

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.37:539.194

*В.Я. АРТЮХОВ, Г.В. МАЙЕР***МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ФОТОПРОЦЕССЫ
В МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМАХ¹**

Рассмотрено влияние межмолекулярных взаимодействий на электронные состояния и спектрально-люминесцентные свойства бимолекулярной системы. Показано, что в качестве начального этапа квантово-химического исследования этого влияния необходим анализ пространственной структуры одноэлектронных состояний (молекулярных орбиталей). Предположение о возможности пренебрежения перекрытием молекулярных орбиталей в контактных комплексах является неверным и приводит к ложным выводам по фотофизике таких комплексов.

Ключевые слова: электронные состояния, фотопроцессы, бимолекулярные системы, органические соединения.

Введение

В конце XIX века Видеман (Wiedemann) выдвинул гипотезу о решающем влиянии окружающей среды на тип молекулярной люминесценции. Анализируя результаты экспериментальных наблюдений люминесценции, он предположил, что «можно преобразовать флуоресцирующее тело в фосфоресцирующее, все более ограничивая свободную подвижность его молекул» (догма Видемана). И хотя позднее заключение Видемана было признано неверным, большое влияние межмолекулярных взаимодействий (ММВ) на спектрально-люминесцентные характеристики молекул не вызывает сомнений и составляет предмет многочисленных исследований [1, 2]. В молекулярной спектроскопии и люминесценции основные проявления универсальных (физических) ММВ заключаются в изменениях положения, формы и интенсивности полос излучения и поглощения. Специфические (квазихимические) ММВ могут вызвать появление (или исчезновение) новых полос поглощения и люминесценции. Уже на ранних этапах развития молекулярной люминесценции большое внимание уделялось проблеме тушения излучения молекул, в том числе и за счет введения в исследуемый образец различных примесей. Такое исследование привело к обнаружению Ж. Перреном (Jean Perrin) явления переноса энергии электронного возбуждения (ПЭЭВ) от одной молекулы (донора, Д) к другой (акцептору, А).

Первое применение квантовой химии к исследованию процесса ПЭЭВ было проведено Г. Гельманом в его известной монографии [3]. Были определены вид волновых функций, оператор, условие резонанса, границы применимости мультипольного разложения оператора межмолекулярного взаимодействия в ряд Тейлора. Отметим также, что в [3] правильно подчеркнута то обстоятельство, что теоретическая интерпретация явления безызлучательного переноса энергии возбуждения должна основываться на положениях трех областей физики молекул: квантовой механики молекул (квантовой химии), теории межмолекулярных взаимодействий возбужденных молекул и теории оптических переходов. Все эти области молекулярной физики в середине 30-х годов XX века находились в процессе становления. Это положение сохранилось и в конце 40-х годов, когда Ферстер (Förster) формулировал свою теорию. В 50–60 годах во всех этих областях знаний произошел существенный прогресс и были установлены основные закономерности (например, в спектроскопии ММВ [1, 2]). Появилась возможность проверки положений теории Ферстера на основе новых знаний. Однако к этому времени сложилось устойчивое мнение, что безызлучательный ПЭЭВ является уникальным фотопроцессом (как особый вид дезактивации возбужденной молекулы), и в работах 60-х годов по теории ПЭЭВ обсуждался лишь вопрос о соотношении величин матричных элементов взаимодействия и энергетического интервала между начальным и конечным состояниями.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (ГК № 07.514.11.4057), гранта Президента РФ (НШ-512.2012.2).

Отметим, что и в современной теории безызлучательных электронных переходов роль ММВ недооценена. В ней при рассмотрении системы молекула – среда учитываются только ядерные (колебательные) координаты среды. Взаимодействием с электронной оболочкой среды и влиянием ее на электронные состояния молекулы пренебрегается. Напротив, спектроскопия ММВ построена на предположении о решающей роли этого влияния на спектральные характеристики молекул в конденсированной фазе [1, 2]. При этом в качестве среды могут выступать другие молекулы такого же сорта (концентрационное тушение), растворитель, матрица, примесь и т.д.

Оценка констант скоростей фотопроцессов связана с вычислением матричных элементов операторов перехода, для чего необходимы волновые функции начального и конечного электронных состояний. Для многих молекул, в которых экспериментально исследовался процесс ПЭЭВ, уже в конце 50-х годов имелись достаточно хорошие расчеты таких волновых функций. Однако, несмотря на важность оценки матричных элементов [4], теоретические работы с привлечением квантово-химических методов отсутствовали.

С конца 80-х годов нами проводились теоретические исследования явления переноса энергии электронного возбуждения в бихромофорных органических соединениях и молекулярных системах [5–10]. В ходе исследований была разработана квантово-химическая модель изучения орбитальной природы и пространственной локализации электронных состояний и особенностей протекания фотопроцессов в таких системах. Установлено, что необходимым условием осуществления межмолекулярного (межхромоморного) фотопроцесса является делокализация волновых функций электронных состояний, участвующих в фотопроцессе. Эта делокализация возникает в результате межмолекулярного взаимодействия компонент (фрагментов) системы. Анализ фотофизических процессов, происходящих в таких молекулах и системах после поглощения фотона, показал, что безызлучательный межмолекулярный перенос энергии осуществляется либо как внутренняя, либо как интеркомбинационная конверсия [6, 10]. Таким образом, было показано, что межмолекулярные фотопроцессы по своей природе (по типу взаимодействия, инициирующего электронный переход) не отличаются от внутримолекулярных фотопроцессов.

Межмолекулярный безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения есть лишь частный случай влияния межмолекулярного взаимодействия на спектрально-люминесцентные и фотохимические свойства органических соединений. Правильное описание механизмов и закономерностей межмолекулярных фотопроцессов необходимо при исследовании тушения люминесценции (в том числе концентрационного), комплексов с переносом заряда и любых полимолекулярных систем.

В данной работе обсудим квантово-химический аспект спектроскопических проявлений ММВ в бимолекулярной системе. Будут рассмотрены системы, в которых при образовании комплекса не проявляются специфические взаимодействия и не образуются локальные межмолекулярные химические связи (например, водородная связь). Основное внимание будет уделено особенностям структуры волновых функций электронных состояний таких систем.

Электронные состояния бимолекулярной системы

С учетом внутри- и межмолекулярных взаимодействий полный электронный гамильтониан бимолекулярной системы может быть записан в виде

$$H = H_1 + H_2 + H_{12}, \quad (1)$$

где H_1 и H_2 – электронные гамильтонианы 1-й и 2-й молекулы:

$$H_1 = \sum_i^{N_1} T_i + \sum_{i,k}^{N_1} \frac{1}{r_{ik}} - \sum_{i,P}^{N_1, M_1} \frac{Z_P}{R_{iP}},$$

$$H_2 = \sum_j^{N_2} T_j + \sum_{j,l}^{N_2} \frac{1}{r_{jl}} - \sum_{j,Q}^{N_2, M_2} \frac{Z_Q}{R_{jQ}},$$

и оператор межмолекулярного взаимодействия

$$H_{12} = \sum_{i,j}^{N_1, N_2} \frac{1}{r_{ij}} - \sum_{i,Q}^{N_1, M_2} \frac{Z_Q}{R_{iQ}} - \sum_{j,P}^{N_2, M_1} \frac{Z_P}{R_{jP}}, \quad (2)$$

где N_1 , N_2 – число электронов, а M_1 , M_2 – число атомов в 1-й и 2-й молекулах; индексы i , k и P относятся к электронам и ядрам 1-й молекулы, а j , l и Q – 2-й молекулы. В случае необходимости

учета присутствия других молекул окружающей среды (растворителя, матрицы и т.п.) в выражение (1) должны быть добавлены электронные гамильтонианы этих молекул и соответствующие члены взаимодействий. Взаимодействия, включенные в выражение (2), аналогичны взаимодействиям в гамильтонианах H_1 и H_2 (отсутствует член, соответствующий кинетической энергии электронов). В случае квантово-химического расчета бимолекулярной системы решается уравнение Шредингера именно для гамильтониана (1). При теоретическом исследовании фотоники многоатомных органических соединений гамильтониан H используется дважды. В начале на его основе при решении уравнений Хартри – Фока определяются энергии и волновые функции электронов, молекулярные орбитали (МО). Далее, этот же гамильтониан используется при вычислении энергий и волновых функций электронно-возбужденных состояний. В обоих случаях межмолекулярное взаимодействие будет влиять на получаемые решения.

Если пренебречь взаимодействием между молекулами (взаимодействием между подсистемами общей системы), то гамильтониан бимолекулярной системы будет включать только первые два слагаемых в выражении (1). Отметим, что исключение члена H_{12} может быть выполнено в любой программе расчета молекулярной электронной задачи несложным техническим изменением алгоритма программы. Решение уравнения Шредингера с гамильтонианом невозмущенной бимолекулярной системы $H_0 = H_1 \oplus H_2$ приводит к нахождению полной энергии $E_0 = E_0^1 + E_0^2$ и волновой функции $\Psi_0 = \Psi_0^1 \otimes \Psi_0^2$ основного состояния.

Одноэлектронные волновые функции φ_i получаются из уравнений Хартри – Фока

$$F_i \varphi_i = \varepsilon_i \varphi_i, \quad 1 \leq I \leq N1 + N2,$$

где, например, для i -го электрона первой молекулы

$$F_i^{M1} = \left\langle \varphi_i \left| -\frac{1}{2} \nabla_i^2 \right| \varphi_i \right\rangle - \sum_{P \in M1} \left\langle \varphi_i \left| \frac{Z_P}{r_{iP}} \right| \varphi_i \right\rangle + \sum_{i' \in M1} \left[\left\langle \varphi_i \varphi_{i'} \left| \frac{1}{r_{ii'}} \right| \varphi_{i'} \varphi_i \right\rangle - \frac{1}{2} \left\langle \varphi_i \varphi_{i'} \left| \frac{1}{r_{ii'}} \right| \varphi_i \varphi_{i'} \right\rangle \right] - \sum_{Q \in M2} \left\langle \varphi_i \left| \frac{Z_Q}{r_{iQ}} \right| \varphi_i \right\rangle + \sum_{j \in M2} \left[\left\langle \varphi_i \varphi_j \left| \frac{1}{r_{ij}} \right| \varphi_j \varphi_i \right\rangle - \frac{1}{2} \left\langle \varphi_i \varphi_j \left| \frac{1}{r_{ij}} \right| \varphi_j \varphi_i \right\rangle \right]. \quad (3)$$

Последние две суммы в (3), согласно определению H_{12} , соответствуют взаимодействию i -го электрона первой молекулы с ядрами атомов и j -м электроном второй молекулы. Строгое отнесение электронов к определенной молекуле возможно только в случае слабого ММВ и при отсутствии обмена электронами между компонентами системы.

При использовании для решения электронной задачи теории Хартри – Фока – Рутана одноэлектронные волновые функции (МО) φ_i представляются в виде линейного разложения по атомным орбиталам (АО) χ_μ

$$\varphi_i = \sum_{\mu \in I} C_{i\mu} \chi_\mu^1 + \sum_{\nu \in 2} C_{i\nu} \chi_\nu^2. \quad (4)$$

В общем случае, МО φ_i являются делокализованными (распределенными) по всем АО бимолекулярной системы. Для невозмущенной системы в рамках теории МО-ЛКАО матрица коэффициентов разложения МО по АО имеет блочный вид:

$$C = \begin{vmatrix} C^1 & 0 \\ 0 & C^2 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Это означает, что МО разлагаются по АО только одного из компонентов системы, т.е. в выражении (4) равны нулю либо все $C_{i\mu}$, либо все $C_{i\nu}$. Спектр собственных значений оператора Фока (одноэлектронных энергий) является совокупностью спектров энергий донора и акцептора $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_1\} + \{\varepsilon_2\}$. В действительности, при расчете невозмущенной системы в рамках электронной задачи после упорядочивания МО по энергии матрица C будет иметь другой вид («перепутанный»), но строгая локализация МО по АО одного из компонентов системы полностью сохраняется.

Используя для построения волновых функций возбужденных электронных состояний Ψ_p однократно возбужденные конфигурации Φ_{ik} , имеем

$$\Psi_p = \sum_{ik \in I} A_{ik} \Phi_{ik} + \sum_{jl \in 2} A_{jl} \Phi_{jl} + \sum_{il} A_{il} \Phi_{il} + \sum_{jk} A_{jk} \Phi_{jk}. \quad (6)$$

В выражении (6) и на рис. 1 предполагается, что МО i и k относятся к первой молекуле комплекса, а j и l – ко второй. Такой вид волновая функция электронного состояния будет иметь в любом случае – с учетом и без учета межмолекулярного взаимодействия. Первые две суммы соответствуют мономолекулярным возбуждениям молекул 1 и 2. На рис. 1 им соответствуют вертикальные стрелки между занятыми и вакантными МО. Третья и четвертая содержат конфигурации, соответствующие переходу электрона с занятой МО одной молекулы на свободную МО другой молекулы (пунктирные стрелки на рис. 1). В общем случае, функция Ψ_p содержит все члены, приведенные в выражении (6). Однако анализ делокализации конкретного возбужденного состояния бимолекулярной системы показывает, что в большинстве случаев основной вклад в формирование Ψ_p вносит одна из сумм в выражении (6). Например, для состояния, преимущественно локализованного на 1-й молекуле величины $|A_{ik}|^2 \gg |A_{jl}|^2, |A_{il}|^2, |A_{jk}|^2$.

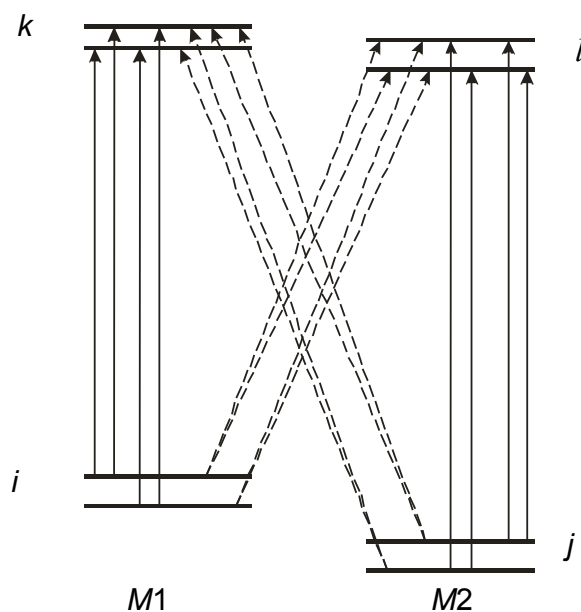


Рис. 1. Однократно возбужденные конфигурации в бимолекулярной системе

При отсутствии в гамильтониане системы члена H_{12} все свойства полной системы (в том числе и спектрально-люминесцентные) будут аддитивны по отношению к аналогичным свойствам подсистем. Все состояния этой системы соответствуют невозмущенной системе в теории возмущений, и соответствующие волновые функции построены на основе только первой или второй суммы в выражении (5). Этот результат не зависит от используемого метода расчета, взаимной ориентации и расстояния между компонентами системы. Напомним, что согласно общепринятой теории электронных переходов состояния подсистем являются адиабатическими чисто спиновыми состояниями. Включение межмолекулярного взаимодействия в виде (2) не может изменить эти характеристики состояний, так как оператор (2) не содержит взаимодействий, которые нарушают адиабатичность или смешивают спиновые состояния. Его действие не может привести к осуществлению электронного перехода (радиационного или безызлучательного) между состояниями указанного типа. По сути, оператор H_{12} есть частный случай оператора кулоновского взаимодействия, и его действие может приводить лишь к уточнению электронной компоненты полной волновой функции состояния. В экспериментальных исследованиях влияние ММВ на спектрально-люминесцентные свойства органических соединений достаточно отчетливо регистрируется, как при переходе от газовой к конденсированной фазе, так и при изменении окружающей среды (например, растворителя).

При использовании для расчета бимолекулярной системы современных пакетов квантово-химических программ гамильтониан формируется в виде (1) автоматически. И таким образом, член H_{12} , соответствующий межмолекулярному взаимодействию, всегда учитывается. Поэтому уменьшение (исчезновение) влияния H_{12} для заданной конформации (относительного расположения) может быть достигнуто только увеличением расстояния между компонентами системы. Рас-

смотрим изменение структуры МО (выражение (3)) и волновых функций возбужденных электронных состояний (выражение (5)) по мере увеличения этого параметра системы.

В контактных комплексах ($R_{12} \approx 3,5 \text{ \AA}$) МО бимолекулярной системы имеют вид (4), т.е. в некоторой степени делокализованы по АО всей системы. Волновые функции электронных состояний определяются выражением (6). При этом третья и четвертая суммы в выражении (6) соответствуют физически возможным процессам переноса электронной плотности между компонентами системы из-за делокализации МО.

Напомним, что обычно используемые в теории электронных переходов операторы электронных переходов являются одноэлектронными операторами (или их суммой). Для матричных элементов одноэлектронного оператора U справедливы правила отбора по однократно возбужденным конфигурациям:

$\langle i \rightarrow k | U | j \rightarrow l \rangle \neq 0$, если:

- 1) $i = j$, $k = l$, тогда $\langle k | U | k \rangle = -\langle i | U | i \rangle$;
- 2) $k = l$, тогда $\langle i \rightarrow k | U | j \rightarrow k \rangle = -\langle i | U | j \rangle$;
- 3) $i = j$, тогда $\langle i \rightarrow k | U | i \rightarrow l \rangle = \langle k | U | l \rangle$.

В рамках теории МО-ЛКАО матричный элемент для электронного перехода (радиационного или безызлучательного) между состояниями с функциями Ψ_p и Ψ_q , в общем виде, записывается как линейная функция от коэффициентов разложения в выражениях (3) и (5) и интегралов в базисе АО:

$$\langle \Psi_p | U | \Psi_q \rangle = f(A_{ik}^p, A_{jl}^q, C_{i\mu}, C_{j\nu}, \langle \chi_\mu | U | \chi_\nu \rangle), \quad (8)$$

где U – оператор перехода. При этом типичными являются члены вида

$$A_{ik}^p \times A_{jl}^q \times C_{i\mu} \times C_{j\nu} \times \langle \chi_\mu | U | \chi_\nu \rangle. \quad (9)$$

Из приведенных выражений следует, что: 1) МО в матричных элементах $\langle i | U | j \rangle$ должны принадлежать одной молекуле либо быть делокализованы по всей системе; 2) в разложении (8) для волновой функции возбужденного состояния должны быть не равны нулю соответствующие значения A_{ik} . Последнее условие будет выполняться, если не равно нулю взаимодействие хотя бы между некоторыми конфигурациями донора $|i \rightarrow k\rangle$ и акцептора $|j \rightarrow l\rangle$. Это взаимодействие в квантово-химических расчетах вычисляется по формуле

$$\lambda \langle H \rangle_{ik,jl} = -\langle ij | kl \rangle + 2\delta_\lambda \langle ik | jl \rangle, \quad (10)$$

где $\langle ij | kl \rangle = \int i(1)j(1) \frac{1}{r_{12}} k(2)l(2) d\tau_1 d\tau_2$; H – оператор Гамильтона (выражение (1)), а δ_λ равно

единице для синглетных и нулю для триплетных состояний. Согласно формуле (10), взаимодействие конфигураций в триплетных состояниях определяется интегралом $\langle ij | kl \rangle$.

Из этих выражений следует, что в контактных комплексах константа скорости электронного перехода будет отлична от нуля, если переход не запрещен правилами отбора матричных элементов (по симметрии или по орбитальной природе). При этом могут осуществляться как мономолекулярные, так и межмолекулярные электронные переходы. Межмолекулярное взаимодействие не только определяет возможность межмолекулярных фотопроцессов, но и изменяет вероятности мономолекулярных фотопроцессов [11, 12].

По мере увеличения R_{12} и уменьшения межмолекулярного взаимодействия делокализация МО будет уменьшаться и, как показывают результаты расчетов, при $R_{12} > 5-15 \text{ \AA}$ МО будут иметь вид (4). При этом в выражении (5) коэффициенты A_{il} (A_{jk}) будут равны нулю или единице, так как конфигурации Φ_{il} (Φ_{jk}) не будут взаимодействовать ни с какой другой. Таким образом, при достаточном расстоянии появятся одноконфигурационные состояния, которые уже не будут соответствовать реальным физическим состояниям, а будут иметь «чисто математический» смысл. Электронные переходы с участием таких состояний будут иметь нулевые вероятности. Волновые функции физических состояний в выражении (5) будут содержать только два первых члена в случае синглетных состояний и один из них в случае триплетных состояний. Последнее обстоятельство приводит к малой эффективности или отсутствию триплет-триплетного переноса энергии между молекулами при $R_{12} > 15 \text{ \AA}$ [6]. Межмолекулярные фотопроцессы между синглетными со-

стояниями в такой системе будут осуществляться по механизму заимствования интенсивности (разрешенности) из соответствующих мономолекулярных электронных переходов [6–8].

Из приведенного выше анализа следует важная роль межмолекулярного взаимодействия на фотопроцессы в бимолекулярных системах. И в контактных комплексах решающую роль будет играть делокализация МО. Известно, что волновые функции самых нижних возбужденных состояний, S_1 и T_1 , включают однократно возбужденные конфигурации Φ_{il} , построенные на 1–2 верхних занятых и нижних вакантных МО. Влияние межмолекулярного взаимодействия на структуру МО зависит от многих причин, и в частности от относительного энергетического расположения МО компонент системы (рис. 2). Конечно, представленные на рис. 1 типы возможного относительного расположения занятых и вакантных молекулярных орбиталей компонент бимолекулярной системы достаточно условны. Тем не менее их можно соотнести с реальными системами. На рис. 2 тип 1 соответствует расположению МО в димерной системе. Известно, что в таких системах наблюдается концентрационное тушение флуоресценции. Тип 2 обнаруживается в комплексах с переносом заряда в возбужденном состоянии. Тип 5 может реализовываться в «инертном» растворителе, если растворенная молекула – катионный краситель (ксантены, полиметины и т.д.). Тип 4 соответствует расположению МО в системе хромофор – растворитель. При этом, как правило, регистрируется поглощение и флуоресценция растворенного соединения.

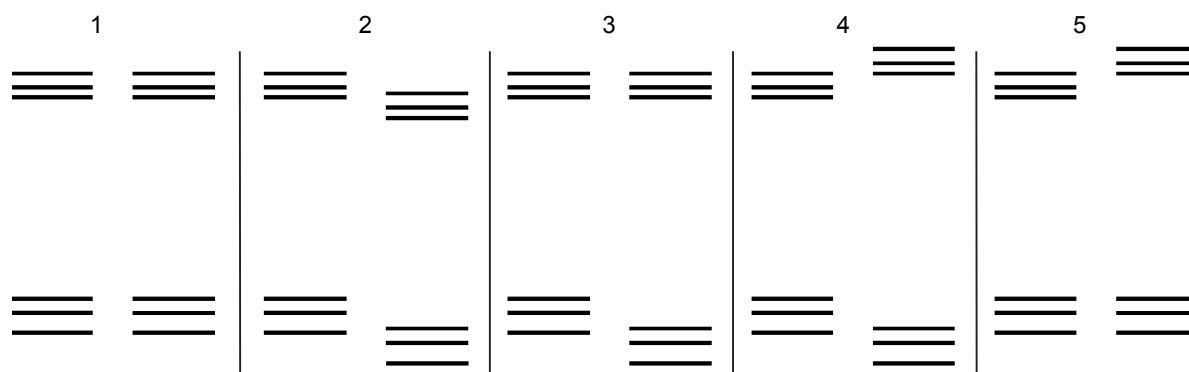


Рис. 2. Типы возможного относительного расположения занятых и вакантных молекулярных орбиталей компонент бимолекулярной системы

Рассмотрим, более подробно ММВ в системе молекула – растворитель. Любая молекула создает вокруг себя анизотропное электрическое поле (потенциал). Причиной анизотропии является неравномерное распределение электрических зарядов в молекуле. Чем более полярна сама молекула, тем более анизотропно и сильнее в некоторых направлениях электрическое поле. Это поле поляризует окружающие молекулы, вызывая в них перераспределение электронной плотности. Поляризация соседних молекул, как и само ММВ, является взаимной. Заметим, что даже при исследовании свойств полярных молекул в полярных растворителях это обстоятельство игнорируется. Обычно учитывается лишь влияние растворителя на физико-химические свойства исследуемой молекулы. ММВ растворенной молекулы с молекулой (молекулами) растворителя приводит к участию колебаний растворителя в колебательной релаксации при осуществлении электронных переходов. В адиабатическом приближении энергия электронов является потенциальной энергией гамильтониана уравнения Шредингера для движения ядер. Поэтому взаимодействие электронных оболочек молекул изменяет потенциал (силовое поле) для ядер системы. Это, в свою очередь, приводит к общей системе колебательных состояний и взаимодействию колебаний молекулы и растворителя. Естественно, это взаимодействие существенно зависит от взаимодействия электронных оболочек.

Заключение

Проведенные исследования фотопроцессов в бимолекулярных (бихромофорных) системах позволили сделать следующие важные выводы:

1) безызлучательные фотофизические процессы (электронные переходы) в молекулярных системах инициируются теми же взаимодействиями, которые ответственны за соответствующие внутримолекулярные процессы;

2) методики оценки констант скоростей внутримолекулярных фотопроцессов применимы к оценке констант скоростей межмолекулярных фотопроцессов при расчете волновых функций электронных состояний молекулярной системы методами квантовой химии в рамках модели «супермолекулы»;

3) межмолекулярное взаимодействие молекул (донора и акцептора) играет решающую роль в осуществлении межмолекулярных фотопроцессов, так как именно оно обеспечивает пространственную делокализацию электронных состояний;

4) межмолекулярные фотопроцессы осуществляются по механизму заимствования интенсивности из соответствующих внутримолекулярных переходов в компонентах системы;

5) выражения для возмущенных волновых функций электронных состояний (2), (3) являются общими и могут быть применены при изучении любой бимолекулярной (полимолекулярной) системы.

Предложенный квантово-химический подход к изучению фотопроцессов в молекулярных системах будет полезным и эффективным при исследовании:

- 1) процессов тушения люминесценции, в том числе концентрационного тушения;
- 2) задач молекулярной (supramolecular) электроники;
- 3) межмолекулярной колебательной релаксации;
- 4) фотопроцессов переноса протона и электрона;
- 5) фотосенсибилизации химических реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mataga N., Chosrowjan H., and Taniguchi S. // J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev. – 2005. – V. 6. – No. 1. – P. 37.
2. Бахшиев Н. Г. Фотофизика диполь-дипольных взаимодействий: процессы сольватации и комплексообразования. – СПб.: Изд-во С.Петербург. ун-та, 2005. – 500 с.
3. Гельман Г. Квантовая химия. – М.: ОНТИ-НКТП, 1937. – 546 с.
4. Dexter D. L. // J. Chem. Phys. – 1953. – V. 21. – P. 836.
5. Артюхов В. Я., Майер Г. В., Риб Н. Р. // Изв. вузов. Физика. – 1993. – Т. 36. – № 10. – С. 69.
6. Майер Г. В., Артюхов В. Я., Базыль О. К. и др. Электронно-возбужденные состояния и фотохимия органических соединений. – Новосибирск: Наука, 1997. – 232 с.
7. Артюхов В. Я., Майер Г. В. // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 10. – С. 24.
8. Артюхов В. Я., Майер Г. В. // ЖФХ. – 2001. – Т. 75. – № 6. – С. 1143.
9. Артюхов В. Я., Майер Г. В. // Журн. прикл. спектр. – 2002. – Т. 69. – № 2. – С. 172.
10. Артюхов В. Я., Помогаев В. А. // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 7. – С. 68.
11. Артюхов В. Я., Майер Г. В. // Изв. МАН ВШ. – 2004. – № 2(28). – С. 119.
12. Артюхов В. Я., Майер Г. В. // Докл. АН ВШ РФ. – 2004. – № 2(3). – С. 15.

Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: artvic@phys.tsu.ru

Поступила в редакцию 03.05.12.