

02

Молекулярная фотоника мономеров 3,3'-диэтил-9-метилтиакарбоцианина и димерных комплексов с кукурбит[8]урилом

© Т.В. Федотова^{1,2}, Г.В. Захарова¹, А.К. Чибисов^{1,2}

¹ Центр фотохимии РАН, ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, 119421 Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), 141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

e-mail: tatyana.fedotova@phystech.edu, gvzakharova@gmail.com, alexander.chibisov@gmail.com

Поступила в редакцию 30.11.2021 г.

В окончательной редакции 30.11.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

Проведено сравнительное исследование спектрально-люминесцентных и спектрально-кинетических свойств 3,3'-диэтил-9-метилтиакарбоцианина (МТКЦ) и 3,3'-диэтилтиакарбоцианина (ТКЦ) и их комплексов с кукурбит[8]урилом в водных растворах. Димерные комплексы ТКЦ с кукурбит[8]урилом, состоящие из *транс*-изомеров, проявляют только замедленную флуоресценцию, тогда как димерные комплексы МТКЦ состоят из *цис*-изомеров и проявляют как замедленную флуоресценцию, так и фосфоресценцию в воде. Димерные комплексы МТКЦ и ТКЦ с кукурбит[8]урилом участвуют в реакции фотопереноса электрона, в которой димерный комплекс МТКЦ проявляет большую способность вступать в реакции фотоокисления.

Ключевые слова: полиметиновые красители, *транс-цис*-изомеризация, кукурбитурилы, поглощение, флуоресценция, триплет-триплетное поглощение, фотоперенос электрона.

DOI: 10.21883/OS.2022.05.52420.3-22

Введение

Известно [1–3], что для мономеров тиакробоцианиновых красителей характерным является существование в растворах равновесия между *транс*- и *цис*-изомерами, положение которого зависит от структуры молекулы и полярности растворителя. Для незамещенных тиакробоцианинов, например для 3,3'-диэтилтиакарбоцианина (ТКЦ), стабильным является *транс*-изомер [4]. При этом *транс*→*цис*-переход является стерически затрудненным, и полярность растворителя не оказывает влияния на положение *транс*⇌*цис*-равновесия. Вместе с тем для алкилмезозамещенного тиакробоцианина (3,3'-диэтил-9-метилтиакарбоцианина (МТКЦ)) существует равновесие между *транс*- и *цис*-изомерами [3], положение которого зависит от полярности растворителя. При увеличении полярности растворителя происходит смещение равновесия в сторону *цис*-изомера [5]. Известно также, что тиакробоцианины проявляют способность к агрегации [6–8] с образованием димеров как простейших супрамолекулярных систем [8,9]. Так, равновесие мономер⇌димер ТКЦ смещается в сторону димеров с ростом концентрации красителя в воде. Наряду с *транс-цис*-фотоизомеризацией мономеры полиметиновых красителей участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, протекающих с участием триплетного состояния [10]. Димеры полиметинов проявляют способность к реакции переноса электрона в триплетном состоянии [11–13]. Так, для анионных

тиамоно- и тиатриметиновых красителей продуктом одноэлектронного окисления димеров в триплетном состоянии является димерный анион-радикал красителя, который в силу неустойчивости спонтанно диссоциирует за 10–30 с [13] на нейтральный радикал и анион красителя. Вместе с тем характерной особенностью полиметиновых красителей является способность к образованию комплексов с молекулами кавитандов и, в частности, с молекулами кукурбит[7,8]урилов [14–16]. В работе [16] было показано, что *транс*-ТКЦ образует с кукурбит[8]урилом (КБ8) димерные комплексы состава 2:2, проявляющие способность к интеркомбинационному переходу в триплетное состояние. Относительно большое время жизни димерных комплексов в триплетном состоянии ($\tau_T \sim 1 \cdot 10^{-4}$ s) позволяет использовать их при триплет-триплетном (Т-Т) переносе энергии [17,18] и в реакции фотопереноса электрона [19].

В настоящей работе было проведено сравнительное исследование спектрально-люминесцентных и спектрально-кинетических свойств МТКЦ и ТКЦ и их димерных комплексов с КБ8 в водных растворах.

Методика эксперимента

Исследования проводили с полиметиновыми красителями — МТКЦ-йодид и ТКЦ-йодид, синтезированными в НИИХИМФОТОПРОЕКТе. В качестве кавитанда использовали КБ8 (Aldrich), в качестве акцепторов

электронов — *n*-нитроацетофенон и 1,4-динитробензол (Aldrich). Измерения проводили в метаноле, этаноле, ацетонитриле (Aldrich) и в воде, очищенной с помощью системы Direct-Q3 Millipore. Принимая во внимание ограниченную растворимость красителя в воде, растворы готовили путем добавления к водному раствору 2–5 μ l насыщенного раствора красителя в диметилсульфоксиде (Aldrich). Спектры поглощения регистрировали на спектрофотометре Agilent 8453. Люминесцентные измерения выполняли на спектрофлуориметре Cary Eclipse. Спектры замедленной флуоресценции и фосфоресценции регистрировали через 100 μ s после прекращения излучения импульсной лампы как источника возбуждения (опция спектрофлуориметра). Измерение спектров Т-Т-поглощения и кинетики дезактивации триплетного состояния проводили на установке ns-лазерного фотолиза [20–22]. Растворы красителей облучали импульсами лазера на иттрий-алюминий гранате (Nd:YAG, „Solar“, $\lambda = 532$ nm) с длительностью импульса 10 ns и энергией до 70 μ J. Удаление кислорода воздуха достигали путем продувки раствора газообразным аргоном. Спектрально-люминесцентные измерения выполняли при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Для мономеров МТКЦ и ТКЦ принципиально возможно существование четырех связанных равновесий (схема 1): между *транс*- и *цис*-мономерами (1), *транс*-мономерами и *транс*-димерами (2), *цис*-мономерами и *цис*-димерами (3), *транс*- и *цис*-димерами (4).

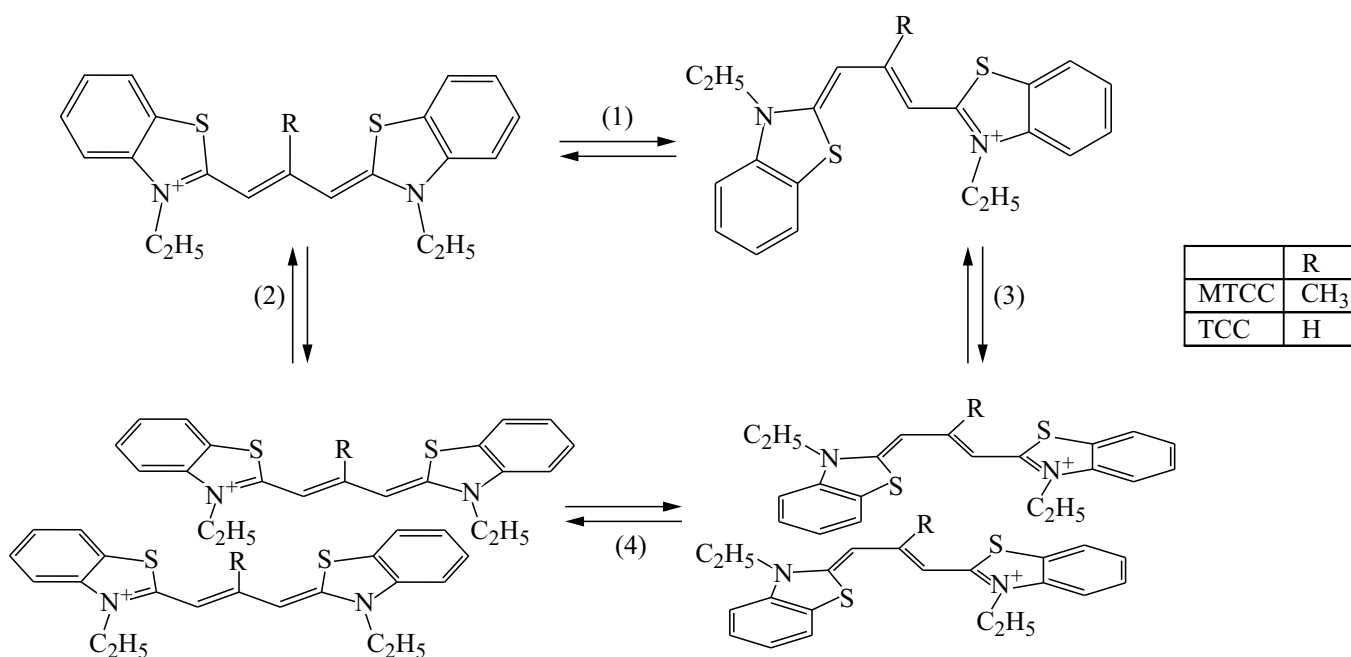


Схема 1.

В разбавленном водном растворе, как в полярной среде, молекулы МТКЦ находятся преимущественно в виде *цис*-мономеров, тогда как в малополярных растворителях (хлороформ, дихлорэтан, диоксан) молекулы МТКЦ присутствуют в виде *транс*-изомера [3,5]. На рис. 1 представлен нормированный спектр поглощения МТКЦ в воде с максимумом при 540 nm и плечом при 504 nm, поглощение которого увеличивается с ростом концентрации красителя. Максимум при 540 nm относится к *цис*-изомеру, тогда как плечо является результатом наложения полос поглощения *цис*-димера и *цис*-мономера красителя (равновесие 3, схема 1). С ростом концентрации МТКЦ в воде до $1.2 \cdot 10^{-5}$ mol/l наблюдается увеличение поглощения при 504 nm вследствие возрастания концентрации димера. Значение константы димеризации (*d*) МТКЦ, рассчитанное из отношения Харриса-Хоббса [23], составляет $1.1 \cdot 10^5$ l/mol. В метаноле димеры красителя диссоциируют на сольватированные молекулы (рис. 1). В отличие от МТКЦ молекулы ТКЦ находятся в виде *транс*-изомера в средах различной полярности [3].

В работе были измерены спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции МТКЦ в воде, представленные на рис. 2. Положение максимума спектра возбуждения флуоресценции (548 nm) отличается от положения максимума спектра поглощения (рис. 1), что подтверждает существование двух форм, одна из которых (*цис*-изомеры) не флуоресцирует. *Цис*-димеры МТКЦ также не проявляют флуоресценцию подобно нефлуоресцирующим димерам ТКЦ, состоящим из *транс*-изомеров [8,24].

Присутствие КБ8 в водном растворе МТКЦ приводит к значительным изменениям в спектрах поглощения и

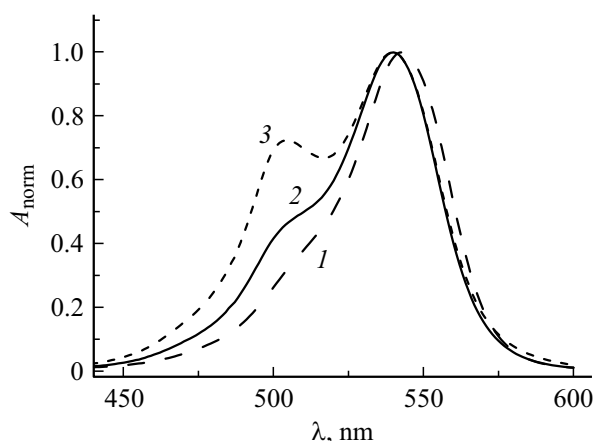


Рис. 1. Нормированные спектры поглощения МТКЦ в метаноле (1) в концентрации $5 \cdot 10^{-6}$ mol/l и в воде в концентрациях $5 \cdot 10^{-6}$ (2) и $1.2 \cdot 10^{-5}$ mol/l (3).

флуоресценции МТКЦ в результате образования комплексов. На рис. 3 приведены спектры поглощения МТКЦ в воде в отсутствие и в присутствии КБ8. При добавлении КБ8 в раствор красителя происходит уменьшение поглощения МТКЦ при 540 nm с одновременным увеличением поглощения при 520 nm, относящегося к димерным комплексам $2[\text{МТКЦ}@\text{КБ8}]$ и смещенного на 16 nm в коротковолновую область относительно димеров МТКЦ в воде. Согласно [16,18], комплекс $2[\text{МТКЦ}@\text{КБ8}]$ имеет состав 2:2.

На рис. 4 приведены спектры флуоресценции МТКЦ, измеренные в отсутствие (спектр 1) и в присутствии КБ8 (спектр 2), при возбуждении люминесценции в полосе поглощения димерных комплексов МТКЦ с КБ8 (520 nm). Спектр 1 с максимумом при 565 nm относится к флуоресценции мономеров МТКЦ. Спектр 2 характеризуется тремя максимумами, из которых максимум при 604 nm относится к флуоресценции димерных комплексов МТКЦ с КБ8, а максимумы при 670 и 705 nm — к фосфоресценции. Измерение спектра фосфоресценции обескислороженного раствора МТКЦ в присутствии КБ8 (рис. 4, спектр 3) подтвердило правильность отнесения полос при 670 и 705 nm к фосфоресценции димерных комплексов. Плечо при 600 nm в спектре фосфоресценции обусловлено замедленной флуоресценцией димерных комплексов МТКЦ с КБ8. Время затухания фосфоресценции димерных комплексов, измеренное в обескислороженном растворе при комнатной температуре при 676 и 707 nm, составляет $2.8 \cdot 10^{-4}$ s. Совпадение времени жизни, измеренное в 2 максимумах, подтверждает факт наличия 2 максимумов в спектре фосфоресценции димерного комплекса. Важно подчеркнуть, что, согласно [16], димерные комплексы, состоящие из *транс*-ТКЦ и КБ8, проявляют исключительно замедленную флуоресценцию, время затухания которой составляет $1.5 \cdot 10^{-2}$ s.

В работе были также проведены спектрально-кинетические измерения промежуточных продуктов лазерного возбуждения мономеров МТКЦ в органических растворителях (метанол, этанол, ацетонитрил), а также димеров и их димерных комплексов с КБ8 в воде. При лазерном возбуждении водных растворов наблюдали кратковременные обратимые изменения в спектрах поглощения, обусловленные интеркомбинационным переходом в триплетное состояние. На рис. 5 представлены разностные спектры поглощения обескислороженного раствора МТКЦ в этаноле, измеренные через различные промежутки времени после лазерного импульса. Отрицательный максимум при 550 nm отражает обеднение основного уровня мономеров МТКЦ, тогда как положительный максимум при 620 nm относится к Т-Т-поглощению мономеров МТКЦ. Спектральные изменения при $\lambda < 470$ nm также относятся к Т-Т-поглощению. Время жизни мономеров в триплетном состоянии составляет $9.5 \cdot 10^{-6}$ s (рис. 5, вставка).

Разностный спектр поглощения водного раствора МТКЦ (рис. 6) характеризуется наличием положитель-

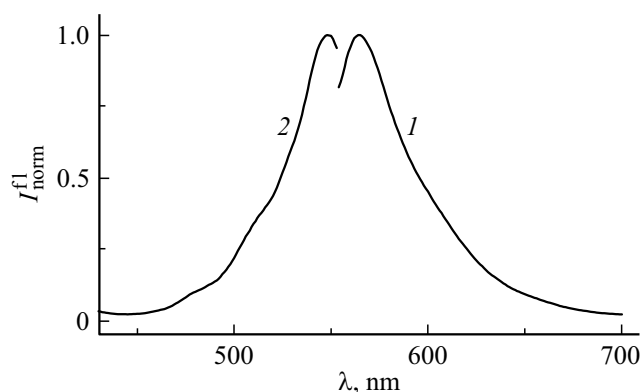


Рис. 2. Нормированные спектры флуоресценции (1, возбуждение на $\lambda_{\text{ex}} = 540$ nm) и возбуждения флуоресценции (2, наблюдение на $\lambda_{\text{obs}} = 564$ nm) МТКЦ в воде ($1.3 \cdot 10^{-6}$ mol/l).

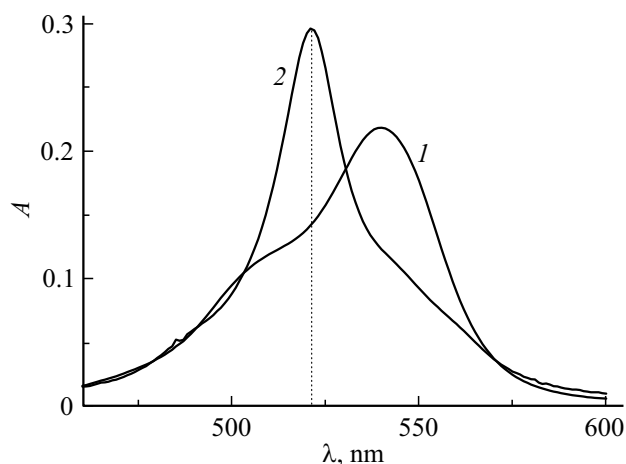


Рис. 3. Спектры поглощения МТКЦ ($1.6 \cdot 10^{-6}$ mol/l) в отсутствие (1) и в присутствии (2) КБ8 ($2.5 \cdot 10^{-5}$ mol/l) в воде.

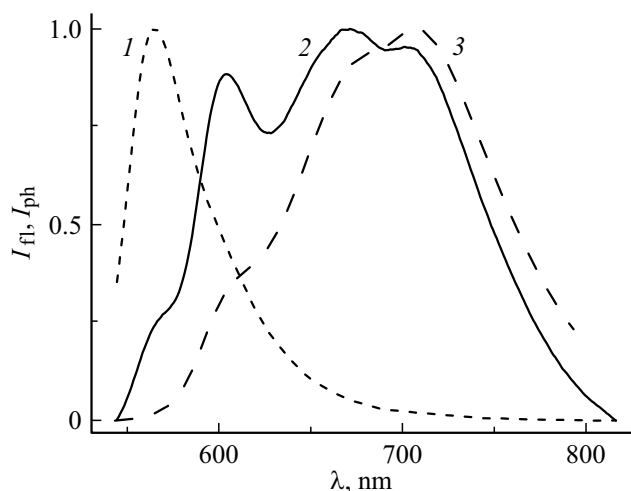


Рис. 4. Нормированные спектры флуоресценции растворов МТКЦ в отсутствие (1) и в присутствии КБ8 (2) и спектр фосфоресценции обескислороженного раствора МТКЦ в присутствии КБ8 (3). Концентрации МТКЦ — $1.6 \cdot 10^{-6}$ mol/l, КБ8 — $2.5 \cdot 10^{-5}$ mol/l; $\lambda_{ex} = 520$ nm.

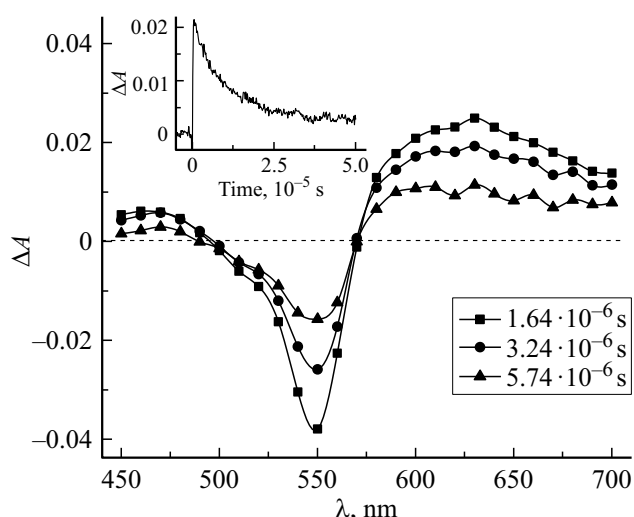


Рис. 5. Время-разрешенные разностные спектры Т-Т-поглощения обескислороженного раствора МТКЦ в этаноле. Концентрация МТКЦ $1.3 \cdot 10^{-4}$ mol/l. В рамке — время измерения спектров. На вставке — кинетика дезактивации триплетного состояния красителя при 650 nm.

ных и отрицательных максимумов. Отрицательные максимумы при 500 и 550 nm отражают выцветание полос димеров и мономеров соответственно, обусловленное обеднением основных уровней. Максимум при 525 nm относится к Т-Т-поглощению димеров красителя. Широкая полоса ($\lambda > 620$ nm) является наложением спектров Т-Т-поглощения мономеров и димеров МТКЦ. В водном растворе время жизни мономеров МТКЦ в триплетном состоянии составляет $4 \cdot 10^{-5}$ s, димеров — $1 \cdot 10^{-5}$ s.

На рис. 7 представлены разностные спектры Т-Т-поглощения обескислороженного водного раствора

МТКЦ в присутствии КБ8. Спектры характеризуются наличием положительных и отрицательных максимумов. Полосы при 550 nm и $\lambda > 620$ nm относятся к Т-Т-поглощению димерных комплексов МТКЦ с КБ8. В спектре Т-Т-поглощения комплекса наблюдается смещение максимума в длинноволновую область на 25 nm по отношению к максимуму Т-Т-поглощения димеров. Спектр подобен спектру Т-Т-поглощения димерного комплекса ТКЦ с КБ8 и спектрам Т-Т-поглощения димеров полиметинов [25]. Время жизни триплетного состояния (τ_T) димерного комплекса составляет $2.8 \cdot 10^{-4}$ s, совпа-

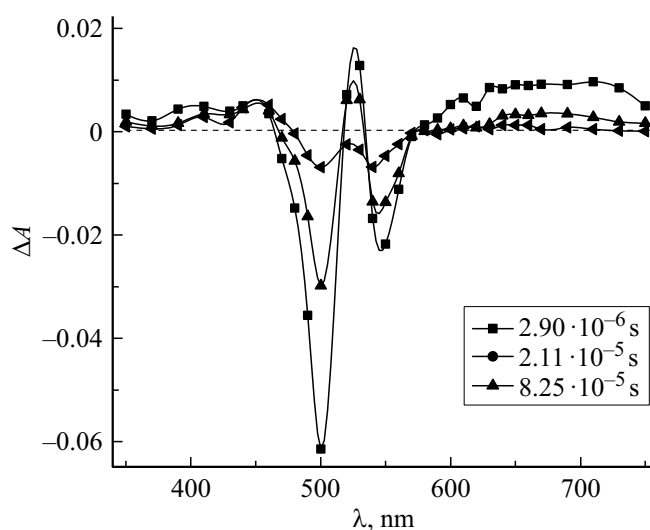


Рис. 6. Время-разрешенные разностные спектры Т-Т-поглощения обескислороженного водного раствора МТКЦ. Концентрация МТКЦ $1.3 \cdot 10^{-4}$ mol/l. В рамке — время измерения спектров.

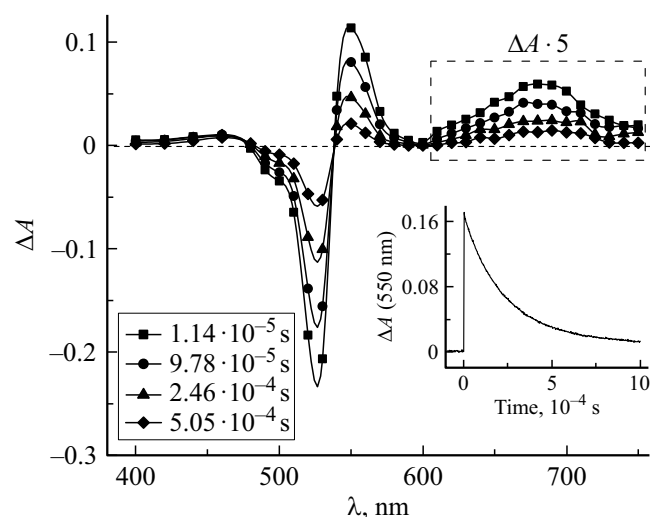


Рис. 7. Время-разрешенные разностные спектры Т-Т-поглощения водного раствора МТКЦ ($1 \cdot 10^{-4}$ mol/l) в присутствии КБ8 ($5 \cdot 10^{-5}$ mol/l). На вставке — кинетическая кривая дезактивации триплетного состояния при 550 nm. В рамке — время измерения спектров; в штриховой рамке — спектры в увеличенном масштабе ($\Delta\lambda = 610-750$ nm).

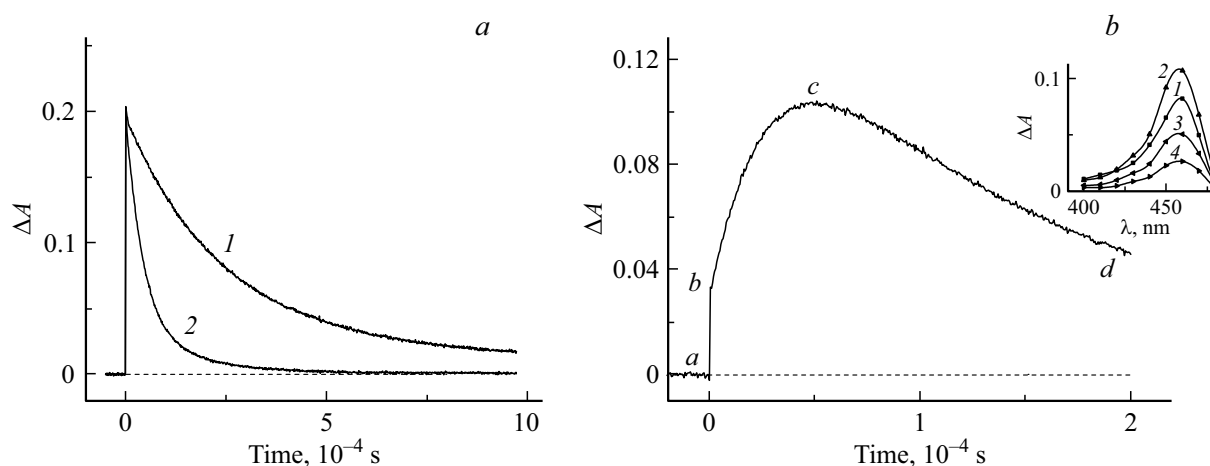


Рис. 8. Кинетические кривые дезактивации триплетного состояния МТКЦ ($1 \cdot 10^{-5}$ mol/l) в присутствии КБ8 ($2.5 \cdot 10^{-5}$ mol/l) при 550 nm (*a*) в отсутствие (1) и в присутствии (2) *n*-НАФ. Кинетические кривые образования и гибели трикатион-радикала димера МТКЦ в комплексе с КБ8 при 460 nm в присутствии *n*-НАФ (*b*). Концентрация *n*-НАФ $1.2 \cdot 10^{-5}$ mol/l. На вставке — спектры поглощения трикатион-радикала димерного комплекса МТКЦ, измеренные через $2.9 \cdot 10^{-6}$ (1), $1.31 \cdot 10^{-5}$ (2), $8.99 \cdot 10^{-5}$ (3) и $1.68 \cdot 10^{-4}$ (4) s.

дает с временем затухания фосфоресценции и заметно превышает τ_T димеров МТКЦ.

В настоящей работе наблюдали перенос электрона между димерными комплексами МТКЦ и ТКЦ с КБ8 в триплетном состоянии и акцепторами электрона — *p*-нитроацетофеноном (*n*-НАФ) и 1,4-динитробензолом (ДНБ). Вывод об участии триплетного состояния в реакции переноса электрона следует из сокращения времени жизни триплетного состояния димерного комплекса при добавлении акцептора электрона. На рис. 8, *a* приведены кинетические кривые дезактивации триплетного состояния димерных комплексов МТКЦ с КБ8 в отсутствие и в присутствии *n*-НАФ. Значение константы скорости тушения k_q составляет $1.4 \cdot 10^9$ l·mol $^{-1}$ ·s $^{-1}$. В процессе тушения в разностном спектре поглощения димерных комплексов МТКЦ с КБ8 наблюдали возникновение новой полосы поглощения при 460 nm, относящейся к трикатион-радикалу димерных комплексов МТКЦ как результат одноэлектронного окисления димерного комплекса МТКЦ (рис. 8, *b*, вставка). Из рис. 8, *b* следует, что кинетическая кривая ΔA состоит из трех участков: *a*–*b*, *b*–*c* и *c*–*d*. Участок *a*–*b* отражает быстрое ($1 \cdot 10^{-8}$ s) увеличение ΔA , обусловленное возникновением Т-Т-поглощения димерных комплексов. Участок *b*–*c* отражает относительно медленное ($5 \cdot 10^{-5}$ s) увеличение ΔA в результате реакции переноса электрона между димерными комплексами в триплетном состоянии и *n*-НАФ, приводящей к образованию димерного трикатион-радикала 2MTKC^{3+*} . Участок *c*–*d* отражает процесс относительно медленной гибели 2MTKC^{3+*} с временем жизни, превышающим $2 \cdot 10^{-4}$ s.

Фотоперенос электрона протекает в димерных комплексах как МТКЦ, так и ТКЦ с КБ8. При этом константа скорости тушения триплетного состояния $2(\text{TKC}@\text{KB8})$ *p*-нитроацетофеноном составляет

$k_q = 8 \cdot 10^8$ l·mol $^{-1}$ ·s $^{-1}$, что в ~ 2 раза меньше значения k_q для $2(\text{MTKC}@\text{KB8})$. Меньшая эффективность фотоокисления димерных комплексов $2(\text{TKC}@\text{KB8})$ по сравнению с димерными комплексами $2(\text{MTKC}@\text{KB8})$ наблюдается также в реакции с ДНБ, протекающей с константами скорости тушения триплетного состояния $k_q = 3 \cdot 10^9$ l·mol $^{-1}$ ·s $^{-1}$ и $k_q = 5.3 \cdot 10^9$ l·mol $^{-1}$ ·s $^{-1}$ для $2(\text{TKC}@\text{KB8})$ и $2(\text{MTKC}@\text{KB8})$ соответственно.

Таким образом, результатом проведенного исследования является обнаружение особенностей фотофизических и фотохимических свойств димерных комплексов МТКЦ и ТКЦ с КБ8. В реакцию комплексообразования с КБ8 вступает МТКЦ в *цис*-форме, тогда как ТКЦ — в *транс*-форме. Для комплексов ТКЦ с КБ8 характерным является наличие замедленной флуоресценции, для комплексов МТКЦ с КБ8 имеет место как замедленная флуоресценция, так и фосфоресценция. Для димерных комплексов МТКЦ и ТКЦ с КБ8 характерной является реакция одноэлектронного окисления в присутствии экзогенного акцептора электрона.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.K. Chibisov, S.V. Shvedov, H. Görner. *J. Photochem. Photobiology A: Chemistry*, **141** (1), 39 (2001). DOI: 10.1016/S1010-6030(01)00426-9
- [2] D. Guillaumont, S. Nakamura. *Dyes and Pigments*, **46** (2), 85 (2000). DOI: 10.1016/S0143-7208(00)00030-9
- [3] К.Г. Владимирова, А.Я. Фрейдзон, А.А. Багатурьянц, Г.В. Захарова, А.К. Чибисов, М.В. Алфимов. *Химия высоких энергий*, **42** (4), 317 (2008). [K.G. Vladimirova, A.Y. Freidzon, A.A. Bagatur'yants et al. *High Energy Chem.*, **42** (4), 275 (2008). DOI: 10.1134/S0018143908040061].
- [4] Г.В. Захарова, В.Г. Авакян, А.К. Чибисов, М.В. Алфимов. *Химия высоких энергий*, **51** (3), 210 (2017). DOI: 10.7868/S0023119317030160 [G.V. Zakharova, V.G. Avakyan, A.K. Chibisov, M.V. Alfimov. *High Energy Chem.*, **51** (3), 195 (2017). DOI: 10.1134/S0018143917030158].
- [5] P.M. Henrichs, S. Gross. *J. Am. Chem. Soc.*, **98** (23), 7169 (1976).
- [6] В.И. Южаков. *Успехи химии*, **48** (11), 2007 (1979). DOI: 10.1070/RC1979v048n11ABEH002430 [V.I. Yuzhakov. *Russ. Chem. Rev.*, **48** (11), 2007 (1979). DOI: 10.1070/RC1979v048n11ABEH002430].
- [7] А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **41** (3), 239 (2007). [A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **41** (3), 200 (2007). DOI: 10.1134/S0018143907030071].
- [8] Б.И. Шапиро. *Успехи химии*, **75** (5), 484 (2006). [B.I. Shapiro. *Russ. Chem. Rev.*, **75** (5), 433 (2006). DOI: 10.1070/RC2006v075n05ABEH001208].
- [9] А.К. Чибисов, Т.Д. Славнова, Х. Гёрнер. *Российские нанотехнологии*, **3** (1), 26 (2008). [A.K. Chibisov, T.D. Slavnova, H. Görner. *Nanotechnologies in Russia*, **3** (1), 19 (2008)].
- [10] Л.С. Атабекян, Д.А. Возняк, Г.В. Захарова, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **42** (6), 505 (2008). [L.S. Atabekyan, D.A. Voznyak, G.V. Zakharova, A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **42** (6), 454 (2008). DOI: 10.1134/S0018143908060064].
- [11] A.K. Chibisov, G.V. Zakharova. *Photochem. Photobiol. Sci.*, **11** (6), 893 (2012). DOI: 10.1039/C1PP05273J
- [12] А.К. Чибисов, Т.Д. Славнова, Г.В. Захарова, Х. Гёрнер. *Химия высоких энергий*, **41** (5), 395 (2007). [A.K. Chibisov, T.D. Slavnova, G.V. Zakharova, H. Görner. *High Energy Chem.*, **41** (5), 344 (2007). DOI: 10.1134/S0018143907050074].
- [13] Г.В. Захарова, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **47** (6), 471 (2013). [G.V. Zakharova, A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **47** (6), 322 (2013). DOI: 10.1134/S001814391306012X].
- [14] Л.С. Атабекян, В.Г. Авакян, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **45** (2), 152 (2011). [L.S. Atabekyan, V.G. Avakyan, A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **45** (2), 123 (2011). DOI: 10.1134/S0018143911020020].
- [15] Г.В. Захарова, В.Г. Авакян, В.П. Маркелов, Н.Л. Святославский, Т.А. Святославская, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **49** (6), 451 (2015). DOI: 10.7868/S0023119315060170 [G.V. Zakharova, V.G. Avakyan, V.P. Markelov, N.L. Svyatoslavskii, T.A. Svyatoslavskaya, A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **49** (6), 407 (2015). DOI: 10.1134/S001814391506017X].
- [16] Г.В. Захарова, В.Г. Авакян, А.К. Чибисов, М.В. Алфимов. *Химия высоких энергий*, **51** (3), 210 (2017). DOI: 10.7868/S0023119317030160 [G.V. Zakharova, V.G. Avakyan, A.K. Chibisov, M.V. Alfimov. *High Energy Chem.*, **51** (3), 195 (2017). DOI: 10.1134/S0018143917030158].
- [17] Т.В. Федотова, В.Н. Гутров, Г.В. Захарова, А.К. Чибисов, М.В. Алфимов. *Химия высоких энергий*, **53** (1), 24 (2019). DOI: 10.1134/S0023119319010042 [T.V. Fedotova, V.N. Gutrov, G.V. Zakharova, A.K. Chibisov, M.V. Alfimov. *High Energy Chem.*, **53** (1), 22 (2019). DOI: 10.1134/S0018143919010041].
- [18] Г.В. Захарова, Т.В. Федотова, В.Н. Гутров, А.К. Чибисов, М.В. Алфимов. *Химия высоких энергий*, **53** (6), 453 (2019). DOI: 10.1134/S0023119319060159 [G.V. Zakharova, T.V. Fedotova, V.N. Gutrov, A.K. Chibisov, M.V. Alfimov. *High Energy Chem.*, **53** (6), 449 (2019). DOI: 10.1134/S0018143919060158].
- [19] Г.В. Захарова, В.Н. Гутров, М.В. Алфимов, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **51** (5), 421 (2017). DOI: 10.1134/S0018143917050163 [G.V. Zakharova, V.N. Gutrov, M.V. Alfimov et al. *High Energy Chem.*, **51** (5), 404 (2017). DOI: 10.1134/S0018143917050162].
- [20] А.К. Чибисов, Г.В. Захарова, Н. Гёрнер. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **1** (7), 1455 (1999). DOI: 10.1039/A809354G
- [21] А.К. Чибисов, Г.В. Захарова, Н. Гёрнер. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **3** (1), 44 (2001). DOI: 10.1039/B005683I
- [22] Л.С. Атабекян, А.К. Чибисов. *Химия высоких энергий*, **41** (2), 122 (2007). [L.S. Atabekyan, A.K. Chibisov. *High Energy Chem.*, **41** (2), 91 (2007). DOI: 10.1134/S0018143907020075].
- [23] W. West, S. Pearce. *J. Phys. Chem.*, **69** (6), 1894 (1965).
- [24] Т.Д. Славнова, А.К. Чибисов, Н. Гёрнер. *J. Phys. Chem. A*, **106** (46), 10985 (2002). DOI: 10.1021/jp020210t
- [25] М.В. Алфимов, А.К. Чибисов, Г.В. Захарова, Т.В. Федотова, В.Г. Плотников. *Изв. вузов. Физика*, **63** (8), 63 (2020). DOI: 10.17223/00213411/63/8/63 [M.V. Alfimov, A.K. Chibisov, G.V. Zakharova et al. *Russ. Phys. J.*, **63** (8), 1363 (2020). DOI: 10.1007/s11182-020-02179-0].