

УДК 545.96;547.778.3

ЦИКЛОМЕТАЛЛИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС РУТЕНИЯ С 3,3',5,5'-ТЕТРАМЕТИЛ-1,1'-БИФЕНИЛ-4,4'-БИПИРАЗОЛОМ И 2,2'-ДИКАРБОКСИБИПИРИДИНОМ: СИНТЕЗ, ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2022 г. М. А. Лаврова^{1, *}, А. М. Лунев¹, В. Е. Гончаренко^{1, 2},
И. В. Тайдаков², В. Д. Долженко¹, Ю. А. Белоусов^{1, 2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

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

*e-mail: mariia.lavrova@chemistry.msu.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 19.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Новый комплекс $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]\text{PF}_6$ (I) получен последовательным взаимодействием $[\text{Ru}-p\text{-суперне}]_2\text{Cl}_4$ с 3,3',5,5'-тетраметил-1,1'-бифенил-4,4'-бипиразолом (L) и 4,4'-дикарбокси-2,2'-бипиридином в среде метанол–хлороформ. Состав комплекса I подтвержден методами ЯМР и элементным анализом, изучены оптические и люминесцентные свойства комплекса. Лиганд L впервые охарактеризован методом PCA (CIF file CCDC № 2118676). Для интерпретации спектров поглощения и испускания проведены квантово-химические расчеты в рамках теории функционала плотности. Комплекс I перспективен для применения в качестве фотосенсибилизатора.

Ключевые слова: циклометаллирование, рутений, ячейки Гретцеля, бипиразол

DOI: 10.31857/S0132344X22060032

Циклометаллированные комплексы (ЦМК) рутения(II) находят применение в качестве противораковых препаратов [1], в материалах для фотокаталитического восстановления CO_2 [2], восстановления [3] и окисления [4] воды, а также в качестве красителей [5, 6] в ячейках Гретцеля (DSSC).

В состав комплексов для DSSC должны входить “якорный” лиганд с кислотными группами, способными ковалентно связываться с поверхностью диоксида титана, используемого в фотоанодах ячеек Гретцеля, и “донорный” лиганд, отвечающий за эффективное поглощение солнечного света [5, 6]. Наиболее изученными комплексами для DSSC являются тиоцианатные комплексы рутения(II) [7]. В их состав входят монодентатные лиганды, что приводит к лабильности комплексов. Для повышения термодинамической и кинетической стабильности комплексов предложено вводить в них вместо монодентатных лигандов бидентатный циклометаллированный лиганд, что приводит к образованию ковалентной связи металл–углерод [8]. Однако при использовании комплексов с циклометаллированным фрагментом уменьшается эффективность работы солнечных элементов по сравнению с элементами на основе тиоцианатных комплексов.

Ранее мы исследовали комплексы рутения(II) на основе 2-арилбензимидазолов. С помощью модификации арильного фрагмента различными донорными и акцепторными заместителями мы исследовали влияние природы заместителя на фотофизические и электрохимические свойства комплексов, а также на эффективность их работы в ячейке [9].

Фенилпиразольные лиганды схожи с бензимидазольными, однако гораздо хуже исследованы [10–19]. ЦМК рутения на основе производных 1-фенил- и 3-фенил-пиразолов были исследованы в качестве противоопухолевых препаратов [13, 16, 17], катализаторов C–C алкилирования [10], циклотримеризации [14] и восстановления кетон [12], фотокатализаторов восстановления муравьиной кислоты [11].

С высокими выходами 1-фенилпиразолы получают конденсацией β -дикетон с фенилгидразином [20, 21]. Вариации заместителей возможны как при введении заместителя в исходный дикетон [21, 22], так и в исходный гидразин [23]. Несмотря на синтетическую доступность [24], среди бипиразольных лигандов хорошо исследованы только незамещенные бипиразолы, тогда как для N-фенилзамещенных бипиразолов комплексы не по-

лучены за более чем 40 лет с публикации методики синтеза лиганда [25].

Лиганд 3,3',5,5'-тетраметил-1,1'-бифенил-4,4'-бипиразол (**L**) потенциально может образовывать как моноядерные, так и биядерные комплексы благодаря наличию двух координационных сайтов. Моноядерные комплексы с данным лигандом должны эффективно поглощать солнечное излучение ввиду наличия большого числа электрон-донорных групп. К недостаткам моноядерных комплексов металлов можно отнести возможность обратного переноса электрона из зоны проводимости TiO_2 , а также локализация процессов переноса электрона и восстановления.

Использование биядерных комплексов в DSSC позволяет пространственно разделить эти процессы, что снизит нежелательные переходы [25]. В биядерных комплексах возможен перенос электрона, причем это осуществляется под действием длинноволнового света с высокими коэффициентами экстинкции. Этот процесс будет конкурировать с обратным переносом, снижая его влияние. Кроме того, восстановление будет происходить на атоме металла, расположенном на большем расстоянии от поверхности TiO_2 , что препятствует рекомбинации заряда [25].

Цель настоящей работы – синтез и исследование фотофизических свойств ЦМК комплекса рутения(II) на основе лигандов **L** и **Dmdcbp**.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использованные в работе коммерчески доступные реагенты и растворители: $[\text{Ru}(p\text{-cymene})\text{Cl}_2]_2$, I_2 (х. ч.), KPF_6 (х. ч.), NaOH (ос. ч.), ацетилацетон, фенилгидразин, диметилловый эфир 4,4'-дикарбокси-2,2'-бипиридина (**Dmdcbp**).

ЭСП измеряли в CH_3CN с помощью прибора СФ-2000 в кварцевых кюветках длиной 1 см (в диапазоне 400–900 нм). Спектры фотолюминесценции (**ФЛ**) растворов измеряли с помощью люминесцентного спектрометра Shimadzu RF-1501. Измерения проводили в кварцевых кюветках диаметром 1 см при комнатной температуре. Спектры ЯМР регистрировали при 25°C на приборе Bruker Avance 400, химические сдвиги приведены в миллионных долях (м.д.) относительно сигналов растворителя. Масс-спектры высокого разрешения (**HRMS**) регистрировали на приборе Bruker maXis Q-TOF (Bruker Daltonik GmbH, Bremen, Germany).

Синтез ацетилацетоната натрия (NaAcac). 3.7 г NaOH растворяли в 5 мл воды и добавляли 18 мл этанола и полученный раствор добавляли (скорость 1 мл/мин) к 9.16 г ацетилацетона при перемешивании в конической колбе на 100 мл. Образовался желтоватый осадок, который охлаждали, затем отфильтровывали при пониженном давлением на

стеклянном фильтре и промывали малым количеством ледяного метанола. Выход 11.67 г $\text{Na}(\text{Acac}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (81%).

Синтез 3,4-диацетилгексан-2,5-диона [26]. Раствор 9.14 г иода в 40 мл ДМФА добавляли (скорость 3 мл/мин) к раствору 11.67 г $\text{Na}(\text{Acac}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в 58 мл ДМФА при интенсивном перемешивании. Полученный красно-коричневый раствор вылили в 400 мл ледяной воды, смесь перемешивали в течение 15 мин, выпавший белый осадок отфильтровывали на стеклянном пористом фильтре и промывали водой. Выход 4.66 г (65%).

ЯМР ^1H (400 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 2.01 (с., 12 H). ЯМР ^{13}C (400 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 23 (с.), 108 (с.), 192 (с.).

Синтез 3,3',5,5'-тетраметил-1,1'-бифенил-4,4'-бипиразола (L**)** [27]. Раствор 1.26 г ($\rho = 1.01$ г/мл – 1.15 мл) фенилгидразина и 1.15 г диацетилацетона в 11.5 мл этанола кипятили с обратным холодильником в течение 24 ч. При кипячении раствор стал прозрачным и оранжевым. Раствор упаривали досуха, сухой остаток перекристаллизовывали из циклогексана, при охлаждении выпадали бесцветные кристаллы. Полученный осадок промывали 1 мл циклогексана и высушивали. Выход 1.85 г (93%).

ЯМР ^1H (400 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 2.21 (с., 6 H), 2.21 (с., 6 H), 7.33–7.39 (м, 2 H), 7.45–7.55 (м., 8 H). ЯМР ^{13}C (400 МГц; CDCl_3 ; δ , м.д.): 11 (с.), 12 (с.), 112 (с.), 124 (с.), 127 (с.), 129 (с.), 137 (с.), 139 (с.), 148 (с.).

Синтез $[\text{RuL}(\text{CH}_3\text{CN})_4]\text{PF}_6$. В пробирку с плотно закручивающейся пробкой помешали 0.165 г (0.48 ммоль) **L**, 0.0094 г (0.24 ммоль) NaOH и 0.089 г (0.48 ммоль) KPF_6 , смесь растворяли в 5 мл предварительно аргонированного ацетонитрила при нагревании и пропускании аргона. 0.0735 г (0.12 ммоль) $[\text{Ru}(p\text{-cymene})\text{Cl}_2]_2$ растворяли в 2 мл хлористого метилена и полученный раствор добавляли к реакционной смеси. Образовался темно-красный раствор. Пробирку термостатировали 72 ч при 45°C. Полученный темно-коричневый раствор упаривали досуха и остаток растворяли в метиле. Провели очистку колоночной хроматографией (силикагель, элюент $\text{CH}_2\text{Cl}_2\text{--CH}_3\text{CN}$ (10 : 1)). Собрали желтую фракцию. Осадок высаливали гексаном и упаривали досуха. Выход 0.15 г (83% в расчете на $[\text{Ru}(p\text{-cymene})_2\text{Cl}_2]_2$).

Синтез $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]\text{PF}_6$ (I**).** 0.15 г (0.2 ммоль) $[\text{RuL}(\text{CH}_3\text{CN})_4]\text{PF}_6$ и 0.109 г (0.4 ммоль) **Dmdcbp** в смеси 5 мл MeOH и 5 мл CH_2Cl_2 кипятили при перемешивании в атмосфере аргона в темноте в течение 24 ч. Образовавшийся черный раствор упаривали досуха. Полученное вещество очищали колоночной хроматографией (силикагель, элюент $\text{CH}_2\text{Cl}_2\text{--CH}_3\text{CN}$ (85 : 1)). Для хорошего разде-

Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры L

Параметр	Структура
Брутто-формула	C ₂₂ H ₂₂ N ₄
<i>M</i>	342.43
Температура съемки, К	293(2)
Сингония	Моноклинная
Пр. группа	<i>P</i> 2 ₁
<i>a</i> , Å	10.258(2)
<i>b</i> , Å	7.8910(16)
<i>c</i> , Å	11.334(2)
β, град	99.02(3)
<i>V</i> , Å ³	906.1(3)
<i>Z</i>	2
ρ(выч.), г/см ³	1.255
μ(MoK _α), мм ⁻¹	0.076
<i>F</i> (000)	364
θ _{мин} –θ _{макс} , град	2.491–29.999
Всего отражений	6872
Число независимых отражений (<i>R</i> _{int})	5087 (0.0253)
Число отражений с <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)	4568
Число параметров	240
<i>R</i> -факторы (по отражениям с <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>))	<i>R</i> ₁ = 0.0500, <i>wR</i> ₂ = 0.1118
<i>R</i> -факторы (по всем отражениям)	<i>R</i> ₁ = 0.0580, <i>wR</i> ₂ = 0.1151
GOOF	1.058
Δρ _{max} / Δρ _{min} , e/Å ³	0.342/–0.336

ления элюирование проводили медленно. Собирали окрашенную фракцию. Далее проводили перекристаллизацию: вещество растворяли в 10 мл смеси метилен–гексан (3 : 2 по объему) и оставляли в холодильнике на 24 ч. Из раствора выпадали черные кристаллы, которые отделяли на стеклянном пористом фильтре, промывали гексаном и высушивали в вакууме. Выход 0.206 г (91%).

ЯМР ¹H (400 МГц; CDCl₃; δ, м.д.): 1.96 (с., 3 H), 2.18 (м, 6 H), 2.65 (с., 3 H), 4.03 (м., 12 H), 6.80 (т., *J* = 6.85 Гц, 1 H) 7.00 (уш.с., 1 H) 7.37–7.50 (м., 5 H), 7.56–7.60 (м., 1 H), 7.71–7.75 (м., 1 H), 7.75–7.91 (м., 3 H), 7.95–7.99 (м., 1 H), 8.03–8.10 (м., 1 H), 8.26 (д., *J* = 7.89 Гц, 1 H), 8.28–8.38 (м., 1 H), 8.78 (т., *J* = 10.12 Гц, 2 H), 8.89–8.97 (м., 2 H). HRMS, *m/z*: найдено 987.2393, рассчитано для C₅₀H₄₅N₈O₈Ru⁺ 987.2412, изотопное распределение пиков совпадает с расчетным.

РСА монокристалла L проведен на дифрактометре Bruker D8 Quest с детектором Photon III (MoK_α-излучение, λ = 0.71073 Å, ω-сканирование)

при температуре 293(2) К. Структура расшифрована прямыми методами и уточнена полноматричным анизотропным МНК по *F*² с использованием программных пакетов SHELXTL и Olex2 [28–30]. Атомы водорода помещены в рассчитанные позиции и уточнены с использованием модели наездника. Лиганд L кристаллизуется в хиральной пространственной группе, однако абсолютная конфигурация структуры не была определена из-за слабого аномального рассеяния рентгеновских лучей, вызванного отсутствием в структуре тяжелых атомов. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры приведены в табл. 1.

Координаты атомов, длины связей, валентные углы и параметры теплового смещения депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2118676; deposit@ccdc.cam.ac.uk или <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

Квантово-химические расчеты проводили в программном пакете FireFly [31] с использовани-

ем функционала V3LYP. Для атома рутения использовали базис Stuttgart RSC 1997 с псевдопотенциалом. Для всех остальных атомов (C, N, H и O) использовали базисный набор 6-311G(d,p). Эта комбинация базисных наборов и функционала дает хорошую корреляцию с экспериментом [32]. Начальные координаты молекулы лиганда L основаны на его кристаллической структуре, а расположение молекул диметилового эфира дикарбоксибипиридина взяты из структуры комплекса с другим C^N-донорным лигандом [9]. Для оценки длины волны испускания оптимизирована геометрия триплетного состояния, а также рассчитана энергия синглетного состояния в данной геометрии. Затем оптимизирована геометрия синглетного состояния для проведения одноточечного расчета TD-DFT, чтобы получить энергии возбуждения для моделирования спектра поглощения комплекса. Для оптимальных геометрий рассчитаны частоты колебаний, мнимых частот не обнаружено (малые мнимые частоты до -10 см^{-1} , вызванные неточностями в сетке инте-

грирования, игнорировали). Визуализацию выполняли с помощью программы ChemCraft v. 1.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллическая структура лиганда представлена на рис. 1. Кристаллы получены охлаждением раствора лиганда в горячем ДМСО, однако они не содержат в своем составе молекул растворителя. Примечательно, что в полученной структуре все ароматические фрагменты лежат в разных плоскостях, а значит, не сопряжены друг с другом. Значения торсионных углов между плоскостями пиразольного фрагмента и фенильного заместителя составляют: N(1)–N(2)–C(6)–C(5) $128.5(2)^\circ$ и N(4)–N(3)–C(17)–C(18) $142.1(2)^\circ$, а между пиразольными фрагментами – C(10)–C(9)–C(12)–C(15) $48.8(4)^\circ$. При рассмотрении упаковки молекул в ячейке не обнаруживается каких-либо π -стекинг-взаимодействий.

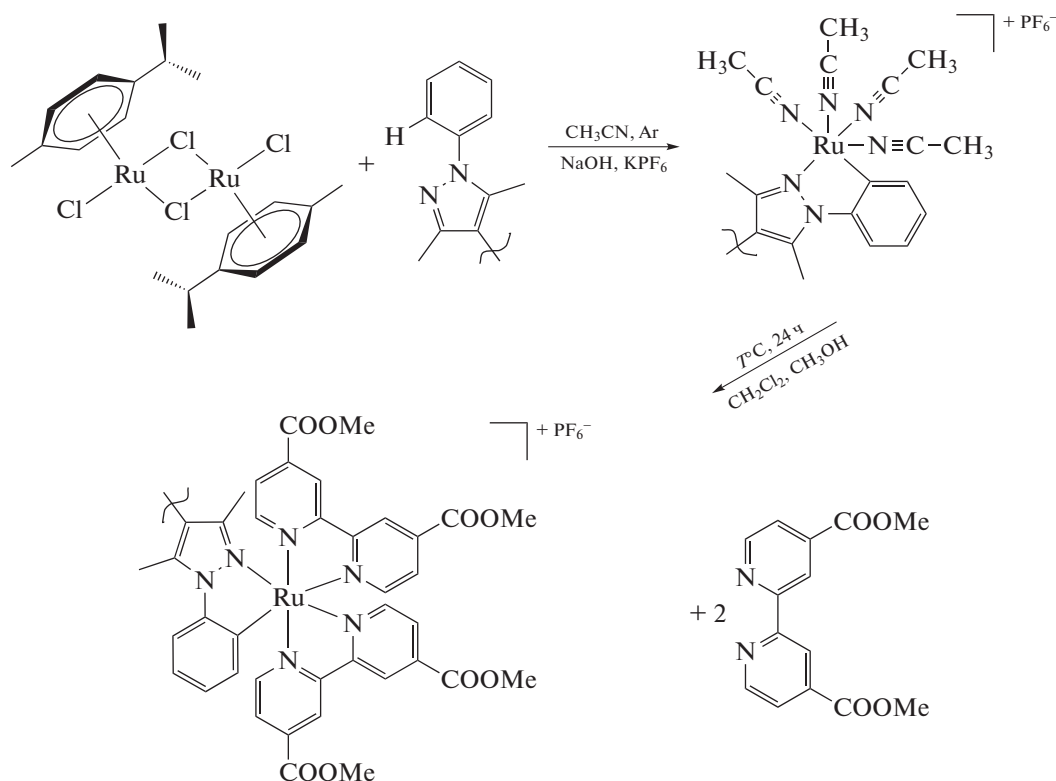


Схема 1.

Синтез комплекса $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]\text{PF}_6$ (I) протекает в две стадии (схема 1). На первой стадии проводили циклометаллирование, на второй вводили диметилловый эфир 4,4'-дикарбокси-2,2'-бипиридина (Dmdcbp). В результате первой стадии образуется продукт, который легко окисляется на

воздухе, поэтому его использовали во второй стадии без промежуточной характеристики. По данным литературы [5], образуется комплекс с четырьмя молекулами ацетонитрила, поэтому мы предполагаем аналогичный состав.

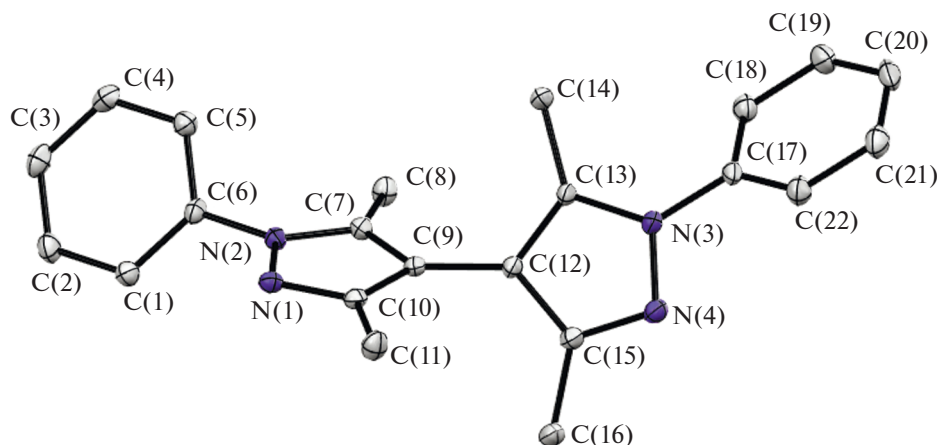


Рис. 1. Молекулярная структура L. Атомы водорода не показаны, тепловые эллипсоиды представлены с вероятностью 50%.

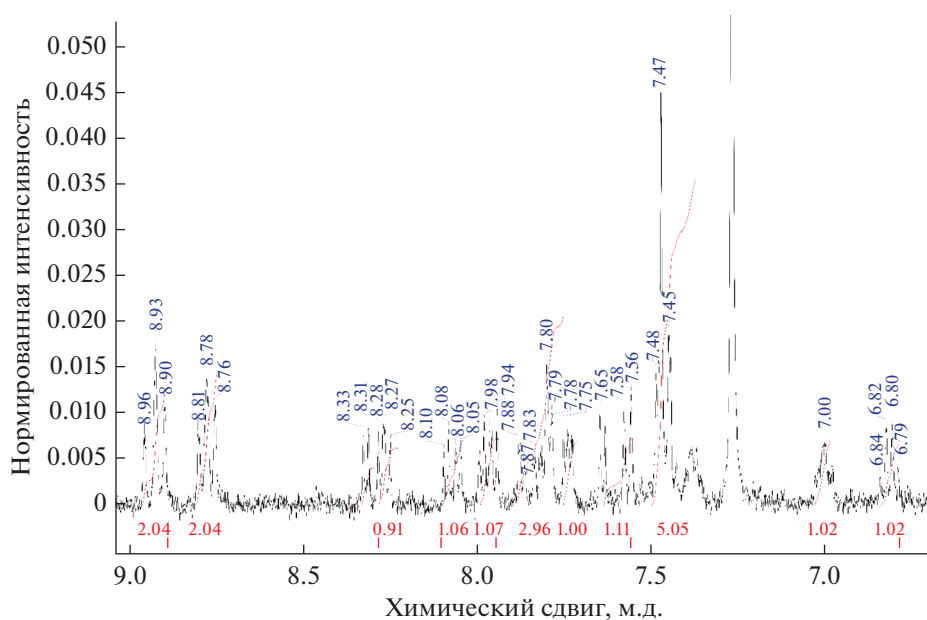


Рис. 2. Ароматическая часть спектра ЯМР комплекса I.

Полученный на второй стадии синтеза комплекс I моноядерный, т.е. бипиразольный лиганд координирован к металлу только одной своей половиной, что подтверждается количеством и соотношением сигналов в его спектре ЯМР. Сигналы в области 6.5–7.0 м.д. указывают на наличие ковалентной связи рутений–углерод (рис. 2). Наиболее интенсивный сигнал в масс-спектре отвечает катиону $[\text{RuL}(\text{Dmdbcpr})_2]^+$, что подтверждается данными изотопного распределения (рис. 3).

Для комплекса I определены молярные коэффициенты поглощения. Полученный спектр разложили на гауссовы составляющие с помощью

МНК (рис. 4). Согласно данным расчетов TDDFT (Time-dependent density functional theory, времязависимая теория функционала электронной плотности), электронные переходы в видимой области соответствуют переходам MLCT (metal-to-ligand charge-transfer, перенос заряда с металла на лиганд).

Комплекс эффективно поглощает в видимой области – длинноволновая полоса с максимумом поглощения 735 нм, характеризуется достаточно высоким значением экстинкции ($\epsilon = 1800 \text{ л моль}^{-1} \text{ см}^{-1}$), что превышает значение в данной области для классических красителей N3 и black dye [5].

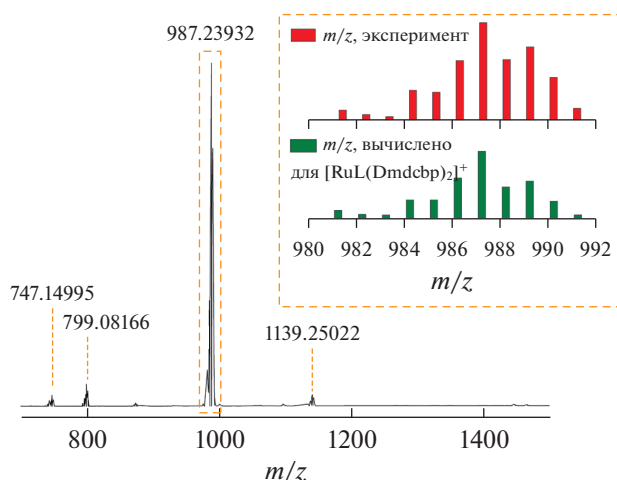


Рис. 3. HRMS-спектр комплекса I. Во врезке увеличенный фрагмент, отвечающий пику при $m/z = 987.23932$ и расчетные данные для катиона $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]^+$.

Спектры ФЛ комплекса I измеряли для разбавленного раствора в ацетонитриле (рис. 5). Из положения полосы испускания оценили энергию возбужденного состояния, она составляет $11\,500\text{ см}^{-1}$.

Электронное строение комплекса изучали с помощью метода DFT. Основной вклад в верхние занятые орбитали комплекса (**ВЗМО**) вносят d -орбитали металла и π -орбитали $\text{C}^{\wedge}\text{N}$ -донорного лиганда (табл. 2). В рассмотренном комплексе симметричный лиганд L, способный выполнять мостиковую функцию, координирован только через один координационный сайт. Интересно, что орбиталь **H** локализована на лиганде L, а орбита-

ли (**H-1**, **H-2**, **H-3**) на металле (рис. 6). Низколежащие свободные орбитали (**НСМО**) локализованы на дикарбоксибипиридиновых лигандах с участием d -орбиталей металла.

Для моделирования ЭСП методом TDDFT рассчитаны характеристики 25 возбужденных состояний. На рис. 3 во врезке представлены положения, интенсивности переходов и огибающая при фиксированной ширине линия поглощения отдельных переходов.

Длину волны испускания (λ_{0-0}), оценивали по разности энергии триплетного и синглетного состояния для оптимизированной геометрии в три-

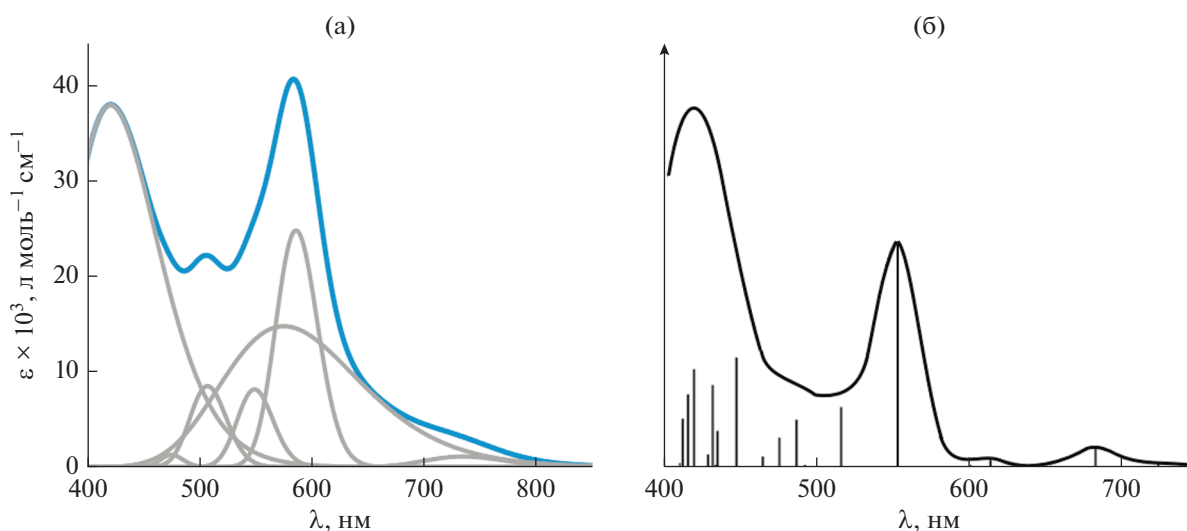


Рис. 4. Спектр поглощения комплекса I в ацетонитриле с разложением на гауссовы составляющие (а); результаты расчета вертикальных переходов методом TDDFT (б).

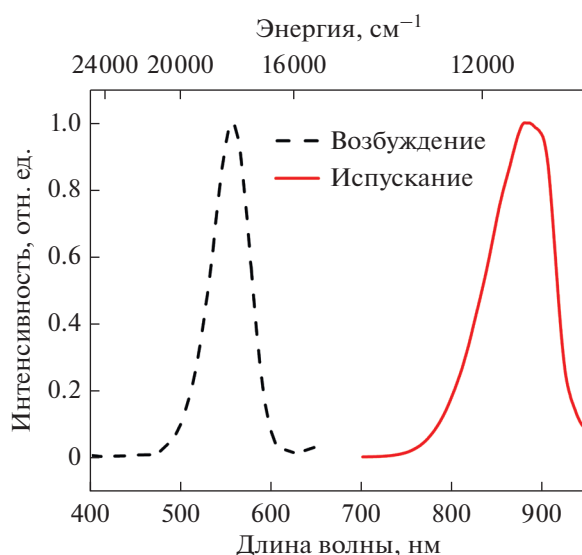


Рис. 5. Спектры возбуждения ($\lambda_{\text{возб}} = 890$ нм) и испускания ($\lambda_{\text{исп}} = 550$ нм) раствора $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]\text{PF}_6$ в CH_3CN .

плетном состоянии (ΔSCF). Рассчитанное значение 930 нм смещено в длинноволновую область относительно эксперимента, что согласуется с данными литературы [33]. ВЗМО триплетного со-

стояния локализована на якорных лигандах, содержащих карбоксильные группы (рис. 7)

Таким образом можно заключить, что комплекс $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]\text{PF}_6$ соответствует основным требо-

Таблица 2. Некоторые расчетные спектральные характеристики комплекса $[\text{RuL}(\text{Dmdcbp})_2]^+$: возбужденные состояния, длины волн (λ , нм), силы осцилляторов и отнесение электронных переходов с вкладом соответствующей конфигурации

Состояние	λ , нм	Сила осциллятора	Основные вклады от переходов МО			
S^2	725	0.012	ВЗМО	→	НСМО + 1	73.7%
S^5	553	0.13	ВЗМО-3	→	НСМО	13.4%
			ВЗМО-2	→	НСМО	22.9%
			ВЗМО-2	→	НСМО + 1	15.5%
			ВЗМО-1	→	НСМО	32.1%
S^6	516	0.035	ВЗМО-2	→	НСМО + 1	36.4%
			ВЗМО-1	→	НСМО	11.3%
			ВЗМО-1	→	НСМО + 1	13.0%
			ВЗМО	→	НСМО + 3	12.4%
S^8	487	0.028	ВЗМО-3	→	НСМО	35.6%
			ВЗМО	→	НСМО + 2	39.1%
S^{12}	447	0.064	ВЗМО-3	→	НСМО + 1	33.5%
			ВЗМО	→	НСМО + 3	13.1%
			ВЗМО	→	НСМО + 4	22.3%

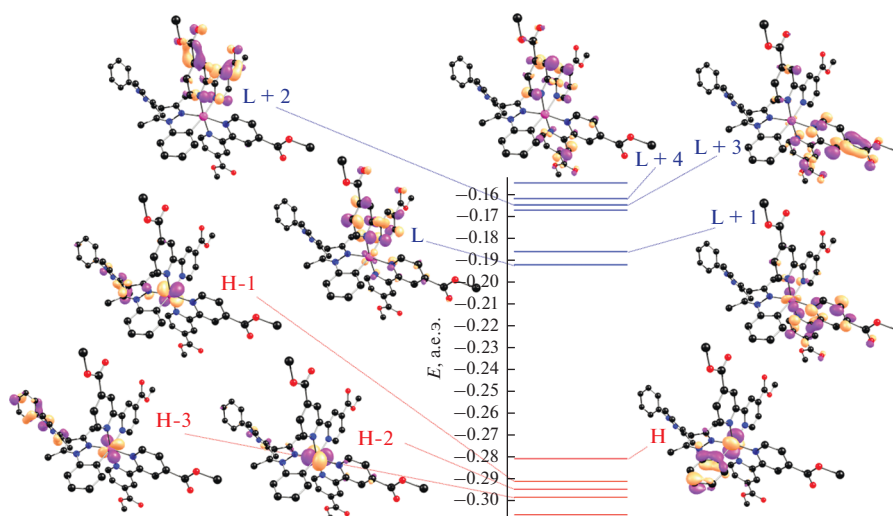


Рис. 6. Схема МО комплекса $[\text{RuL}(\text{Dmdbcpr})_2]^+$ и изображения граничных орбиталей.

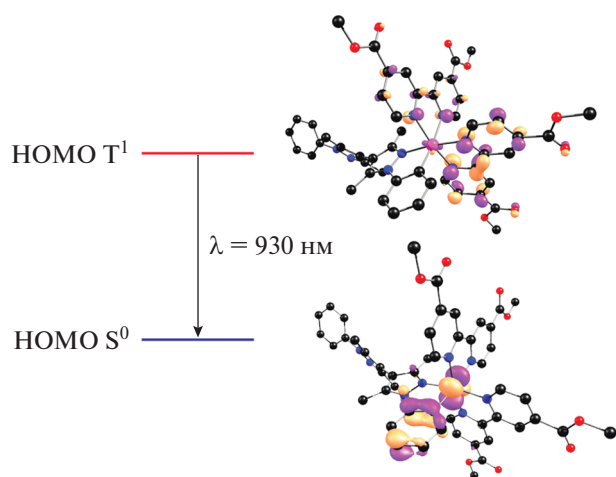


Рис. 7. Изображение ВЗМО основного синглетного и нижнего триплетного состояний комплекса $[\text{RuL}(\text{Dmdbcpr})_2]^+$ по данным DFT расчета.

ваниям [5], предъявляемым к фотосенсибилизаторам для DSSC: обладает высоким поглощением в видимой области, ВЗМО-орбитали локализованы на донорном лиганде L и металле, а НСМО – на акцепторном якорном лиганде Dmdbcpr.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-33-90285).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang H., Zhang P., Chen H. et al. // Chem. Eur. J. 2015. V. 21. P. 715.
2. Ono T., Qu S., Gimbirt-Surinach C. et al. // ACS Catal. 2017. V. 7. P. 5932.
3. Yuan Y.J., Yu Z.T., Chen D.Q. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. P. 603.
4. Tseng H., Zong R., Muckerman J.T., Thummel R. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 11763.
5. Aghazada S., Nazeeruddin M.K. // Inorganics. 2018. V. 6. P. 52.
6. Mauri L., Colombo A., Dragonetti C. et al. // Molecules. 2021. V. 26. P. 7638.
7. Zakeeruddin S., Nazeeruddin M., Humphry-Baker R., Grätzel M. // Inorg. Chim. Acta. 1999. V. 296. P. 250.
8. Bomben P.G. Cycloruthenated Chromophores for the Dye-Sensitized Solar Cells. Calgary, 2012.
9. Lavrova M.A., Mishurinskiy S.A., Smirnov D.E. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 16935.
10. Korvorapun K., Moselage M., Struwe J. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2020. V. 59. P. 18795.
11. Nakahara Y., Toda T., Matsunami A. et al. // Chem. Asian J. 2018. V. 13. P. 73.
12. Toda T., Saitoh K., Yoshinari A. et al. // Organometallics. 2017. V. 36. P. 1188.
13. Novohradsky V., Yellol J., Stuchlikova O. et al. // Chem. Eur. J. 2017. V. 23. P. 15294.
14. Grigg R., Kilner C., Senthilnathanan M. et al. // Arkivoc. 2007. V. 2007. P. 145.
15. Alharis R.A., McMullin C.L., Davies D.L. et al. // Faraday Discuss. 2019. V. 220. P. 386.

16. *Ballester F.J., Ortega E., Porto V. et al.* // Chem. Commun. 2019. V. 55. P. 1140.
17. *Kamatchi T.S., Kalaivani P., Fronczek F.R. et al.* // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 46531.
18. *Boutadla Y., Davies D.L., Jones R., Singh K.* // Chem. Eur. J. 2011. V. 17. P. 3438.
19. *Toda T., Suzuki S., Kuwata S.* // Chem. Commun. 2019. V. 55. P. 1028.
20. *Reddy C.S., Kumar G.R., Devi M.V., Nagaraj A.* // Acta Chim. Slov. 2011. V. 58. P. 576.
21. *Svistunova I.V., Shapkin N.P., Nikolaeva O.V., Apasnasenko O.A.* // Russ. J. Gen. Chem. 2011. V. 81. P. 756.
22. *Chambers D., Denny W.A., Buckleton J.S., Clark G.R.* // J. Org. Chem. 1985. V. 50. P. 4736.
23. *Texier-Boullet F., Klein B., Hamelim J.* // Synthesis. 1986. V. 1986. P. 409.
24. *Mosby W.L.* // J. Chem. Soc. 1957. P. 3997.
25. *Anon I.* // Bulletin de la Societe Chimique de France. 1975. P. 1371.
26. *Ponomarova V.V., Komarchuk V.V., Boldog I. et al.* // CrystEngComm. 2013. V. 15. P. 8280.
27. *Imai Y., Nakajima T., Ueda M.* // J. Polym. Sci. 1981. V. 19. P. 1421.
28. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
29. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
30. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
31. *Alex A. Granovsky, Firefly version 8.* <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
32. *Derrat H.S., Robertson C.C., Meijer A.J.H.M., Thomas J.A.* // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 12300.
33. *Soupart A., Dixon I.M., Alary F., Heully J.L.* // Theor. Chem. Acc. 2018. P. 137.