

УДК 541.141

МЕХАНИЗМЫ ГИБЕЛИ ЭКСИПЛЕКСОВ. КВАНТОВЫЕ ВЫХОДЫ И КОНСТАНТЫ СКОРОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРИПЛЕТОВ ИЗ ЭКСИПЛЕКСОВ 9-ЦИАНФЕНАНТРЕНА

© 2004 г. Д. Н. Догадкин*, Е. В. Долотова*, И. В. Соболева*, М. Г. Кузьмин*,
В. Ф. Плюснин**, И. П. Поздняков**, В. П. Гривин**, Д. Филлипс***, К. Мерфи***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119992, Москва, Воробьевы Горы
E-mail: kuzmin@photo.chem.msu.ru

**Институт кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

***Империял колледж SW7 2AY, Лондон, Великобритания

Поступила в редакцию 14.04.2004 г.

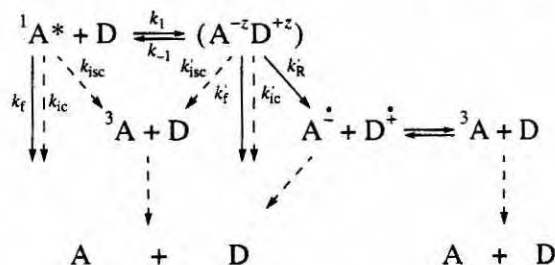
Измерены квантовые выходы образования триплетных состояний из эксиплексов 9-цианфенантрена с 1,2,3- и 1,3,5-триметоксибензолами в растворителях различной полярности и константы скорости интеркомбинационной конверсии в этих эксиплексах. В растворителях слабой и средней полярности эксиплексы гибнут преимущественно в результате внутренней и интеркомбинационной конверсии, а в полярных растворителях дополнительно за счет диссоциации на ион-радикалы.

Известно, что возбужденные донорно-акцепторные комплексы – эксиплексы – играют ключевую роль во многих реакциях фотопереноса электрона [1–16]. При этом квантовые выходы продуктов фотореакции и константы скорости тушения возбужденных молекул определяются механизмом и кинетикой гибели эксиплексов. Как было показано ранее [6–11, 17–20], гибель эксиплексов происходит в основном в результате процессов диссоциации на ион-радикалы, внутренней конверсии в основное состояние и интеркомбинационной (ИКК) конверсии в триплетное состояние. Выяснение деталей и закономерностей этих процессов крайне важно для определения принципов управления реакциями фотопереноса электрона.

В настоящей работе количественно изучена эффективность образования триплетных состояний из эксиплексов 9-цианфенантрена (СР) с донорами электрона – 1,2,3- и 1,3,5-триметоксибензолами (123ТМВ и 135ТМВ), для которых $\Delta G_{et}^* = -0.09$ и -0.02 эВ соответственно. Ранее были определены энтальпии и энтропии образования и энтальпии и энтропии активации образования и гибели этих эксиплексов [10–13].

В полярных растворителях эксиплексы обычно образуются при контактном (внутрисферном) взаимодействии возбужденных молекул с донорами и акцепторами электрона при $\Delta G_{et}^* > -0.4$ эВ. Свойства эксиплексов, в частности, константы скорости внутренней и интеркомбинационной

конверсии и константы скорости диссоциации эксиплексов на ион-радикалы зависят от электронной структуры эксиплексов, а именно от степени переноса заряда [1–9]. Особенно сильные изменения степени переноса заряда наблюдаются для эксиплексов в интервале $-0.2 < \Delta G_{et}^* < 0.2$ эВ.



Схема

Кинетическая схема образования триплетов и ион-радикалов при внутрисферном фотопереносе электрона изображена выше. В этой схеме k_1 и k_{-1} – константы скорости образования эксиплекса ($A^{-z}D^{+z}$) и его диссоциации на исходные компоненты; k_f , k'_f , k_{ic} , k'_{ic} , k_{isc} и k'_{isc} – константы скорости флуоресценции, внутренней и интеркомбинационной конверсии флуорофора и эксиплекса соответственно; k'_R – константа скорости диссоциации эксиплекса на ион-радикалы; z – степень переноса заряда в эксиплексе. Эффективная константа скорости тушения возбужденных молекул k_q зависит от скорости и энергии Гиббса образования

эксиплекса ΔG_{Ex}^* , времени жизни эксиплекса τ_0' и определяется следующим выражением [10]:

$$k_q = 1/[1/k_1 + \tau_0' \exp(\Delta G_{\text{Ex}}^*/RT)]. \quad (1)$$

Константа скорости образования эксиплекса k_1 близка по величине к константе скорости диффузии в данном растворителе [10].

В настоящей работе методом лазерного импульсного фотолиза исследованы спектры промежуточных продуктов, образующихся в растворах СР с триметоксибензолами, определены квантовые выходы образования триплетных состояний СР. Изучены зависимости квантового выхода триплетных состояний от полярности среды и движущей силы переноса электрона ΔG_{et}^* . Показано, что триплетное состояние СР в этих системах образуется как из синглетного возбужденного состояния $^1\text{СР}^*$, так и из эксиплекса.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

9-Цианфенантрен, $E(\text{A}/\text{A}^-) = -1.91 \text{ В}$, $E^* = 3.42 \text{ эВ}$ (Aldrich, 98%), 1,2,3-триметоксибензол, $E(\text{D}^+/\text{D}) = 1.42 \text{ В}$ (Janssen Chimica, 97%), 1,3,5-триметоксибензол, $E(\text{D}^+/\text{D}) = 1.49 \text{ В}$ (Aldrich, 99%) использовались без дополнительной очистки. Растворители: толуол (PhCH_3 , $\epsilon = 2.379$), бутилацетат (AcOBu , $\epsilon = 5.01$) и бутиронитрил (PrCN , $\epsilon = 20.3$) очищали по стандартным методикам [21]. Концентрация СР составляла примерно 0.05 мМ, а концентрация доноров (123ТМВ и 135ТМВ) варьировалась в пределах 0.03–0.47 М. Для измерения спектров флуоресценции СР и эксиплексов и спектров поглощения промежуточных продуктов использовали растворы, из которых был удален кислород продуванием азота или аргона в течение 15 мин. Условия проведения и обработка результатов флуоресцентных измерений описаны ранее в [13–15]. Величина ΔG_{et}^* определялась как $\Delta G_{\text{et}}^* = E(\text{D}^+/\text{D}) - E(\text{A}/\text{A}^-) - E^*$, где $E(\text{D}^+/\text{D})$ и $E(\text{A}/\text{A}^-)$ – электрохимические потенциалы донора и акцептора относительно насыщенного каломельного электрода в ацетонитриле [11], E^* – энергия возбуждения акцептора в первое синглетное состояние.

Для записи стационарных оптических спектров поглощения использовали спектрофотометр HP8453 (Hewlett Packard) с диодной линейкой. Для регистрации спектров поглощения промежуточных продуктов использовали установку лазерного импульсного фотолиза (XeCl лазер, 308 нм, длительность импульса 15 нс, энергия 20 мДж). Подробное описание установки и методики измерений приведено в [22]. Кинетику флуоресценции СР в отсутствие и присутствии 123ТМВ и 135ТМВ измеряли методом корреляционного счета фото-

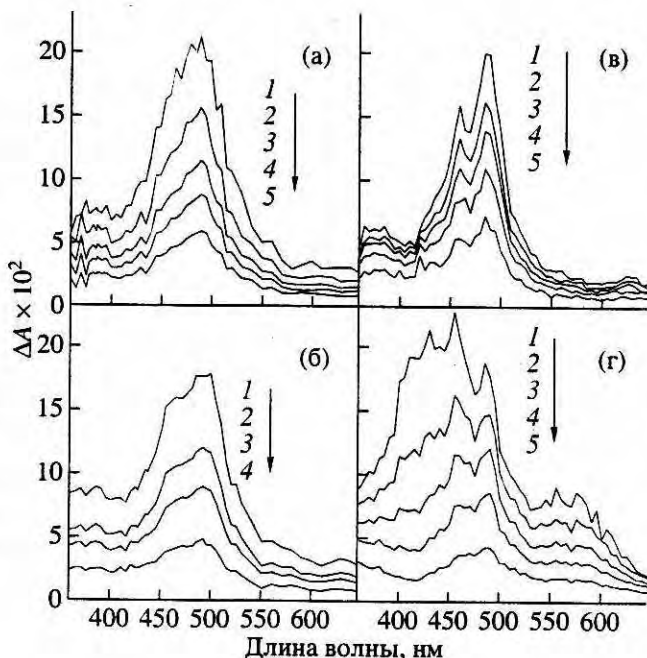


Рис. 1. Спектры промежуточного поглощения при возбуждении растворов СР в отсутствие (а, в) и в присутствии (б, г) 135ТМВ. Для каждого набора спектров указано время регистрации после лазерного импульса. а – СР в толуоле, 1–5 – 0, 2, 4, 6, 10 мкс; б – СР + 0.470 М 135ТМВ в толуоле, 1–4 – 0, 1.2, 3.2, 9.2 мкс; в – СР в бутиронитриле, 1–5 – 0, 1.2, 2.4, 4, 8 мкс; г) СР + 0.151 М 135ТМВ в бутиронитриле, 1–5 – 0, 0.8, 2, 4, 10 мкс.

нов [23]. Для возбуждения образцов использовали излучение удвоенной частоты Ti:Sapphire лазера (355 нм), длина волны регистрации – 380 нм. Детектирование флуоресценции осуществляли с помощью ФЭУ с микроканальными пластинами. Время отклика установки не превышало 230 пс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры промежуточного поглощения при возбуждении (308 нм) растворов СР в толуоле представлены на рис. 1 (а – в отсутствие донора; б – в присутствии 135ТМВ). На обоих спектрах наблюдается полоса с максимумом в области 485–490 нм, которая относится к триплет-триплетному (Т-Т) поглощению СР. При добавлении 135ТМВ, также как и 123ТМВ, форма спектра промежуточного поглощения практически не изменяется. Аналогичные спектры зарегистрированы в бутилацетате. Таким образом, в растворителях слабой и средней полярности единственным наблюдаемым промежуточным продуктом в системах СР–123ТМВ и СР–135ТМВ является триплетное состояние 9-цианфенантрена ($^3\text{СР}$).

В более полярном растворителе бутиронитриле в спектрах промежуточных продуктов к поло-

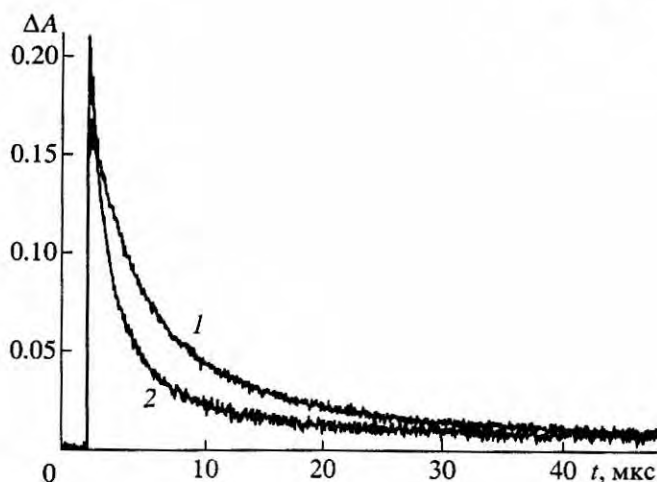


Рис. 2. Кинетика уменьшения оптической плотности промежуточного поглощения после лазерного импульса для раствора СР в бутиронитриле в присутствии 0.151 М 135ТМВ на длине волны 485 (1) и 430 нм (2).

сам Т-Т-поглощения СР добавляются полосы поглощения анион-радикала $СР^{\cdot-}$ с максимумом на длине волны 430 нм [24] (рис.1г), катион-радикалов 135ТМВ $^{\cdot+}$ (575 нм, рис.1г) [25, 26] и 123ТМВ $^{\cdot+}$ (420 нм) [25]. На рис. 2 показаны кинетики изменения оптической плотности поглощения на 485 и 430 нм для раствора СР в бутиронитриле в присутствии 0.151 М 135ТМВ. Уменьшение поглощения на этих длинах волн, происходящее с разной скоростью, подтверждает, что соответствующие полосы относятся к поглощению промежуточных продуктов различной природы – триплетного состояния СР (485 нм) и анион-радикала $СР^{\cdot-}$ (430 нм).

Анализ полученных спектров промежуточного поглощения позволяет определить квантовые выходы образующегося триплетного состояния СР в растворах СР-донор (при образовании эксиплексов). В литературе, однако, отсутствуют необходимые для расчета величины квантовых выходов флуоресценции и ИКК 9-цианфенантрена.

Квантовые выходы флуоресценции СР в отсутствие донора (ϕ_f^0) были определены относительно фенантрена, для которого квантовый выход флуоресценции равен 0.11 в неполярных и 0.125 в полярных растворителях [27].

Квантовый выход триплетного состояния СР в отсутствие тушения ϕ_T^0 определяли по оптической плотности Т-Т-поглощения СР и эталона – антрацена (в расчете на полное поглощение возбуждающего лазерного импульса), используя формулу:

$$\phi_T^0 = \phi_T^0(\text{An}) \frac{\epsilon_T(\text{An}) \Delta A_T(\text{CP})}{\epsilon_T(\text{CP}) \Delta A_T(\text{An})}, \quad (2)$$

где $\phi_T^0(\text{An})$ – квантовый выход ИКК антрацена, $\epsilon_T(\text{CP})$ и $\epsilon_T(\text{An})$ – молярные десятичные коэффициенты Т-Т-поглощения СР и антрацена, ΔA_T – оптические плотности в максимумах этих полос.

Молярный десятичный коэффициент Т-Т-поглощения СР на 490 нм (максимум полосы в толуоле) $\epsilon_T^{490}(\text{CP})$ определяли с помощью метода триплет-триплетного переноса энергии. В качестве акцептора энергии (и эталона для определения квантового выхода) удобно использовать антрацен (An), выбор которого обусловлен следующими соображениями:

1) Энергии триплетных уровней E_T антрацена и СР равны 1.82 и 2.54 эВ, соответственно [28]. Значительная разница в E_T обеспечивает высокую эффективность триплет-триплетного переноса энергии с константой скорости, близкой к диффузионной.

2) При близких концентрациях СР и антрацена, последний значительно слабее поглощает на 308 нм, и лазерный импульс возбуждает в основном СР. Однако поглощение антрацена на 308 нм все же достаточно для регистрации его Т-Т-поглощения при прямом возбуждении.

3) Т-Т-поглощение антрацена смещено в коротковолновую область (максимум полосы на 431 нм) и слабо перекрывается с полосой Т-Т-поглощения СР (490 нм).

4) Большая эффективность ИКК и соответственно высокий квантовый выход триплетного состояния.

Для антрацена в бензоле (наиболее близком к толуолу по химической природе растворителе) в литературе [29] приводятся два значения $\epsilon_T(\text{An})$ для максимума полосы Т-Т-поглощения на 431 нм (69000 и 42000 л моль $^{-1}$ см $^{-1}$), что делает неопределенным расчет квантового выхода. Можно, однако, воспользоваться тем, что для определения квантового выхода 3СР необходимо знать лишь величину $\phi_T^0(\text{An})$ и отношение $\epsilon_T^{431}(\text{An})/\epsilon_T^{490}(\text{CP})$ (уравнение (2)). Последняя величина была определена методом переноса энергии между триплетными состояниями СР и антрацена. С этим процессом конкурирует Т-Т-аннигиляция триплетных состояний СР, которая является реакцией второго порядка. По этой причине измерения проводили при слабых интенсивностях лазерного импульса и соответственно небольших начальных концентрациях 3СР , когда аннигиляцией можно пренебречь. В этом случае (при $\Delta A_T^{490} \rightarrow 0$)

$$\Delta A_T^{431} / \Delta A_T^{490} \rightarrow \epsilon_T^{431}(\text{An}) / \epsilon_T^{490}(\text{CP}), \quad (3)$$

Квантовые выходы и константы скорости флуоресценции и интеркомбинационной конверсии 9-цианфенантрена ($\Phi_f^0, \Phi_T^0, k_f, k_{isc}$) и эксиплексов CP – 135TMB и CP – 123TMB ($\Phi_f^0, \Phi_T^0, k_f', k_{isc}'$)

Система	Растворитель	τ_0	τ_0'	Φ_f^0	$\Phi_f^{\prime 0}$	Φ_T^0	$\Phi_T^{\prime 0}$	k_f	k_f'	k_{isc}	k_{isc}'
		НС									
CP – 135TMB $\Delta G_{et}^* = -0.02$ эВ	PhCH ₃	27	27.4	0.28	0.21	0.71	0.42	10	8	26	15
	AcOBu	27	32	0.28	0.18	0.47	0.42	10	6	17	13
	PrCN	21	14	0.29	0.08	0.64	0.35	14	6	30	25
CP – 123TMB $\Delta G_{et}^* = -0.09$ эВ	PhCH ₃	27	20	0.28	0.21	0.71	0.53	10	10	26	27
	AcOBu	27	6	0.28	0.12	0.47	0.25	10	20	17	42
	PrCN	21	2.3	0.29	0.01	0.64	0.16	14	4	30	70

Примечание. Средняя погрешность измерений $\pm 10-15\%$.

где ΔA_T^{490} и ΔA_T^{431} – оптические плотности T-T-поглощения CP и антрацена соответственно. Измерения показали, что $\epsilon_T^{431}(\text{An})/\epsilon_T^{490}(\text{CP}) = 6 \pm 0.5$.

Величина квантового выхода ИКК антрацена $\Phi_T^0(\text{An})$ в неполярных растворителях равна 0.75 [27]. Это значение было использовано для вычисления величин Φ_T^0 по уравнению (2) (данные представлены в таблице). Квантовый выход ³CP в присутствии донора определяли из соотношения:

$$\Phi_T^\Sigma(^3\text{CP}) = \Phi_T^0 \{ \Delta A_T^{490}([D]) / \Delta A_T^{490}(0) \}, \quad (4)$$

где $\Delta A_T^{490}(0)$ и $\Delta A_T^{490}([D])$ – оптические плотности T-T-поглощения CP в отсутствие тушителя и в его присутствии соответственно.

Суммарный квантовый выход образования ³CP путем ИКК из ¹CP* и из эксиплекса (без учета возможного канала образования триплетного состояния из ион-радикальной пары) равен:

$$\Phi_T^\Sigma = \Phi_T^0 (\Phi_f / \Phi_f^0) + [1 - (\Phi_f / \Phi_f^0)] \Phi_T^{\prime 0}. \quad (5)$$

Это выражение можно переписать в виде

$$\frac{\Phi_T^\Sigma}{\Phi_T^0} = \frac{\Phi_f^{\prime 0}}{\Phi_f^0} + \frac{\Phi_f^0}{\Phi_f^0} \left(1 - \frac{\Phi_f^{\prime 0}}{\Phi_f^0} \right). \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) $\Phi_T^0 = k_{isc} \tau_0$ и Φ_T^Σ – квантовые выходы образования ³CP в отсутствие и присутствии донора, $\Phi_T^{\prime 0} = k_{isc}' \tau_0'$ – квантовый выход ³CP, образующегося путем ИКК из эксиплекса, Φ_f^0 и Φ_f' – квантовые выходы флуоресценции CP в отсутствие и в присутствии донора соответственно.

На рис. 3 представлена зависимость Φ_T^Σ / Φ_T^0 от Φ_f / Φ_f^0 , полученная для растворов CP в присутствии различных концентраций обоих доноров в различных растворителях. Из уравнения 6 следует, что в том случае, когда не происходит образования ³CP из эксиплекса, эта зависимость является прямой линией ($\Phi_T^\Sigma / \Phi_T^0 = \Phi_f / \Phi_f^0$). Экспериментальные точки

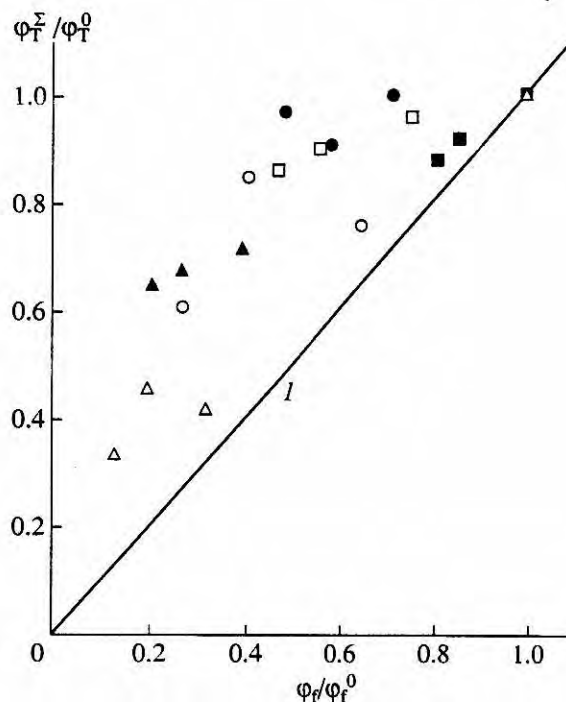


Рис. 3. Зависимость Φ_T^Σ / Φ_T^0 от Φ_f / Φ_f^0 для систем CP – 135TMB (черные точки) и CP – 123TMB (светлые точки) в PhCH₃ (■, □), AcOBu (●, ○) и PrCN (▲, △). Прямая 1 – зависимость $\Phi_T^\Sigma / \Phi_T^0 = \Phi_f / \Phi_f^0$.

на рис. 3 для исследованных систем во всех растворителях лежат выше этой прямой, т.е. с повышением концентрации донора относительный квантовый выход триплетов Φ_T^{Σ}/Φ_T^0 падает медленнее, чем относительный квантовый выход флуоресценции Φ_f/Φ_f^0 . Это свидетельствует о том, что во всех использованных растворителях триплетное состояние CP образуется в результате ИКК как из синглетного возбужденного состояния $^1CP^*$, так и из эксиплекса¹.

Для определения Φ_T^0 уравнение (6) удобно представить в форме:

$$\Phi_T^{\Sigma}(\Phi_f^0/\Phi_f) - \Phi_T^0 = \Phi_T^0(\Phi_f^0/\Phi_f - 1), \quad (7)$$

которая позволяет находить квантовый выход триплетного состояния CP, образовавшегося из эксиплекса (Φ_T^0), определяя зависимость Φ_T^{Σ} от концентрации донора. Полученные из таких концентрационных зависимостей значения квантовых выходов Φ_T^0 приведены в таблице.

Значения собственных квантовых выходов флуоресценции эксиплексов Φ_f^0 и констант k_f' определялись по спектрам флуоресценции растворов CP в присутствии различных концентраций донора и спектрам испускания образующихся при этом эксиплексов. В соответствии с приведенной выше схемой образования и гибели эксиплекса величины Φ_f'/Φ_f и Φ_f^0/Φ_f определяются выражениями [15]:

$$\Phi_f'/\Phi_f = (k_f'/k_f)k_1\tau_0[D]/(1 + k_{-1}\tau_0), \quad (8)$$

$$\Phi_f^0/\Phi_f = 1 + k_q\tau_0[D] = 1 + k_1\tau_0[D]/(1 + k_{-1}\tau_0), \quad (9)$$

$$\tau_0 = 1/(k_f + k_{ic} + k_{isc}), \quad (10)$$

$$\tau_0' = 1/(k_f' + k_{ic}' + k_{isc}' + k_R').$$

Здесь Φ_f' и Φ_f – квантовые выходы флуоресценции эксиплекса и CP при концентрации донора [D] соответственно, τ_0 – время жизни флуорофора в отсутствие тушения. Способ экспериментального количественного определения отношений Φ_f'/Φ_f и Φ_f^0/Φ_f описан в [15]. Величины τ_0 и τ_0' ,

в том числе измеренные ранее [13], приведены в таблице. Из уравнений (8) и (9) следует:

$$(\Phi_f^0/\Phi_f - 1)/(\Phi_f'/\Phi_f) = (k_f/k_f')(\tau_0/\tau_0'). \quad (11)$$

Величины констант $k_f = \Phi_f^0/\tau_0$ и констант k_f' , определенных по уравнению (11), также как и значения $\Phi_f^0 = k_f'\tau_0'$, приведены в таблице.

Вычисленные значения k_{isc}' оказались сравнимы с константами скорости k_{isc} в тех же растворителях. С увеличением полярности растворителя наблюдается уменьшение Φ_f^0 и Φ_T^0 вследствие усиления эффективности процесса внутренней конверсии в эксиплексе и диссоциации эксиплекса на ион-радикалы. Константа скорости флуоресценции эксиплекса k_f' также уменьшается, что связано с увеличением степени переноса заряда в исследованных эксиплексах [4]. С другой стороны, одновременно с уменьшением Φ_T^0 , константа скорости ИКК из эксиплексов (k_{isc}') заметно увеличивается. Подробно анализ зависимости k_{isc}' , а также k_{ic}' и k_R' от полярности растворителя и ΔG_{ct}^* будет рассмотрен в следующих публикациях. Отметим только, что процессы внутренней и интеркомбинаторной конверсии в эксиплексах протекают с сопоставимыми константами скорости и подчиняются одинаковым закономерностям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ИКК дает существенный вклад в процесс гибели эксиплексов. Она приводит к образованию триплетных состояний флуорофора вследствие существенно меньшей стабильности триплетных эксиплексов по сравнению с синглетными эксиплексами. Меньшая стабильность эксиплексов в триплетном состоянии связана с гораздо большей энергетической щелью между локальным триплетным и СТ состояниями, чем между нижним возбужденным синглетным и СТ состояниями (синглетное и триплетное СТ состояния являются практически вырожденными). Несмотря на то, что константы скорости ИКК из эксиплексов и из синглетного возбужденного состояния флуорофора близки по величине, образование эксиплекса не приводит к существенному снижению выхода триплетов, а в ряде случаев даже может приводить к его повышению из-за достаточно больших времен жизни эксиплексов (т.е. относительно малых констант скорости внутренней конверсии и диссоциации на ион-радикалы).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 02-03-32797, 02-03-32441 и 03-03-33134),

¹ Известно, что в полярных растворителях триплетное состояние может образовываться и в результате ИКК в ион-радикальных парах [30]. Исследования влияния магнитного поля на квантовый выход триплетных состояний показывают, что в эксиплексах с $\Delta G_{ct}^* > -0.1$ эВ доля этого канала образования триплетов пренебрежимо мала [20]. В системах CP-123TMB и CP-135TMB она не превышает 5%.

гранта Минобразования РФ "Университеты России" № УР.05.01.002 и гранта ИНТАС № 00-0772.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kikuchi K., Niwa T., Takahashi Y., Ikeda H., Miyashi T., Hoshi M. // Chem. Phys. Lett. 1990. V. 173. № 5 / 6. P. 421.
2. Вайнштейн Ю.А., Садовский Н.А., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 1994. Т. 28. № 3. С. 244.
3. Kikuchi K., Takahashi Y., Katagiri T., Niwa T., Hoshi M., Miyashi T. A. // Chem. Phys. Lett. 1991. V. 180. № 5. P. 403.
4. Gould I.R., Young R.H., Mueller L.J., Farid S. // J. Am. Chem. Soc. 1994. V. 116. № 18. P. 8176.
5. Gould I.R., Farid S. // Acc. Chem. Res. 1996. V. 29. № 11. p.522.
6. Vauthey E., Hogemann C., Allonas X. // J. Phys. Chem. A. 1998. V. 102. № 38. P. 7362.
7. Sadovskii N.A., Kuzmin M.G., Gorner H., Schaffner K. // Chem. Phys. Lett. 1998. V. 282. № 5 / 6. P. 456.
8. Kuzmin M.G. // J. Photochem. Photobiol. A:Chemistry. 1996. V. 102. № 1. P. 51.
9. Inada T.N., Miyazawa C.S., Kikuchi K., Yamauchi M., Nagata T., Takahashi Y., Ikeda H., Miyashi T. // J. Am. Chem. Soc. 1999. V. 121. № 31. P. 7211.
10. Kuzmin M.G., Soboleva I.V., Dolotova E.V., Dogadkin D.N. // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. V. 2. P. 967.
11. Долотова Е.В., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 4. С. 272.
12. Кузьмин М.Г., Долотова Е.В., Соболева И.В. // Журн. физ. химии. 2002. Т. 76. № 7. С. 1235.
13. Dolotova E., Dogadkin D., Soboleva I.V., Kuzmin M., Nicolet O., Vauthey E. // Chem. Phys. Lett. 2003. V. 380. P. 729.
14. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2001. Т.35. № 2. С. 130.
15. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2001. Т.35. № 4. С. 283.
16. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2002. Т. 36. № 6. С. 1.
17. Orbach N., Ottolenghi M. // Chem. Phys. Lett. 1975. V. 35. № 2. P. 175.
18. Davis H.F., Chattopadhyay S.K., Das P.K. // J. Phys. Chem. 1984. V. 88. № 13. P. 2798.
19. Schael F. Löhmannsröben // J. Photochem. Photobiol. A:Chemistry. 1997. V. 105. P. 317.
20. Вайнштейн Ю.А., Садовский Н.А., Кузьмин М.Г., Плюснин В.Ф., Гривин В.П. // Химия высоких энергий. 1996. Т. 30. № 6. С. 446.
21. Вайсбергер А., Проскауэр Э., Риддик Д., Тунс Э. Органические растворители. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. С. 518.
22. Grivin V.P., Khmelinski I.V., Plyusnin V.F., Blinov I.I., Balashev K.P. // J. Photochem. Photobiol. A:Chem. 1990. V. 51. P. 167.
23. O'Connor D.V., Phillips D. Time Correlated Single Photon Counting. London: Academic Press, 1984.
24. Von Raumer M., Sarbach A., Suppan P. // J. Photochem. Photobiol. A:Chemistry. 1977. V. 107. № 1. P. 43.
25. O'Neill P., Steenken S., Schulte-Frohlinde D. // J. Phys. Chem. 1975. V. 79. № 25. P. 2773.
26. Ichinose N., Tanaka T., Kawanishi S., Suzuki T., Ekdo K. // J. Phys. Chem. A. 1999. V. 103. № 40. P. 7923.
27. Murov S.L. Handbook of Photochemistry. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1973. P. 272.
28. Lewis F.D., Zebrowski B.E., Correa P.E. // J. Am. Chem. Soc. 1984. V. 106. № 1. P. 187.
29. Compton R.H., Gratton T.U., Morrow T. // J. Photochem. 1980. V. 14. № 1. P. 61.
30. Федотова Е.Я., Соколик И.А., Франкевич Е.Л. // Химия высоких энергий. 1980. Т. 14. № 4. С. 350.