

УДК 546.47:547.567.4:(548.73+543.421/.424)

ГЕТЕРОЛЕПТИЧЕСКИЕ КАТЕХОЛАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЦИНКА С N-ДОНОРНЫМИ ЛИГАНДАМИ

© 2023 г. А. В. Малеева^{1, *}, О. Ю. Трофимова¹, И. А. Якушев², Р. Р. Айсин³, А. В. Пискунов^{1, **}

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

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

³Институт элементоорганической химии им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

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

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

Поступила в редакцию 15.12.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

Принята к публикации 12.01.2023 г.

Методом лигандного обмена получены новые гетеролептические катехолатные комплексы цинка на основе 3,6-ди-*трет*-бутил-*о*-бензохинона, содержащие координированные на металл N-донорные лиганды (2,2'-бипиридин и фенантролин). По данным рентгеноструктурного анализа, оба комплекса представляют собой димерные производные, демонстрирующие множественные межмолекулярные π – π -взаимодействия между ароматическими фрагментами соседних молекул (CCDC № 2222704 (I), 2222705 (II)). Электронные спектры пропускания кристаллических образцов I и II и их растворов демонстрируют широкие полосы поглощения в видимой области спектра с максимумом около 500 нм.

Ключевые слова: редокс-активный лиганд, *о*-хинон, перенос заряда, цинк, рентгеноструктурный анализ, электронная спектроскопия

DOI: 10.31857/S0132344X2260059X, **EDN:** TVGOVB

В последние годы значительно повысился интерес к LL'CT-соединениям (LL'CT – ligand-to-ligand charge transfer – перенос заряда лиганд–лиганд) как к фотоэлектрохромным материалам, способным к переключению своих фотофизических характеристик под воздействием управляющего излучения или электрического поля [1]. Особый интерес представляют материалы, поглощающие в ближней ИК-области спектра. В их основе лежат сопряженные органические молекулы и агрегаты [2], полимеры [3], неорганические материалы, такие как квантовые точки [4], перовскиты [5] и донорно-акцепторные комплексы металлов [6–11]. Последний класс вызывает особый интерес в связи с большим разнообразием редокс-активных органических лигандов. Это позволяет проводить тонкую настройку электронных свойств соединений методами координационной химии. Перспективными лигандными системами для построения такого рода производных металлов являются бипиридины и их аналоги [12], а также дважды восстановленные *о*-хиноны (катехолаты) [13–17], в качестве акцепторных и донорных фрагментов соответственно. Модернизация и функционализация доноров и акцепторов

позволяет изменять положение граничных орбиталей в синтезируемых комплексах металлов и тем самым в широких интервалах изменять их оптические свойства.

Подавляющее большинство известных в настоящий момент LL'CT-комплексов получено на основе переходных металлов. Активно исследуются соединения никеля [18–28], кобальта [22, 28, 29], меди [20, 28], марганца [22, 23, 30], платины [31–36], палладия [34, 37–39]. Однако высокая цена потенциальных материалов на основе наиболее эффективных комплексов платиновых металлов делает их практическое применение менее привлекательным. Весьма перспективным может оказаться получение редокс-активных гетеролептических комплексов на основе более дешевых непереходных металлов. Недавно было обнаружено, что поглощение в видимой и ближней ИК-области спектра, отвечающее эффективному внутримолекулярному переносу заряда между лигандом-донором (катехолат или амидофенолят) и лигандом-акцептором (2,2'-бипиридин), можно наблюдать в комплексах галлия(III) с искаженной квадратно-пирамидальной геометрией [40,

41]. При этом октаэдрическое строение координационного узла с участием тех же лигандных систем не обеспечивает условий для возникновения LL'CT-перехода [40, 42]. В продолжение этих исследований в настоящей работе были синтезированы новые катехолатные комплексы цинка с 2,2'-бипиридин (**Bipy**) и фенантролином (**Phen**) с последующим изучением их электронных спектров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все операции по синтезу и исследованию химических превращений комплексов цинка проводили в условиях отсутствия кислорода и влаги воздуха. Использованные в работе растворители очищали и обезвоживали согласно рекомендациям [43]. В работе использовали коммерчески доступные реактивы: Zn (металлический) (Aldrich), Bipy (Aldrich), Phen (Aldrich). 3,6-Ди-*трет*-бутил-*о*-бензохинон получали согласно методике [44]. ИК-спектры регистрировали на ИК Фурье-спектрометре ФСМ-1201 (суспензии в вазелиновом масле; кюветы KBr). Элементный анализ выполняли на приборе Elementar Vario El cube. Электронный спектр суспензии соединений в масле и растворов записывали с использованием спектрометров Carl Zeiss Jena Specord M400 и СФ-2000 соответственно.

Синтез (3,6-Cat)Zn · Bipy (I), (3,6-Cat)Zn · Phen (II). Катехолат цинка, с координированными молекулами ТГФ (3,6-CatZn · 2ТГФ, где 3,6-Cat — 3,6-ди-*трет*-бутилкатехолат) получали согласно методике [45]. К 0.86 г светло-желтого раствора 3,6-CatZn · 2ТГФ (2 ммоль) в тетрагидрофуране приливали растворы Bipy (0.312 г, 2 ммоль) или Phen (0.36 г, 2 ммоль) в том же растворителе в соотношении реагентов 1 : 1. Смешение производилось при температуре 60°C и сопровождалось появлением темно-бордовой (Bipy) или фиолетовой (Phen) окраски реакционной смеси. При медленном охлаждении полученного раствора наблюдали выпадение мелкокристаллических образцов I и II, пригодных для рентгеноструктурного анализа (РСА).

I: кристаллы коричнево-красного цвета; выход 0.88 г (86%).

Найдено, %: C 65.35; H 6.92; N 5.17.

Для C₅₆H₇₂N₄O₆Zn₂

вычислено, %: C 65.43; H 7.06; N 5.45.

ИК-спектр (ν , см⁻¹): 1607 с, 1596 с, 1578 ср, 1567 ср, 1535 сл, 1492 ср, 1442 с, 1431 ср, 1401 с, 1348 ср, 1324 сл, 1314 сл, 1291 ср, 1279 ср, 1256 с,

1225 с, 1203 ср, 1169 ср, 1148 ср, 1100 сл, 1057 ср, 1040 сл, 1020 ср, 970 с, 936 ср, 922 ср, 807 ср, 783 ср, 758 с, 735 с, 695 сл, 677 ср, 657 с, 628 сл, 554 сл, 535 сл.

II: кристаллы красно-фиолетового цвета; выход 0.98 г (91%).

Найдено, %: C 66.77; H 7.01; N 4.98.

Для C₆₀H₇₂N₄O₆Zn₂

вычислено, %: C 66.97; H 6.74; N 5.21.

ИК-спектр (ν , см⁻¹): 1624 сл, 1581 сл, 1519 ср, 1462 с, 1434 с, 1396 с, 1352 ср, 1291 ср, 1289 сл, 1279 сл, 1254 ср, 1215 ср, 1202 ср, 1144 ср, 1100 сл, 967 ср, 932 сл, 922 сл, 867 сл, 845 с, 808 сл, 770 ср, 727 с, 698 сл, 675 ср, 648 ср, 557 сл, 536 сл.

РСА I и II проведен на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Venture Photon (MoK α , λ = 0.71073 Å, режим ϕ - и ω -сканирования, микрофокусный источник рентгеновского излучения Incoatec I μ S 3.0) при 100 К в ЦКП ФМИ ИОНХ РАН. Первичное индицирование параметров элементарной ячейки, их уточнение, интегрирование экспериментальных интенсивностей отражений проведены с использованием программного комплекса Bruker APEX3 [46]. Учет поглощения интенсивностей отражений произведен по программе SADABS [47]. Структуры I и II расшифрованы прямыми методами [48] и уточнены полноматричным МНК по F^2 [49] в анизотропном приближении для всех неводородных атомов без каких-либо ограничений на тепловые или геометрические параметры структуры. Атомы водорода помещены в расчетные положения и уточнены в модели “наездника” с $U_{\text{изо}}(\text{H}) = 1.5U_{\text{экр}}(\text{C})$ для атомов водорода метильных групп и $1.2U_{\text{экр}}(\text{O})$ для всех остальных атомов водорода. Расчеты выполнены с помощью пакета программ SHELXTL [48, 49] в среде обработки и визуализации структурных данных OLEX2 [50]. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур приведены в табл. 1, значения избранных длин связей — в табл. 2.

Структуры зарегистрированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2222704 (I), 2222705 (II); ccdc.cam.ac.uk/structures).

Расчеты проводили при помощи программы Gaussian 09 [51] методом теории функционала плотности (DFT) в приближении B3LYP/def2tzvp. Локализацию стационарных точек осуществляли путем полной оптимизации геометрии молекулярных структур. Отсутствие мнимых частот свиде-

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

Параметр	Значение	
	(I · THF) ₂	(II · THF) ₂
Брутто-формула	C ₅₆ H ₇₂ N ₄ O ₆ Zn ₂	C ₆₀ H ₇₂ N ₄ O ₆ Zn ₂
Размеры кристалла, мм	0.280 × 0.130 × 0.050	0.170 × 0.060 × 0.050
Сингония	Триклинная	Моноклиная
Пр. группа	<i>P</i> $\bar{1}$	<i>C</i> 2/ <i>c</i>
<i>a</i> , Å	10.9193(6)	17.3053(6)
<i>b</i> , Å	15.1337(9)	22.7487(7)
<i>c</i> , Å	15.9563(9)	13.3755(5)
α , град	83.681(2)	90
β , град	83.994(2)	92.481(2)
γ , град	74.934(2)	90
<i>V</i> , Å ³	2034.72(18)	5260.6(3)
<i>Z</i>	2	4
ρ (выч.), г/см ³	1.353	1.359
μ , мм ⁻¹	1.005	0.968
$\theta_{\min}$ – $\theta_{\max}$, град	1.399–28.740	2.087–26.403
Число наблюдаемых отражений	42 323	34 267
Число независимых отражений	13071	5399
<i>R</i> _{int}	0.0442	0.0713
<i>S</i> (<i>F</i> ²)	1.035	1.024
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (<i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²))	0.0389/0.0955	0.0419/0.0902
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (по всем параметрам)	0.0540/0.1017	0.0659/0.1003
$\Delta\rho_{\max}/\Delta\rho_{\min}$, е/Å ³	1.016/–0.821	0.766/–0.456

Таблица 2. Избранные длины связей (Å) в комплексах I и II*

Связь	<i>d</i> , Å	
	I	II
Zn(1)–O(1)	2.0876(13)	2.1165(18)
Zn(1)–O(2)	1.9596(13)	1.9526(19)
Zn(1)–N(1)	2.1504(16)	2.180(2)
Zn(1)–N(2)	2.1323(16)	2.119(2)
Zn(1)–O(1A)	2.0147(14)	1.9867(19)
Zn(1)–Zn(1A)	2.8394(5)	2.8894(6)
Zn(2)–Zn(2B)	2.8911(4)	
O(1)–C(1)	1.375(2)	1.366(3)
O(2)–C(2)	1.338(2)	1.331(3)
Zn(1A)–O(1)	2.0147(14)	1.9867(19)
C(1)–C(2)	1.434(3)	1.441(4)
C(2)–C(3)	1.406(3)	1.407(4)
C(3)–C(4)	1.396(3)	1.394(4)
C(4)–C(5)	1.384(3)	1.394(4)
C(5)–C(6)	1.400(3)	1.396(4)
C(6)–C(1)	1.399(3)	1.395(4)

* Преобразования симметрии, используемые для создания эквивалентных атомов: (A) $-x + 1, -y, -z + 1$; (B) $-x + 1, -y + 1, -z$ (I). (A) $-x + 3/2, -y + 1/2, -z + 1$; (B) $-x + 1, y, -z + 3/2$ (II).

тельствует о том, что молекулы находятся в минимуме потенциальной энергии. TD-DFT расчеты для оптимизированной молекулы II выполнены в рамках функционала CAM-B3LYP [52], который хорошо зарекомендовал себя при расчете энергий внутримолекулярных переносов заряда [53] с использованием функционала 6-31G(d,p).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом обмена нейтральных лигандов между известным 3,6-ди-*трет*-бутил-катехолатом

цинка, содержащим координированные на металл молекулы ТГФ [45], получены новые катехолаты цинка I и II с Bipy или Phen в координационной сфере металлоцентра (схема 1). Смешение реагентов проводили в среде тетрагидрофурана при температуре 60°C. При медленном охлаждении полученной реакционной смеси наблюдалось выпадение мелкокристаллических образцов I и II коричнево-красного и красно-фиолетового цветов соответственно, пригодных для PCA.

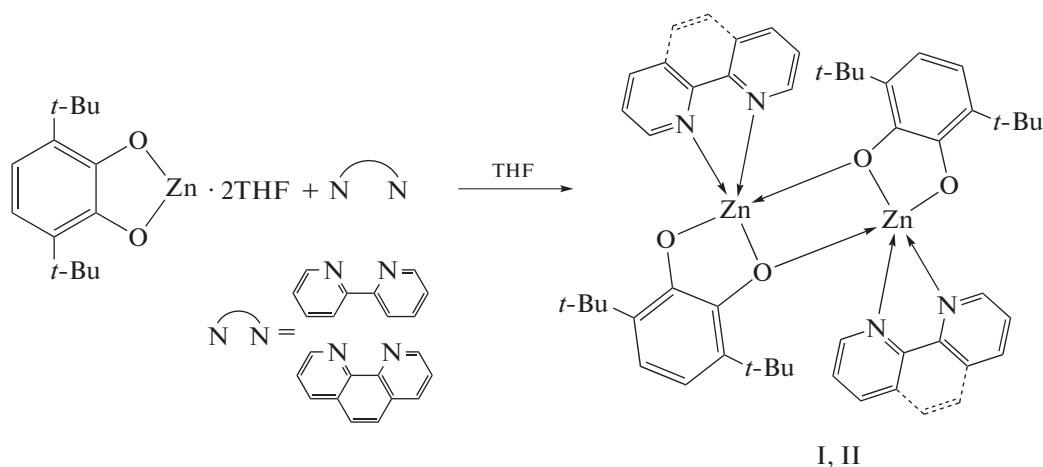


Схема 1.

Молекулярное и кристаллическое строение комплексов I и II определено методом PCA. Элементарная ячейка комплекса I содержит две независимые молекулы димерного соединения цинка, строение которых близко между собой. Поэтому в дальнейшем обсуждается только одна из них.

Молекулы комплексов I и II обладают центром инверсии и имеют сходное димерное строение, образованное за счет попарной координации одного из атомов кислорода катехолатных лигандов на соседний атом цинка (связи Zn(1)–O(1A) и Zn(1A)–O(1)) (рис. 1) подобно ранее изученным аналогичным комплексам цинка на основе природного пирокатехина – 4-метилэскулетина [54]. Необходимо отметить, что данный тип олигомеризации мало характерен для комплексов металлов на основе 3,6-ди-*трет*-бутил-*о*-бензохинона в отличие от его 3,5-замещенного аналога [13]. Тем не менее ранее мостиковый тип координации диолата отмечался при формировании 3,6-ди-*трет*-бутилкатехолатных комплексов непременных металлов – магния [55], галлия [56], олова [57] и свинца [58]. Комплекс I кристаллизуется в

триклинной пространственной группе $P\bar{1}$ в виде сольвата с молекулами тетрагидрофурана (3,6-Cat)Zn(Bipy) · 2THF, таким образом в его кристаллической ячейке располагается одна молекула димерного комплекса на две сольватные молекулы ТГФ (табл. 1). Состав кристаллической ячейки II схож с таковым для I, (3,6-Cat)Zn(Phen) · 2THF, однако он кристаллизуется в моноклинной пространственной группе $C2/c$ (табл. 1). Координационный полиэдр катиона цинка в обоих комплексах представляет собой искаженную тетрагональную пирамиду: два атома кислорода катехолатного лиганда O(1), O(2) и два атома азота 2,2'-бипиридина/фенатролина N(1) и N(2) лежат в основании, а атом кислорода O(1A) соседнего *о*-хинонового лиганда – в вершине пирамиды. Плоскости, формирующие основания обеих пирамид, параллельны друг другу (атомы O(1), O(2), N(1) и N(2), лежат в одной, а O(1A), O(2A), N(1A) и N(2A) – в другой плоскости). При этом плоскости катехолатного и дииминового лиганда в мономерных единицах расположены под углом 57.64° и 75.20° друг к другу в соединениях I и II соответственно. Четырехугольник Zn(1)O(1)Zn(1A)O(1A) пред-

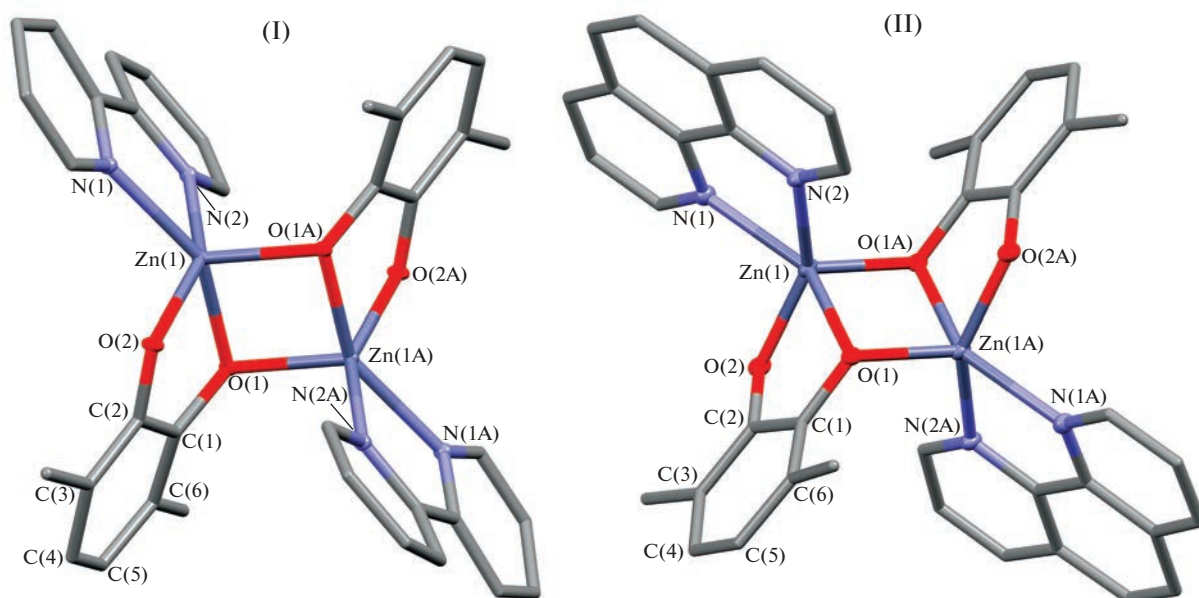


Рис. 1. Молекулярное строение I и II. Тепловые эллипсоиды отдельных атомов приведены с 30%-ной вероятностью. Атомы водорода, метильные группы *t*-Bu-групп и сольватные молекулы ТГФ не приведены для ясности.

ставляет собой ромб с углами Zn(1)O(1)Zn(1A) 87.58° и 89.47° для I и II соответственно. Димерная организация комплексов I и II влияет на распределение длин связей в координационных узлах. Так, связи металла с мостиковыми атомами кислорода Zn(1)—O(1) ($2.0876(13)$ и $2.1165(18)$ Å для I и II соответственно) оказываются длиннее, чем связи Zn(1) с атомом кислорода соседнего катехолатного лиганда O(1A) ($2.0147(14)$ и $1.9867(19)$ Å для I и II соответственно). Расстояния Zn(1)—O(2) являются самыми короткими и составляют $1.9596(13)$ и $1.9526(19)$ Å для I и II соответственно. Как результат мостиковой структуры длины связей C—O в каждом катехолатном лиганде также не эквивалентны. Связи C(1)—O(1) ($1.375(2)$ и $1.366(3)$ Å для I и II соответственно) заметно длиннее C(2)—O(2) ($1.338(2)$ и $1.331(3)$ Å для I и II соответственно). Расстояния Zn—N составляют $2.1323(16)$ и $2.1504(16)$ Å для I и $2.119(2)$ и $2.180(2)$ Å для II и представляют собой усредненные значения между таковыми для известных *o*-хиноновых комплексов цинка с бидентатно координированными N-лигандами [59]. Значения связей C—C *o*-хиноновых лигандов типичны для катехолатных комплексов металлов [56, 60, 61].

В кристаллах комплексов I и II обнаружен ряд коротких контактов между ароматическими фрагментами (рис. 2). Часть из них представляет собой классические стэкинг π – π -взаимодействия между N-лигандами соседних димерных молекул ком-

плекса. Длины этих контактов составляют 3.532 – 3.586 Å для I и 3.533 – 3.605 Å для II соответственно. В свою очередь, взаимодействия типа $\text{C}_{\text{аром}}\cdots\text{H}\cdots\pi$ обуславливают дополнительное межмолекулярное связывание между дипиридильными (фенантролиновыми) лигандами и катехолатными фрагментами, их длина равна 3.614 – 3.795 Å для I и 3.672 Å для II соответственно.

Наличие значительного числа коротких межмолекулярных контактов в кристаллических образцах I и II определило их очень низкую растворимость в большинстве доступных органических растворителей. Это не позволило зарегистрировать ЯМР-спектры для обоих комплексов. Электронные спектры поглощения для соединения II удалось получить в растворе ДМСО (рис. 3). Наблюдаемый спектр характеризуется наличием широкой полосы поглощения в области 550 нм ($\epsilon = 5 \times 10^{-4}$ моль/л, $\epsilon = 6.8 \times 10^2$ дм³ моль⁻¹ см⁻¹), отвечающей π – π^* -переходу и обуславливающий наблюдаемую фиолетовую окраску соединения. Электронные спектры суспензии кристаллических образцов I и II были записаны в минеральном масле (рис. 3). Для обоих кристаллических образцов наблюдается схожий характер электронных спектров, характеризующийся широкой интенсивной полосой в интервале видимого спектра, захватывающая начало ближней ИК-области, 400 – 800 нм с максимумом в районе 500 нм (рис. 3).

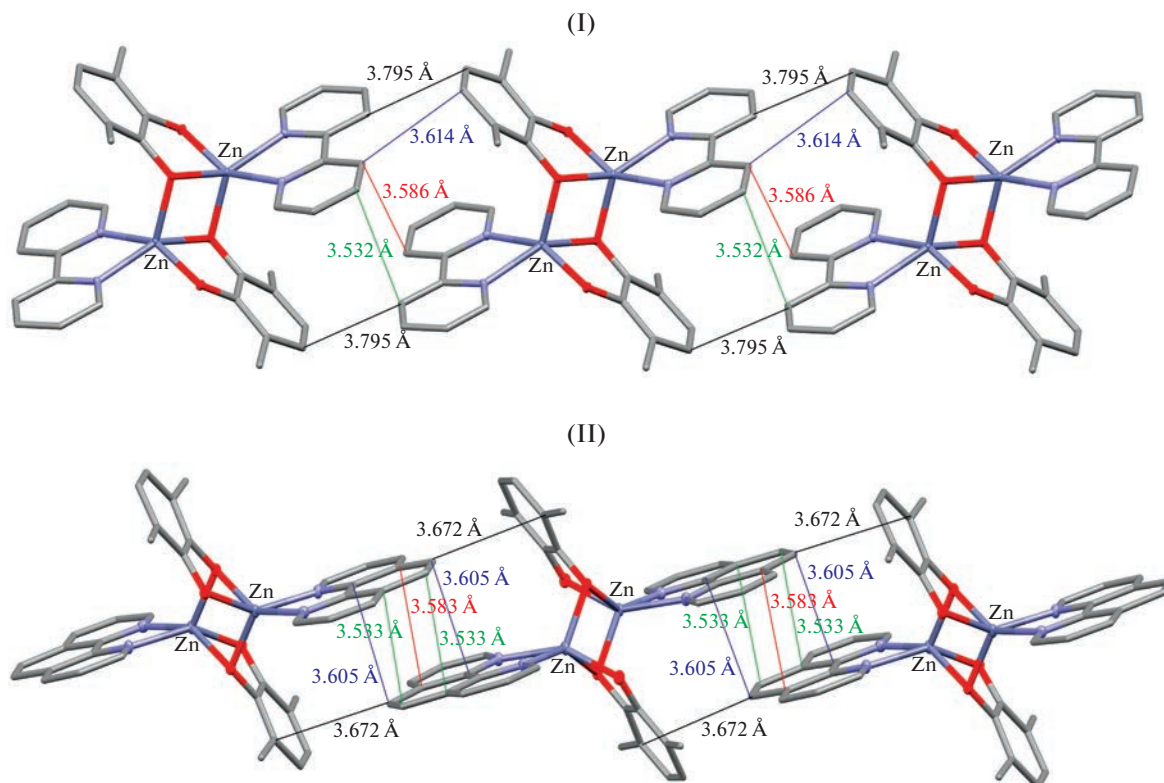


Рис. 2. Межмолекулярные контакты в I и II.

Димерные комплексы I и II, а также мономерная молекула соединения I были оптимизированы в рамках квантово-химических расчетов методом DFT на уровне B3LYP/def2tzvp. Оптимизация четырехкоординационного мономерного комплекса дает одну стационарную конфигурацию с сильно искаженной тетраэдрической геометрией координационного центра (рис. 4).

Диэдральный угол между плоскостями двух бидентатных лигандов в полученной структуре составляет 41.2° . В рамках оптимизации геометрии удастся также обнаружить плоско-квадратную молекулу катехолата цинка, дестабилизированную относительно искаженного тетраэдра на 0.2 ккал/моль. Однако наличие одной мнимой частоты для плоской структуры свидетельствует о том, что она является переходным состоянием. Формирование димера из двух искаженных тетраэдров стабилизирует систему на 26.1 ккал/моль. Это позволяет говорить о том, что диссоциация димерной молекулы маловероятна в условиях комнатной температуры. Оптимизированная геометрия димеров I и II хорошо воспроизводит полученную в рамках РСА. Анализ молекулярных орбиталей показал, что граничные орбитали преимущественно располагаются на редокс-актив-

ных лигандах. ВЗМО (-4.17 и -4.19 эВ для I и II соответственно) и ВЗМО-1 (-4.20 и -4.22 эВ для I и II соответственно) делокализованы по ароматическим системам донорного катехолатного фрагмента (рис. 5). При этом ВЗМО имеет незначительный вклад d_{xy} -орбиталей цинка. Практически вырожденные по энергии НСМО (-2.51 и -2.52 эВ для I и II соответственно) и НСМО+1 (-2.48 и -2.50 эВ для I и II соответственно) занимают акцепторные дииминовые лиганды (рис. 5).

По данным TD-DFT, для рассматриваемых комплексов наиболее длинноволновое поглощение обусловлено двумя малоинтенсивными переходами ВЗМО–НСМО+1 ($\lambda = 520.5$ нм, 2.382 эВ, сила осциллятора 0.0014 и $\lambda = 523.8$ нм, 2.367 эВ, сила осциллятора 0.0019 для I и II соответственно) и ВЗМО-1–НСМО ($\lambda = 508.5$ нм, 2.430 эВ, сила осциллятора 0.0252 и $\lambda = 506.0$ нм, 2.450 эВ, сила осциллятора 0.0239 для I и II соответственно), что хорошо соответствует регистрируемым в электронных спектрах суспензий соединений широким полосам поглощения в районе 500 нм, а также для комплекса II в растворе ДМСО ($\lambda_{\max} = 550.0$ нм, 2.25 эВ). Таким образом, наблюдаемая окраска комплексов I и II обусловлена внутримолекулярным переносом заряда лиганд–лиганд между

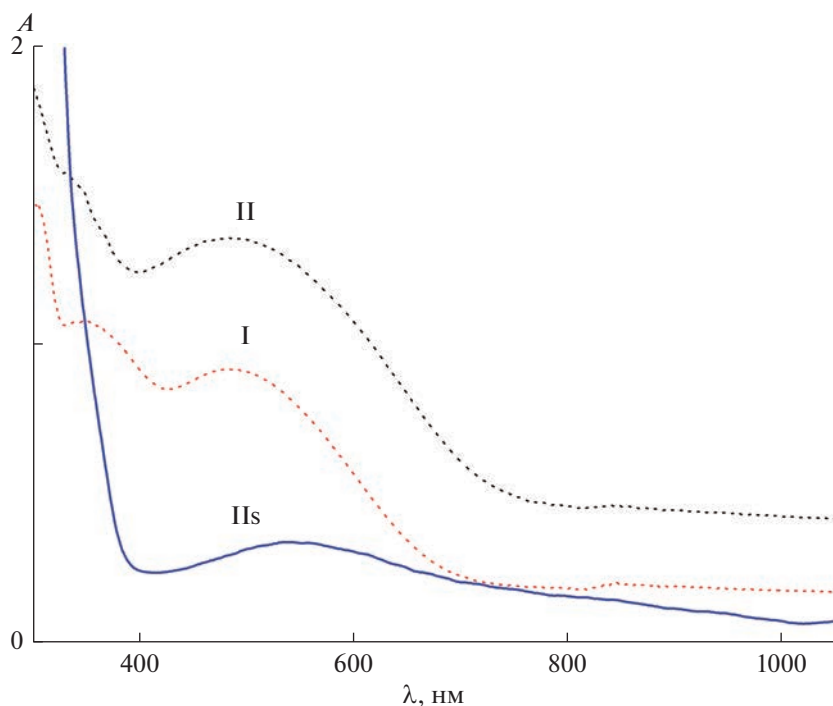


Рис. 3. Электронные спектры поглощения комплексов I и II (пунктирные линии с подписями I и II соответствуют спектрам суспензий кристаллических образцов I и II в минеральном масле; сплошная линия IIс – спектр раствора комплекса II в ДМСО ($c = 5 \times 10^{-4}$ моль/л, $l = 1$ см)).

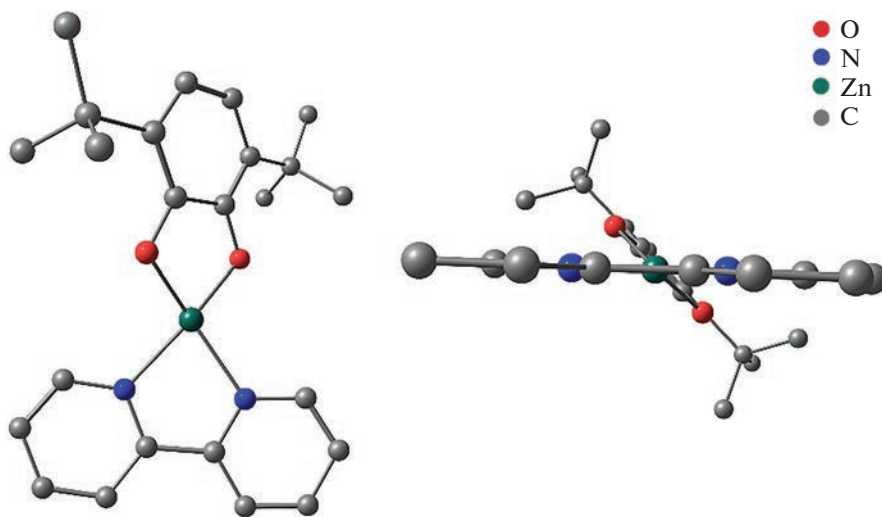


Рис. 4. Виды молекулярной структуры мономера соединения I, полученной на основании квантово-химических расчетов.

донорным катехолом и акцепторным диимином. Наличие множественных тесных контактов между молекулами в кристаллической упаковке изучаемых соединений способствует возникновению дополнительных возможностей для реализации межмолекулярного переноса заряда, что

приводит к изменению спектральных характеристик кристаллических образцов и появлению более глубокой окраски. Необходимо отметить, что ранее [62] уже предпринимались попытки наблюдать LL'CT-переходы в схожих центросимметричных димерных дитиолатных комплексах цинка

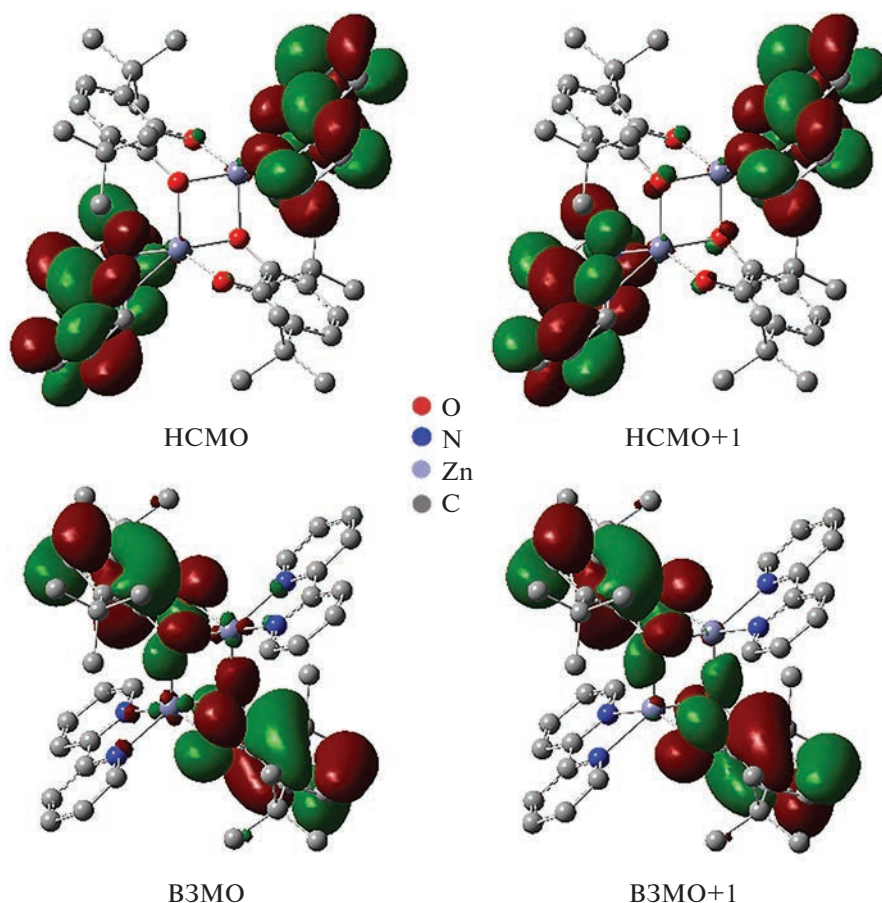


Рис. 5. Виды граничных орбиталей комплекса I по данным квантово-химических расчетов.

с бипиридином и фенантролином. Геометрическое расположение донорного и акцепторного редокс-активных лигандов в изученных [62] пятикоординационных дитиолатных производных цинка должно обеспечивать более подходящие условия для эффективного переноса заряда — диэдральный угол между дитиолатом и фенантролином составляет 15.4° , что существенно меньше, чем в соединениях I и II (57.64° и 75.20° соответственно). Тем не менее авторам не удалось наблюдать полосы поглощения, отвечающие LL'CT-переходу в электронном спектре.

Таким образом, в ходе проделанной работы синтезированы новые гетеролептические 3,6-дитрет-бутилкатехолатные комплексы цинка с бидентатно координированными бипиридиновым или фенантролиновым лигандами. Соединения димеризуются посредством межмолекулярных связей Zn—O. Установлено, что оба комплекса демонстрируют полосы поглощения в интервале длин волн видимого спектра, отвечающие возникновению LLCT-переходов и обусловленные

наличием двух разнозаряженных редокс-активных лигандов — донорного катехолатного и акцепторного дииминового.

Авторы заявляют об отсутствии 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). Рентгеноструктурные исследования комплексов I, II проводились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 22-13-00351).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weinstein J.A., Tierney M.T., Davies E.S. et al. // *Inorg. Chem.* 2006. V. 45. P. 4544.
2. Lu X., Lee S., Hong Y. et al. // *J. Am. Chem. Soc.* 2017. V. 139. P. 13173.
3. Cai K., Xie J., Zhao D. // *J. Am. Chem. Soc.* 2014. V. 136. P. 28.
4. Pan Z., Zhao K., Wang J. et al. // *ACS Nano.* 2013. V. 7. P. 5215.
5. Cui B.-B., Zhong Y.-W., Yao J. // *J. Am. Chem. Soc.* 2015. V. 137. P. 4058.
6. Cui B.-B., Tang J.-H., Yao J. et al. // *Ang. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. P. 9192.
7. Cameron L.A., Ziller J.W., Heyduk A.F. // *Chem. Sci.* 2016. V. 7. P. 1807.
8. Espa D., Pilia L., Marchiò L. et al. // *Dalton Trans.* 2013. V. 42. 12429.
9. Liu Y., Zhang Z., Chen X. et al. // *Dyes Pigments.* 2016. V. 128. P. 179.
10. Wong J.L., Higgins R.F., Bhowmick I. et al. // *Chem. Sci.* 2016. V. 7. P. 1594.
11. Kramer W.W., Cameron L.A., Zarkesh R.A. et al. // *Inorg. Chem.* 2014. V. 53. P. 8825.
12. Еришова И.В., Пискунов А.В., Черкасов В.К. // *Успехи химии.* 2020. Т. 89. С. 1157 (Ershova I.V., Piskunov A.V., Cherkasov V.K. // *Russ. Chem. Rev.* 2020. V. 89. P. 1157).
13. Pierpont C.G. // *Coord. Chem. Rev.* 2001. V. 219–221. P. 415.
14. Абакумов Г.А., Пискунов А.В., Черкасов В.К. и др. // *Успехи химии.* 2018. Т. 87. № 5. С. 393 (Abakumov G.A., Piskunov A.V., Cherkasov V.K. et al. // *Russ. Chem. Rev.* 2018. V. 87. P. 393).
15. Rajput A., Sharma A.K., Barman S.K. et al. // *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 414. P. 213240.
16. Pashanova K.I., Poddel'sky A.I., Piskunov A.V. // *Coord. Chem. Rev.* 2022. V. 459. P. 214399.
17. Kaim W., Das A., Fiedler J. et al. // *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 404. P. 213114.
18. Dunn T.J., Chiang L., Ramogida C.F. et al. // *Chem. Eur. J.* 2013. V. 19. P. 9606.
19. Chiang L., Kochem A., Jarjays O. et al. // *Chem. Eur. J.* 2012. V. 18. P. 14117.
20. Chiang L., Herasymchuk K., Thomas F. et al. // *Inorg. Chem.* 2015. V. 54. P. 5970.
21. Storr T., Wasinger E.C., Pratt R.C. et al. // *Ang. Chem. Int. Ed.* 2007. V. 46. P. 5198.
22. Kurahashi T., Fujii H. // *J. Am. Chem. Soc.* 2011. V. 133. P. 8307.
23. Aono S., Nakagaki M., Kurahashi T. et al. // *J. Chem. Theory Comput.* 2014. V. 10. P. 1062.
24. Kochem A., Gellon G., Leconte N. et al. // *Chem. – Eur. J.* 2013. V. 19. P. 16707.
25. Clarke R.M., Jeen T., Rigo S. et al. // *Chem. Sci.* 2018. V. 9. P. 1610.
26. Ward M.D. // *J. Solid State Electrochem.* 2005. V. 9. P. 778.
27. Pashanova K.I., Bitkina V.O., Yakushev I.A. et al. // *Molecules.* 2021. V. 26. P. 4622.
28. Pashanova K.I., Ershova I.V., Trofimova O.Y. et al. // *Molecules.* 2022. V. 27.
29. Clarke R.M., Hazin K., Thompson J.R. et al. // *Inorg. Chem.* 2016. V. 55. P. 762.
30. Lecarme L., Chiang L., Moutet J. et al. // *Dalton Trans.* 2016. V. 45. P. 16325.
31. Yang J., Kersi D.K., Giles L.J. et al. // *Inorg. Chem.* 2014. V. 5. P. 4791.
32. Rauth G.K., Pal S., Das D. et al. // *Polyhedron.* 2001. V. 20. P. 363.
33. Heinze K., Reinhardt S. // *Chem. Eur. J.* 2008. V. 14. P. 9482.
34. Deibel N., Schweinfurth D., Fiedler J. et al. // *Dalton Trans.* 2011. V. 40. P. 9925.
35. Scattergood P.A., Jesus P., Adams H. et al. // *Dalton Trans.* 2015. V. 44. P. 11705.
36. Best J., Sazanovich I.V., Adams H. et al. // *Inorg. Chem.* 2010. V. 49. P. 10041.
37. Roy R., Chattopadhyay P., Sinha C. // *Polyhedron.* 1996. V. 15. P. 3361.
38. Tahara K., Kadowaki T., Kikuchi J. et al. // *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 2018. V. 91. P. 1630.
39. Sobottka S., Nöfler M., Ostericher A.L. et al. // *Chem. Eur. J.* 2020. V. 26. P. 1314.
40. Maleeva A.V., Ershova I.V., Trofimova O.Y. et al. // *Mendelev Commun.* 2022. V. 32. P. 83.
41. Еришова И.В., Малеева А.В., Айсин Р.Р. и др. // *Изв. АН. Сер. хим.* 2023. Т. 72. С. 193 (Ershova I.V., Maleeva A.V., Aysin I.A. et al. // *Russ. Chem. Bull.* 2023. V. 72. P. 193).
42. Малеева А.В., Трофимова О.Ю., Еришова И.В. и др. // *Изв. АН. Сер. хим.* 2022. Т. 71. С. 1441 (Maleeva A.V., Trofimova O.Y., Ershova I.V. et al. // *Russ. Chem. Bull.* 2022. V. 71. P. 1441).
43. Perrin D.D., Armarego W.L.F., Perrin D.R. *Purification of Laboratory Chemicals.* Oxford: Pergamon Press, 1980. P. 544.
44. Гарнов В.А., Неводчиков В.А., Абакумова Л.Г. и др. // *ДАН СССР.* 1987. Т. 36. С. 1728 (Garnov V.A., Nevodchikov V.I., Abakumova L.G. et al. // *Bull. Acad. Sci. USSR.* 1987. V. 36. P. 1728).
45. Пискунов А.В., Малеева А.В., Абакумов Г.А. и др. // *Коорд. химия.* 2011. Т. 37. С. 243 (Piskunov A.V., Maleeva A.V., Abakumov G.A. et al. // *Russ. J. Coord. Chem.* 2011. V. 37. P. 243).
46. APEX3, SAINT and SADABS. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2016.
47. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M. et al. // *J. Appl. Cryst.* 2015. V. 48. P. 3.
48. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr. A.* 2015. V. 71. P. 3.
49. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr. C.* 2015. V. 71. P. 3.
50. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // *J. Appl. Cryst.* 2009. V. 42. P. 339.
51. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. *Gaussian 09.* Wallingford (CT, USA): Revision D.01. Inc., 2013.
52. Yanai T., Tew D.P., Handy N.C. // *Chem. Phys. Lett.* 2004. V. 393. P. 51.
53. Loos P., Comin M., Blase X., Jacquemin D. // *J. Chem. Theory Comput.* 2021. P. 3666.

54. *Butler I.S., Gilson D.F.R., Jean-Claude B.J. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2014. V. 423. P. 132.
55. *Пискунов А.В., Ладю А.В., Абакумов Г.А. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2007. № 1. С. 92 (*Piskunov A.V., Lado A.V., Abakumov G.A. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2007. V. 56. P. 97).
56. *Piskunov A.V., Maleeva A.V., Mescheryakova I.N. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2012. V. 2012. P. 4318.
57. *Piskunov A.V., Lado A.V., Fukin G.K. et al.* // Heteroatom. Chem. 2006. V. 17. P. 481.
58. *Абакумов Г.А., Черкасов В.К., Пискунов А.В. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2006. № 7. С. 1103 (*Abakumov G.A., Cherkasov V.K., Piskunov A.V. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2006. V. 55. P. 1146).
59. *Piskunov A.V., Maleeva A.V., Bogomyakov A.S. et al.* // Polyhedron. 2015. V. 102. P. 715.
60. *Chegerev M.G., Piskunov A.V., Maleeva A.V. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2016. V. 2016. P. 3813.
61. *Brown S.N.* // Inorg. Chem. 2012. V. 51. P. 1251.
62. *Wang Q.-H., Long D.-L., Hu H.-M. et al.* // J. Coord. Chem. 2000. V. 49. P. 201.