

УДК 541.49;546.725

КОМПЛЕКСЫ ТРИКАРБОНИЛЖЕЛЕЗА НА ОСНОВЕ N,N'-ДИЗАМЕЩЕННЫХ ФЕНАНТРЕНДИИМИНОВ

© 2023 г. Г. Г. Казаков^{1, 2, *}, Н. О. Дружков¹, Е. В. Баранов¹, В. К. Черкасов^{1, 2}

¹Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: gkazakov@iomc.ras.ru

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 23.08.2022 г.

Изучено окислительное присоединение N,N'-дизамещенных фенантрендииминов к карбонилам железа. По реакции акцепторных фенантрендииминов с $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ получены комплексы трикарбонила железа(I) с анион-радикальными формами лигандов. Полученные соединения охарактеризованы методами ЯМР и ИК-спектроскопии, строение комплекса на основе N,N'-бис(3-трифторметилфенил)-фенантрендиимина и лиганда имидазол-2-она установлено с помощью рентгеноструктурного анализа (CCDC № 2173471 и 2173472 соответственно).

Ключевые слова: фенантрендиимин, железо(I), карбонил железа, PCA

DOI: 10.31857/S0132344X22600205, **EDN:** STUFOK

Лиганды α -дииминового ряда применяются для построения широкого спектра металлокомплексов непереходных и переходных элементов. Интерес к подобным лигандам обусловлен их редокс-активностью — они способны обратимо принимать один или два электрона, находясь в координационной сфере металла.

Фенантрендиимины являются малоизученными лигандами в координационной химии, в основном из-за относительно недавнего открытия рациональных путей синтеза [1, 2]. Совокупность расширенной ароматической системы и возможностей регулирования стерических и электронных эффектов позволяет использовать их для стабилизации низковалентных состояний элементов 14–15 групп [3–5]. Комплексы железа с α -дииминовыми лигандами [6–13] представляют интерес в качестве катализаторов для разнообразных химических превращений [9, 14–21]. Сообщений о синтезе фенантрендииминовых комплексов железа на данный момент в литературе нет.

Цель настоящей работы — получение комплексов железа на основе N,N'-дизамещенных 9,10-фенантрендииминов. Для изучения были выбраны диимины, различные по стерической загруженности и электроноакцепторным свойствам: 2,6-ди-*изо*-пропилфенил (**L**¹) — с высокой стерической загруженностью; 2,6-ди-*изо*-пропилфенилзамещенный 2,7-дибромфенантренимин (**L**²), обладающий объемными заместителями и высокой

акцепторностью, и 3-трифторметилфенил (**L**³) — самый электроноакцепторный, но обладающий малой стерической загруженностью (схема 1).

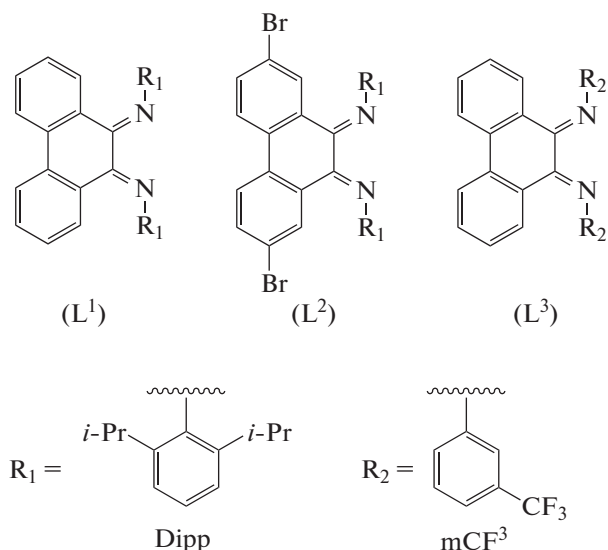


Схема 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез лигандов **L**¹, **L**³ [2] и 2,7-дибромфенантренимина [22] осуществляли согласно литературным методикам. Все операции по синтезу комплексов выполняли в вакуумированной системе. Растворители очищали по стандартным

методикам. ИК-спектры записывали на спектрометре ФСМ1201 в вазелиновом масле в области 4000–400 см^{-1} . Спектры ЯМР записывали на спектрометрах Bruker Avance III (400 МГц) и Avance Neo (300 МГц). Элементный анализ выполняли с использованием Elementar Vario El Cube.

Синтез N,N'-бис(2,6-ди-изо-пропилфенил)-2,7-дибромфенантрен-9,10-диимина (L^2). К раствору 2,7-дибром-9,10-фенантренина 5.0 г (13.66 ммоль) в толуоле (50 мл) при перемешивании с помощью магнитной мешалки добавляли шестикратный избыток 2,6-ди-изо-пропиланилина (15.46 мл, 82 ммоль). К полученному раствору прикапывали TiCl_4 2.99 мл (5.18 г, 27.3 ммоль). Реакцию проводили в течение 4 ч. Органический слой промывали водой до нейтральной реакции. После удаления растворителя продукт выделяли из ацетонитрила. Выход 6.9 г (73.8%).

Найдено, %	C 66.78;	H 5.92;	N 4.06.
Для $\text{C}_{38}\text{H}_{40}\text{N}_2\text{Br}_2$			
вычислено, %	C 66.67;	H 5.89;	N 4.09.

ЯМР ^1H (300 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 8.78 (с., 1H), 7.23–7.29 (м., 1H), 7.20 (с., 1H), 7.01–7.07 (м., 3H), 6.90–7.00 (м., 6H), 2.97 (септ., $J = 6.8$ Гц, 2H), 2.02 (септ., $J = 6.8$ Гц, 2H), 1.12 (д., $J = 6.9$ Гц, 6H), 1.09 (д., $J = 6.9$ Гц, 6H), 0.82 (д., $J = 6.6$ Гц, 6H), 0.75 (д., $J = 6.7$ Гц, 6H).

ЯМР ^{13}C (75 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 156.91, 146.18, 135.18, 135.08, 134.64, 133.84, 132.15, 131.74, 130.49, 130.16, 127.8, 127.55, 125.91, 125.14, 125.02, 124.01, 123.85, 122.59, 29.04, 27.56, 24.61, 23.29, 22.62, 22.25.

ИК-спектр (ν , см^{-1}): 1640 с, 1617 с, 1587 ср, 1486 ср, 1438 с, 1406 ср, 1361 ср, 1322 ср, 1280 с, 1254 с, 1219 ср, 1187 сл, 1168 сл, 1101 сл, 1078 сл, 1057 сл, 1041 сл, 1005 сл, 962 сл, 936 сл, 892 ср, 837 сл, 812 с, 794 ср, 765 с, 760 с, 732 ср, 717 ср, 701 сл, 669 сл, 652 сл, 512 сл, 459 сл.

Синтез комплекса $L^2\text{Fe}(\text{CO})_3$ (I). Раствор 0.2 г (0.292 ммоль) L^2 в толуоле прибавляли к суспензии 0.106 г (0.292 ммоль) $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ в толуоле. Смесь перемешивали в течение 12 ч, цвет изменился с красного на интенсивно бордовый. Толуол и $\text{Fe}(\text{CO})_5$ удаляли при пониженном давлении. Остаток растворяли в гексане. Комплекс выделяли после концентрирования до 2 мл в виде темно-красного порошка. Выход 0.146 г (60.6%).

Найдено, %	C 59.79;	H 4.90;	N 3.38.
Для $\text{C}_{41}\text{H}_{40}\text{N}_2\text{O}_3\text{Br}_2\text{Fe}$			
вычислено, %	C 59.73;	H 4.89;	N 3.40.

ЯМР ^1H (300 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 7.2–7.37 (м., 3H), 6.88–7.10 (м., 9H), 3.03–3.08 (м., 4H), 1.22 (ш.с., 12H), 0.84 (ш.с., 12H).

ЯМР ^{13}C (75 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 211.87, 157.53, 144.31, 141.67, 138.23, 137.81, 129.85, 129.44, 129.01, 128.63, 126.79, 126.33, 126.07, 125.33, 124.64, 124.21, 124.0, 123.56, 119.54, 118.56, 27.95, 23.64, 23.11.

ИК-спектр (ν , см^{-1}): 2044 с, 1979 с, 1967 с, 1588 сл, 1487 ср, 1462 с, 1456 с, 1377 с, 1333 с, 1303 сл, 1277 сл, 1257 сл, 1180 ср, 1167 ср, 1127 ср, 1090 ср, 1068 ср, 999 с, 898 ср, 895 ср, 846 ср, 820 с, 793 ср, 761 с, 725 ср, 698 ср, 667 ср, 623 ср, 609 ср, 585 сл, 570 сл, 541 сл, 521 сл, 506 сл.

Синтез комплекса $L^3\text{Fe}(\text{CO})_3$ (II) и фенантроимидазол-2-она (L^4). Раствор 0.3 г (0.607 ммоль) L^3 в толуоле прибавляли к суспензии 0.110 г (0.303 ммоль) $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ в толуоле. Смесь перемешивали в течение 12 ч, цвет менялся с красного на интенсивно бордовый. Толуол и $\text{Fe}(\text{CO})_5$ удаляли при пониженном давлении. Остаток растворяли в гексане и отфильтровывали от бесцветного порошка (L^4). Комплекс II выделяли после замены растворителя на диэтиловый эфир и концентрирования до 2 мл в виде темно-красных игольчатых кристаллов. Выход II 0.135 г (35%), L^4 – 0.137 г (43.1%) относительно диимина.

Найдено, %	C 58.70;	H 2.54;	N 4.42.
Для $\text{C}_{31}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_3\text{F}_6\text{Fe}$			
вычислено, %	C 58.84;	H 2.57;	N 4.39.

Комплекс II: ЯМР ^1H (400 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 8.03 (д., $J = 8.1$ Гц, 2H), 7.73 (д., $J = 5.2$ Гц, 2H), 7.27 (д., $J = 7.4$ Гц, 2H), 7.15–7.23 (м., 4H), 7.07 (т., $J = 7.6$ Гц, 2H), 6.90 (т., $J = 7.9$ Гц, 2H), 6.77 (т., $J = 7.7$ Гц, 2H).

ЯМР ^{13}C (101 МГц; C_6D_6 ; δ , м.д.): 209.83, 159.21, 148.30, 130.66, 129.95, 127.80, 127.56, 127.04, 126.68, 126.43, 126.00, 124.12, 122.47, 122.39, 122.35, 120.7, 120.67, 120.64.

ИК-спектр (ν , см^{-1}): 2042 с, 1980 с, 1973 с, 1750 сл, 1638 ср, 1618 ср, 1587 ср, 1460 с, 1406 сл, 1378 с, 1280 ср, 1254 сл, 1215 сл, 1168 сл, 1100 сл, 1078 сл, 1056 сл, 1004 сл, 962 сл, 936 ср, 899 сл, 891 ср, 839 сл, 811 с, 795 с, 760 с, 731 ср, 723 с, 669 сл, 664 сл, 631 сл, 587 сл, 568 сл.

Лиганд L^4 : ЯМР ^1H (300 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 8.79 (д., $J = 8.4$ Гц, 2H), 7.90 (с., 2H), 7.7–7.87 (м., 6H), 7.54–7.62 (м., 2H), 7.33–7.42 (м., 2H), 7.24 (д., $J = 8.0$ Гц, 2H).

ЯМР ^{13}C (75 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 154.40, 137.16, 132.32 (кв., $J = 33.3$ Гц), 131.88, 130.35, 128.31, 126.89, 125.71 (д.кв., $J = 11.5, 3.7$ Гц), 125.34, 124.03, 121.71, 121.26, 120.71, 120.61.

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры рентгеноструктурных экспериментов для соединений II и L⁴

Параметр	Значение	
	II	L ⁴
Брутто-формула	C ₃₁ H ₁₆ N ₂ O ₃ F ₆ Fe	C ₂₉ H ₁₆ N ₂ O ₃ F ₆
<i>M</i>	634.31	522.44
<i>T</i> , К	100(2)	100(2)
Кристаллическая система	Триклинная	Моноклинная
Пр. группа	<i>P</i> $\bar{1}$	<i>C</i> 2/ <i>c</i>
<i>a</i> , Å	9.7494(6)	22.9831(10)
<i>b</i> , Å	12.2373(7)	10.2587(5)
<i>c</i> , Å	13.1216(7)	9.6320(4)
α , град	111.594(2)	90
β , град	111.236(2)	96.9224(16)
γ , град	92.218(2)	90
<i>V</i> , Å ³	1329.78(13)	2254.45(17)
<i>Z</i>	2	4
ρ (выч.), мг/м ³	1.584	1.539
μ , мм ⁻¹	0.647	0.128
θ , град	2.28–29.13	2.97–27.48
Число собранных отражений	10 505	14 581
Число независимых отражений	6942	2592
<i>R</i> _{int}	0.0240	0.0496
<i>S</i> (<i>F</i> ²)	1.023	1.053
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ (<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>))	0.0468, 0.1134	0.0506, 0.1105
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ (по всем параметрам)	0.0603, 0.1228	0.0758, 0.1210
$\Delta\rho_{\max}/\Delta\rho_{\min}$, e Å ⁻³	0.653/–0.770	0.330/–0.350

ИК-спектр (ν , см⁻¹): 1695 с, 1611 сл, 1597 сл, 1568 сл, 1520 ср, 1494 ср, 1459 с, 1445 с, 1431 ср, 1396 ср, 1385 ср, 1333 с, 1310 ср, 1285 ср, 1269 ср, 1253 ср, 1200 ср, 1183 ср, 1172 с, 1139 с, 1122 с, 1093 ср, 1066 с, 1050 сл, 1005 сл, 991 сл, 978 сл, 951 сл, 900 сл, 887 сл, 856 ср, 811 ср, 793 сл, 776 сл, 756 ср, 738 с, 717 ср, 700 ср, 667 сл, 658 сл, 650 ср, 614 сл, 550 сл, 528 сл.

Найдено, % С 66.75; Н 3.12; N 5.31.
 Для C₂₉H₁₆N₂O₃F₆
 вычислено, % С 66.67; Н 3.09; N 5.36.

РСА соединений II и L⁴ проведен на монокристалльном дифрактометре Bruker D8 Quest (MoK α -излучение, λ = 0.71073 Å, ϕ - и ω -сканирование). Сбор дифракционных данных, начальное индентирование отражений и уточнение параметров элементарной ячейки произведен с использованием программы APEX3 [23]. Экспериментальные

наборы интенсивностей интегрированы с помощью программы SAINT [24, 25]. Структуры II и L⁴ решены прямыми методами по “dual-space” алгоритму в программе SHELXT [26] и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов по F_{hkl}^2 в анизотропном приближении для неводородных атомов. Атомы водорода помещены в геометрически рассчитанные положения и уточнены изотропно. Расчеты структур проведены с использованием программного пакета SHELXTL [27, 28]. Учет поглощения произведен в программе SADABS [29]. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур II и L⁴ приведены в табл. 1, значения их основных длин связей и углов – в табл. 2.

Структуры депонированы в Кембриджском банке кристаллографических данных (CCDC № 2173471 (II), 2173472 (L⁴); <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/>).

Таблица 2. Основные длины связей (Å) и валентные углы (град) в соединениях II и L⁴

Связь	<i>d</i> , Å	Связь	<i>d</i> , Å
II			
Fe(1)–C(29)	1.803(2)	Fe(1)–N(2)	1.909(2)
Fe(1)–C(30)	1.808(2)	N(1)–C(1)	1.347(3)
Fe(1)–C(31)	1.801(2)	N(2)–C(2)	1.350(3)
Fe(1)–N(1)	1.906(2)	C(1)–C(2)	1.430(3)
L ⁴			
C(15)–O(1)	1.222(3)	N(1)–C(1)	1.405(2)
C(15)–N(1)	1.383(2)	C(1)–C(1A)	1.367(3)
Угол	ω, град	Угол	ω, град
II			
N(1)Fe(1)N(2)	79.44(7)	N(2)Fe(1)C(30)	159.52(10)
N(1)Fe(1)C(30)	92.54(9)	C(31)Fe(1)N(1)	111.17(9)
N(2)Fe(1)C(29)	92.43(9)	C(31)Fe(1)N(2)	104.36(9)
C(29)Fe(1)C(30)	86.35(10)	C(31)Fe(1)C(29)	95.50(10)
N(1)Fe(1)C(29)	153.26(9)	C(31)Fe(1)C(30)	96.10(11)
L ⁴			
N(1)C(15)N(1A)	105.5(2)	N(1)C(15)O(1)	127.25(10)

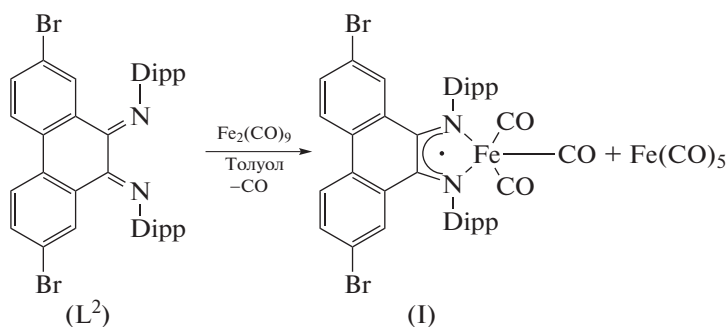
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве удобного метода синтеза металло-комплексов было выбрано окислительное присоединение дииминов к карбонилам железа. Подобный подход позволяет получать целевые комплексы с минимальным количеством побочных продуктов. Оказалось, что с пентакарбонилем железа фенантрендиимины не вступают в реакцию даже при нагревании смесей независимо от своих стерических или акцепторных характеристик.

При использовании Fe₂(CO)₉ в реакцию вступают только диимины L² и L³, обладающие высокой акцепторностью. Реакция протекает при перемешивании в течение 12 ч в толуоле. При удалении растворителя в вакуумированной системе был

обнаружен летучий продукт бледно желтого цвета, который с помощью хромато-масс-спектрометрии определен как Fe(CO)₅. В литературе имеются примеры подобного взаимодействия диазидиенов с Fe₂(CO)₉ с выделением пентакарбонила железа [6, 30].

При взаимодействии двух эквивалентов лиганда L² с одним эквивалентом Fe₂(CO)₉ (схема 2) цвет раствора изменился с красного на фиолетовый и наблюдалось выделение газа. После отделения от летучих компонентов остаток содержал половину взятого в реакцию диимина и комплекс I, который выделили в индивидуальном состоянии в виде темно-красного порошка.

**Схема 2.**

В спектре ЯМР ^1H комплекса I наблюдаются сигналы атомов водорода эквивалентных алкильных групп арильных заместителей при атомах азота, что говорит о симметричности (*E,E*-конфигурации) органического фрагмента, тогда как свободный диимин имеет несимметричную *E,Z*-конфигурацию [2]. Спектр ЯМР ^{13}C содержит пик при 211 м.д., что свидетельствует о наличии карбонильного лиганда. В ИК-спектре присутствуют полосы поглощения органического лиганда и ин-

тенсивные полосы поглощения в районе 1975 и 2040 см^{-1} , что характерно для терминальных CO.

Реакция с таким же соотношением реагентов в случае с 3-трифторметилфенилзамещенным диимином имеет некоторые отличия — не удастся зафиксировать выделение газа. Оставшаяся реакционная смесь после удаления $\text{Fe}(\text{CO})_5$ содержит два продукта, выделенные в чистом виде — интенсивно окрашенный металлокомплекс II и бесцветные кристаллы L^4 (схема 3).

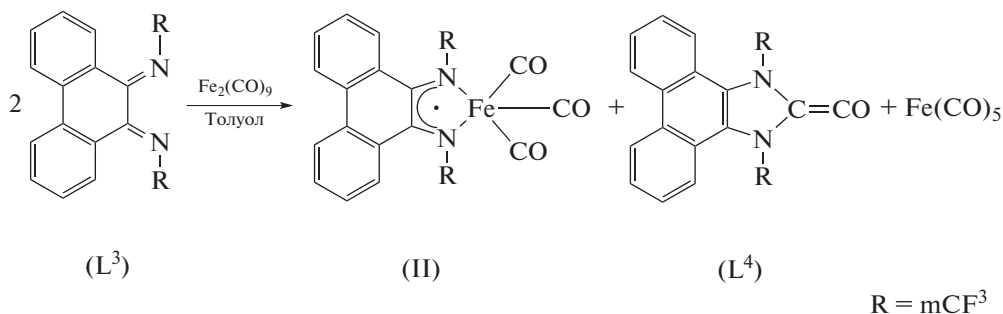


Схема 3.

Схожесть ЯМР и ИК-спектров I и II позволяет предположить одинаковое строение этих соединений.

Кристаллы II, пригодные для РСА, получали из эфира. Молекула соединения II представляет собой пятикоординационный комплекс железа (рис. 1а). Атом Fe(1) имеет искаженное тетрагонально-пирамидальное окружение. Величина τ для координационной сферы Fe(1) составляет 0.10, что близко к аналогичной величине для идеальной тетрагональной пирамиды ($\tau = 0$) [31]. Дииминовый лиганд и два карбонильных заместителя с атомами C(29) и C(30) находятся в основании пирамиды, а третий $\text{C}\equiv\text{O}$ лиганд с атомом C(31) занимает апикальную позицию. Подобное строение характерно для α -дииминовых комплексов с трикарбонилем железа [7, 8]. Длины связей C—N и C—C, составляющие 1.347(3), 1.350(3) и 1.430(3) Å соответственно, характерны для анион-радикальной формы лиганда [32]. Фенантреновый фрагмент дииминового лиганда неплоский со средним отклонением углеродных атомов в 0.14 Å. Получить кристаллы комплекса I, пригодные для РСА, не удалось, соединение независимо от условий выпадает в виде тонких игольчатых кристаллов.

Несмотря на радикальную природу органического лиганда комплексы I, II диамагнитны, что связано с антиферромагнитным взаимодействием электронов анион-радикала и атома низкоспинового железа(I). Попытки заместить группы CO в комплексах трикарбонила железа(I) и получить соединения железа в более высокой степени окис-

ления действием избытка диимина не увенчались успехом.

Бесцветные кристаллы L^4 оказались плохо растворимы в ароматических и предельных углеводородах. ИК-спектр соединения содержит интенсивную полосу поглощения карбонильной группы при 1695 см^{-1} . В спектре ЯМР ^1H видны сигналы протонов фенантрендиамидного фрагмента в симметричной конфигурации. Спектр ЯМР ^{13}C помимо сигналов от фенантреновой части содержит пик при 154 м.д. Строение соединения L^4 было определено рентгеноструктурным анализом (рис. 1б). Молекула L^4 симметрична, поворотная ось 2-го порядка проходит через центр связи C(1)—C(1A) и далее по связи O(1)—C(15). В отличие от комплекса II, фенантреновый фрагмент плоский. Среднее отклонение углеродных атомов от плоскости фенантрена составляет 0.03 Å. В молекулах II и L^4 CF_3 -группы фенильных заместителей направлены по разные стороны от плоскости фенантрендииминового лиганда. Аналогичная конфигурация 3-трифторметилфенильных заместителей обнаружена в фенантрендииминовом комплексе ZnI_2 [33]. Можно отметить, что единственное упоминание о подобных продуктах при взаимодействии дииминов с карбонилами переходных металлов известно только для реакции диазидиена с карбонилем железа [34].

Таким образом, было изучено взаимодействие N,N'-диарилзамещенных фенантрендииминов с карбонилами железа. Обнаружено, что в реакцию

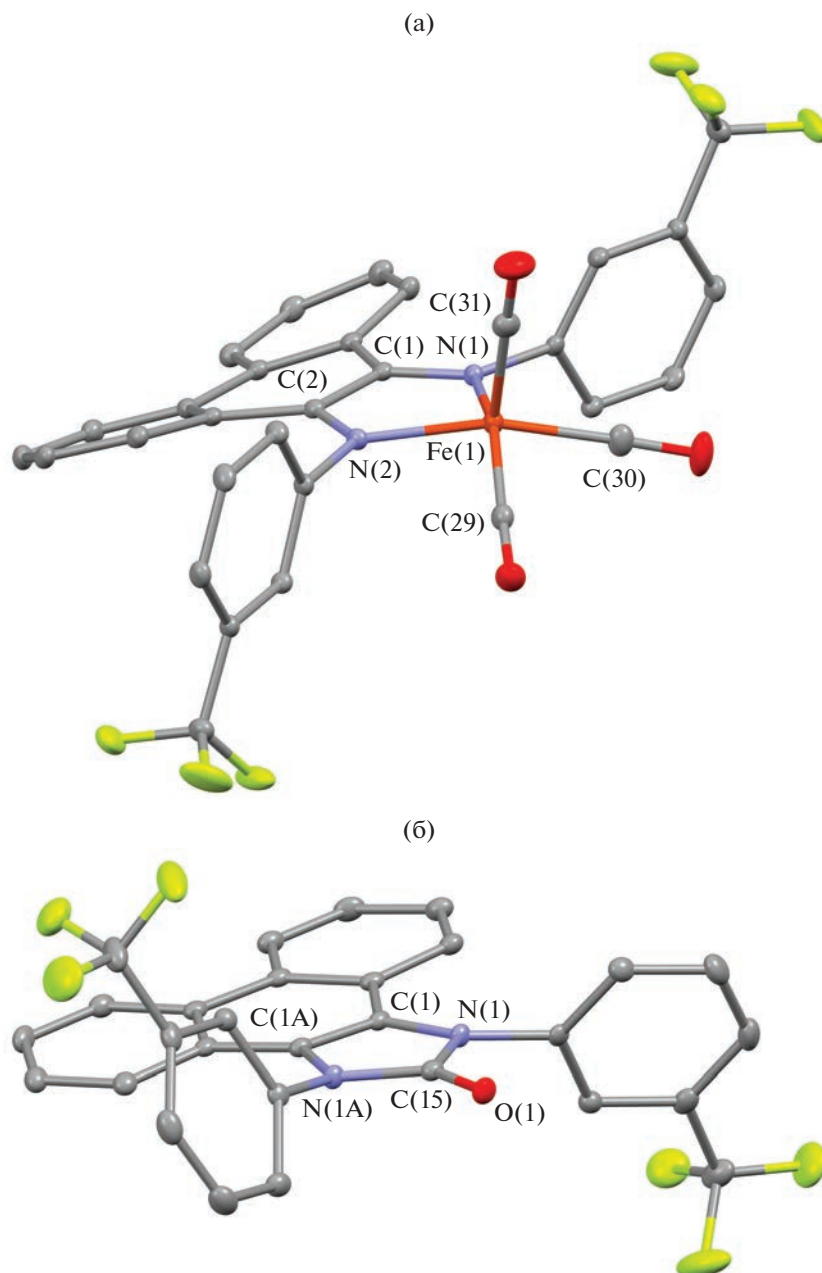


Рис 1. Молекулярные структуры анион-радикального комплекса II (а) и лиганда L^4 (б). Тепловые эллипсоиды представлены с 30%-ной вероятностью. Атомы водорода не показаны.

вступает $Fe_2(CO)_9$ и только с акцепторными фенантренидами, приводя к трикарбонильным комплексам $Fe(I)$ с анион-радикальным лигандом. При использовании фенантренидинов с малообъемными заместителями при атомах азота происходит образование еще одного продукта реакции – фенантроимидазол-2-она.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Аналитический центр ИМХ РАН” при поддержке гранта “Обеспечение развития материально-технической инфраструктуры центров коллективного пользования научным оборудованием” (Уникальный идентификатор RF–2296.61321X0017, соглашение № 075-15-2021-670).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-33-90063).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao B., Luo X., Gao W. *et al.* // Dalton Trans. 2012. V. 41. P. 2755.
2. Cherkasov V.K., Druzhkov N.O., Kocherova T.N. *et al.* // Tetrahedron. 2012. V. 68. P. 1422.
3. Druzhkov N.O., Kazakov G.G., Shavyrin A.S. *et al.* // Inorg. Chem. Commun. 2018. V. 90. P. 92.
4. Abakumov G., Druzhkov N., Kazakov G. *et al.* // Dokl. Chem. 2019. V. 489. P. 279.
5. Kazakov G.G., Druzhkov N.O., Baranov E.V. *et al.* // J. Organomet. Chem. 2021. V. 946–947. P. 121887.
6. Otsuka S., Yoshida T., Nakamura A. // Inorg. Chem. 1967. V. 6. P. 20.
7. Brown J.A., Chaparro A.L., McCarthy L.C. *et al.* // Polyhedron. 2021. V. 203. P. 115168.
8. Janes T., Rawson J.M., Song D. // Dalton Trans. 2013. V. 42. P. 10640.
9. Wekesa F.S., Arias-Ugarte R., Kong L. *et al.* // Organometallics. 2015. V. 34. P. 5051.
10. Liang Q., Lin J.H., DeMuth J.C. *et al.* // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 12287.
11. Fedushkin I.L., Skatova A.A., Khvoinova N.M. *et al.* // Russ. Chem. Bull. 2013. V. 62. P. 2122.
12. Villa M., Miesel D., Hildebrandt A. *et al.* // Chem-CatChem. 2017. V. 9. P. 3203.
13. Koten G.V., Vrieze K. Advances in Organometallic Chemistry. N.Y.: Academic Press, 1982. P. 151.
14. Brown L.A., Wekesa F.S., Unruh D.K. *et al.* // J. Polym. Sci. A Polym. Chem. 2017. V. 55. P. 2824.
15. Bart S.C., Hawrelak E.J., Lobkovsky E., Chirik P.J. // Organometallics. 2005. V. 24. P. 5518.
16. Schmidt V.A., Kennedy C.R., Bezdek M.J., Chirik P.J. // J. Am. Chem. Soc. 2018. V. 140. P. 3443.
17. tom Dieck H., Dietrich J. // Angew. Chem. Int. Ed. 1985. V. 24. P. 781.
18. Lichtenberg C., Adelhardt M., Gianetti T.L. *et al.* // ACS Catal. 2015. V. 5. P. 6230.
19. Saini A., Smith C.R., Wekesa F.S. *et al.* // Org. Biomol. Chem. 2018. V. 16. P. 9368.
20. Liang Q., DeMuth J.C., Radović A. *et al.* // Inorg. Chem. 2021. V. 60. P. 13811.
21. Yu X., Zhu F., Bu D., Lei H. // RSC Adv. 2017. V. 7. P. 15321.
22. Unver E.K., Tarkuc S., Udum Y.A. *et al.* // J. Polym. Sci. A. 2010. V. 48. P. 1714.
23. APEX3. Bruker Molecular Analysis Research Tool. Version. 2018.7-2. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2018.
24. SAINT. Data Reduction and Correction Program. Version. 8.38A. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2017.
25. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M., Stalke D. // J. Appl. Crystal. 2015. V. 48. P. 3.
26. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
27. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
28. SHELXTL. Structure Determination Software Suite. Version. 6.14. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2003.
29. SADABS. Bruker/Siemens Area Detector Absorption Correction Program. Version. 2016/2. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2016.
30. Shi Q.Z., Richmond T.G., Troglor W.C., Basolo F. // Organometallics. 1982. V. 1. P. 1033.
31. Addison A.W., Rao T.N., Reedijk J. *et al.* // Dalton Trans. 1984. V. P. 1349.
32. Kazakov G., Druzhkov N., Cherkasov V. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. P. 178.
33. Abakumov G.A., Druzhkov N.O., Kocherova T.N. *et al.* // Dokl. Chem. 2016. V. 467. P. 109.
34. Frühauf H.-W., Landers A., Goddard R., Krüger C. // Angew. Chem. Int. Ed. 1978. V. 17. P. 64.