

УДК 546.4+546.05+546.55+546.43+547.7+ 547.8+579.8

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОКАРБОКСИЛАТНОГО КОМПЛЕКСА С МЕТАЛЛООСТОВОМ Zn_2Eu

© 2023 г. М. А. Уварова^{1, *}, И. В. Тайдаков^{2, 3}, М. А. Шмелев¹, С. Е. Нефедов¹, И. Л. Еременко¹

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

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

*e-mail: yak_marin@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Показано, что кипячение водного ацетата европия(III) с трифторуксусной кислотой в смеси диоксан-ацетонитрил приводит к образованию полимера $\{[Eu(\mu-OCCF_3)_3(OH)_2]_n\}$ (I), содержащего сольватные молекулы диоксана. При взаимодействии I с $[Phen_2Zn_2(\mu-OOC^tBu)_2(OOC^tBu)_2]$ (II) (Phen = 1,10-фенантролин) в CH_2Cl_2 при комнатной температуре образуется осадок, перекристаллизация которого из ацетонитрила дает необычный трехъядерный гетерометаллический гетероанионный комплекс $Phen_2Zn_2Eu(\mu^3-OH)(OOC^tBu)_4(OCCF_3)_2$ (III). Строение полученных соединений установлено по данным PCA (CCDC № 2235937–2235939). Для комплекса III исследованы оптические свойства.

Ключевые слова: трифторацетаты, гетерометаллические комплексы, европий, люминесценция, фосфоресценция, кристаллическая структура

DOI: 10.31857/S0132344X23700329, **EDN:** HQGFDW

Комплексы лантаноидов привлекают внимание, в первую очередь, из-за их уникальных люминесцентных свойств [1, 2]. Однако бывает сложно получить эффективное фотовозбуждение ионов лантаноидов из-за запрещенных $f-f$ -переходов, что приводит к низким коэффициентам экстинкции [3–5]. Одним из способов усиления люминесценции является получение гетерометаллических $d-f$ -комплексов, в которых переходный металл/лиганд (d -блок) может действовать как донор энергии для сенсibilизации люминесценции ионов лантаноидов [6–10]. Поэтому разработка простых методов синтеза гетерометаллических комплексов, содержащих ионы как $3d$ -, так и $4f$ -металлов, привлекают все большее внимание [11–18].

Соединения редкоземельных металлов (РЗМ), содержащие анионы сильных кислот, вытеснение которых на внешнюю сферу приводит к появлению вакантных орбиталей, могут быть использованы в качестве потенциальных строительных блоков для получения сложных гетерометаллических комплексов и кластеров в реакциях с различными основаниями. В качестве донорных оснований могут быть использованы металлсодержащие молекулы $Phen/DipyM(OOCR)_2$ ($M = Zn, Co, R = Ph, Me, ^tBu, Phen = 1,10$ -фенантролин, $Dipy = 2,2'$ -дипиридил), основность которых определяется

природой заместителя R в карбоксилат-анионе. Трифторацетаты РЗМ хорошо известны, однако их основным недостатком, как исходных для данных реакций, является наличие координированных молекул воды [19–26].

Цель настоящей работы – получение трифторацетатов европия в присутствии донорных молекул диоксана и ацетонитрила в жестких условиях (кипячение в течение 5 ч) и использование их для получения гетерометаллического комплекса с металлоостовом Zn_2Eu , а также изучение оптических свойств полученного гетерометаллического комплекса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез комплексов проводили на воздухе с использованием растворителей без дополнительной очистки: ацетонитрил (“ос. ч.”, Химмед), диоксан (“ч. д. а.”, Химмед), дихлорметан (“х. ч.” Химмед). Для синтеза использовали коммерчески доступные реактивы: ацетат европия гидрат (Acros), 1,10-фенантролин (99%, Acros), $[Zn(OOC^tBu)_2]_n$ синтезировали по известной методике [27].

Элементный анализ выполняли на автоматическом C,H,N-анализаторе Carlo Erba EA 1108. ИК-спектры соединения регистрировали на ИК-

спектрофотометре с Фурье преобразованием Perkin-Elmer Spectrum 65 методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в интервале частот 400–4000 см⁻¹.

Спектры поглощения растворов комплекса и сходной соли в ацетонитриле регистрировали на приборе Jasco V-770 в кварцевых кюветах с толщиной поглощающего слоя 1 см.

Спектры люминесценции и фосфоресценции образцов регистрировали на спектрофлуориметре Perkin-Elmer SL-45, снабженном волоконно-оптической приставкой для твердых образцов. Твердые образцы помещали в кварцевые кюветы диаметром 6 мм. В качестве источника возбуждения использовали импульсную ксеноновую лампу. При регистрации спектров фосфоресценции использовали задержку регистрации после импульса лампы 100 мкс, после чего данные интегрировали в течение 1 мс.

Синтез $\{[\text{Eu}(\mu\text{-OOC}\text{CF}_3)_3(\text{OH})_2] \cdot \text{O}_2\text{C}_4\text{H}_8\}_n$ (I). К суспензии 0.2 г (0.5 ммоль) $\text{Eu}(\text{OOCMe})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ в 10 мл смеси ацетонитрил–диоксан (1 : 1) добавляли избыток 0.5 мл (6 ммоль) трифторуксусной кислоты и кипятили в течение 5 ч. Полученный раствор концентрировали до 3 мл в токе аргона и медленно охлаждали до комнатной температуры. Образовавшиеся крупные бесцветные кристаллы отделяли от маточного раствора декантацией, промывали гексаном и сушили в токе аргона. Выход I 0.25 г (83%)

Найдено, %: C 19.04; H 1.93.
Для $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_{10}\text{F}_9\text{Eu}$
вычислено, %: C 19.52; H 1.97.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹: 3409 с.ш, 2945 ср, 2906 сл, 2880 сл, 1712 с, 1651 с, 1658 с, 1479 с, 1454 ср, 1379 сл, 1262 ср, 1209 с, 1149 с, 1115 ср, 1081 ср, 1043 сл, 897 сл, 870 с, 804 сл, 796 с, 725 с, 607 ср, 521 ср, 455 сл.

Синтез $\text{Phen}_2\text{Zn}_2(\mu\text{-OOC}\text{Bu})_2(\text{OOC}\text{Bu})_2$ (II). К суспензии комплекса $[\text{Zn}(\text{OOC}\text{Bu})_2]_n$ (0.1 г, 0.13 ммоль) в 5 мл хлористого метилена добавляли 0.13 ммоль (0.03 г) Phen. Полученный раствор выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Образовавшиеся прозрачные кристаллы отделяли от маточного раствора декантацией, промывали гексаном и сушили в токе аргона. Выход II 0.06 г (50%).

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹: 3265 ср, 2965 ср, 2955 с, 2933 сл, 2865 сл, 1601 ср, 1558 с, 1485 с, 1433 с, 1404 ср,

1353 ср, 1313 сл, 1221 с, 1155 ср, 1032 ср, 890 ср, 778 с, 734 сл, 615 сл, 471 сл, 416 сл.

Найдено, %: C 58.04; H 4.83; N 13.50.
Для $\text{C}_{44}\text{H}_{52}\text{N}_4\text{O}_8\text{Zn}_2$
вычислено, %: C 59.00; H 5.85; N 6.25.

Синтез $[\text{Phen}_2\text{Zn}_2\text{Eu}(\mu\text{-OOC}\text{Bu})_4(\mu^3\text{-OH})(\text{OOC}\text{CF}_3)_2]$ (III). Раствор 0.1 г (0.11 ммоль) $[\text{Phen}_2\text{Zn}_2(\text{OOC}\text{Bu})_4]$ и 0.055 г (0.11 ммоль) комплекса I в 10 мл дихлорметана перемешивали при комнатной температуре в течение 10 мин. Образовавшийся белый осадок фильтровывали и растворяли в 10 мл ацетонитрила. Полученный прозрачный раствор оставляли медленно испаряться при комнатной температуре в течение суток. Образовавшиеся прозрачные кристаллы отделяли от маточного раствора декантацией, промывали последовательно холодным бензолом, гексаном и сушили в токе аргона.

Выход III 0.04 г (28%).

Найдено, %: C 45.11; H 4.17; N 3.89.
Для $\text{C}_{48}\text{H}_{53}\text{N}_4\text{O}_{13}\text{F}_6\text{Zn}_2\text{Eu}$
вычислено, %: C 44.67; H 4.14; N 4.34.

ИК-спектр (KBr; ν , см⁻¹: 3438 сл.ш, 2963 сл, 1737 с, 1719 с, 1679 с, 1626 сл, 1588 сл, 1520 сл, 1486 сл, 1437 ср, 1428 ср, 1349 сл, 1321 сл, 1224 ср, 1182 с, 1207 с, 1197 с, 1144 с, 1135 с, 1051 сл, 902 сл, 869 сл, 846 ср, 835 ср, 795 с, 773 ср, 722 с, 728 с, 610 сл, 521 сл, 481 сл.

РСА монокристаллов I–III выполнен на дифрактометре Bruker Apex II, оборудованном CCD-детектором (MoK_α , $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор) [28]. Введена полуэмпирическая поправка на поглощение по программе SADABS [29]. Структура решена прямым методом и уточнены МНК сначала в изотропном, а затем в анизотропном приближении по F_{hkl}^2 . Положения атомов водорода рассчитаны геометрически и уточнены в изотропном приближении по модели “наездника”. Все расчеты проведены с помощью комплекса программ SHELXL-2018/3 [30] с использованием Olex2 [31]. В структуре II *трет*-бутильные фрагменты разупорядочены по двум с заселенностями 0.827/0.173. В структуре III *трет*-бутильные фрагменты разупорядочены по двум с заселенностями 0.73/0.27 и 0.62/0.38. Геометрия полиэдров атомов металлов определена с использованием программы SHAPE 2.1 [32]. Кристаллографические параметры и детали уточнения структур I–III приведены в табл. 1. Основные длины связей представлены в табл. 2.

Таблица 1. Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и утонения структур I–III

Параметры	Значение		
	I	II	III
Эмпирическая формула	$C_{10}H_{12}O_{10}F_9Eu$	$C_{44}H_{52}N_4O_8Zn_2$	$C_{48}H_{53}N_4O_{13}F_6Zn_2Eu$
Масса	615.16	895.63	1290.64
Сингония	Триклинная	Ромбическая	Моноклинная
Пр. группа	$P\bar{1}$	$R\bar{3}cn$	$P2_1/c$
$a, \text{Å}$	9.742(2)	9.91(8)	14.141(7)
$b, \text{Å}$	10.200(2)	14.034(9)	20.762(10)
$c, \text{Å}$	11.206(4)	30.750(11)	20.359(10)
$\alpha, \text{град}$	104.146(4)	90	90
$\beta, \text{град}$	93.126(3)	90	90.488(7)
$\gamma, \text{град}$	117.504(2)	90	90
$V, \text{Å}^3$	939.5(4)	4275(36)	5977(5)
Z	2	4	4
$\rho(\text{выч.}), \text{г/см}^3$	2.175	1.392	1.434
$\mu, \text{см}^{-1}$	3.472	1.179	1.908
$2\theta_{\text{max}}, \text{град}$	4.726–52.000	5.206–51.988	4.002–48.870
$F(000)$	592	1872.0	2600.0
Количество отражений	8171	23762	45145
Независимых отражений	3641	4208	9853
R_{int}	0.0313	0.1793	0.1794
Число уточняемых параметров	3464	266	629
GOOF	1.025	0.739	1.016
$R_1, wR_2 (I > 2\sigma(I))$	$R_1 = 0.0293$ $wR_2 = 0.0730$	$R_1 = 0.0437$ $wR_2 = 0.0743$	$R_1 = 0.0767$ $wR_2 = 0.1854$
$\Delta\rho_{\text{max}}/\rho_{\text{min}}, \text{e/Å}^3$	1.14/–1.18	0.31/–0.48	0.84/–0.91

Таблица 2. Основные длины связей (Å) соединений I–III

Длина связей, Å	I	II	III
Zn–O		1.918(3)–2.081(17)	1.988(8)–1.994(9)
Zn–N		2.107(3)–2.202(15)	2.094(11), 2.236(14)
Eu–O(H ₂ O; OH)	2.299(3)–2.430(3)		2.453(7)
Eu–O(OOCR)	2.375(3)–2.555(3)		2.348(11)–2.483(7)
Eu....Eu	4.861(11), 5.031(10)		
Eu....Zn			3.647(2), 3.694(2)
Zn...Zn		4.077(6)	3.500(10)

Полный набор рентгеноструктурных параметров исследованных соединений депонирован в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2235937 (I), 2235938 (II), 2235939 (III)) и доступен по адресу: deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Простейшие комплексы РЗМ с трифторацетат-анионами достаточно хорошо изучены. Они представляют собой биядерные комплексы $[M_2(\mu\text{-OOCF}_3)_4(\text{OOCF}_3)_2(\text{OH}_2)_x]$, содержащие в зависимости от природы РЗМ различное количество молекул воды.

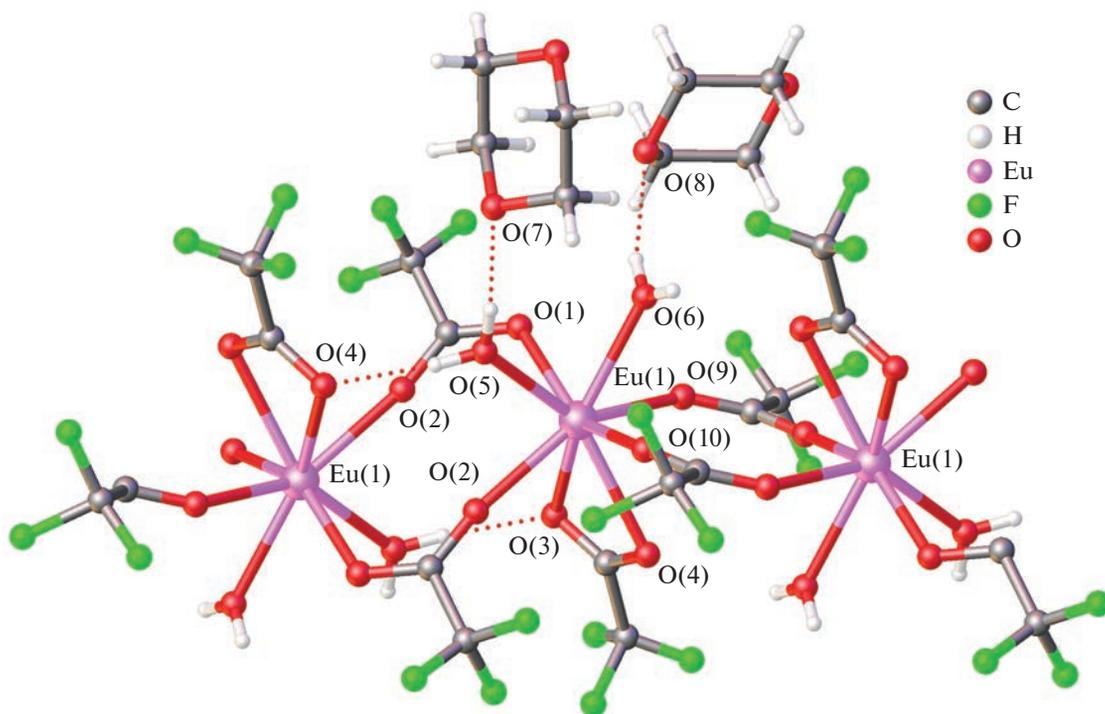


Рис. 1. Фрагмент полимерной цепи I. Пунктирной линией показаны водородные связи.

Было предположено, что использование для синтеза таких соединений диоксана, способного координироваться, при длительном кипячении позволит уменьшить количество молекул воды в комплексе [33, 34]. В результате реакция трифторуксусной кислоты с водным ацетатом европия в ацетонитриле с последующим добавлением диоксана и кипячением в течение 5 ч приводит к образованию полимера $\{[\text{Eu}(\text{OOC}\text{CF}_3)_3(\text{OH}_2)_2] \cdot \text{O}_2\text{C}_4\text{H}_8\}_n$ (I).

Комплекс I кристаллизуется в триклинной пространственной группе $P\bar{1}$ с центром инверсии между двумя ионами европия. В структуре I можно выделить биядерные фрагменты $\{\text{Eu}_2\}$ с расстоянием металл–металл 4.8605(11) Å, где ионы металлов связаны двумя трифторацетатными мостиками (Eu–O 2.354(3), 2.389(2) Å). Формирование

линейной полимерной цепи, направленной вдоль оси *a* происходит за счет связывания биядерных фрагментов двумя OOCCF_3 -мостиками (рис. 1, Eu–O 2.399(3), 2.375(4) Å, Eu...Eu 5.0131(10) Å, угол EuEuEu составляет 160.00(1)°). Каждый ион европия дополнительно координирует хелатно-связанный анион трифторуксусной кислоты (Eu–O 2.524(3), 2.555(3) Å), а также две молекулы воды (Eu–O 2.373(3), 2.430(3) Å), достраивая свое окружение до квадратной антипризмы ($S_q(\text{Eu}) = 1.856$). Координированные молекулы воды задействованы в формировании системы водородных связей с атомами кислорода сольватных молекул диоксана и координированных трифторацетатных анионов, что приводит к стабилизации супрамолекулярного слоя (табл. 3).

Таблица 3. π–π-Взаимодействия в кристаллической упаковке комплексов II, III*

Взаимодействие	$\text{Cg} \cdots \text{Cg}$, Å	Код симметрии	$\text{Cg} \cdots \Pi$, Å	α , град
II				
Phen...Phen	3.70(3)	$5/2 - x, 1/2 - y, z$	3.4918(16)	6.61(19)
Phen...Phen	3.62(3)		3.3954(19)	6.8(2)
III				
Phen...Phen	3.570(9)	$1 - x, 2 - y, -z$	3.496(6)	1.0(7)
Phen...Phen	3.567(10)		3.479(7)	3.3(8)

* Cg – центроид ароматических колец, Π – перпендикуляр к плоскости кольца, α – угол между плоскостями ароматических фрагментов.

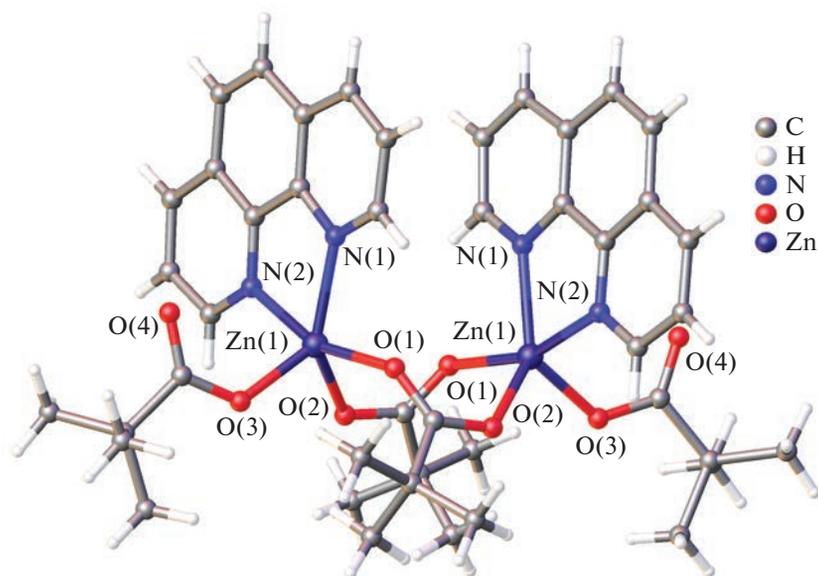


Рис. 2. Строение комплекса II.

Для получения гетерометаллического соединения в реакции пивалата цинка с 1,10-фенантролином в дихлорметане был синтезирован комплекс $[\text{Phen}_2\text{Zn}_2(\mu\text{-OOC'Bu})_2(\text{OOC'Bu})_2]$ (II, рис. 2). В биядерном комплексе II ионы цинка связаны двумя мостиковыми пивалат-анионами ($\text{Zn}-\text{O}$ 1.982(3), 2.082(16) Å) и находятся на несвязывающем расстоянии 4.077(6) Å. Каждый ион цинка достраивает свое окружение до искаженной квадратной пирамиды ($S_q(\text{Zn}) = 2.753$) за счет координации монодентатно координированного OOC'Bu -аниона ($\text{Zn}-\text{O}$ 1.918(3) Å) и хелатно-связанной молекулы Phen ($\text{Zn}-\text{N}$ 2.107(3), 2.201(15) Å). Координированные молекулы Phen задействованы во внутри- и межмолекулярных $\pi-\pi$ -взаимодействиях с формированием супрамолекулярных цепей, направленных вдоль оси *b* (табл. 3). Также в стабилизации кристаллической упаковки участвуют взаимодействия $\text{C}-\text{O}\cdots\pi$ и $\text{C}-\text{H}\cdots\text{O}$. Биядерные комплексы цинка аналогичного II строения ранее были получены с анионами 5-фтор-2-гидроксibenзойной [35] и 3,5-динитробензойной [36] кислот. Для пивалатных же комплексов цинка с хелатными лигандами наиболее характерна моноядерная структура [14, 17].

Обнаружено, что реакция 2 молей соединения II с одним молем I в ацетонитриле при комнатной температуре приводит к образованию гетерометаллического комплекса $[\text{Phen}_2\text{Zn}_2(\mu^3\text{-OH})(\text{OOC'Bu})_4\text{Eu}(\text{OOCFF}_3)_2]$ (III, рис. 3, выход 28%). По данным PCA, в комплексе III два фрагмента PhenZn ($\text{Zn}-\text{N}$ 2.085(8)–2.223(10) Å, $\text{Zn}\cdots\text{Zn}$ 3.4995(10) Å) связаны с фрагментом $\text{Eu}(\eta^2\text{-OOCFF}_3)(\text{OOCFF}_3)$ ($\text{Eu}-\text{O}$ 2.362(8)–

2.441(8) Å) за счет тридентатно-мостиковой гидроксильной группы ($\text{Zn}-\text{O}$ 1.993(6), 1.999(6), $\text{Eu}-\text{O}$ 2.457(5) Å), трех мостиковых пивалат-анионов ($\text{Zn}-\text{O}$ 1.986(6)–2.097(8), $\text{Eu}-\text{O}$ 2.372(7)–2.412(7)) и одного мостикового аниона OOCFF_3 ($\text{Zn}\cdots\text{Eu}$ 3.694(2), 3.647(2) Å, $\text{Zn}-\text{O}$ 2.005(9), $\text{Eu}-\text{O}$ 2.411(7) Å). Вероятно, образование тридентатно-мостиковой гидроксильной группы в этой реакции происходит в результате депротонирования координированной на атоме европия(III) в исходном трифторацетате молекулы воды с возникновением слабой пивалиновой кислоты, что приводит к достаточно коротким расстояниям $\text{Eu}-\text{Zn}$ в полученном трехъядерном комплексе III. Фрагмент $\{\text{Zn}_2\text{EuO}\}$ в структуре комплекса III является не плоским и атом кислорода тридентатно-мостиковой гидроксильной группы выступает из плоскости Zn_2Eu на 0.478(8) Å.

Координационное окружение цинка соответствует тригональной бипирамиде ($S_q(\text{Zn}(1)) = 1.705$, $S_q(\text{Zn}(2)) = 0.627$). Каждый ион европия достраивает окружение до додекаэдра с треугольными гранями ($S_q(\text{Eu}) = 1.323$) за счет координации хелатно-связанного OOC'Bu -аниона ($\text{Zn}-\text{O}$ 2.380(11), 2.440(12) Å). Координированная мостиковая гидроксильная группа задействована в водородном связывании с атомом кислорода монодентатно-связанного аниона OOCFF_3 (табл. 3). Молекулы Phen, координированные к ионам Zn, задействованы в формировании внутри- и межмолекулярных $\pi-\pi$ -взаимодействий с формированием супрамолекулярных цепей, направленных вдоль оси *b* (табл. 4).

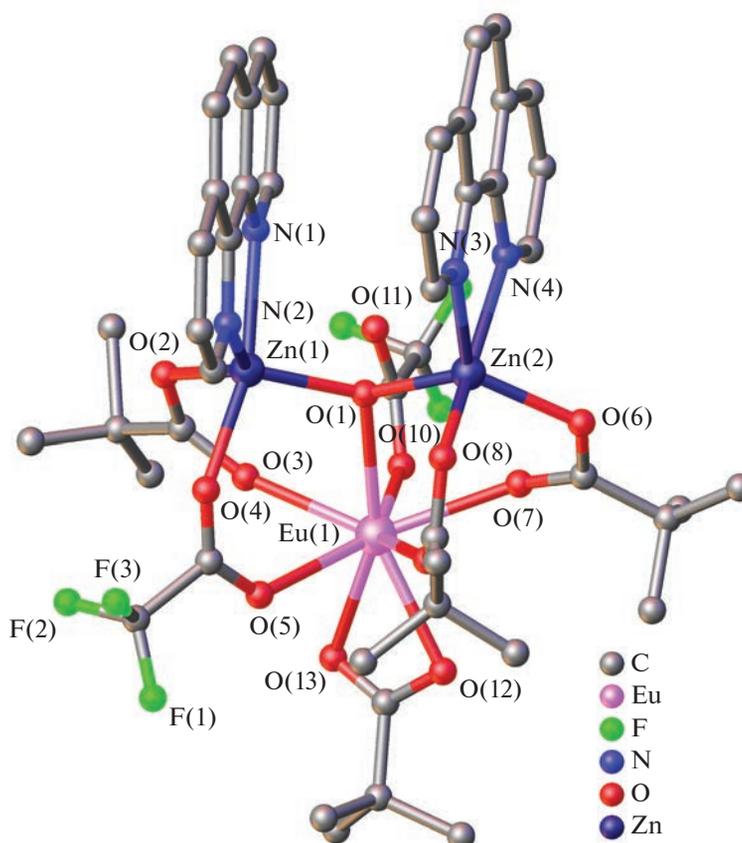


Рис. 3. Строение комплекса III. Атомы водорода не показаны.

Для комплекса III изучены оптические свойства. Спектр поглощения комплексного соединения III представлен на рис. 4. В спектре хорошо заметна характерная для фенантролина линейчатая структура (максимумы при 230 и 270 нм соответственно). Коэффициент экстинкции достаточно высок ($\epsilon = 10^5$ л моль $^{-1}$ см $^{-1}$).

Спектры люминесценции и возбуждения комплекса III представлен на рис. 5. Длинноволновое плечо в спектре эмиссии в данном случае обусловлено собственной люминесценцией фенантролина [37]. Линия при 617 нм, соответствует переходу

$^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ в ионе Eu^{3+} , линии соответствующие другим возможным переходам Eu^{3+} имеют низкую интенсивность, и фактически не проявляются. Характерный равномерный вид кривой спектра возбуждения в диапазоне 250–400 нм свидетельствует о наличии достаточно эффективной передачи энергии с органических лигандов на центральный ион европия.

Спектры фосфоресценции комплекса (рис. 6) несколько отличаются от спектров люминесценции. На них хорошо заметна вторая линия фосфоресценции иона европия (при 593 нм), соот-

Таблица 4. Параметры водородных связей в кристалле комплексов I, III

D–H \cdots A	Расстояние, Å			Угол ДНА, град	Код симметрии
	D–H	H \cdots A	D \cdots A		
I					
O(5)–H(5A) \cdots O(3)	0.85	2.26	120	2.788(5)	–x, –y, 1 – z
O(5)–H(5B) \cdots S(8)	0.85	1.94	153	2.728(5)	
O(6)–H(6A) \cdots O(7)	0.86	1.85	166	2.684(5)	
O(6)–H(6B) \cdots O(4)	0.86	1.97	157	2.780(5)	
III					
O(1)–H(1) \cdots O(11)	0.98	1.89	151	2.786(13)	1 – x, –y, 1 – z

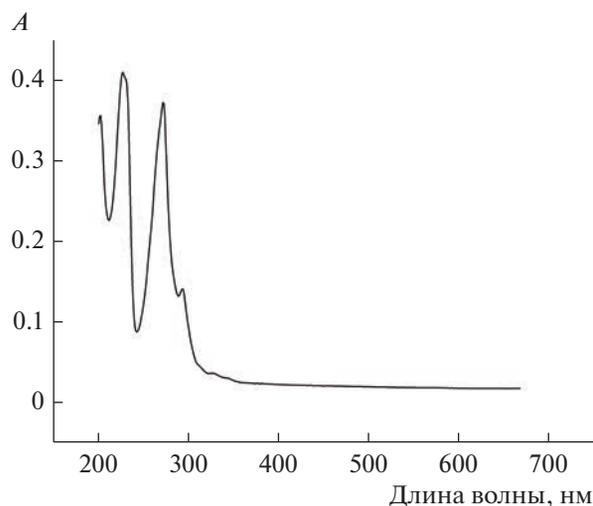


Рис. 4. Спектр поглощения комплекса III $c = 4 \times 10^{-6}$ моль/л в ацетонитриле.

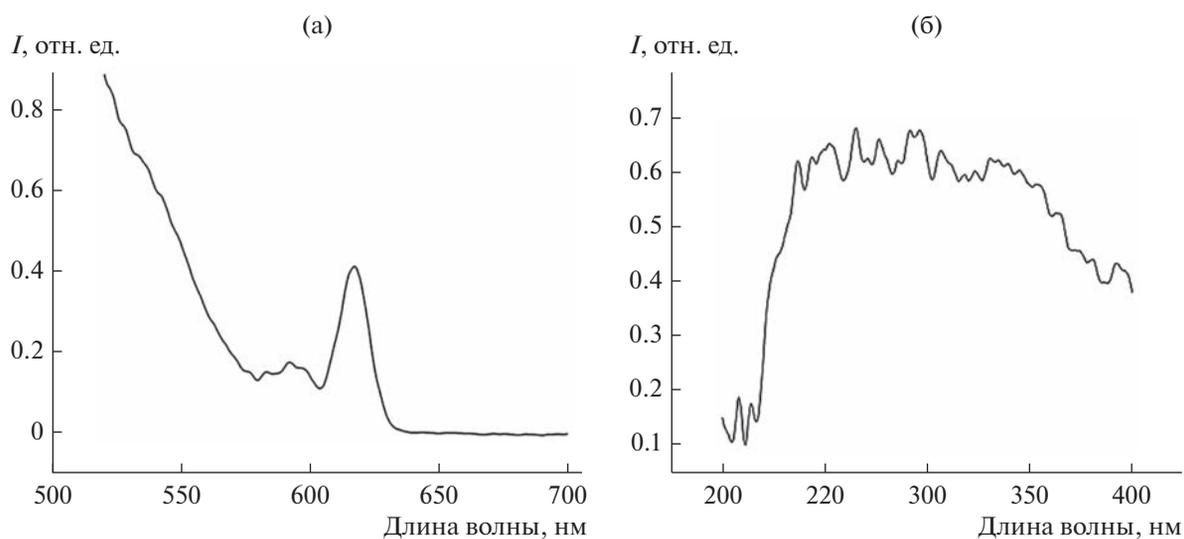


Рис. 5. Спектр люминесценции при $\lambda_{\text{возб}} = 375$ нм (а) и спектр возбуждения при $\lambda_{\text{исп}} = 617$ нм (б) комплекса III.

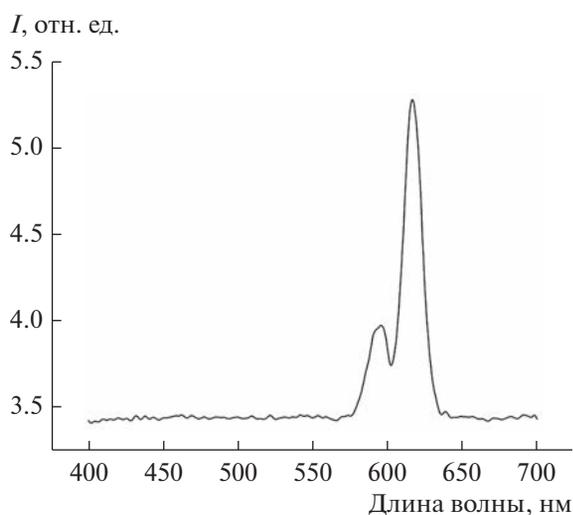


Рис. 6. Спектр фосфоресценции комплекса III.

ветствующая переходу ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$, однако ее интенсивность существенно ниже, чем основной линии при 617 нм. Несимметричное сильно искаженное окружение иона европия в комплексе III влияет на соотношение интенсивности полос в спектрах люминесценции и фосфоресценции.

Таким образом, разработана методика синтеза необычного гидроксо-мостикового смешаноанионного комплекса с металлоостовом Zn_2Eu . На спектре люминесценции комплекса преобладает собственная люминесценция лиганда, тогда как линии люминесценции иона европия имеют низкую интенсивность и фактически не проявляются. Спектр фосфоресценции имеет две линии, однако преобладает основная линия фосфоресценции атома европия 617 нм.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Рентгенодифракционные исследования, элементный анализ и ИК-спектроскопия выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул ИОНХ РАН. Исследование оптических свойств выполнено с использованием оборудования ФИАН РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ИОНХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shi Q., Zhang S., Wang Q. et al. // J. Mol. Struct. 2007. V. 837. P. 185.
2. Binnemans K. // Chem. Rev. 2009. V. 109. P. 4283.
3. Lu X.-Q., Feng W.-X., Hui Y.-N. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2010. V. 18. P. 2714.
4. Yang X., Jones R. A., Wu Q. et al. // Polyhedron. 2006. V. 25. P. 271.
5. Lo W.-K., Wong W.-K., Wong W.-Y. et al. // Inorg. Chem. 2006. V. 45. P. 9315.
6. Lu X., Bi W., Chai W. et al. // New J. Chem. 2008. V. 32. P. 127.
7. Belousov Y.A., Kiskin M.A., Sidoruk A.V. et al. // Austr. J. Chem. 2022. V. 75. P. 572.
8. Colis J.C.F., Staples R., Tripp C. et al. // J. Phys. Chem. B. 2005. V. 109. P. 102.
9. Yang X., Jones R.A., Lynch V. et al. // Dalton Trans. 2005. № 5. P. 849.
10. Xu H.-B., Shi L.-X., Ma E. et al. // Chem. Commun. 2006. V. 15. P. 1601.
11. Chietal Y.-X. // J. Luminescence. 2011. V. 131. P. 1707.
12. Xu H. B., Zhong Y. T., Zhang W. X. et al. // Dalton Trans. 2010. V. 39. P. 5676.
13. Shmelev M.A., Gogoleva N.V., Sidorov A.A. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2021. 515. P. 120050.
14. Николаевский С.А., Ямбулатов Д.С., Старикова А.А. и др. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 4. С. 241 (Nikolaevskii S.A., Yambulatov D.S., Starikova A.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 4. P. 260). <https://doi.org/10.1134/S1070328420040053>
15. Kiskin M.A., Varaksina E.A., Taydakov I.V. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 482. P. 85. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2018.05.037>
16. Егоров Е.Н., Михалева Е.А., Кискин М.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 10. С. 2141 (Egorov E.N., Kiskin M.A., Sidorov A.A. et al. // Rus. Chem. Bull. 2013. V. 62. № 10. P. 2141.) <https://doi.org/10.1007/s11172-013-0313-9>
17. Nikolaevskii S.A., Evstifeev I.S., Kiskin M.A. et al. // Polyhedron. 2018. V. 152. P. 61. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.06.021>
18. Kiskin M.A., Dobrokhotova Zh.V., Bogomyakov A.S. et al. // Russ. Chem. Bull. 2016. V. 65. P. 1488. <https://doi.org/10.1007/s11172-016-1475-z>
19. Rastorguev A.A., Remova A.A., Romanenko G.V. et al. // J. Struct. Chem. 2001. V. 42. P. 907
20. Munasinghe H.N., Szlag R.G., Imer M.R., Rabuffetti F.A. // Inorg. Chem. 2022. V. 61. P. 5588. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c00196>
21. Соколова Н.П., Варанд В.Л., Романенко Г.В. и др. // Коорд. химия. 2003. Т. 29. № 5. С. 387 (Sokolova N.P., Varand V.L., Romanenko G.V. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2003. V. 29. P. 362). <https://doi.org/10.1023/A:1023636120532>
22. Belyi V.I., Rastorguev A.A., Remov A.A. et al. // J. Struct. Chem. 2004. V. 45. P. 130.
23. Уварова М.А., Неведов С.Е. // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 12. С. 1713 (Uvarova M.A., Nefedov S.E. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 12. P. 1837). <https://doi.org/10.1134/S0036023621120202>
24. Boyle T.J., Yonemoto D.T., Sears J.M., Treadwell L.J. // Polyhedron. 2017. V. 131. P. 59.
25. Barja B., Baggio R., Garland M.T., Aramendia P.F. // Inorg. Chim. Acta. 2003. V. 346. P. 187.
26. Уварова М.А., Неведов С.Е. // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 6. С. 737 (Uvarova M.A., Nefedov S.E. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 6. P. 839). <https://doi.org/10.1134/S0036023621060206>
27. Golubnichaya M.A., Sidorov A.A., Fomina I.G. et al. // Russ. Chem. Bull. 1999. V. 48. P. 1751.
28. SMART (control) and SAINT (integration). Software. Version 5.0. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1997
29. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M., Stalke D. // J. Appl. Cryst. 2015. V. 48. P. 3.
30. Spek A.L. // Acta Crystallogr. 2009. V. D65(2). P. 148.
31. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339.
32. Casanova D., Llunell M., Alemany P., Alvarez S. // Chem. Eur. J. 2005. V. 11. P. 1479.
33. Уварова М.А., Луценко И.А., Никифорова М.Е. и др. // Коорд. химия. 2022. № 8. С. 451 (Uvarova M.A., Lutsenko I.A., Nikiforova M.E. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2022. V. 48. P. 457). <https://doi.org/10.1134/S1070328422080073>
34. Уварова М.А., Неведов С.Е. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 9. С. 530 (Uvarova M.A., Nefedov S.E. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. T. 46. № 9. C. 608). <https://doi.org/10.1134/S1070328420090079>
35. Xiao Y., Huang P., Wang W. // J. Clust. Sci. 2015. V. 26. I. 4. P. 1091.
36. Dey D., Roy S., Purkayastha R.D. et al. // J. Molec. Struct. 2013. V. 1053. P. 127.
37. Бочкарев М.Н., Витухновский А.Г., Каткова М.А. Органические светоизлучающие диоды (OLED). Н. Новгород.: Деком., 2011. 359 с.