хим.* – 2008. – № 10. – С. 2156 – 2158.
6. *Фурсова Е.Ю., Кузнецова О.В., Романенко Г.В., Богомяков А.С., Овчаренко В.И.* // *Изв. АН. Сер. хим.* – 2010. – № 2. – С. 330 – 334.
7. *Miyasaka H., Yamashita M.* // *Dalton Trans.* – 2007. – P. 399 – 406.
8. *Lecren L., Roubeau O., Coulon C., Li Y.-G., Le Goff X.F., Wernsdorfer W., Miyasaka H., Clérac R.* // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2005. – **127**. – P. 17353 – 17363.
9. *Miyasaka H., Nakata K., Lecren L., Coulon C., Nakazawa Y., Fujisaki T., Sugiura K., Yamashita M., Clérac R.* // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2006. – **128**. – P. 3770 – 3783.
10. *Kachi-Terajima C., Miyasaka H., Sugiura K., Clérac R., Nojiri H.* // *Inorg. Chem.* – 2006. – **45**. – P. 4381 – 4390.
11. *Lecren L., Wernsdorfer W., Li Y.-G., Vindigni A., Miyasaka H., Clérac R.* // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2007. – **129**. – P. 5045 – 5051.
12. *Ovcharenko V.I.* In: *Stable Radicals: Fundamentals and Applied Aspects of Odd-Electron Compounds* / Ed. R.G. Hicks. – Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd., 2010. – P. 461 – 501.
13. *Фурсова Е.Ю., Кузнецова О.В., Овчаренко В.И., Романенко Г.В., Богомяков А.С., Кискин М.А., Еременко И.Л.* // *Изв. АН. Сер. хим.* – 2010. – № 6. – С. 1129 – 1137.
14. *Lecren L., Roubeau O., Li Y.-G., Le Goff X.F., Miyasaka H., Richard F., Wernsdorfer W., Coulon C., Clérac R.* // *Dalton Trans.* – 2008. – P. 755 – 766.
15. *Ababei R., Li Y.-G., Roubeau O., Kalisz M., Bréfuel N., Coulon C., Harter E., Liu X., Mathonière C., Clérac R.* // *New J. Chem.* – 2009. – **33**. – P. 237 – 248.
16. *Hiraga H., Miyasaka H., Clérac R., Fourmigue M., Yamashita M.* // *Inorg. Chem.* – 2009. – **48**. – P. 2887 – 2898.
17. *Ларионов С.В.* // *Журн. структур. химии.* – 1982. – **23**, № 14. – С. 125 – 147.
18. *Caneschi A., Gatteschi D., Sessoli R., Rey P.* // *Acc. Chem. Res.* – 1989. – **22**, N 11. – P. 392 – 398.
19. *Ovcharenko V., Bagryanskaya E.* In: *Spin-Crossover Materials: Properties and Applications* / Ed. M. A. Halcrow. – New York: Wiley-VCH, 2013. – P. 239 – 280.
20. *Ikorskii V.N., Ovcharenko V.I., Shvedenkov Y.G., Romanenko G.V., Fokin S.V., Sagdeev R.Z.* // *Inorg. Chem.* – 1998. – **37**. – P. 4360 – 4367.
21. *Spek A.L.* // *J. Appl. Crystallogr.* – 2003. – **36**. – P. 7 – 13.
22. *Tasiopoulos A.J., Wernsdorfer W., Moulton B., Zaworotko M.J., Christou G.* // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2003. – **125**. – P. 15274 – 15275.
23. *Aromí G., Batsanov A.S., Christian P., Helliwell M., Parkin A., Parsons S., Smith A.A., Timco G.A., Winpenny R.E.P.* // *Chem. Eur. J.* – 2003. – **9**, N 20. – P. 5142 – 5161.
24. *Dunitz J.D., Bernstein J.* // *Acc. Chem. Res.* – 1995. – **28**, N 4. – P. 193 – 200.
25. *Cambridge Structural Database, Version 5.34, Cambridge Crystallographic Data Center, Cambridge, November 2012 (last update February 2013).*