

УДК 546.7

НЕОБЫЧНЫЙ ШЕСТИЯДЕРНЫЙ ПИРАЗОЛ-ПИРАЗОЛАТ-ПИВАЛАТ Fe(II, III), ОБРАЗУЮЩИЙСЯ ПРИ η^5, π -СВЯЗЫВАНИИ МОСТИКОВОГО ПИРАЗОЛАТ-АНИОНА С КАТИОНАМИ КАЛИЯ

© 2020 г. М. А. Уварова¹, С. Е. Нефедов¹, *

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

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

Поступила в редакцию 27.09.2019 г.

После доработки 29.09.2019 г.

Принята к публикации 30.09.2019 г.

Реакция водного сульфата железа(II) с пивалатом калия в MeCN с последующим удалением растворителя, растворением остатка в Et₃N и гексане приводит к образованию коричневого раствора и белого осадка. При взаимодействии маточного раствора с избытком 3,5-диметилпиразола (HDmpz) получен гексаядерный комплекс $\{[\text{Fe}_3(\mu^3\text{-O})(\mu\text{-OOC}^t\text{Bu})_4(\text{OOC}^t\text{Bu})_2(\text{HDmpz})(\mu, \eta^5\text{-Dmpz})(\mu\text{-K})]_2 \cdot 2\text{HDmpz}\}$ (I), охарактеризованный методами элементного анализа, ИК-спектроскопии, PCA (CIF file CCDC № 1956015). Комплекс I формируется в результате впервые наблюдаемого в присутствии карбоксилатов железа депротонирования HDmpz, что приводит к возникновению пиразолат-мостикового аниона, собирающего через необычную η^5, π -координацию с катионом калия два трехядерных фрагмента $\text{Fe}_3(\mu^3\text{-O})(\mu\text{-OOC}^t\text{Bu})_4(\text{OOC}^t\text{Bu})_2(\text{HDmpz})$ в шестиядерный кластер.

Ключевые слова: пивалаты железа(II, III), мостиковый пиразолат-анион, η^5, π -координация, катион калия, синтез, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0132344X20020073

Комплексы железа(II, III), содержащие карбоксилат-анионы и координированные гетероциклические молекулы (пиразол или имидазол и их аналоги) во многих случаях рассматриваются как структурные аналоги активной части природных металлоферментов, отвечающих за различные каталитические процессы, прежде всего за реакции окисления-восстановления H₂O до H₂, CO₂ до CO, N₂ до NH₃ и O₂ до H₂O и др. [1–8].

Кроме того, такие комплексы активно изучаются в качестве потенциальных молекулярных магнетиков, катализаторов различных химических реакций, а также исходных соединений для синтеза необычных гомо-, гетерометаллических материалов, в том числе мелкодисперсных различной размерности, получаемых в результате восстановления в атмосфере водорода или термолита [9–11].

Ранее было обнаружено, что гетероциклический 3,5-диметилпиразол (HDmpz) в мягких условиях может депротонироваться в присутствии простейших димеров-фонариков M₂(μ-OOC^tBu)₄(NEt₃)₂ (M = Zn, Co(II)) с образованием пиразолат-мостиковых димеров M₂(μ-Dmpz)₂(HDmpz)₂(OOC^tBu)₂, при протонировании которых сильной трифторметансульфоновой кислотой образуются

комплексы [M₂(μ-OOC^tBu)₂(HDmpz)₄]Otf₂, содержащие координационный узел MO₂N₂, присутствующий в активной части природных металлоферментов [12].

В настоящей работе рассмотрен подход для получения пиразолат-мостиковых комплексов на основе пивалата железа(II), изучено строение продукта реакции водного сульфата железа с пивалатом калия в ацетонитриле и последующей реакции с триэтиламинном и HDmpz – $\{[\text{Fe}_3(\mu^3\text{-O})(\mu\text{-OOC}^t\text{Bu})_4(\text{OOC}^t\text{Bu})_2(\text{HDmpz})(\mu, \eta^5\text{-Dmpz})(\mu\text{-K})]_2 \cdot 2\text{HDmpz}\}$ (I).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все операции по синтезу и выделению комплекса проводили в атмосфере чистого аргона с использованием абсолютных растворителей.

Синтез комплекса I. Сухие порошки FeSO₄ · 7H₂O (1.00 г, 3.60 мМ) и KOOC^tBu (0.76 г, 5.42 мМ) помещали в двугорлую колбу, вакуумировали и растворяли в 20 мл абсолютного ацетонитрила. Полученный слабо-окрашенный коричневый раствор отфильтровывали от белого осадка. Фильтрат концентрировали досуха в вакууме водоструйного насоса и добавляли последовательно

Таблица 1. Кристаллографические параметры и детали уточнения структуры комплекса I

Параметр	Значение
<i>M</i>	2433.77
Цвет	Коричневый
<i>T</i> , К	150(2)
Сингония	Триклинная
Пр. гр.	$P\bar{1}$
<i>a</i> , Å	11.448(2)
<i>b</i> , Å	14.618(3)
<i>c</i> , Å	21.660(4)
α , град	90.78(3)
β , град	97.58(3)
γ , град	110.31(3)
<i>V</i> , Å ³	3362.8(13)
<i>Z</i>	1
ρ (выч.), мг/м ³	1.202
μ , мм ⁻¹	0.758
<i>F</i> (000)	1288
Размеры кристалла, мм	0.24 × 0.22 × 0.20
Область θ , град	1.48–26.00
Интервалы индексов отражений	$-13 \leq h \leq 14$, $-16 \leq k \leq 18$, $-26 \leq l \leq 26$
Число отражений	12781
Число независимых отражений (<i>R</i> _{int})	3803 (0.1254)
GOOF	0.908
<i>R</i> (<i>I</i> > 2 σ (<i>I</i>))	<i>R</i> ₁ = 0.0763, <i>wR</i> ₂ = 0.1738
<i>R</i> (по всем рефлексам)	<i>R</i> ₁ = 0.2243, <i>wR</i> ₂ = 0.2305
Остаточная электронная плотность (min/max), е/Å ³	0.570/–0.693

1 мл Et₃N (частично растворяется) и 20 мл гексана. Коричневый раствор смешивали с раствором HDmpz (0.53 г, 5.51 мМ) в 5 мл гексана. Реакционную смесь концентрировали до ~15 мл и выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Образовавшиеся при этом коричневые монокристаллы отделяли от маточного раствора декантацией, промывали холодным гексаном и сушили в

токе аргона. Выход монокристаллического продукта 0.3 г (25%).

Найдено (порошок), %: С 48.02; Н 6.95; N 4.88.
Для C₁₀₀H₁₇₀N₁₂O₃₀K₂Fe₆
вычислено, %: С 49.35; Н 7.04; N 6.91.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹): 3021 сл, 2957 сл, 2870 сл, 1591 ср, 1567 ср, 1524 сл, 1483 ср, 1419 с, 1355 ср, 1333 ср, 1304 ср, 1224 с, 1082 с, 1032 с, 784 ср, 735 ср, 659 о.сл, 562 сл.

ИК-спектры кристаллических образцов регистрировали в интервале 4000–550 см⁻¹ в таблетках KBr на ИК-Фурье спектрометре NEXUS фирмы NICOLET с использованием приставки MIRacle фирмы Pike Technologies с алмазным кристаллом.

РСА I выполнен по стандартной методике на автоматическом дифрактометре Bruker SMART Apex II, оборудованном CCD-детектором (MoK α , λ = 0.71073 Å, графитовый монохроматор, ω -сканирование) при *T* = 150 К. Расчет структуры проведен с использованием комплекса программ SHELXTL PLUS (PC версия). Уточнение структур выполнено с использованием программы SHELXTL-97 [13–16]. Разупорядоченная по нескольким позициям сольватная молекула гексана удалена из уточнения программой SQUEEZE. Кристаллографические данные и детали уточнения приведены в табл. 1, основные геометрические параметры изученного комплекса в табл. 2.

Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1956015; deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружено, что реакция водного сульфата железа(II) с пивалатом калия (1 : 2) в ацетонитриле при комнатной температуре с последующим полным удалением растворителя, растворением остатка в триэтилаmine и гексане приводит к образованию коричневого раствора и белого осадка. Взаимодействие полученного раствора с избытком HDmpz и кристаллизация при комнатной температуре дает с выходом 25% коричневые монокристаллы гексаядерного комплекса I.

По данным РСА в независимой части кластера I (рис. 1, табл. 1, 2) три атома железа, расположенные на несвязывающих расстояниях Fe(1)...Fe(2) 3.2767(9), Fe(1)...Fe(3) 3.2501(9), Fe(2)...Fe(3) 3.2834(9) Å соединены тридентато-мостиковым атомом кислорода (Fe(1)–O(15) 1.897(5), Fe(2)–O(15) 1.855(5), Fe(3)–O(15) 1.914(5) Å; отклонение атома O(15) от плоскости Fe₃ 0.030 Å). Атом Fe(2), содержащий в аксиальной позиции молекулу

Таблица 2. Основные длины связей и валентные углы в комплексе I

Связь	$d, \text{Å}$	Связь	$d, \text{Å}$
Fe(1)–O(15)	1.897(5)	Fe(1)–O(7)	1.935(6)
Fe(1)–O(3)	2.003(6)	Fe(1)–O(1)	2.036(6)
Fe(1)–O(5)	2.056(6)	Fe(1)–N(3)	2.105(7)
Fe(2)–O(15)	1.855(5)	Fe(2)–O(11)	1.996(6)
Fe(2)–O(9)	1.995(5)	Fe(2)–O(4)	2.004(6)
Fe(2)–O(2)	2.012(6)	Fe(2)–N(1)	2.152(7)
Fe(3)–O(15)	1.914(5)	Fe(3)–O(13)	1.949(5)
Fe(3)–O(12)	2.007(6)	Fe(3)–O(10)	2.024(6)
Fe(3)–O(6)	2.057(6)	Fe(3)–N(4)	2.084(7)
Fe(3)–K(1)	3.836(3)	K(1)–O(8)	2.593(6)
K(1)–O(14)	2.627(6)	K(1)–O(14)	2.733(6)
K(1)–O(6)	2.812(6)	K(1)–N(4)	2.854(7)
K(1)–N(3)	2.866(7)	K(1)–C(36)	3.126(10)
K(1)–C(39)	3.155(9)	K(1)–C(38)	3.288(9)
K(1)–C(11)	3.291(9)	K(1)–C(13)	3.467(10)
K(1)–C(35)	3.537(11)	O(14)–K(1)	2.627(6)
N(1)–N(2)	1.325(8)	N(3)–N(4)	1.373(8)
N(5)–N(6)	1.322(10)		
Угол	ω , град	Угол	ω , град
O(15)Fe(1)O(7)	170.5(2)	O(15)Fe(1)O(3)	96.9(2)
O(7)Fe(1)O(3)	91.8(2)	O(15)Fe(1)O(1)	94.4(2)
O(7)Fe(1)O(1)	90.0(2)	O(3)Fe(1)O(1)	86.1(2)
O(15)Fe(1)O(5)	87.7(2)	O(7)Fe(1)O(5)	84.6(2)
O(3)Fe(1)O(5)	167.6(2)	O(1)Fe(1)O(5)	82.0(2)
O(15)Fe(1)N(3)	85.1(2)	O(7)Fe(1)N(3)	92.0(3)
O(3)Fe(1)N(3)	84.1(3)	O(1)Fe(1)N(3)	170.1(3)
O(5)Fe(1)N(3)	107.9(3)	O(15)Fe(2)O(11)	96.5(2)
O(15)Fe(2)O(9)	96.5(2)	O(11)Fe(2)O(9)	88.4(2)
O(15)Fe(2)O(4)	91.4(2)	O(11)Fe(2)O(4)	89.3(2)
O(9)Fe(2)O(4)	171.9(2)	O(15)Fe(2)O(2)	93.5(2)
O(11)Fe(2)O(2)	169.5(2)	O(9)Fe(2)O(2)	87.3(2)
O(4)Fe(2)O(2)	93.6(2)	O(15)Fe(2)N(1)	171.0(2)
O(11)Fe(2)N(1)	86.7(3)	O(9)Fe(2)N(1)	92.0(3)
O(4–Fe(2)N(1)	80.2(3)	O(2)Fe(2)N(1)	83.9(3)
O(15–Fe(3)O(13)	178.5(3)	O(15)Fe(3)O(12)	95.0(2)
O(13–Fe(3)O(12)	86.3(2)	O(15)Fe(3)O(10)	92.1(2)
O(13)Fe(3)O(10)	88.6(2)	O(12)Fe(3)O(10)	88.9(2)
O(15)Fe(3)O(6)	92.5(2)	O(13)Fe(3)O(6)	86.2(2)
O(12)Fe(3)O(6)	172.0(2)	O(10)Fe(3)O(6)	88.3(2)
O(15)Fe(3)N(4)	85.0(2)	O(13)Fe(3)N(4)	94.2(2)
O(12)Fe(3)N(4)	93.4(3)	O(10)Fe(3)N(4)	176.4(3)
O(6)Fe(3)N(4)	89.8(2)	O(15)Fe(3)K(1)	101.06(16)
O(13)Fe(3)K(1)	77.51(18)	O(12)Fe(3)K(1)	134.63(17)
O(10)Fe(3)K(1)	131.94(18)	O(6)Fe(3)K(1)	45.61(16)
N(4)Fe(3)K(1)	46.97(19)	O(8)K(1)O(14)	110.2(2)
O(8K(1)O(14)	151.1(2)	O(14)K(1)O(14)	92.81(19)
O(8K(1)O(6)	84.49(19)	O(14)K(1)O(6)	155.03(18)
O(14)K(1)O(6)	68.16(18)	O(8)K(1)N(4)	98.01(19)
O(14)K(1)N(4)	131.7(2)	O(14)K(1)N(4)	77.84(19)
O(6)K(1)N(4)	62.07(19)	O(8)K(1)N(3)	71.90(19)
O(14)K(1)N(3)	133.4(2)	O(14)K(1)N(3)	105.3(2)
O(6)K(1)N(3)	69.6(2)	N(4)K(1)N(3)	27.77(17)

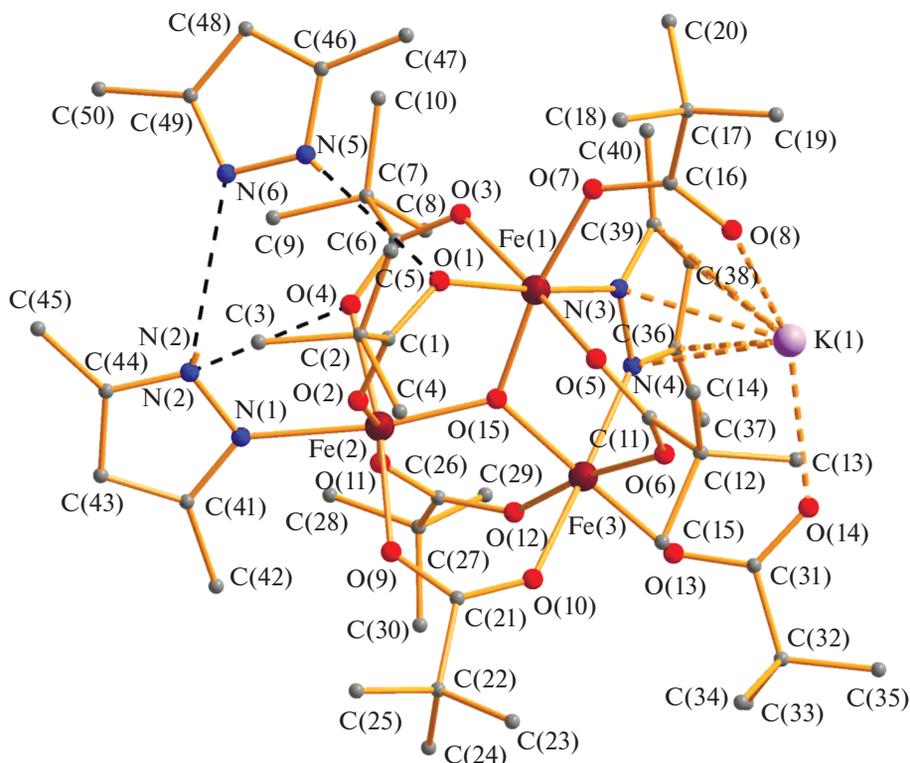


Рис. 1. Структура независимой части комплекса I.

HDmpz (Fe(2)–N(1) 2.152(7) Å), связан с каждым из двух других атомов железа двумя μ -пивалат-анионами (Fe(2)–O 1.996(6)–2.012(6), Fe(1)–O 2.003(6), 2.036(6), Fe(3)–O 2.007(6), 2.024(6) Å) и имеет искаженное октаэдрическое окружение. Аналогичное окружение имеют и атомы Fe(1) и Fe(3), которое помимо μ^3 -атома кислорода и атомов кислорода, принадлежащих пивалатным мостикам (Fe(1)–O(5) 2.056(6), Fe(3)–O(6) 2.057(6) Å), дополнено атомами азота депротонированного мостикового пиразолат-аниона (Fe(1)–N(3) 2.105(7), Fe(3)–N(4) 2.084(7) Å) и атомами кислорода конечного аниона OOC'Bu (Fe(1)–O(7) 1.935(6), Fe(3)–O(13) 1.949(5) Å). Некоординированные атомы кислорода конечных пивалат-анионов имеют контакты с катионом калия (K(1)⋯O(8) 2.593(6), K(1)–O(14) 2.733(6) Å), который координирован по η^5, π -типу с делокализованной электронной π -плотностью мостикового Dmpz (K(1)⋯N 2.854(7), 2.866(7), K(1)⋯C 3.126(10)–3.288(9) Å). Длина связи азот–азот в пиразолат-анионе (1.373(8) Å) заметно увеличена по сравнению с длинами связей в координированном (1.325(8) Å) и сольватном пиразолах (1.322(10) Å). Катион калия связан также с атомом кислорода O(14) (K(1)–O(14) 2.627(6) Å), принадлежащем другой молекуле треугольника Fe₃, формируя шестиядерный кластер I (рис. 2).

В кристаллической ячейке комплекса I присутствуют две сольватные молекулы пиразола, NH-фрагменты которых образуют водородные связи с атомом кислорода мостикового пивалат-аниона (N(5)⋯O(1) 2.899(8) Å). Пиррольные атомы азота связаны с NH-фрагментами координированного Dmpz (N(6)⋯N(2) 3.164(11) Å), соединенного, в свою очередь, с атомом кислорода мостикового карбоксилата (N(2)⋯O(4) 2.830(9) Å) (рис. 1).

В кристалле молекулы локализованы и не образуют заметных контактов (рис. 3).

Структурно охарактеризованные комплексы карбоксилатов железа, содержащие мостиковые пиразолат-анионы, не известны. Однако ряд соединений с другими анионами получен в ходе реакций галогенидов железа(II, III) с пиразолатами щелочных металлов, а также в результате депротонирования пиразолов посредством синтеза. Так, при взаимодействии Fe(NO)I с NaDmpz образуется пиразолат-мостиковый димер Fe₂(μ -Dmpz)₂(NO)₄ с длинами связей Fe–N 2.009(5) Å и расстоянием металл–металл 3.3359(3) Å [17]. Депротонирование незамещенного пиразола (HPz) ферроценом в вакууме при 145°C в течение 5 сут приводит к образованию пиразолат-мостикового полимера незамещенного пиразола [Fe(Pz)₂]_n (Fe–N 2.027(1) Å) [18]. Синтезированы трехядерные комплексы железа(III) Fe₃(μ^3 -O)(μ -4-RPz)₆X₃ (R = NO₂, X = Br [19], NCS [20]), четырехядерные комплексы

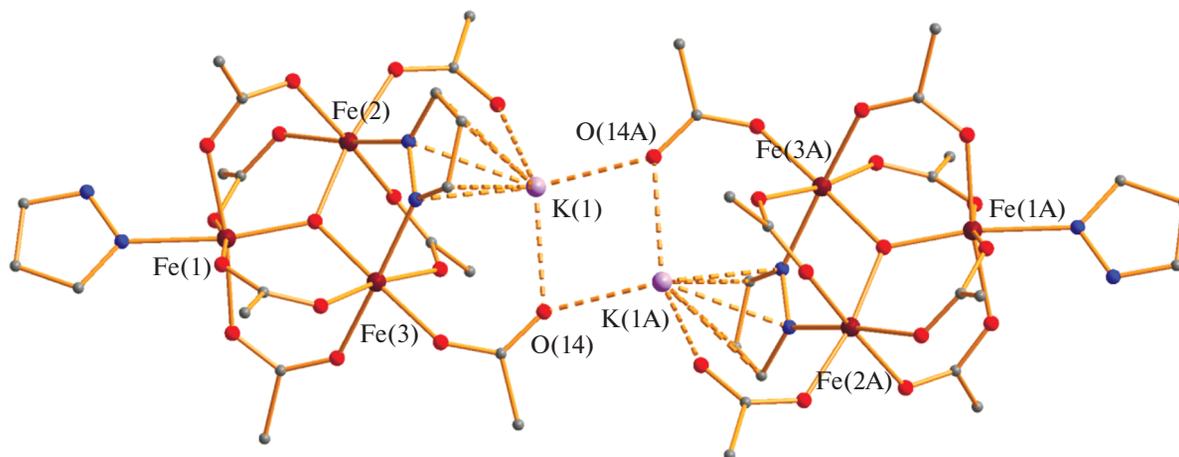


Рис. 2. Строение кластера I. Для ясности в *tert*-бутильных заместителях карбоксилат-анионов показаны только опорные атомы углерода, опущены метильные заместители HDmpz и атомы водорода. Цвет атомов: кислород – красный, азот – синий, углерод – серый.

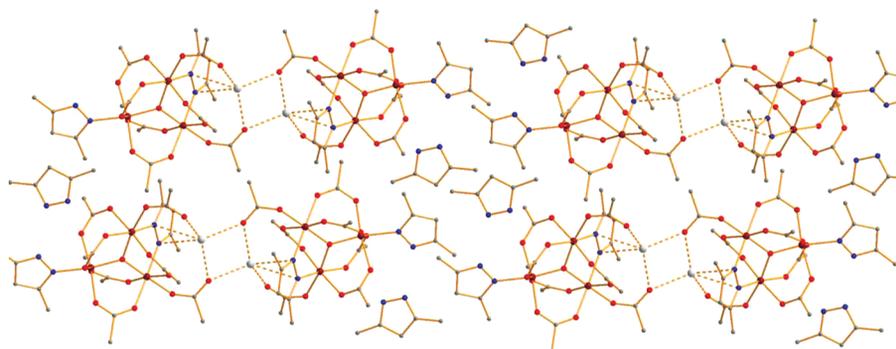


Рис. 3. Упаковка молекул комплекса I в кристалле. Для ясности в *tert*-бутильных заместителях карбоксилат-анионов показаны только опорные атомы углерода. Цвет атомов: железо – коричневый, кислород – красный, азот – синий, углерод – серый.

$[\text{LFe}_3(\mu\text{-}3\text{-PhPz})_3\text{OFe}][\text{OTf}]_2$ (L = лиганд на основе 1,3,5-триарилбензольного фрагмента [21]), а также пиразолат-мостиковые кластеры, содержащие кубановый металлоостов $\text{Fe}_4(\mu^3\text{-O})_4$, $\text{Fe}_8(\mu^4\text{-O})_4(\mu\text{-Pz})_{12}\text{Cl}_4$ [22], $\text{Fe}_8(\mu^4\text{-O})_4(\mu\text{-}4\text{-RPz})_{12}\text{X}_4$, (X = Cl, Br; R = H, Me, Cl, 'Bu) [23–25].

Показано, что реакции карбоксилатов железа(II), содержащих стерически нагруженные анионы 2,6-ди(*para*-толил)бензоат и 2-фенилбензоат с HDmpz, приводят к образованию моноядерных и биядерных комплексов со структурой китайского фонарика и координированными молекулами пиразола. Такие комплексы рассматриваются как структурные аналоги активной части природных металлоферментов [26–29].

Известно также, что пиразолат-анионы могут выступать в качестве η^5, π -лигандов, например, в соединениях $[\text{Na}(\text{Dmpz})(\text{Thf})_4]$, $[\text{Na}\{\text{Al}(\text{Dmpz})_2\text{Me}_2\}]_n$

[28]; $\text{Na}(\eta^6\text{-PhMe})\{\text{Ln}(3,5\text{-}'\text{Bu}_2\text{Pz})_4\}$ (Ln = Tb, Ho), $[\text{K}(\eta^6\text{-PhMe})\{\text{Ln}(3,5\text{-}'\text{Bu}_2\text{Pz})_4\}] \cdot 2\text{PhMe}$ (Ln = La, Sm, Tb, Yb, Lu) (K–N 2.83(1)–3.01(1), K–C 3.07(1)–3.41(1) Å [30]; $\text{K}[(\text{OC})_3\text{Mn}(\mu\text{-Pz})_3\text{Mn}(\text{CO})_3]$, где катион калия является мостиковым и связан с четырьмя мостиковыми пиразолат-анионами двух димеров Mn_2 (K–центр Pz 2.903–3.371 Å) [31]; $(\text{Thf})_6\text{Ba}_6(\text{Dmpz})_8\{(\text{OSiMe}_2)_2\text{O}\}_2$ [32]. Отметим, что расстояния K– η^5, π -RPz в исследованных комплексах вполне соответствуют расстояниям в исследованном кластере I.

Таким образом, в результате проведенных исследований обнаружено, что одним из конечных продуктов реакции водного сульфата железа(II) с пивалатом калия в присутствии Et_3N как депротонирующего агента и HDmpz в мягких условиях является не ожидаемый биядерный комплекс $\text{M}_2(\mu\text{-Dmpz})_2(\text{HDmpz})_2(\text{OOC}'\text{Bu})_2$, аналог ком-

плексов цинка и кобальта, а необычный кластер $\{[\text{Fe}_3(\mu^3\text{-O})(\mu\text{-OOC'Bu})_4(\text{OOC'Bu})_2(\text{HDmpz})(\mu,\eta^5\text{-Dmpz})(\mu\text{-K})]_2 \cdot 2\text{HDmpz}\}$, возникающий в результате частичного окисления атомов металла, связанных с сильными донорными пивалат-анионами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Рентгеноструктурные исследования комплексов выполнены с использованием оборудования ЦКПФМИ ИОНХ РАН, функционирующего при поддержке государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lippard S.J., Berg J.M. Principles of Bioinorganic Chemistry. Mill Valley (CA, USA): University Science Books, 1994.
- Solomon E.I., Sundaram U.M., Machonkin T.E. // Chem. Rev. 1996. V. 96. P. 2563. <https://doi.org/10.1021/cr950046o>
- Dance I.Z., Lubitz W. // Anorg. Allg. Chem. 2015. V. 641. P. 91. <https://doi.org/10.1002/zaac.201400120>
- Lubitz W., Ogata H., Rüdiger O., Reijerse E. // Chem. Rev. 2014. V. 114. P. 4081. <https://doi.org/10.1021/cr4005814>
- Kaim W., Rall J. // J. Angew. Chem., Int. Ed. 1996. V. 35. P. 43. <https://doi.org/10.1002/anie.199600431>
- Holm R.H., Kennepohl P., Solomon E.I. // Chem. Rev. 1996. V. 96. P. 2239. <https://doi.org/10.1021/cr9500390>
- Eady R.R. // Coord. Chem. Rev. 2003. P. 237. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(02\)00248-5](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(02)00248-5)
- Baran P., Boca R., Chakraborty I. et al. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 645. <https://doi.org/10.1021/ic7020337>
- Ruiter G. de, Thompson N.B., Lionetti D. // J. Am. Chem. Soc. 2015. V. 137. P. 14094. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b07397>
- Mehrotra R.C., Bohra R. Metal Carboxylates. London: Acad. Press, 1983. P. 396.
- Cotton F.A., Wilkincon G., Murillo C.A., Bochmann M. Advanced Inorganic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- Kiskin M.A., Eremenko I.L. // Russ. Chem. Rev. 2006. V. 75. P. 559. <https://doi.org/10.1070/RC2006v075n07ABEH003636>
- Nefedov S.E. // Russ. J. Inorg. Chem. 2006. V. 51. Suppl. 1. P. S49. <https://doi.org/10.1134/S0036023606130031>
- SMART (control) and SAINT (integration) Software. Version 5.0. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1997.
- SAINT: Area-Detector Integration Software. Madison (WI, USA). Bruker AXS Inc., 2012.
- Sheldrick G.M. SADABS. Program for Scaling and Correction of Area Detector Data. Göttingen (Germany): Univ. of Göttingen, 1997.
- Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
- Chong K.S., Rettig S.J., Storr A., Trotter J. // Can. J. Chem. 1979. V. 57. P. 3119. <https://doi.org/10.1139/v79-509>
- Patrick B.O., Reiff W.M., Sanchez V.A. et al. // Polyhedron 2001. V. 20. P. 1577. [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(01\)00657-X](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(01)00657-X)
- Sameera W.M.C., Pinero D.M., Herchel R. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2012. P. 3500. <https://doi.org/10.1002/ejic.201200206>
- Govor E.V., Al-Ameed K., Chakraborty I. et al. // Angew. Chem., Int. Ed. 2017. V. 56. P. 582. <https://doi.org/10.1002/anie.201610534>
- de Ruiter G., Thompson N.B., Lionetti D., Agapie T. // J. Am. Chem. Soc. 2015. V. 137. P. 14094. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b07397>
- Raptis R.G., Georgakaki I.P., Hockless D.C.R. // Angew. Chem. Int. Ed. 1999. V. 38. P. 1632. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19990601\)38:11<1632::AID-ANIE1632>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19990601)38:11<1632::AID-ANIE1632>3.0.CO;2-O)
- Chakraborty I., Baran P., Sanakis Y., Simopoulos A. et al. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 11734. <https://doi.org/10.1021/ic801459s>
- Baran P., Boca R., Chakraborty I. et al. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 645. <https://doi.org/10.1021/ic7020337>
- Deutscher J., Corona T., Warm K. et al // Eur. J. Inorg. Chem. 2018. V. 45. P. 4925. <https://doi.org/10.1002/ejic.201800269>
- Sungho Yoon, Lippard S.J. // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. P. 2666. <https://doi.org/10.1021/ja031603o>
- Reisner E., Telsler J., Lippard S.J. // Inorg. Chem. 2007. V. 46. P. 10754. <https://doi.org/10.1021/ic701663j>
- Cortes-Llamas S., Velazquez-Carmona M.-A., Munoz-Hernandez M.-A. // Inorg. Chem. Commun. 2005. V. 8. P. 155. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2004.11.028>
- Deacon G.B., Delbridge E.E., Evans D.J. et al. // Chem. Eur. J. 2004. V. 10. P. 1193. <https://doi.org/10.1002/chem.200305444>
- Morawitz T., Zhang F., Bolte M. et al. // Organometallics. 2008. V. 27. P. 5067. <https://doi.org/10.1021/om800504r>
- Steiner A., Lawson G.T., Walfort B. et al. // Dalton Trans. 2001. P. 219. <https://doi.org/10.1039/b009121i>