

УДК 541.141

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНКУРЕНЦИЮ ПРОЦЕССОВ ГИБЕЛИ ЭКСИПЛЕКСОВ 9-ЦИАНФЕНАНТРЕНА

© 2005 г. Д. Н. Догадкин*, Е. В. Долотова*, И. В. Соболева*, М. Г. Кузьмин*,
В. Ф. Плюснин**, И. П. Поздняков**, В. П. Гривин**

*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

Поступила в редакцию 09.06.2004 г.

Определены активационные параметры процессов внутренней и интеркомбинационной конверсии в эксиплексах 9-цианфенантрена с 1,3,5- и 1,2,3-триметоксибензолами, а также их диссоциации на ион-радикалы. Показано, что энтальпии активации разных процессов гибели для каждого из эксиплексов в данном растворителе имеют близкие значения, что дает возможность использовать линейную аппроксимацию температурной зависимости логарифма времени жизни эксиплекса.

Эксиплексы с частичным переносом заряда являются интермедиатами в слабо экзоэргических ($\Delta G_{\text{ET}}^* > -0.5$ эВ) реакциях фотопереноса электрона между органическими молекулами [1–7]. Скорость таких реакций определяется природой промежуточного продукта – эксиплекса [8]. В ряде предыдущих работ [9–12] мы детально исследовали энергетику образования и электронную структуру таких эксиплексов. Было установлено, что скорость образования эксиплексов с частичным переносом заряда определяется скоростью диффузии и ориентацией реагентов, а свободная энергия образования эксиплексов – их электронной структурой и полярностью среды. Также были определены усредненные энтальпии ($\Delta H_{\text{Ex}}^\ddagger$) и энтропии ($\Delta S_{\text{Ex}}^\ddagger$) гибели эксиплексов [13, 14]. Эти параметры обычно рассчитываются двумя способами. 1-й способ основан на определении $\Delta H_{\text{Ex}}^\ddagger$ и $\Delta S_{\text{Ex}}^\ddagger$ из температурной зависимости времени жизни эксиплекса τ_0' по уравнению [15]:

$$1/\tau_0' = k_{\text{Ex}} \approx (k_B T/h) \exp(\Delta S_{\text{Ex}}^\ddagger/R) \exp(-\Delta H_{\text{Ex}}^\ddagger/RT). \quad (1)$$

Здесь k_B и h – постоянные Больцмана и Планка. 2-й способ, применяющийся в случае отсутствия прямых измерений τ_0' при разных температурах и использованный в ряде наших исследований, основан на определении температурной зависимости квантовых выходов испускания флуорофора и эксиплекса.

Было показано, что в реакции фотопереноса электрона, протекающей через стадию образования эксиплекса с частичным переносом заряда, лимитирующей стадией является стадия гибели эксиплекса, а не стадия его образования, скорости которой определяется диффузией реагентов друг к другу. Это является существенным отличием от механизма переноса электрона по Маркусу [16], согласно которому лимитирующей стадией является реорганизация реагентов и среды, предшествующая переносу электрона. Причина такого различия заключается в стабилизации эксиплексов с частичным переносом заряда за счет больших величин матричного элемента электронного взаимодействия между локально-возбужденным состоянием и состоянием с переносом заряда (0.2–0.4 эВ) [8, 9, 13]. Найденные в [13, 14] величины $\Delta S_{\text{Ex}}^\ddagger$ и $\Delta H_{\text{Ex}}^\ddagger$ показывают, что главным фактором, определяющим величину активационного барьера стадии гибели эксиплекса, является сильно отрицательная энтропия активации гибели эксиплекса (порядка $-(50-150)$ Дж/моль К), в то время как $\Delta H_{\text{Ex}}^\ddagger$ близка к нулю.

Известно, что основными процессами гибели эксиплекса в неполярных растворителях являются флуоресценция, внутренняя и интеркомбинационная конверсия [17–19], а в полярных – также диссоциация на ион-радикалы [20–23]. При определении термодинамических и активационных параметров образования и гибели эксиплексов предполагалось [13–15], что во всем исследованном диапазоне температур гибель эксиплекса может быть охарактеризована одной и той же средней энтропией и энтальпией активации, хотя из-

за конкуренции нескольких процессов вклад каждого из них может меняться с изменением температуры. Целью настоящей работы было определение и анализ значений активационных параметров, определяющих скорость процессов внутренней и интеркомбинационной конверсии в эксиплексах и диссоциации эксиплексов на ион-радикалы. Объектами исследования были выбраны эксиплексы 9-цианфенантрена с 1,2,3- и 1,3,5-триметоксibenзолами ($\Delta G_{\text{ET}}^* = -0.09$ и -0.02 эВ соответственно), для которых ранее [22, 23] были найдены величины констант скорости и квантовых выходов процессов гибели при комнатной температуре. Экспериментально было исследовано влияние температуры (диапазон измерений – 230–300 К) на конкуренцию между процессами гибели эксиплекса. Показано, что эти процессы имеют близкие активационные характеристики, т.е. относительный вклад каждого из них слабо зависит от температуры.

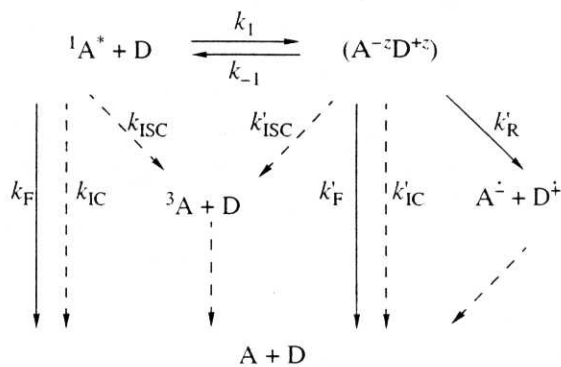
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Использованные вещества: 9-цианфенантрен (CP) (акцептор электрона); 1,3,5-триметоксibenзол (135TMB) и 1,2,3-триметоксibenзол (123TMB) (доноры электрона); растворители – толуол (PhCH₃), бутилацетат (AcOBu) и бутиронитрил (PrCN). Условия очистки веществ, а также условия проведения эксперимента и обработка результатов флуоресцентных измерений при различных температурах описаны ранее в [12].

Методика получения промежуточных спектров поглощения в нано- и микросекундном диапазоне с помощью лазерного импульсного фотолиза, а также расчет квантовых выходов промежуточных продуктов – триплетов и ион-радикалов CP описаны в работах [22, 23]. Для возбуждения молекул CP использовали излучение XeCl эксимерного лазера на длине волны 308 нм с энергией импульсов 10 мДж. Для проведения измерений при температурах ниже комнатной использовали кварцевый оптический криостат, который продувался парами жидкого азота, что позволяло варьировать диапазон температур от 300 до 230 К. С помощью специального электронного стабилизатора с обратной связью температура поддерживалась автоматически с точностью 0.5 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [22, 23] было показано, что образование триплетного состояния CP происходит путем интеркомбинационной конверсии из возбужденного синглетного состояния CP и из эксиплекса. Ион-радикалы образуются в результате диссоциации эксиплекса (схема).



Кинетическая схема образования триплетных состояний и ион-радикалов при внутрисферном фотопереносе электрона (с образованием эксиплекса ($A^{-z}D^{+z}$)).

Исходя из приведенной схемы, квантовые выходы испускания флуорофора (Φ_F) и эксиплекса (Φ'_F) зависят от концентрации тушителя [D] следующим образом:

$$\Phi_F^0/\Phi_F = 1 + k_Q\tau_0[D] = 1 + k_1\tau_0[D]/(1 + k_{-1}\tau_0'), \quad (2)$$

$$\Phi'_F/\Phi_F = (k'_F/k_F)k_1\tau_0'[D]/(1 + k_{-1}\tau_0'). \quad (3)$$

Здесь Φ_F^0 – квантовый выход испускания флуорофора в отсутствие D, $\tau_0 = 1/(k_F + k_{IC} + k_{ISC})$ и $\tau_0' = 1/(k'_F + k'_{IC} + k'_{ISC} + k'_R)$, где индексы ISC, IC и R обозначают процессы интеркомбинационной и внутренней конверсии в эксиплексе и диссоциации эксиплекса на ион-радикалы соответственно, а квантовые выходы интеркомбинационной конверсии в эксиплексе Φ_T^0 , образования ион-радикалов Φ_R^0 и внутренней конверсии Φ'_{IC} (в расчете на единичную эффективность образования эксиплекса), определяются исходя из выражений:

$$\Phi_T^\Sigma(\Phi_F^0/\Phi_F) - \Phi_T^0 = \Phi_T^0(\Phi_F^0/\Phi_F - 1), \quad (4)$$

$$\Phi_R^0 = \Phi_R/(1 - \Phi_F/\Phi_F^0), \quad (5)$$

$$\Phi'_{IC} = 1 - \Phi_F^0 - \Phi_T^0 - \Phi_R^0. \quad (6)$$

Здесь Φ_T^Σ и Φ_R – квантовые выходы триплетов и анион-радикалов CP в присутствии донора электрона, Φ_T^0 – квантовый выход триплетов CP в отсутствие донора, Φ_F^0 и Φ_F – квантовые выходы флуоресценции CP в отсутствие и присутствии донора соответственно.

Зависимость констант скорости образования (k_1) и диссоциации (k_{-1}) эксиплекса на исходные компоненты, а также констант скорости процес-

Таблица 1. Параметры уравнений (11)–(14) для эксиплексов CP с 123ТМВ и 135ТМВ [13]

Эксиплекс	Растворитель	A'	B'	C' × 10 ⁻³	D' × 10 ⁻³	A	B	C × 10 ⁻³	D × 10 ⁻³
CP–123ТМВ	PhCH ₃	-3.9 ^a	–	1.6 ^б	–	12 ^в	–	2.04 ^г	–
ΔG _{ET} [*] = -0.09 эВ	AcOBu	11	20	-2.14	-5.78	27	16	-1.52	-4.6
CP–135ТМВ	PhCH ₃	-8 ^a	–	2.31 ^б	–	7.9 ^в	–	2.63 ^г	–
ΔG _{ET} [*] = -0.02 эВ	AcOBu	12	21.8	-2.24	-5.26	26.4	21	-1.52	-5.19
	PrCN	6.9	17.5	-1.04	-4.83	26.5	15.2	-1.3	-4.22

^{a, б, в, г} В данных системах наблюдаются только левые ветви зависимостей $\ln\{(\varphi_F^0/\varphi_F - 1)/\tau_0[D]\}$ и $\ln\{(\varphi_F'/\varphi_F)/[D]\}$ от $1/T$, поэтому в таблице приведены разности параметров: ^a – (A'–B'), ^б – (C'–D'), ^в – (A–B), ^г – (C–D).

сов гибели эксиплексов $k_i' = \varphi_i^0/\tau_0'$ и суммарной константы $k_{Ex} = 1/\tau_0'$ от температуры можно выразить как:

$$k_1 = K_{Ass}(k_B T/h) \exp(\Delta S_1^\ddagger/R) \exp(-\Delta H_1^\ddagger/RT), \quad (7)$$

$$k_{-1} = (k_B T/h) \exp(\Delta S_{-1}^\ddagger/R) \exp(-\Delta H_{-1}^\ddagger/RT), \quad (8)$$

$$k_i' = (k_B T/h) \exp(\Delta S_i^\ddagger/R) \exp(-\Delta H_i^\ddagger/RT), \quad (9)$$

$$k_{Ex} = (k_B T/h) \exp(\Delta S_{Ex}^\ddagger/R) \exp(-\Delta H_{Ex}^\ddagger/RT). \quad (10)$$

Здесь индекс $i = IC, ISC$ или R , $K_{Ass} \approx 0.2 \text{ дм}^3 \text{ моль}^{-1}$ – константа ассоциации для контактного комплекса между реагентами, ΔH_1^\ddagger и ΔS_1^\ddagger , ΔH_{-1}^\ddagger и ΔS_{-1}^\ddagger , ΔH_i^\ddagger и ΔS_i^\ddagger , ΔH_{Ex}^\ddagger и ΔS_{Ex}^\ddagger – энтальпии и энтропии активации соответствующих процессов. При расчете $\varphi_T^0(T)$, $\varphi_{IC}^0(T)$ и $\varphi_R^0(T)$ по уравнениям (4)–(6) необходимо учитывать зависимости φ_F^0/φ_F и φ_F'/φ_F от температуры:

$$\begin{aligned} \ln\{(\varphi_F^0/\varphi_F - 1)/\tau_0[D]\} &= \\ &= A + C/T - \ln[1 + \exp(B + D/T)], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \ln\{(\varphi_F'/\varphi_F)/[D]\} &= \\ &= A' + C'/T - \ln[1 + \exp(B' + D'/T)] \end{aligned} \quad (12)$$

в том случае, когда зависимости имеют колокообразный вид, и

$$\ln\{(\varphi_F^0/\varphi_F - 1)/\tau_0[D]\} = (A - B) + (C - D)/T, \quad (13)$$

$$\ln\{(\varphi_F'/\varphi_F)/[D]\} = (A' - B') + (C' - D')/T \quad (14)$$

в случае, когда наблюдаются только левые ветви этих зависимостей [13, 14]. Значения коэффициентов $A = \ln(K_{Ass}) + \Delta S_1^\ddagger/R$, $A' = \ln(k_i'/k_F) + \ln(K_{Ass}) + (\Delta S_1^\ddagger - \Delta S_{Ex}^\ddagger)/R$, $B = B' = (\Delta S_{-1}^\ddagger - \Delta S_{Ex}^\ddagger)/R$, $C = -\Delta H_1^\ddagger/R$, $C' = (\Delta H_{Ex}^\ddagger - \Delta H_1^\ddagger)/R$, $D = D' = (\Delta H_{Ex}^\ddagger -$

$-\Delta H_{-1}^\ddagger)/R$ для исследованных эксиплексов приведены в табл. 1.

Как видно из рис. 1 и 2, для исследованных эксиплексов $\ln(k_i')$ и $\ln(k_{Ex})$ линейно зависят от обратной температуры $1/T$. При этом наклоны зависимостей $\ln(k_i')$, также как и $\ln(k_{Ex})$, для каждого из эксиплексов в данном растворителе имеют близкие значения. Это означает, что относительный вклад различных процессов гибели эксиплекса – внутренней и интеркомбинационной конверсии в эксиплексе, а также диссоциации эксиплекса на ион-радикалы, слабо меняется с температурой, и правомерно использовать линейные приближенные зависимости $\ln(k_{Ex})$ от $1/T$ для определения средних величин ΔH_{Ex}^\ddagger и ΔS_{Ex}^\ddagger . Исключение составляет эксиплекс CP–135ТМВ в толуоле, где зависимости $\ln(k_{ISC}')$ и $\ln(k_{IC}')$ от $1/T$ имеют наклоны с различным знаком. Из рис. 2 видно, что лишь при комнатной температуре эти процессы имеют близкие величины констант скорости. С понижением температуры процесс интеркомбинационной конверсии становится доминирующим, то есть основной вклад в величину k_{Ex} вносит k_{ISC}' . Таким образом, и в этом случае, аппроксимация зависимости $\ln(k_{Ex})$ от $1/T$ не приводит к существенной ошибке. Величины энтальпий и энтропий активации процессов гибели эксиплекса, а также константы скорости каждого из этих процессов при комнатной температуре, приведены в табл. 2. Использование найденных экспериментально отношений (k_F'/k_F) [22, 24] позволило уточнить значения ΔS_{Ex}^\ddagger для эксиплексов CP–135ТМВ и CP–123ТМВ. Из приведенных в табл. 2 данных следует, что энтропии активации каждого из процессов гибели эксиплексов также близки к значениям ΔS_{Ex}^\ddagger .

Рассмотрим факторы, определяющие активационные характеристики каждого из процессов

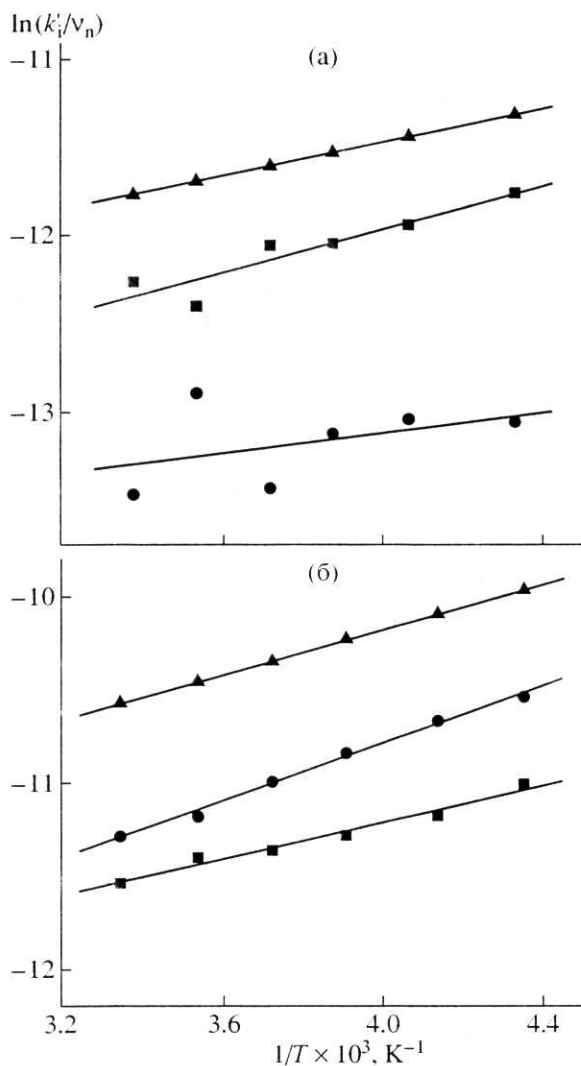


Рис. 1. Зависимости констант скорости процессов гибели эксиплексов k'_{ISC} (■), k'_{IC} (●) и k'_{EX} (▲), нормированных на частотный фактор $v_n = (k_B T/h)$, от обратной температуры для эксиплексов CP-123TMB в толуоле (а) и бутилацетате (б).

гибели эксиплекса. В случае гибели эксиплексов путем внутренней или интеркомбинационной конкуренции, энтальпия активации близка к нулю, а ΔS^\ddagger — начальная энтропия активации, определяемая как $R(\ln k'_{ISC(IC)} - \ln(k_B T/h))$, составляет (50–120) Дж моль⁻¹ К⁻¹ [13, 14]. Однако фактически она представляет собой не термодинамическую характеристику переходного состояния, а характеризует вероятность перехода и соответствует величине Франк-Кондоновского фактора 10^{-3} – 10^{-7} . Таким образом, найденные экспериментально величины $\Delta H^\ddagger_{ISC(IC)}$ и $\Delta S^\ddagger_{ISC(IC)}$ соответствуют механизмам интеркомбинационной и внутренней конкуренции.

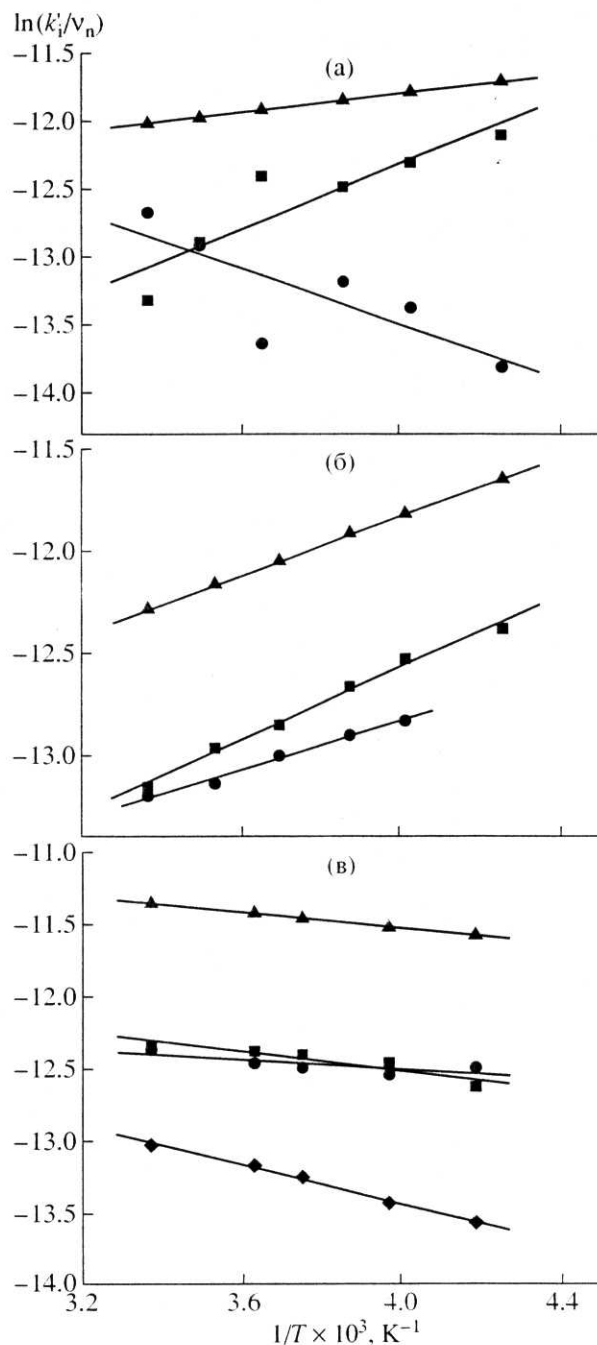


Рис. 2. Зависимости констант скорости процессов гибели эксиплексов k'_{ISC} (■), k'_{IC} (●), k'_R (◆) и k'_{EX} (▲), нормированных на частотный фактор $v_n = (k_B T/h)$, от обратной температуры для эксиплексов CP-135TMB в толуоле (а), бутилацетате (б) и бутиронитриле (в).

Сильно отрицательные величины энтропии активации диссоциации эксиплексов на ион-радикалы ΔS^\ddagger_R также согласуются с механизмом, для которого характерны энтропии активации порядка $(-100$ – $150)$ Дж моль⁻¹ К⁻¹, что связано с большой величиной энтропии сольватации образующихся

Таблица 2. Энтальпии активации (ΔH_{ISC}^\ddagger , ΔH_{IC}^\ddagger , ΔH_R^\ddagger , ΔH_{Ex}^\ddagger , кДж/моль), энтропии активации (ΔS_{ISC}^\ddagger , ΔS_{IC}^\ddagger , ΔS_R^\ddagger , ΔS_{Ex}^\ddagger , Дж моль⁻¹ К⁻¹), энергии Гиббса активации (ΔG_{ISC}^\ddagger , ΔG_{IC}^\ddagger , ΔG_R^\ddagger , ΔG_{Ex}^\ddagger , кДж/моль), константы скорости (k'_{ISC} , k'_{IC} , k'_R , k'_{Ex} , мкс⁻¹) интеркомбинационной (ISC) и внутренней (IC) конверсии в эксиплексе, диссоциации на ион-радикалы (R) и их сумма k_{Ex} , времена жизни эксиплексов τ'_0 , ($T=293$ К)

	Эксиплекс					
	CP-135TMB			CP-123TMB		
	растворитель					
	PhCH ₃	AcOBu	PrCN	PhCH ₃	AcOBu	PrCN
ΔH_{ISC}^\ddagger	-9.8	-7.3	2.8	-5.15	-4.1	-
ΔH_{IC}^\ddagger	8.6	-5.0	1.4	-2.4	-6.4	-
ΔH_R^\ddagger	-	-	5.6	-	-	-
ΔH_{Ex}^\ddagger	-2.7	-5.9	2.2	-3.9	-5.1	-
ΔS_{ISC}^\ddagger	-142	-133	-93	-120	-110	-
ΔS_{IC}^\ddagger	-78	-126	-98	-119	-115	-
ΔS_R^\ddagger	-	-	-89	-	-	-
ΔS_{Ex}^\ddagger	-109	-122	-87	-111	-105	-
ΔG_{ISC}^\ddagger	31.8	31.7	30.0	30.0	28.1	27.7*
ΔG_{IC}^\ddagger	31.4	31.9	30.2	32.5	27.3	24.3*
ΔG_R^\ddagger	-	-	31.7	-	-	27.4*
ΔG_{Ex}^\ddagger	29.2	29.8	27.7	28.6	25.7	23.3*
k'_{ISC}	15.3	13	25	26.5	41.7	69.6
k'_{IC}	13.5	12.5	26.4	13	105	283
k'_R	-	-	14.3	-	-	78.2
k'_{Ex}	36.5	31.3	71.4	50	167	435
τ'_0	27.4	32	14	20	6	2.3

* Найдены из констант скорости гибели эксиплекса по формуле $\Delta G_i^\ddagger = -RT \ln(k'_i h/k_B T)$.

ионов [25]. Можно оценить значения энтальпии и энтропии активации диссоциации эксиплекса на ион-радикалы, используя экспериментальные данные зависимостей констант скорости превращения эксиплекса в сольватно-разделенную ион-радикальную пару k_{solv} и обратно k_{-solv} [26, 27], а также данные по температурной зависимости разности энергий сольватации диполя ΔG_μ (15 Дебай) и ионной пары ΔG_{IP} [10]. Зависимость k_{solv} от энергетики переноса электрона дает линейную связь энергии активации ΔG_R^\ddagger со свободной энергией сольватации ΔG_R :

$$\begin{aligned} \Delta G_R^\ddagger &\approx 17 + 7.4 \Delta G_R = \\ &= 17 + 7.4(\Delta G_{IP} - \Delta G_\mu) \quad (\text{кДж/моль}). \end{aligned} \quad (15)$$

В свою очередь, зависимости ΔG_{IP} и ΔG_μ от температуры имеют следующий вид [10]:

$$\Delta G_\mu \approx -52 + 0.06T \quad (\text{кДж/моль}), \quad (16)$$

$$\Delta G_{IP} \approx -69 + 0.12T \quad (\text{кДж/моль}). \quad (17)$$

Комбинация приведенных выражений дает следующие значения для активационных параметров диссоциации эксиплекса CP-135TMB на ион-радикалы: $\Delta H_R^\ddagger = 11$ кДж/моль, $\Delta S_R^\ddagger = -45$ Дж/моль К. Эти значения характеризуют максимальные значения ΔH_R^\ddagger и ΔS_R^\ddagger , поскольку неизвестно, как зависит свободный член в уравнении (15) от температуры. Как видно из табл. 2, полученные экспериментально величины ΔH_R^\ddagger и ΔS_R^\ddagger для эксиплекса

СР-135ТМВ в бутиронитриле, примерно в два раза отличаются от вычисленных, что вполне допустимо, поскольку они не превышают верхних пределов соответствующих рассчитанных величин.

Результаты исследования показывают, что все процессы гибели эксиплекса имеют близкие значения энтальпии и энтропии активации и соответственно близкие значения свободной энергии активации реакции ΔG_i^\ddagger . Величины ΔG_i^\ddagger в исследованных системах варьируются от 23 до 33 кДж/моль и превышают значения свободной энергии активации реакции образования эксиплекса примерно на 10–15 кДж/моль [24]. Таким образом, подтверждается вывод о том, что лимитирующей стадией реакции фотопереноса электрона является стадия гибели эксиплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kikuchi K., Niwa T., Nakahashi Y., Ikeda H. // Chem. Phys. Lett. 1990. V. 173. № 5/6. P. 421.
2. Kikuchi K., Katagiri T., Niwa T., Takahashi Y., Suzuki T., Hoshi M., Miyashi T. // Chem. Phys. Lett. 1991. V. 180. № 5. P. 403.
3. Kuzmin M., Sadovskii N., Weinstein J., Kutsenok O. // Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.). 1993. V. 105. № 6. P. 637.
4. Kuzmin M.G. // Pure Appl. Chem. 1993. V. 65. № 8. P. 1653.
5. Gould I.R., Young R.H., Mueller L.J., Farid S. // J. Am. Chem. Soc. 1994. V. 116. № 18. P. 8176.
6. Gould I.R., Young R.H., Mueller L.J., Albrecht A.C., Farid S. // J. Am. Chem. Soc. 1994. V. 116. № 18. P. 8188.
7. Садовский Н.А., Куценко О.И., Вайнштейн Ю.А., Кузьмин М.Г. // Журн. физ. химии. 1996. Т. 70. № 12. С. 2194.
8. Кузьмин М.Г. // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия. 2001. Т. 42. № 3. С. 181.
9. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2001. Т. 35. № 2. С. 130.
10. Кузьмин М.Г., Долотова Е.В., Соболева И.В. // Журн. физ. химии. 2002. Т. 76. № 7. С. 1235.
11. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2002. Т. 36. № 6. С. 1.
12. Kuzmin M.G., Soboleva I.V., Dolotova E.V., Dogadkin D.N. // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. V. 2. P. 967.
13. Долотова Е.В., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 4. С. 272.
14. Догадкин Д.Н., Соболева И.В., Кузьмин М.Г. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 2. С. 135.
15. Sadovskii N.A., Kuzmin M.G., Görner H., Schaffner K. // Chem. Phys. Lett. 1998. V. 282. № 5/6. P. 456.
16. Marcus R.A. // Pure Appl. Chem. 1997. V. 69. № 1. P. 13.
17. Davis H.F., Chattopadhyay S.K., Das P.K. // J. Phys. Chem. 1984. V. 88. № 13. P. 2798.
18. Vauthey E., Hogemann C., Allonas X. // J. Phys. Chem. A. 1998. V. 102. № 38. P. 7362.
19. 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.
20. Orbach N., Ottolenghi M. // Chem. Phys. Lett. 1975. V. 35. № 2. P. 175.
21. Schael F., Löhmansröben H.-G. // J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry. 1997. V. 105. P. 317.
22. Догадкин Д.Н., Долотова Е.В., Соболева И.В., Кузьмин М.Г., Плюснин В.Ф., Поздняков И.П., Гривин В.П., Филлипс Д., Мерфи К. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 6. С. 434.
23. Догадкин Д.Н., Долотова Е.В., Соболева И.В., Кузьмин М.Г., Плюснин В.Ф., Поздняков И.П., Гривин В.П., Вонг Э., Бродар П., Николе О. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 6. С. 440.
24. Dolotova E., Dogadkin D., Soboleva I.V., Kuzmin M., Nicolet O., Vauthey E. // Chem. Phys. Lett. 2003. V. 380. P. 729.
25. Fawcett W.R. // J. Phys. Chem. 1999. V. 103. № 50. P. 11181.
26. Arnold B.R., Noukakis D., Farid S., Goodman J.L., Gould I.R. // J. Am. Chem. Soc. 1995. V. 117. № 15. P. 4399.
27. Arnold B.R., Farid S., Goodman J.L., Gould I.R. // J. Am. Chem. Soc. 1996. V. 118. № 23. P. 5482.