

УДК 546.302:546.722

СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ ТЕТРАЯДЕРНЫХ ГЕТЕРОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАРБОКСИЛАТОВ ЖЕЛЕЗА(II)-ЛИТИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ N-ДОНОРНЫМИ ЛИГАНДАМИ

© 2023 г. Д. С. Ямбулатов¹, Ю. К. Воронина¹, С. А. Николаевский¹, *,
А. И. Поддельский¹, М. А. Кискин¹, И. Л. Еременко¹

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

*e-mail: sanikol@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 07.12.2022 г.

В результате многокомпонентных химических реакций с участием $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Li}(\text{Piv})$, $\text{K}(\text{Piv})$ (Piv = пивалат-анион) и гетероциклических N-донорных лигандов (пиридин (Py), 1,10-фенантролин (Phen)), проведенных в сухом ацетонитриле в инертной атмосфере, синтезированы новые гетерометаллические тетраядерные комплексы $[\text{Fe}_2^{\text{II}}\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Py})_2]$ (I) и $[\text{Fe}_2^{\text{II}}\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Phen})_2]$ (II), в которых все карбоксилатные анионы выступают в роли мостиковых лигандов. Молекулярная и кристаллическая структура соединений установлена методом PCA (CCDC № 2220576 (I), 2220577 (II · 2CH₃CN)). В исследованных комплексах атомы железа(II) находятся в искаженном октаэдрическом лигандном окружении.

Ключевые слова: пивалат, тетраядерный комплекс, железо(II), литий, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0132344X22600539, **EDN:** SADTEI

Гетерометаллические координационные и металлоорганические соединения, содержащие атомы железа и лития в одной молекуле, становятся популярными объектами исследования. Они характеризуются богатой структурной химией [1–4] и перспективными функциональными свойствами [5–8], которыми в некоторой степени можно управлять путем варьирования пространственных и электронных характеристик мостиковых лигандов, а также переключением степеней окисления иона железа. Из наиболее нестандартных областей потенциального применения Fe-Li-соединений следует выделить их использование в качестве металлирующих агентов, способных селективно отщеплять протоны в частично замещенных фтораренах [9]. Значительно чаще Fe-Li-соединения исследуются в качестве перспективных прекурсоров при создании катодов для Li-ионных батарей [10], структурных аналогов неорганических перовскитов [11] или фрустрированных магнитных фаз [12].

Карбоксилатные лиганды являются удобной полифункциональной платформой для создания и исследования новых полиядерных архитектур [13–25], в том числе построенных за счет связывания RCOO-групп с катионами железа и лития [26–29]. Несмотря на то что полиядерные гетеро-

металлические карбоксилаты, содержащие атомы s- и d-металлов, изучаются достаточно интенсивно [30–37], нам удалось найти в Кембриджском банке структурных данных (версия 5.43 с обновлением в марте 2022 г.) лишь 19 комплексов, структурно охарактеризованных Fe-Li-карбоксилатов. При этом основной проблемой для химиков-синтетиков, работающих в этой области, является склонность ионов железа(II) к окислительному гидролизу [38], приводящему к формированию сложных оксидов и гидроксидов [26, 39, 40].

В настоящей работе представлены результаты по синтезу и исследованию строения гетерометаллических Fe(II)-Li(I)-пивалатных комплексов с тетраядерным $\{\text{Fe}_2\text{Li}_2\}$ -металлоостовом, стабилизированным координацией нейтральных N-донорных лигандов (пиридина (Py) и 1,10-фенантролина (Phen)).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез и выделение целевых продуктов проводили в инертной среде с использованием стандартной техники Шленка. Ацетонитрил (х. ч., Химмед) сушили над оксидом фосфора(V), хранили над активированными молекулярными ситами (4 Å), отбирали конденсацией непосредственно перед

синтезом. Пивалаты лития и калия получали по известным методикам [41, 42]. Перед введением в реакцию с сульфатом железа(II) пивалат калия нагревали при 140°C на масляной бане в течение суток в динамическом вакууме. Пивалат железа(II) $[\text{Fe}(\text{Piv})_2]_n$ получали по обменной реакции из $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и KPiv в дегазированном этиловом спирте без доступа воздуха перемешиванием в течение 3 сут при комнатной температуре; образующийся осадок сульфата калия отфильтровывали после замены растворителя на ацетонитрил и добавления избытка пиридина или эквимолярного количества 1,10-фенантролина для формирования растворимых комплексов железа предполагаемого состава $[\text{Fe}_2(\text{Piv})_4(\text{Py})_2]$ или $[\text{Fe}(\text{Piv})_2(\text{Phen})]$ [43]. Коммерчески доступные гидроксид лития $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ и ацетат калия (х. ч., Русхим), $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, пиридин (х. ч., Химмед), HPiv (х. ч., Alfa Aesar), Phen (х. ч., Aldrich) использовали без предварительной очистки.

ИК-спектры соединений регистрировали в диапазоне 400–4000 см^{-1} на спектрофотометре Perkin Elmer Spectrum 65, оснащенный приставкой Quest ATR Accessory (Specac), методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Элементный анализ выполняли на автоматическом C,H,N,S-анализаторе EuroEA-3000 (EuroVektor).

Синтез $[\text{Fe}_2\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Py})_4]$ (I). В стеклянную ампулу помещали навеску пивалата лития (0.108 г, 1.0 ммоль), дегазировали в динамическом вакууме в течение 10 мин. К приготовленному *in situ* из $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.254 г, 1.0 ммоль) и KPiv (0.280 г, 2.0 ммоль) пивалату железа(II) сконденсировали 10 мл ацетонитрила и добавили избыток пиридина (1 мл, 12.5 ммоль). Реакционную смесь отфильтровывали от сульфата калия, фильтрат желтого цвета приливали к пивалату лития. Ампулу запаивали и нагревали на масляной бане при температуре 110°C в течение 8 ч до полного растворения пивалата лития и образования прозрачного раствора желтого цвета. Дальнейшее охлаждение реакционной смеси и выдержка при –18°C в течение 24 ч привели к образованию желтых кристаллов. Выход 0.382 г (73%).

Найдено, %: C, 57.22; H, 7.01; N, 5.28.

Для $\text{C}_{50}\text{H}_{74}\text{N}_4\text{O}_{12}\text{Li}_2\text{Fe}_2$

вычислено, %: C, 57.26; H, 7.11; N, 5.34.

ИК-спектр (НПВО; ν , см^{-1}): 2958 см^{-1} , 2915 см^{-1} , 2864 см^{-1} , 1579 см^{-1} , 1557 см^{-1} , 1481 см^{-1} , 1444 см^{-1} , 1409 см^{-1} , 1359 см^{-1} , 1224 см^{-1} , 1152 см^{-1} , 1071 см^{-1} , 1033 см^{-1} , 1005 см^{-1} , 939 см^{-1} , 898 см^{-1} , 791 см^{-1} , 754 см^{-1} , 701 см^{-1} , 603 см^{-1} , 559 см^{-1} , 409 см^{-1} .

Синтез $[\text{Fe}_2\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Phen})_2] \cdot 2(\text{CH}_3\text{CN})$ (II) $\cdot 2(\text{CH}_3\text{CN})$. В стеклянную ампулу помещали навеску пивалата лития (0.108 г, 1.0 ммоль), дегазировали в динамическом вакууме в течение 10 мин.

К приготовленному *in situ* из $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.254 г, 1.0 ммоль) и KPiv (0.280 г, 2.0 ммоль) пивалату железа(II) сконденсировали 10 мл ацетонитрила и добавляли Phen. Реакционную смесь рыжего цвета отфильтровывали от сульфата калия, фильтрат приливали к пивалату лития. Ампулу запаивали, нагревали на масляной бане при температуре 110°C в течение 10 ч, дальнейшее охлаждение до комнатной температуры приводило к образованию кристаллов зеленого цвета. Выход 0.493 г (84%).

Найдено, %: C, 59.21; H, 6.34; N, 7.09.

Для $\text{C}_{58}\text{H}_{76}\text{N}_6\text{O}_{12}\text{Li}_2\text{Fe}_2$

вычислено, %: C, 59.30; H, 6.52; N, 7.15.

ИК-спектр (НПВО; ν , см^{-1}): 3062 см^{-1} , 2958 см^{-1} , 2918 см^{-1} , 2867 см^{-1} , 2253 см^{-1} , 1576 см^{-1} о.с., 1481 см^{-1} , 1406 см^{-1} , 1359 см^{-1} , 1224 см^{-1} , 1146 см^{-1} , 1096 см^{-1} , 1030 см^{-1} , 933 см^{-1} , 892 см^{-1} , 845 см^{-1} , 795 см^{-1} , 723 см^{-1} , 600 см^{-1} , 556 см^{-1} , 434 см^{-1} о.с., 421 см^{-1} о.с., 403 см^{-1} .

РСА монокристаллов изученных соединений проведен на автоматическом дифрактометре Bruker D8 Venture, оборудованном CCD-детектором (графитовый монохроматор; MoK_α -излучение, $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$; ω - и ϕ -сканирование) при температуре 100 К. Выполнен полуэмпирический учет поглощения с помощью программы SADABS [44]. Структуры расшифрованы и уточнены вначале в изотропном, затем в анизотропном приближении по программе SHELXL-2018/3 [45] с использованием OLEX2 [46]. Атомы водорода помещены в геометрически рассчитанные положения и включены в уточнение по модели “наездника”. Кристаллографические параметры и детали уточнения структур приведены в табл. 1.

Полный набор рентгеноструктурных параметров структур I, II $\cdot 2\text{CH}_3\text{CN}$ депонирован в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2220576, 2220577 соответственно; deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полиядерные комплексы $[\text{Fe}_2^{\text{II}}\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Py})_2]$ (I) и $[\text{Fe}_2^{\text{II}}\text{Li}_2(\text{Piv})_6(\text{Phen})_2]$ (II) получены по реакции соответствующих пивалатных комплексов железа(II) с азотсодержащим основанием (Py или Phen) и пивалатом лития при температуре 110°C в течение 8–10 ч в растворе ацетонитрила (схема 1).

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

Параметр	Значение	
	I	II
Брутто-формула	$2(\text{C}_{50}\text{H}_{74}\text{N}_4\text{O}_{12}\text{Li}_2\text{Fe}_2)$	$\text{C}_{54}\text{H}_{70}\text{N}_4\text{O}_{12}\text{Li}_2\text{Fe}_2 \cdot 2(\text{C}_2\text{H}_3\text{N})$
M	2097.42	1174.82
Сингония, пр. группа	Triclinic, $P\bar{1}$	Triclinic, $P\bar{1}$
a , Å	12.639(2)	11.9192(5)
b , Å	14.055(2)	12.0100(6)
c , Å	17.879(3)	12.4795(5)
α , град	80.098(6)	61.385(1)
β , град	80.169(6)	79.953(2)
γ , град	67.402(6)	84.589(1)
V , Å ³	2869.4(8)	1544.07(12)
Z	1	1
μ , мм ⁻¹	0.56	0.53
Размеры кристалла, мм	$0.15 \times 0.11 \times 0.02$	$0.18 \times 0.15 \times 0.11$
$T_{\min}$, $T_{\max}$	0.271, 0.381	0.304, 0.381
Число измеренных отражений	17003	23836
Число независимых отражений	9830	7796
Число отражений с $I > 2\sigma(I)$	6993	6863
R_{int}	0.052	0.036
$R_1/wR(F^2)$, ($I > 2\sigma(I)$)	0.0845/0.2385	0.0320/0.0801
$R_1/wR(F^2)$, (по всем отражениям)	0.1163/0.2598	0.0384/0.0833
Число уточняемых параметров	688	384
Остаточная электронная плотность max/min, e Å ⁻³	1.25, -1.06	0.54, -0.41

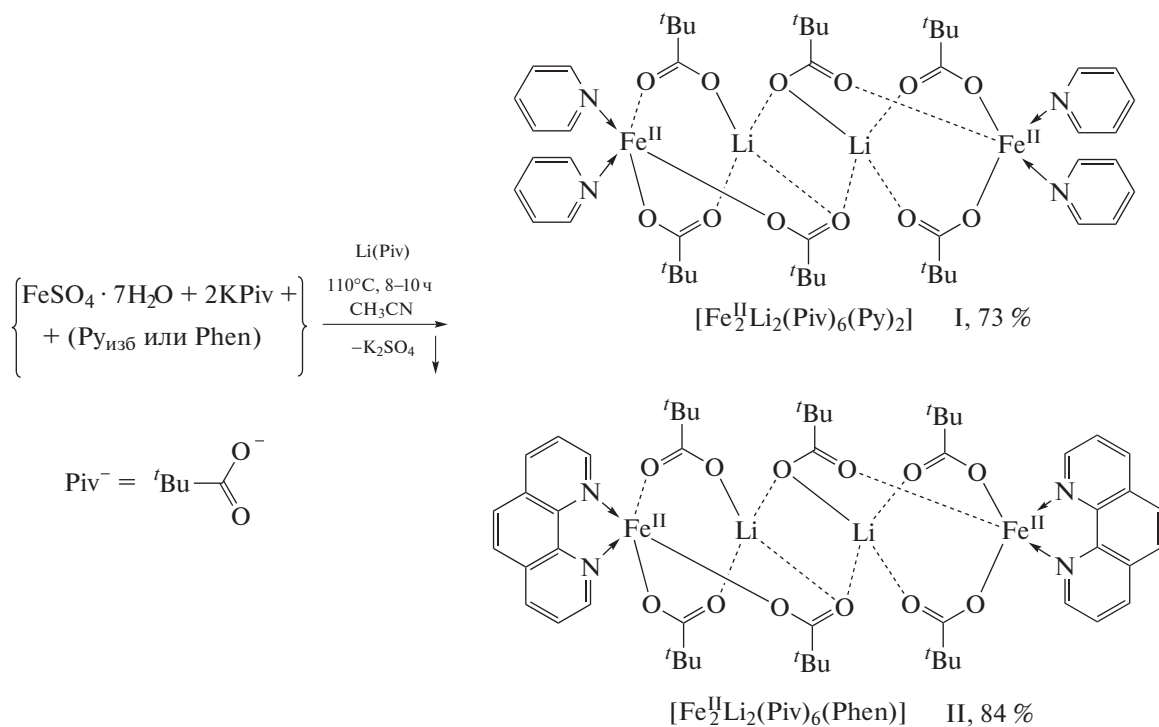


Схема 1.

Комплексы были выделены из реакционной смеси после ее охлаждения в виде желтых (I) и зеленых (II) монокристаллов. Строение соединений I и II установлено методом РСА (рис. 1). В кристалле молекулы комплексов centrosymmetricheskie, при этом в кристаллической ячейке комплекса I содержится две кристаллографически независимые молекулы. Кристаллы соединения II содержат по две сольватные молекулы ацетонитрила на одну молекулу комплекса.

В обоих комплексах центральные атомы железа Fe(1) находятся в искаженном октаэдрическом лигандном окружении, образованном четырьмя атомами кислорода трех пивалатных лигандов и двумя атомами азота концевых донорных лигандов (два Ru или Phen соответственно), а атомы лития Li(1) — в слабоискаженном тетраэдрическом окружении четырех атомов кислорода карбоксильных групп (рис. 2). Заметим, что в ранее описанных полиядерных Fe(III)-Li оксокарбоксилатах металлоостов формально описывается как $\{Fe_4Li_2O_2\}$. Такой металлоостов содержит три различных вида мостиковых карбоксилатов (шесть O,O' - μ^2 -, два O,O' - μ^2 - и два O,O' - μ^3 -карбоксилата) и близок к строению других известных гексаполи-

ядерных карбоксилатов типа $[M'_2M''_4(O)_2(O_2CR)_{10}L_4]$ ($M' = Fe(III), Mn(III)$; $M'' = Mn(II), Fe(II), Co(II), Ni(II)$) [47–49]. В отличие от упомянутых оксокарбоксилатов, металлоостов комплексов I и II описывается составом $\{Fe_2Li_2\}$ и содержит два вида пивалатных лигандов: два O,O' - μ^2 - и четыре O,O,O' - μ^3 -пивалата (в двух из них мостиковый атом кислорода связывает два атома лития и в двух других — атом железа и атом лития).

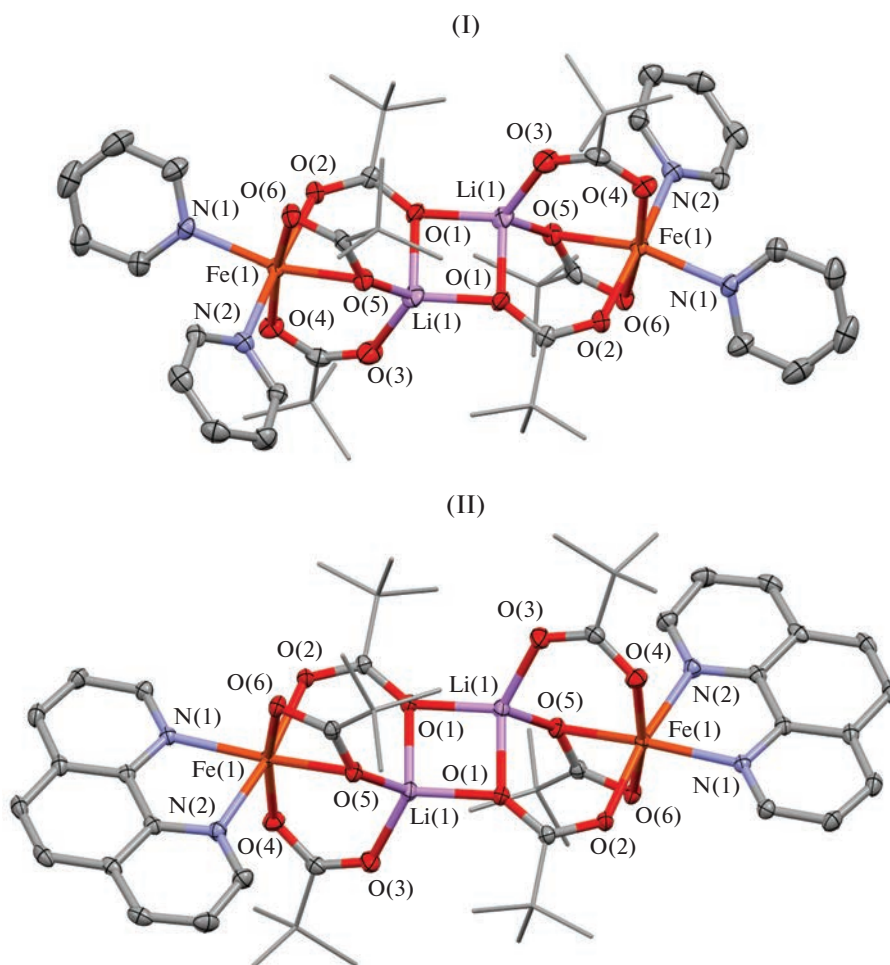


Рис. 1. Молекулярное строение комплексов I и II в кристаллическом состоянии по данным РСА. Эллипсоиды 50%-ной вероятности (атомы углерода *трет*-бутильных групп показаны без эллипсоидов). Атомы водорода не показаны. Некоторые длины связи (Å): Fe(1)–N(1) 2.158(5), Fe(1)–N(2) 2.161(5), Fe(1)–O(2) 2.129(4), Fe(1)–O(4) 2.027(4), Fe(1)–O(5) 2.252(4), Fe(1)–O(6) 2.178(4), Li(1)–O(1) 1.973(13), Li(1)–O(3) 1.881(11), Li(1)–O(5) 1.909(11), Li(1)–O(1') 1.914(11) (I); Fe(1)–N(1) 2.159(1), Fe(1)–N(2) 2.190(1), Fe(1)–O(2) 2.078(1), Fe(1)–O(4) 2.020(1), Fe(1)–O(5) 2.236(1), Fe(1)–O(6) 2.232(1), Li(1)–O(1) 2.024(2), Li(1)–O(3) 1.915(2), Li(1)–O(5) 1.922(2), Li(1)–O(1') 1.937(2) (II).

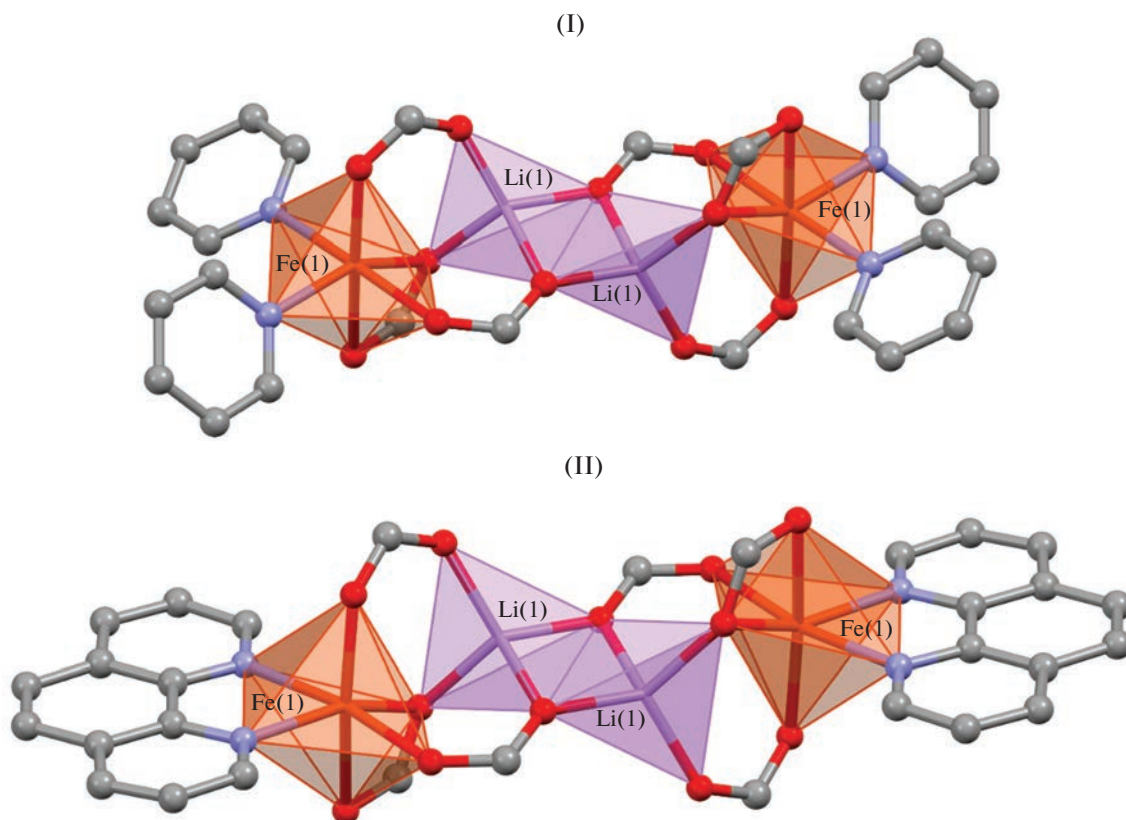


Рис. 2. Полиэдры FeO_4N_2 и LiO_4 в комплексах I и II.

Таким образом в обоих соединениях все карбоксилатные лиганды являются мостиковыми и связывают за счет атомов кислорода ионы железа Fe(1) и лития Li(1) . При этом связи $\text{Fe(1)}-\text{O(2)}$ и $\text{Fe(1)}-\text{O(4)}$ с немостиковыми атомами O (2.129(4) и 2.027(4) Å в I и 2.078(1) и 2.020(1) Å в II) несколько короче связи $\text{Fe(1)}-\text{O(5)}$ с мостиковым атомом O (2.252(4) Å в I и 2.236(1) Å в II). Эти связи $\text{Fe}-\text{O}$ в I и II длиннее, чем в родственных полиядерных железо(III)-литиевых пивалатных комплексах, например $[\text{Fe}_3^{\text{III}}\text{Li}_2(\text{Piv})_{10}(\mu\text{-O})_2(\text{H}_2\text{O})_2]$ (1.988–2.063 Å) [28], $[\text{Fe}_6^{\text{III}}\text{Li}_5(\text{tBuPO}_2)_6(\text{Piv})_8(\mu\text{-O})_2(\text{MeOH})_2]$ (1.96–2.05 Å) [1], что может быть результатом существенного уменьшения делокализации электронной плотности в карбоксилатном фрагменте $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}=\text{O}$ по сравнению с наличием обычно делокализованного карбоксилатного фрагмента OCO в соединениях с мостиковыми или полумостиковыми анионами карбоновых кислот [50–52]. С другой стороны, связи $\text{Fe}-\text{O}$ в среднем соответствуют аналогичным связям в полиядерных карбоксилатных комплексах железа(II), например в $[\text{Fe}_2^{\text{II}}\text{Li}_2(\text{L})_6]$ ($\text{L} = \mu\text{-трет-бутил-3-окси-бут-2-еноат}$) (2.04–2.22 Å) [53].

В кристалле I молекулы комплекса связаны друг с другом ван-дер-ваальсовыми и $\text{C}-\text{H}\cdots\text{O}$ -взаимодействиями (табл. 2). В кристалле II, помимо внутри и межмолекулярных контактов $\text{C}-\text{H}\cdots\text{O}$, между молекулами комплекса реализуются $\text{C}-\text{H}\cdots\pi$ - и $\pi\cdots\pi$ -взаимодействия (табл. 2). При этом в кристалле наблюдаются стеклинг-взаимодействия между пиридинным и фенильным циклами координированных молекул Phен соседних молекул, что приводит к формированию супрамолекулярной цепочки (рис. 3).

Таким образом, нами предложены новые эффективные методики синтеза неизвестных ранее молекулярных пивалатов с ионами железа(II) и лития в соотношении 2 : 2 (комплексы I и II) с выходом более 70%, а также установлено молекулярное и кристаллическое строение этих продуктов. Заметим, что новые комплексы железа(II) с металлоостовом $\{\text{Fe}_2\text{Li}_2\}$ дополняют серию известных архитектур с ионами кобальта(II), никеля(II), меди(II), цинка(II) и кадмия(II) [54–56] и представляют интерес в качестве объектов исследования магнитных и каталитических свойств.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Таблица 2. Основные параметры внутри- и межмолекулярных взаимодействий в I и II (Cg – центроид ароматического кольца, H/C...Cg – расстояние от атома до центра цикла, C–H–π – угол между связью C–H и плоскостью цикла, Cg_I–Cg_J – расстояние между центроидами колец I и J, α – угол между плоскостями колец, Cg_I–perp – расстояние, определенное как перпендикуляр, опущенный от Cg_I на плоскость кольца J, Slippage – расстояние между Cg_I и перпендикулярной проекцией Cg_J на кольцо I)

Тип взаимодействия		Параметры			
I					
C–H...A	Элемент симметрии	D–H, Å	H...A, Å	D...A, Å	Угол DHA, град
C(24A)–H...O(6A)	$-x, 2 - y, 1 - z$	0.95	2.42	3.357(8)	169
C(24B)–H...O(2A)	$1 - x, 1 - y, 1 - z$	0.95	2.51	3.399(11)	155
II					
C–H...A	Элемент симметрии	D–H, Å	H...A, Å	D...A, Å	Угол DHA, град
C(5)–H...O(3)	x, y, z	0.98	2.58	3.4922(19)	155
C(1S)–H...O(6)	x, y, z	0.98	2.44	3.079(2)	123
C(17)–H...O(4)	$-x, 1 - y, 1 - z$	0.95	2.57	3.4107(18)	147
C(24)–H...N(1S)	$x, y, 1 + z$	0.95	2.59	3.241(2)	126
C–H...π	Элемент симметрии	H...Cg, Å	C...Cg, Å	C–H–Cg, град	γ, град
C(3)–H...Cg, где Cg – центроид кольца N(1)C(16)C(17)C(18)C(19)C(27)	$1 + x, y, z$	2.81	3.767(2)	166	9.36
π...π	Элемент симметрии	Cg _I –Cg _J , Å	α, град	Cg _I ⊥регр, Å	γ, град
Cg _I ...Cg _J , где кольцо <i>I</i> – N(2)C(25)C(24)C(23)C(23)C(26), кольцо <i>J</i> – C(19)C(20)C(21)C(22)C(23)C(26)C(27)	$-x, -y, 2 - z$	3.7005(10)	0.89(8)	3.3190(7)	26.2

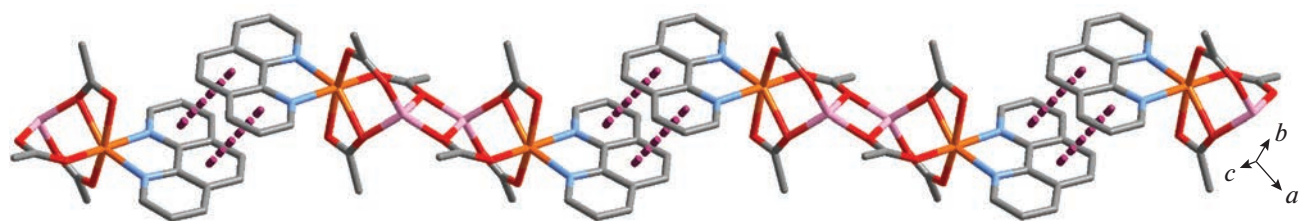


Рис. 3. Фрагмент упаковки молекул II в кристалле (π...π-взаимодействия показаны пунктиром; атомы H, Me-группы и сольватные молекулы не показаны).

БЛАГОДАРНОСТИ

РСА, элементный анализ и ИК спектроскопия выполнены с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-13-00436-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khanra S., Helliwell M., Tuna F. et al. // Dalton Trans. 2009. P. 6166.
2. Mund G., Vidovic D., Batchelor R.J. et al. // Chem. Eur. J. 2003. V. 9. P. 4757.
3. Chen C., Fröhlich R., Kehr G., Erker G. // Organometallics. 2008. V. 27. P. 3248.
4. Cross R.J., Farrugia L.J., McArthur D.R., Peacock R.D., Taylor D.S.C. // Inorg. Chem. 1999. V. 38. P. 5698.
5. Subban C.V., Ati M., Rousse G. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2013. V. 135. P. 3653.
6. Berben L.A., Long J.R. // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 8459.
7. Scheibitz M., Li H., Schnorr J. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 16319.
8. Martin L., Engelkamp H., Akutsu H. et al. // Dalton Trans. 2015. V. 44. P. 6219.
9. Maddock L.C.H., Kennedy A., Hevia E. // Chimia. 2020. V. 74. P. 866.
10. Yao W., Armstrong A.R., Zhou X. et al. // Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 3483.
11. Clulow R., Bradford A.J., Lee S.L., Lightfoot P. // Dalton Trans. 2019. V. 48. P. 14461.
12. Yao W., Clark L., Xia M. et al. // Chem. Mater. 2017. V. 29. P. 6616.
13. Lutsenko I.A., Yambulatov D.S., Kiskin M.A. et al. // Polyhedron 2021. V. 206. P. 115354.
14. Адонин С.А., Новиков А.С., Федин В.П. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 2. С. 112 (Adonin S.A., Novikov A.S., Fedin V.P. // Russ. J. Coord. Chem. V. 46. P. 119). <https://doi.org/10.1134/S1070328420020013>
15. Nikolaevskii S.A., Petrov P.A., Sukhikh T.S. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2020. V. 508. P. 119643.
16. Сидоров А.А., Кискин М.А., Александров Г.Г. и др. // Коорд. химия. 2016. Т. 42. № 10. С. 581 (Sidorov A.A., Kiskin M.A., Aleksandrov G.G. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2016. V. 42. P. 621). <https://doi.org/10.1134/S1070328416100031>
17. Sidorov A.A., Gogoleva N.V., Bazhina E.S. et al. // Pure Appl. Chem. 2020. V. 92. P. 1093.
18. Adonin S.A., Petrov M.D., Novikov A.S. et al. // J. Clust. Sci. 2019. V. 30. P. 857.
19. Bondarenko M.A., Novikov A.S., Korolkov I.V. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2021. V. 524. P. 120436.
20. Bondarenko M.A., Abramov P.A., Novikov A.S. et al. // Polyhedron. 2022. V. 214. P. 115644.
21. Бондаренко М.А., Адонин С.А. // Журн. структур. химии. 2021. Т. 62. № 8. С. 1339 (Bondarenko M.A., Adonin S.A. // J. Struct. Chem. 2021. V. 62. P. 1251). <https://doi.org/10.1134/S0022476621080114>
22. Zaguzin A.S., Sukhikh T.S., Kolesov B.A. et al. // Polyhedron. 2022. V. 212. P. 115587.
23. Yoshinari N., Konno T. // Coord. Chem. Rev. 2023. V. 474. P. 214850.
24. Yambulatov D.S., Nikolaevskii S.A., Shmelev M.A. et al. // Mendeleev Commun. 2021. V. 31. P. 624.
25. Nikolaevskii S.A., Yambulatov D.S., Voronina J.K. et al. // ChemistrySelect. 2020. V. 5. P. 12829.
26. Li J.-H., Liu H., Wei L., Wang G.-M. // Solid State Sci. 2015. V. 48. P. 225.
27. Lutsenko I.A., Kiskin M.A., Nikolaevskii S.A. et al. // Mendeleev Commun. 2020. V. 30. P. 273.
28. Луценко И.А., Кискин М.А., Александров Г.Г. и др. // Изв. АН. Сер. хим. № 3. С. 0449 (Lutsenko I.A., Kiskin M.A., Alexandrov G.G. et al. // Russ. Chem. Bull. 2018. V. 67. P. 449). <https://doi.org/10.1007/s11172-018-2091-x>
29. Луценко И.А., Кискин М.А., Тугай Я.А. и др. // Коорд. химия. 2022. Т. 48. № 11. С. 704 (Lutsenko I.A., Kiskin M.A., Tigai Y.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2022. V. 48. P. 760). <https://doi.org/10.1134/S1070328422110070>
30. Bazhina E.S., Kiskin M.A., Babeshkin K.A. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2023. V. 544. P. 121238.
31. Bazhina E.S., Kiskin M.A., Korlyukov A.A. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2020. V. 2020. P. 4116.
32. Bazhina E.S., Aleksandrov G.G., Kiskin M.A. et al. // Polyhedron. 2017. V. 137. P. 246.

33. Бажина Е.С., Гоголева Н.В., Зорина-Тихонова Е.Н. и др. // Журн. структур. химии. 2019. Т. 60. № 6. С. 893 (Bazhina E.S., Gogoleva N.V., Zorina-Tikhonova E.N. et al. // J. Struct. Chem. 2019. V. 60. P. 855). <https://doi.org/10.1134/S0022476619060015>
34. Hursthouse M.B., Light M.E., Price D.J. // Angew. Chem. Int. Ed. 2004. V. 43. P. 472.
35. Yao R., Li Y., Chen Y et al. // J. Am. Chem. Soc. 2021. V. 143. P. 17360.
36. Redshaw C., Elsegood M.R.J. // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. V. 46. P. 7453.
37. Mon M., Lloret F., Ferrando-Soria J. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2016. V. 55. P. 11167.
38. Yang F., Xing Y., Deng Z. et al. // Int. J. Chem. React. 2021. V. 19. P. 1103.
39. Li Y.-W., Zhao J.-P., Wang L.-F., Bu X.-H. // Cryst-EngComm. 2011. V. 13. P. 6002.
40. Zeng M.-H., Feng X.-L., Chen X.-M. // Dalton Trans. 2004. P. 2217.
41. Зорина-Тихонова Е.Н., Ямбулатов Д.С., Кискин М.А. и др. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 2. С. 67 (Zorina-Tikhonova E.N., Yambulatov D.S., Kiskin M.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. P. 75). <https://doi.org/10.1134/S1070328420020104>
42. Kiskin M.A., Fomina I.G., Aleksandrov G.G. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2004. V. 7. P. 734.
43. Randall C.R., Shu L., Chiou Y.-M. et al. // Inorg. Chem. 1995. V. 34. P. 1036.
44. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M., Stalke D. // J. Appl. Crystallogr. 2015. V. 48. P. 3.
45. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
46. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
47. Çelenligil-Çetin R., Staples R.J., Stavropoulos P. // Inorg. Chem. 2000. V. 39. P. 5838.
48. Cañada-Vilalta C., Huffman J.C., Streib W.E. et al. // Polyhedron. 2001. V. 20. P. 1375.
49. Li J., Zhang F., Shi Q. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2002. V. 5. P. 51.
50. Фукин Г.К., Самсонов М.А., Баранов Е.В. и др. // Коорд. химия. 2018. Т. 44. № 5. С. 325 (Fukin G.K., Samsonov M.A., Baranov E.V. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2018. V. 44. P. 626). <https://doi.org/10.1134/S1070328418100020>
51. Fukin G.K., Samsonov M.A., Kalistratova O.S., Gushchin A.V. // Struct. Chem. 2016. V. 27. P. 357.
52. Grabowski S.J., Dubis A.T., Martynowski D. et al. // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108. P. 5815.
53. Han H., Wei Z., Barry M.C. et al. // Dalton Trans. 2017. V. 46. P. 5644.
54. Dobrokhotova Z., Emelina A., Sidorov A. et al. // Polyhedron. 2011. V. 30. P. 132.
55. Sapijanik A.A., Kiskin M.A., Kovalenko K.A. et al. // Dalton Trans. 2019. V. 48. P. 3676.
56. Gogoleva N.V., Kuznetsova G.N., Shmelev M.A. et al. // J. Solid State Chem. 2021. V. 294. P. 121842.