

УДК 547.979.733

## СПЕКТРЫ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФТАЛОЦИАНИНОВ КОБАЛЬТА(II) И МАРГАНЦА(III) С ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2022 г. Е. Н. Овченкова<sup>а</sup>, Н. Г. Бичан<sup>а,\*</sup>, Т. Н. Ломова<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

\*e-mail: bng@isc-ras.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 14.10.2021 г.

Представлены результаты исследования сверхбыстрой динамики возбужденных состояний (октакис-3,5-ди-*трет*-бутилфеноксифталоцианинато)кобальта(II) и марганца(III), а также донорно-акцепторных систем на их основе с фуллеро[60]- и фуллеро[70]пирролидинами в качестве акцепторов. Возбужденные состояния достигались при воздействии на исследуемые поглощающие вещества лазерного импульса в методе фемтосекундной абсорбционной спектроскопии. Описана кинетика и виды спектров фотоиндуцированного поглощения металлофталоцианинов и их диад с замещенными пирролидинами, определены времена жизни состояний с разделенными зарядами и определены константы разделения и рекомбинации зарядов.

**Ключевые слова:** замещенный фталоцианин, комплекс кобальта, комплекс марганца, производные фуллерена, донорно-акцепторные диады, фотоиндуцированное фемтосекундное поглощение

DOI: 10.31857/S0044453722040252

Донорно-акцепторные (D–A) комплексы, фрагменты которых подбираются таким образом, чтобы сформировать донорно-акцепторную пару, являются перспективными в практическом отношении фотоактивными системами. В качестве распространенных D–A-пар изучаются порфириновые фуллерены и фталоцианиновые фуллерены, в которых порфирины и фталоцианины выступают в роли электронодоноров [1–5], а фуллерены – в роли акцепторов [6]. Эта роль связана с наличием системы сопряженных связей, низким потенциалом окисления и значительным поглощением в видимой области спектра у первых и уникальной трехмерной структуры с низким потенциалом восстановления и небольшой энергией реорганизации – у вторых. Применение таких D–A-систем в области создания элементов солнечной энергетики требует наличия в них эффективного фотоиндуцированного переноса электронов и долгоживущего состояния с разделенными зарядами, которое достигается за счет быстрого разделения (CS) и медленной рекомбинации зарядов (CR). Лучшим методом изучения динамики процессов и определения времен жизни состояния с разделенными зарядами являются методы исследования с временным разрешением, в частности наносекундная и фемтосекундная импульсная

лазерная спектроскопия. Воздействие нано- или фемтосекундных лазерных импульсов на D–A-системы позволяет создать высокую концентрацию молекул в возбужденном состоянии с изменением их донорно-акцепторных свойств.

Быстрые процессы в порфириновых молекулах всегда интересовали исследователей и первые работы по изучению этих процессов были выполнены еще до изобретения метода фемтосекундной спектроскопии [7]. С появлением метода порфирины и фталоцианины стали объектами исследования, активно изучающимися по настоящее время [8, 9]. Большое внимание уделяется изучению фемтосекундной спектроскопии поглощения D–A-систем на их основе [10, 11]. Установлено, что эффективность фотоиндуцированного переноса электрона в порфириновых и фталоцианиновых фуллереновых системах зависит от различных факторов, а именно от природы замещения в макроциклическом фрагменте [12, 13], геометрии [14] и длины [15] сопряженного мостика между D и A, структуры модифицированного фуллерена [16] и способа его связывания с донором [17]. Кроме того, фотоиндуцированный перенос электронов может быть настроен с помощью координации макрогетероциклическо-

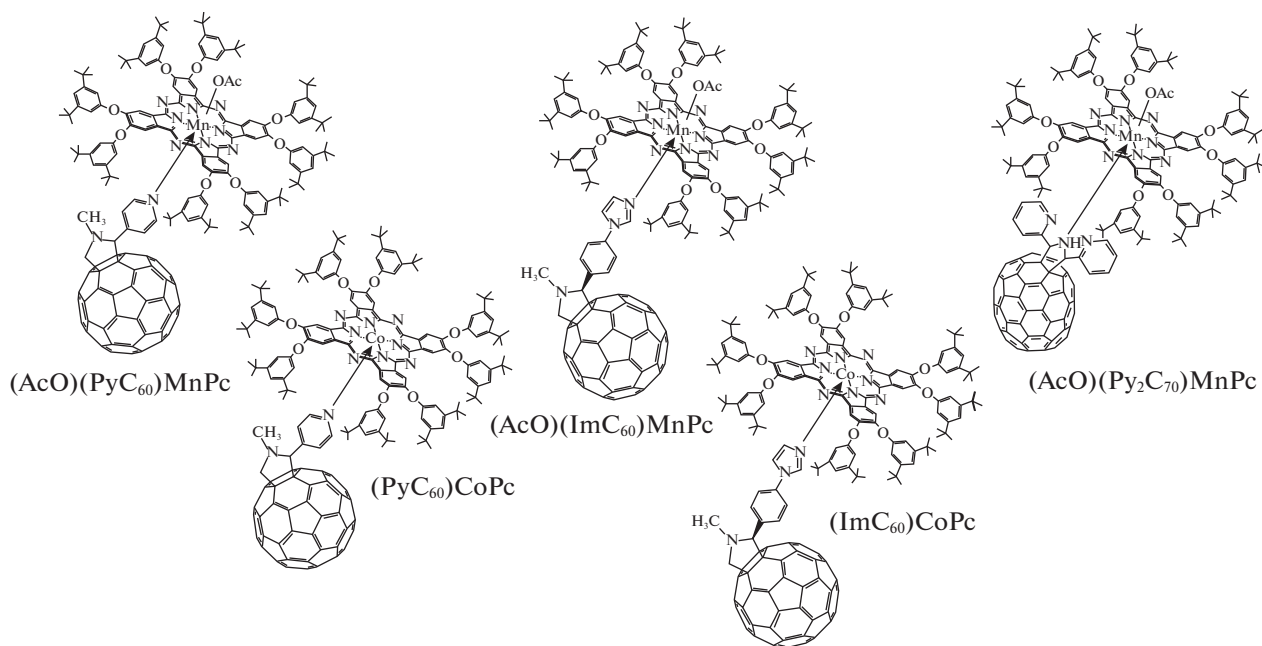


Рис. 1. Структурные формулы исследуемых D–A-комплексов.

го соединения с ионом металла. Анализ литературы показал, что большинство работ посвящено синтезу D–A-систем на основе порфиринов и фталоцианинов цинка [3, 10, 12]. Однако для расширения возможностей дизайна фотоактивных систем необходимо уделить внимание порфириновым и фталоцианиновым комплексам других *d*-металлов, а также *s*- и *p*-металлов. Так, например, комплексы кобальта, молибдена, рутения, обладая высокой координационной емкостью, образуют D–A-системы различного состава [18–22]. Наличие гидроксидных лигандов в порфиринах и фталоцианинах алюминия и олова открывает возможности получения ковалентных фуллерен-содержащих аксиальных комплексов [23, 24]. Координация марганца с макроциклическим лигандом также позволяет получать D–A-системы с потенциалом в качестве средств для сбора света во всем видимом и ближнем ИК-диапазоне для фотоэлектрических приложений [25–27].

Для разработки подходов в синтезе перспективных фотоактивных компонентов на основе порфирин- и фталоцианин-фуллереновых комплексов необходимо выявление взаимосвязи между химической структурой и параметрами, влияющими на эффективность процесса фотоиндуцированного переноса электрона. В настоящей работе в качестве объектов исследования выбраны D–A-системы на основе (октакис-3,5-ди-*трет*-бутилфенокси)фталоцианинато)кобальта(II) и марганца(III) (CoPc и (AcO)MnPc) и 1-*N*-метил-2-(пиридин-4-ил)-3,4-фуллеро[60]пирролидина (PyC<sub>60</sub>), 1-*N*-метил-4-(1*H*-имидазол-1'-

ил)-3,4-фуллеро[60]пирролидина (ImC<sub>60</sub>) и 2,5-ди-(пиридин-2-ил)-3,4-фуллеро[70]пирролидина (Py<sub>2</sub>C<sub>70</sub>) (рис. 1). Для определения времен жизни состояний с разделенными зарядами использован метод фемтосекундной абсорбционной спектроскопии как актуальный при исследовании динамики процессов, время протекания которых менее 1 нс.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Метод получения координационных донорно-акцепторных диад

Синтез D–A-систем (координационных диад) проведен путем самосборки в системах (октакис-3,5-ди-*трет*-бутилфенокси)фталоцианин кобальта(II) или марганца(III) – пиридил- или имидазол-замещенный фуллеро[60]- или фуллеро[70]пирролидин в толуоле. Подробное описание механизмов их образования, кинетических и термодинамических параметров и спектральных методов определения структуры представлено в работах [10, 28, 29]. Максимумы *Q*-полосы в электронных спектрах поглощения (ЭСП) и константы устойчивости как ключевые параметры диад приведены в табл. 1.

### Дифференциальные спектры поглощения тетрапиррольных комплексов и донорно-акцепторных диад на их основе

Использована установка для регистрации спектров фотоиндуцированного поглощения в

фемтосекундном диапазоне, созданная в Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (Москва). Разрешенные во времени дифференциальные спектры наведенного поглощения  $\Delta A(\lambda, t)$  измерялись методом "возбуждение—зондирование" с помощью фемтосекундной абсорбционной установки [10, 29] с использованием фемтосекундного титан-сапфирового лазера (800 нм, 80 МГц, 30 фс, "Цунами", Spectra-Physics, США). Для возбуждения объектов исследования использовались усиленные импульсы (800 нм, 100 Гц, 1.5 мДж, 40 фс), которые разделялись на два пучка. Один из пучков ослабляли до энергии 0.8 мДж и направляли на неколлинеарный оптический параметрический усилитель № 1 ("NOPA", Clark-MXR, США), излучение которого использовалось в качестве импульса накачки. Импульс накачки имел гауссову форму с максимумом излучения 690 (для CoPc и диад на его основе) и 735 нм (для (AcO)MnPc и диад на его основе), длительностью 25 фс, с энергией 150 мДж. Эта энергия является оптимальной для получения сигнала достаточной амплитуды. Второй пучок ослабляли до 0.4 мДж и направляли на неколлинеарный оптический параметрический усилитель № 2 ("Topas white", Light Conversion, Литва). Для создания зондирующего импульса суперконтинуума излучение пучка (890 нм, 35 фс, 10 мкДж) ослаблялось до 1 мкДж и фокусировалось на тонкой кварцевой ячейке с чистой H<sub>2</sub>O. Импульсы накачки и белого континуума фокусировались в пятно диаметром 300 и 120 мкм соответственно. Поляризации импульсов накачки и зондирования были ориентированы под магическим углом 54.7° друг к другу. Суперконтинуум диспергировался с помощью полихроматора (Action SP300, Roper Scientific, США) и регистрировался с помощью CCD-камеры ("Newton", Andor, США).

Дифференциальные спектры поглощения  $\Delta A(\lambda, t) = A(\lambda, t) - A_0(\lambda)$ , возникающие при импульсном фотовозбуждении, являются разностью двух спектров исследуемых образцов:  $A(\lambda, t)$  при времени задержки  $t$  и исходного спектра поглощения раствора образца без возбуждения  $A_0(\lambda)$ . Дифференциальные спектры  $\Delta A(\lambda, t)$  были записаны в спектральном диапазоне 380–850 нм. Измеренные спектры подвергались коррекции, учитывающей дисперсию групповой скорости континуума, по процедуре, описанной в работах [30, 31]. Эксперименты выполнялись при температуре 298 К в 0.5 мм оптической кювете в атмосфере азота, чтобы избежать контакта раствора пробы с воздухом.

Анализ временных характеристик дифференциальных спектров осуществлялся с помощью кинетического моделирования на основе сингулярного разложения (SVD) матрицы полученных

**Таблица 1.** Максимумы поглощения в ЭСП ( $Q$ -полосы,  $\lambda_{\max}$ ) и константы устойчивости D–A-диад,  $K$

D–A-диада	$\lambda_{\max}$ , нм (в толуоле)	$K \times 10^{-5}$ , л/моль
(PyC <sub>60</sub> )CoPc	609, 677	(5.62 ± 1.22) [28]
(ImC <sub>60</sub> )CoPc	610, 677	(6.60 ± 1.13) [29]
(AcO)(PyC <sub>60</sub> )MnPc	658, 730	(0.24 ± 0.02) [28]
(AcO)(ImC <sub>60</sub> )MnPc	655, 730	(0.38 ± 0.08) [29]
(AcO)(Py <sub>2</sub> C <sub>70</sub> )MnPc	656, 731	(0.48 ± 0.02) [10]

данных. Используемый подход предполагает рассмотрение всего массива экспериментальных значений  $\Delta A(\lambda, t)$ , где  $\Delta A$  отображает фотоиндуцированные изменения оптической плотности исследуемого образца (просветление и наведенное поглощение). Экспоненциальная обработка полученных данных на длине волны возбужденного состояния использована для определения времени жизни возбужденного состояния и констант скорости процессов переноса электрона.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

ЭСП CoPc и (AcO)MnPc имеют интенсивные  $Q$ -полосы при 673 и 727 нм, соответственно, обусловленные переходами ВЗМО–НВМО ( $a_{1u} \rightarrow e_g$ ). Высокая интенсивность  $Q$ -полос фталоцианиновых комплексов относительно макрогетероциклических аналогов, например металлопорфиринов, связана с расширением цикла и заменой четырех  $C_{\text{мезо}}$ - на N-атомы, что нарушает энергетический баланс между занятыми граничными орбиталями ( $a_{1u}$  и  $a_{2u}$ ) [32]. При образовании донорно-акцепторных комплексов исследуемых фталоцианинов с фуллеро[60]- и фуллеро[70]-пирролидинами  $Q$ -полосы в их ЭСП батохромно смещаются на 3–5 нм (табл. 1). Наблюдается уменьшение интенсивности  $Q$ -полос для всех случаев в 1.2–2 раза, что связано с появлением дополнительной донорно-акцепторной связи M–N<sub>фуллерен</sub>, которая вносит вклад в баланс энергетических уровней.

Дифференциальные спектры поглощения CoPc и (AcO)MnPc, измеренные в спектральном диапазоне от 380 до 850 нм при определенной временной задержке, представлены на рис. 2.

В дифференциальных спектрах можно выделить полосы поглощения  $\Delta A(\lambda, t) > 0$  из электронно-возбужденных состояний (excited state absorption – ESA-полосы) и полосы выцветания  $\Delta A(\lambda, t) < 0$  (bleaching – BL-полосы) [33]. BL-полосы в дифференциальных спектрах обусловлены обеднением основного состояния комплексов за счет возбуждения. В дифференциальном спектре поглощения CoPc (рис. 2а) BL-полосы проявляются

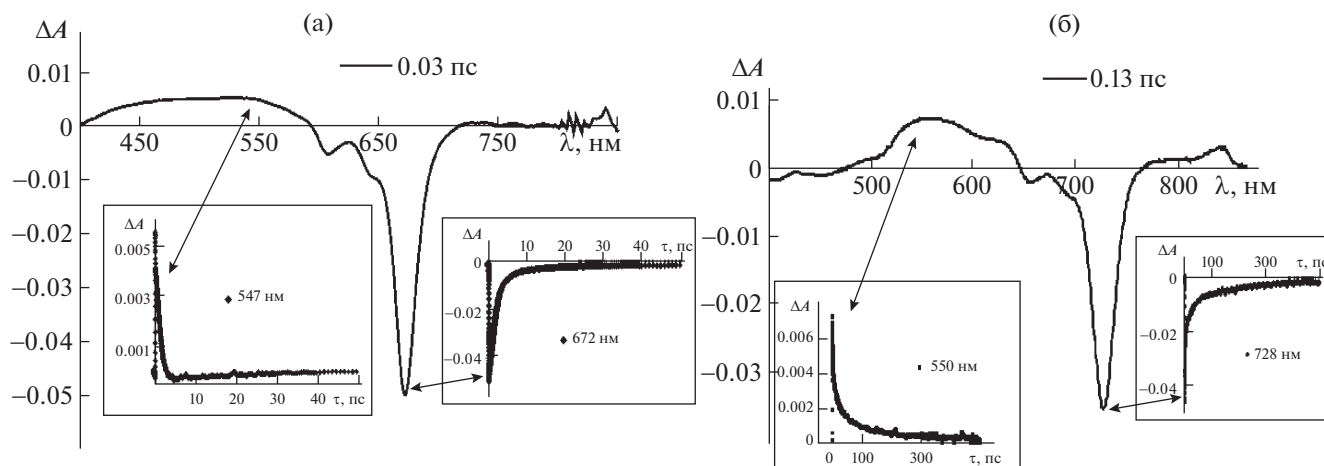


Рис. 2. Дифференциальные спектры поглощения CoPc (а) и (AcO)MnPc (б) при возбуждении импульсом 690 нм (а) и 735 нм (б) в толуоле, насыщенном азотом. На вставках показаны соответствующие кинетические кривые.

при 608, 643 и 672 нм в области  $Q$ -полосы, а ESA-полоса простирается от 478 до 550 нм. Вставка на рис. 2а показывает, что относительная интенсивность пика выцветания при 672 нм существенно изменяется во времени, тогда как изменение интенсивности пика возбужденного состояния при 547 нм менее значительно. Временной профиль для полос при 672 и 547 нм показывает очень быстрое восстановление этих сигналов. Постоянная времени для восстановления сигнала при 672 нм составляла 2.14 пс, в то время как экспоненциальное затухание пика при 547 нм показало постоянную времени 1.05 пс (рис. 2а, вставка).

В случае (AcO)MnPc (рис. 2б) полосы выцветания проявляются при 657 и 728 нм, тогда как полосы возбужденного состояния проявляются в области 520–630 нм и при 845 нм. Временной профиль поглощения (AcO)MnPc при 550 нм (вставка на рис. 2б) хорошо описывается триэкспоненциальной функцией, показывая два коротких времени жизни 0.68 и 15.89 пс и заметную составляющую длительного времени жизни 111.24 пс. Таким образом, замена атома металла во фталоцианиновом комплексе способствует изменению времени жизни возбужденного состояния.

Фотоиндуцированный перенос электрона от молекул CoPc и (AcO)MnPc к фуллерен-содержащему аксиальному лиганду наблюдается при возбуждении диад, растворенных в деаэрированном толуоле, импульсным лазерным излучением с длиной волны 690 и 735 нм соответственно.

Дифференциальные спектры поглощения на примере (Pc<sub>60</sub>)CoPc и (AcO)(Pc<sub>60</sub>)MnPc, измеренные в спектральном диапазоне от 380 до 850 нм при различных временах задержки, представлены на рис. 3 и 4. В дифференциальных спектрах поглощения диад наблюдаются небольшие сдвиги полос, подтверждающие образование состоя-

ния с разделенными зарядами – CoPc<sup>•+</sup> : Pc<sub>60</sub><sup>•-</sup> и (AcO)MnPc<sup>•+</sup> : Pc<sub>60</sub><sup>•-</sup>. Так, в случае (Pc<sub>60</sub>)CoPc BL полосы проявляются при 610, 644 и 677 нм, а ESA полосы (полосы CoPc<sup>•+</sup>) – при 548 и 729 нм (табл. 2). В случае (AcO)(Pc<sub>60</sub>)MnPc полосы выцветания находятся при 656 и 727 нм, а полосы возбужденного состояния (полосы (AcO)MnPc<sup>•+</sup>) – при 561 и 835 нм (табл. 2). К сожалению, условия эксперимента (спектральный диапазон приборной установки от 400 до 900 нм) не позволяют обнаружить переходную полосу  $\pi$ -анион радикальной формы Pc<sub>60</sub><sup>•-</sup> в диадах, так как она проявляется в ближней ИК-области от 950 до 1020 нм [16, 34].

Время жизни состояния с разделенными зарядами в D–A-диадах определялось путем экспоненциальной аппроксимации экспериментальных кривых дифференциального поглощения (рис. 3, 4, вставки). Первый участок кинетической кривой описывает рост сигнала разностного поглощения и позволяет определить время образования возбужденного состояния ( $\tau_{CS}$ ), а второй участок, характеризующийся падением разностного поглощения, позволяет определить его время жизни ( $\tau_{CR}$ ). Обнаружено, что возбужденное состояние CoPc<sup>•+</sup> в диадах (Pc<sub>60</sub>)CoPc и (ImC<sub>60</sub>)CoPc образуется за 5 и 7 фс и его время жизни, определенное по двухэкспоненциальной зависимости, составляет 9.92 и 20.89 пс соответственно. В случае диад на основе марганец(III) фталоцианина время образования возбужденного состояния (AcO)MnPc<sup>•+</sup> около 0.06–0.08 пс, а время его жизни описывается трехэкспоненциальной зависимостью и самая длительная составляющая  $\tau_{CR}$  равна 144.41,

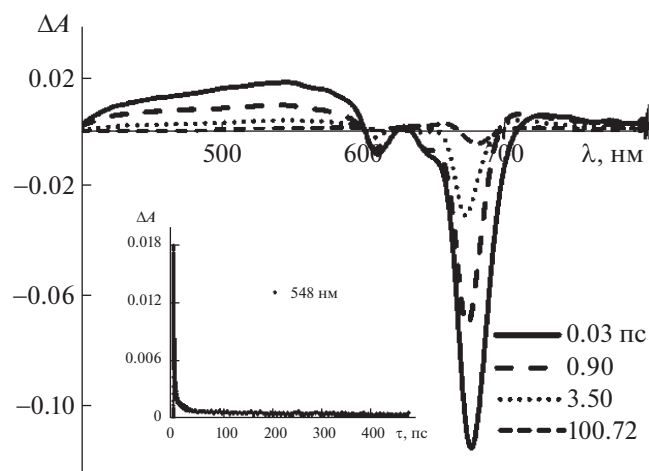


Рис. 3. Дифференциальные спектры поглощения  $(\text{PyC}_{60})\text{CoPc}$  при возбуждении импульсом 690 нм в деаэрированном толуоле. На вставке показана соответствующая кинетическая кривая.

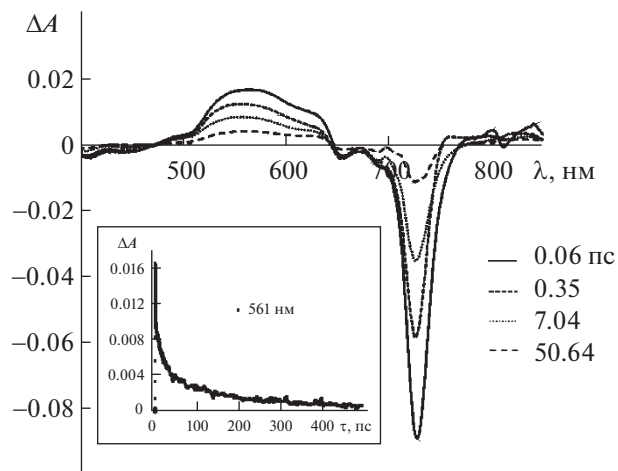


Рис. 4. Дифференциальные спектры поглощения  $(\text{AcO})(\text{PyC}_{60})\text{MnPc}$  при возбуждении импульсом 735 нм в деаэрированном толуоле. На вставке показана соответствующая кинетическая кривая.

128.71 и 82.63 пс для  $(\text{AcO})(\text{PyC}_{60})\text{MnPc}$ ,  $(\text{AcO})(\text{ImC}_{60})\text{MnPc}$  и  $(\text{AcO})(\text{Py}_2\text{C}_{70})\text{MnPc}$  соответственно (табл. 2). Константы скорости разделения ( $k_{\text{CS}}$ ) и рекомбинации ( $k_{\text{CR}}$ ) зарядов представлены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что величина  $k_{\text{CR}}$  для D–A-диад на 1–3 порядка меньше, чем

значения  $k_{\text{CS}}$ . Такая тенденция обычно наблюдается для порфириновых и фталоцианиновых фуллереновых диад из-за низкой энергии реорганизации фуллерена [12, 16]. Из табл. 2 также видно, что вариация фуллеропирролидинов в составе D–A-диад влияет на значения  $k_{\text{CR}}$ . По результатам определения времен жизни состояний с разделенными зарядами,

Таблица 2. Максимумы BL- и ESA-полос в дифференциальных спектрах поглощения диад, длина волны поглощения с временным профилем ( $\lambda$ , нм), времена образования и жизни возбужденного состояния ( $\tau_{\text{CS}}$ ,  $\tau_{\text{CR}}$ ) и константы скорости разделения ( $k_{\text{CS}}$ ) и рекомбинации ( $k_{\text{CR}}$ ) зарядов в диадах в толуоле

Комплекс	BL-полосы, нм	ESA-полосы, нм	$\lambda$ , нм	$\tau_{\text{CS}}$ , пс	$k_{\text{CS}}$ , $\text{с}^{-1}$	$\tau_{\text{CR}}$ , пс	$k_{\text{CR}}$ , $\text{с}^{-1}$
CoPc	608, 643, 672	в области 478–550	547	0.003		1.05	
$(\text{PyC}_{60})\text{CoPc}$	610, 643, 677	548, 729	548	0.005	$2.0 \times 10^{14}$	1.05 9.92	$9.52 \times 10^{11}$ $1.01 \times 10^{11}$
$(\text{ImC}_{60})\text{CoPc}$	611, 643, 677	548, 840	548	0.007	$1.43 \times 10^{14}$	1.55 20.89	$6.45 \times 10^{11}$ $4.78 \times 10^{10}$
$(\text{AcO})\text{MnPc}$	657, 728	в области 520–630, 845	550	0.03		0.68 15.89 111.24	
$(\text{AcO})(\text{PyC}_{60})\text{MnPc}$	656, 727	561, 835	561	0.06	$1.67 \times 10^{13}$	0.30 16.84 144.41	$3.33 \times 10^{12}$ $5.94 \times 10^{10}$ $6.92 \times 10^9$
$(\text{AcO})(\text{ImC}_{60})\text{MnPc}$	655, 728	557, 838	557	0.074	$1.35 \times 10^{13}$	0.38 16.74 128.71	$2.63 \times 10^{12}$ $5.97 \times 10^{10}$ $7.77 \times 10^9$
$(\text{AcO})(\text{Py}_2\text{C}_{70})\text{MnPc}$	658, 734	553, 837	553	0.085	$1.18 \times 10^{13}$	0.39 8.63 82.63	$2.56 \times 10^{12}$ $1.16 \times 10^{11}$ $1.24 \times 10^{10}$

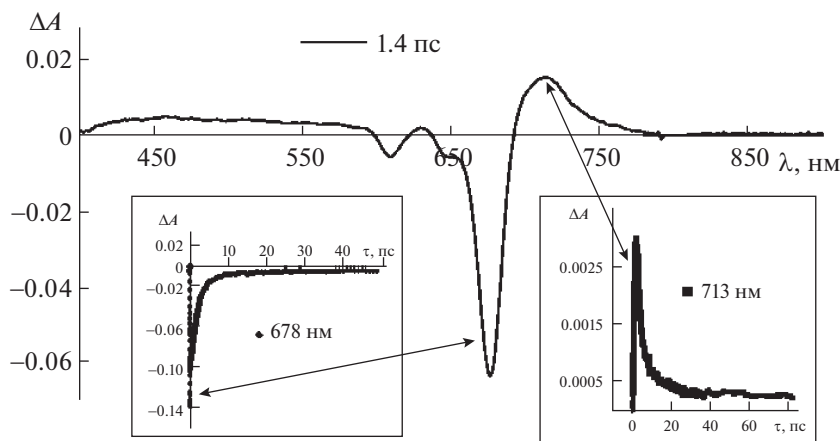


Рис. 5. Дифференциальные спектры поглощения CoPc при возбуждении импульсом 685 нм в деаэрированном 1,2-дихлорбензоле. На вставках показаны соответствующие кинетические кривые.

$\tau_{CR}$ , системы на основе (AcO)MnPc более перспективны для оптоэлектроники по сравнению с таковыми на основе CoPc.

Несмотря на то, что результаты фемтосекундных исследований показывают малое время жизни возбужденных состояний порфиринов и фталоцианинов кобальта(II) [29, 35, 36], они могут использоваться в качестве донорных строительных блоков для систем с переносом заряда, построенных по другим стратегиям. В работах [37, 38] методом самосборки в растворе были получены сокристаллы с переносом заряда на основе порфирина кобальта и фуллеренов ( $C_{70}$ ,  $C_{60}$ ), которые демонстрируют превосходную электропроводность, высокую “подвижность” дырок, чрезвычайно высокую термическую стабильность и сильные межмолекулярные взаимодействия между фуллереном и порфирином кобальта. В работах [37, 38] также было показано, что сокристаллизация с переносом заряда является мощной стратегией для рационального проектирования и создания широкого класса проводящих элементов для электроники нового поколения. Авторы работ [39, 40] для выяснения причин повышенной электрокаталитической активности систем на основе оксида графена и порфирина кобальта исследовали их, используя спектроскопические измерения с временным разрешением и теоретические расчеты. Фотовозбуждение этих наногибридных систем видимым светом приводит к быстрому разделению зарядов, вызывая восстановление электроакцепторных одностенных углеродных нанотрубок и окисление электронодонорных порфиринов. Измерения переходного поглощения подтверждают, что ион-радикальные пары являются долгоживущими, со временем жизни в микросекундном диапазоне. В работе [36] показано, что время жизни возбужденного состояния порфирина кобальта(II) может быть

увеличено изменением природы растворителя. Мы провели исследование фемтосекундных спектров CoPc в деаэрированном 1,2-дихлорбензоле. CoPc демонстрирует хорошую растворимость и стабильность при сильном лазерном облучении в этой среде, как и в толуоле. В дифференциальном спектре CoPc в 1,2-дихлорбензоле полосы выцветания проявляются при 612, 649 и 678 нм, а полосы возбужденного состояния при 471 и 713 нм (рис. 5). Время образования возбужденного состояния, определенное из временного профиля поглощения при 713 нм, составляет 1.52 пс, а время его жизни 26.86 пс. Таким образом, замена толуола на 1,2-дихлорбензол в качестве растворителя увеличило  $\tau_{CR}$  в 26 раз.

Таким образом, в данной работе методом фемтосекундной абсорбционной спектроскопии показано, что октаakis-3,5-ди-*трет*-бутилфенокси)фталоцианины кобальта(II) и марганца(III) образуют фотоиндуцированные состояния с разделенными зарядами – радикальные соли в составе донорно-акцепторных координационных диад с N-гетероциклическими производными фуллеро[60]- и фуллеро[70]пирролидинами. Анализом дифференциальных спектров и временных профилей поглощения D–A-диад получены ключевые константы для их возбужденных состояний в зависимости от природы иона металла во фталоцианиновом доноре электрона, строения фуллерен-содержащего акцептора и растворителя. Так, на количественном уровне показано, что фталоцианины кобальта(II) и марганца(III) пригодны для получения D–A-систем с акцепторами фуллереновой природы и что их возбужденными состояниями в виде радикальных солей можно управлять.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 21-73-20090. Авторы выражают благодарность за проведение



исследований дифференциальных спектров поглощения донорно-акцепторных систем проф., д.х.н. В.А. Надточенко, к.х.н. И.В. Шелаеву, Ф.Е. Гостеву. Работа выполнена на оборудовании Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (Москва) и Центра коллективного пользования научным оборудованием “Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhu P.H., Song F.F., Ma P. et al. // *Dyes Pigments*. 2018. V. 151. P. 385.  
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.01.012>
2. Бичан Н.Г., Овченкова Е.Н. // *Изв. АН, Сер. хим.* 2021. Т. 70. № 2. С. 239.  
<https://doi.org/10.1007/s11172-021-3081-y>
3. Lu X.-J., Zhang C.-R., Shen Y.-L. et al. // *J. Mol. Struct.* 2018. V. 1173. P. 398.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.07.018>
4. Ji W., Wang T.-X., Ding X. et al. // *Coord. Chem. Rev.* 2021. V. 439. P. 213875.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213875>
5. Basiuk V.A., Tahuilan-Anguiano D.E. // *Chem. Phys. Lett.* 2019. V. 722. P. 146.  
<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.03.019>
6. Ganesamoorthy R., Sathiyam G., Sakthivel P. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2017. V. 161. P. 102.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.11.024>
7. Schwarz F.P., Gouterman M., Muljiani Z. et al. // *Department of Chemistry, Harvard University, Cambridge Bioinorg. Chem.* 1972. V. 2. № 1. P. 1.
8. Bhattacharya S., Reddy G., Paul S. et al. // *Dyes Pigments*. 2021. V. 184. P. 108791.  
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108791>
9. Hong J., Fauvell T.J., Helweh W. et al. // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2019. V. 372. P. 270.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.12.026>
10. Ovchenkova E.N., Bichan N.G., Gostev F.E. et al. // *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 2021. V. 263. P. 120166.  
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120166>
11. Kc C.B., D'Souza F. // *Coord. Chem. Rev.* 2016. V. 322. P. 104.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2016.05.012>
12. Das S.K., Song B., Mahler A. et al. // *J. Phys. Chem. C*. 2014. V. 118. № 8. P. 3994.  
<https://doi.org/10.1021/jp4118166>
13. Follana-Berná J., Seetharaman S., Martín-Gomis L. et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2018. V. 20. № 11. P. 7798.  
<https://doi.org/10.1039/C8CP00382C>
14. Wijesinghe C.A., El-Khouly M.E., Zandler M.E. et al. // *Chem. – A Eur. J.* 2013. V. 19. № 29. P. 9629.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201300877>
15. Pelado B., Abou-Chahine F., Calbo J. et al. // *Chem. – A Eur. J.* 2015. V. 21. № 15. P. 5814.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201406514>
16. Seetharaman S., Jang Y., Kc C. et al. // *J. Porphyrins Phthalocyanines*. 2018. V. 21. № 12. P. 1.  
<https://doi.org/10.1142/s1088424617500924>
17. Ince M., Hausmann A., Martinez-Diaz M.V. et al. // *Chem. Commun.* 2012. V. 48. № 34. P. 4058.  
<https://doi.org/10.1039/c2cc30632h>
18. Rodríguez-Morgade M.S., Plonska-Brzezinska M.E., Athans A.J. et al. // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. V. 131. № 30. P. 10484.  
<https://doi.org/10.1021/ja902471w>
19. Motorina E.V., Lomova T.N., Klyuev M.V. // *Mendeleev Commun.* 2018. V. 28. № 4. P. 426.  
<https://doi.org/10.1016/j.mencom.2018.07.029>
20. Bichan N.G., Ovchenkova E.N., Mozgova V.A. et al. // *Polyhedron*. 2021. V. 203. P. 115223.  
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2021.115223>
21. Ovchenkova E.N., Bichan N.G., Gruzdev M.S. et al. // *New J. Chem.* 2021. V. 45. P. 9053.  
<https://doi.org/10.1039/D1NJ00980J>
22. Subedi D.R., Jang Y., Ganesan A. et al. // *J. Porphyrins Phthalocyanines*. 2021. V. 25. № 05–06. P. 533.  
<https://doi.org/10.1142/S1088424621500449>
23. Zarrabi N., Poddutoori P.K. // *Coord. Chem. Rev.* 2021. V. 429. P. 213561.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213561>
24. Zhao H., Zhu Y., Chen C. et al. // *Polymer*. 2014. V. 55. № 8. P. 1913.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.02.058>
25. El Mahdy A.M., Halim S.A., Taha H.O. // *J. Mol. Struct.* 2018. V. 1160. P. 415.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.02.041>
26. Ovchenkova E.N., Bichan N.G., Kudryakova N.O. et al. // *Dyes Pigments*. 2018. V. 153. № P. 225.  
<https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.02.023>
27. Овченкова Е.Н., Бичан Н.Г., Ломова Т.Н. // *Журн. орган. химии*. 2016. Т. 52. № 10. С. 1509.  
<https://doi.org/10.1134/s1070428016100213>
28. Bichan N.G., Ovchenkova E.N., Tsaturyan A.A. et al. // *New J. Chem.* 2020. V. 44. № 26. P. 11262.  
<https://doi.org/10.1039/D0NJ02166K>
29. Ovchenkova E.N., Bichan N.G., Tsaturyan A.A. et al. // *J. Phys. Chem. C*. 2020. V. 124. № 7. P. 4010.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b11661>
30. Shelaev I.V., Gostev F.E., Vishnev M.I. et al. // *J. Photochem. Photobiol. B: Biology*. 2011. V. 104. № 1. P. 44.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2011.02.003>
31. Kovalenko S.A., Dobryakov A.L., Ruthmann J. et al. // *Phys. Rev. A*. 1999. V. 59. № 3. P. 2369.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.59.2369>
32. Mack J., Stillman M.J., in “The Porphyrin Handbook” (Kadish K.M., Smith K.M., and Guillard R., eds.). Academic Press. Amsterdam, 2003. P. 43.
33. Михайлов К.М. Динамика фотовозбужденных димеров и тримеров порфирина цинка на фемто- и пикосекундной шкале времен: Дис. ... канд. хим.

- наук. М.: Институт химической физики РАН, 2018. 97 с.
34. *Guldi D.M., Rahman G.M.A., Jux N. et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. V. 127. № 27. P. 9830.  
<https://doi.org/10.1021/ja050930o>
35. *Lopnow G.R., Melamed D., Leheny A.R. et al.* // *J. Phys. Chem.* 1993. V. 97. № 35. P. 8969.  
<https://doi.org/10.1021/j100137a022>
36. *Yu H.Z., Baskin J.S., Steiger B. et al.* // *Chem. Phys. Lett.* 1998. V. 293. № 1. P. 1.  
[https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(98\)00753-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(98)00753-2)
37. *Zheng S., Zhong J., Matsuda W. et al.* // *Nano Research.* 2018. V. 11. № 4. P. 1917.  
<https://doi.org/10.1007/s12274-017-1809-7>
38. *Wakahara T., D'Angelo P., Miyazawa K.I. et al.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2012. V. 134. № 17. P. 7204.  
<https://doi.org/10.1021/ja211951v>
39. *Cho S., Lim J.M., You J.-M. et al.* // *Isr. J. Chem.* 2016. V. 56. № 2–3. P. 169.  
<https://doi.org/10.1002/ijch.201500022>
40. *You J.-M., Han H.S., Lee H.K. et al.* // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2014. V. 39. № 10. P. 4803.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.107>