

02

## Кинетика сенсibilизированной люминесценции как инструмент для идентификации безызлучательного переноса энергии

© Е.Н. Бодунов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
191031 Санкт-Петербург, Россия

e-mail: evgeny.bodunov@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.10.2020 г.

В окончательной редакции 14.10.2020 г.

Принята к публикации 28.10.2020 г.

Предложено простое уравнение для расчета кинетики сенсibilизированной люминесценции акцепторов, обусловленной безызлучательным переносом энергии (Förster Resonance Energy Transfer, FRET) электронного возбуждения от доноров. В уравнение в качестве параметров входят времена жизни возбужденных состояний донора и акцептора и экспериментальная кинетика затухания люминесценции доноров при наличии FRET. В уравнение не входит конкретный вид механизма FRET. Уравнение предлагается использовать для аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции с целью количественного подтверждения наличия FRET между донорами и акцепторами.

**Ключевые слова:** безызлучательный перенос энергии, сенсibilизированная люминесценция, кинетика затухания люминесценции.

DOI: 10.21883/OS.2021.02.50554.262-20

### Введение

Безызлучательный перенос энергии (Förster Resonance Energy Transfer, FRET) продолжает оставаться эффективным инструментом для исследования фотопроцессов в различных средах. В последние годы FRET используется в качестве инструмента для исследования нанокристаллов, квантовых точек (QD) и гибридных структур на их основе [1–16].

Доказательством существования FRET являются следующие его проявления [17–19]. Если FRET происходит между разными молекулами (или QD), то:

(1) при увеличении концентрации акцепторов энергии (молекул, QD) наблюдается уменьшение квантового выхода люминесценции доноров (молекул, QD), безызлучательно передающих энергию возбуждения акцепторам,

(2) кинетика затухания люминесценции доноров приобретает ферстеровский вид (stretched exponential, в общем случае [8,20,21]),

(3) появляется сенсibilизированная люминесценция (люминесценция акцепторов в отсутствие их прямого возбуждения) как результат FRET,

(4) наблюдается рост интенсивности сенсibilизированной люминесценции с увеличением концентрации акцепторов,

(5) на малых временах после импульсного возбуждения доноров наблюдается увеличение интенсивности сенсibilизированной люминесценции (enhancement of sensitized luminescence, ESL), а затем ее уменьшение [2].

Если FRET происходит между одинаковыми молекулами (или QD одного размера), то можно наблюдать:

(1) концентрационную деполяризацию люминесценции [17,18,22,23],

(2) ферстеровскую (stretched exponential, в общем случае) кинетику затухания анизотропии испускания люминесценции [24],

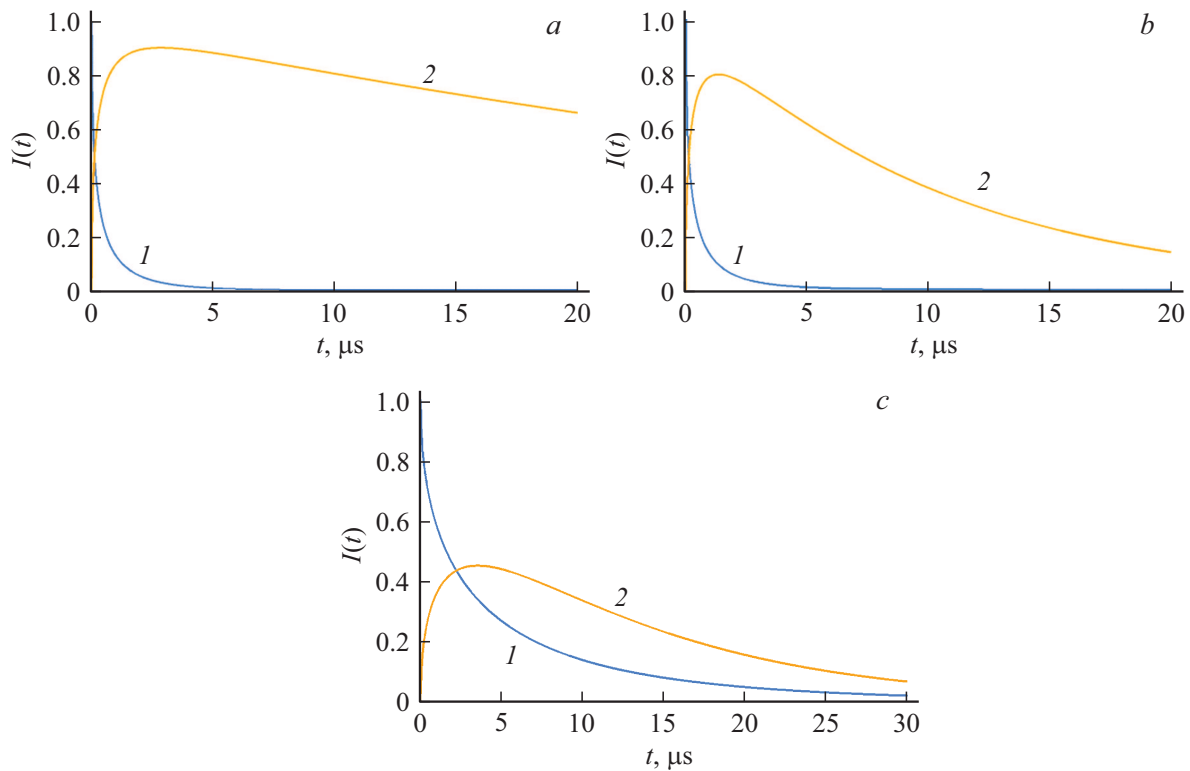
(3) сдвиг спектра люминесценции в длинноволновую сторону с увеличением концентрации молекул (или QD) при наличии неоднородного уширения спектров [2,25,26],

(4) более быструю кинетику затухания люминесценции на коротковолновом краю неоднородно уширенного спектра по сравнению с кинетикой на длинноволновом краю, где возможно также ESL [2,25,26],

(5) эффект Вебера — исчезновение концентрационной деполяризации люминесценции у молекул в растворах при их возбуждении на длинноволновом краю неоднородно уширенного спектра поглощения [27,28].

Заметим, что в большинстве работ наличие FRET подтверждается на количественном уровне совпадением экспериментальной кинетики затухания люминесценции доноров с кинетикой ферстеровского вида [17,18,29], а сенсibilизированная люминесценция акцепторов используется для доказательства FRET только на качественном уровне [2].

В настоящей работе выводится уравнение для кинетики сенсibilизированной люминесценции (молекул, QD) при произвольном механизме FRET. Она удобна для аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции и, следовательно, для подтверждения наличия FRET в исследуемой системе доноров и акцепторов.



**Рис. 1.** Кинетика затухания люминесценции доноров (1) (синяя кривая, 1) и кинетика сенсibilизированной люминесценции акцепторов (2) (желтая кривая, 2) при диполь-дипольном механизме FRET и различных значениях параметров. (a)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 50 \mu s$ ,  $a = 2 \mu s^{-1/2}$ , (b)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 10 \mu s$ ,  $a = 2 \mu s^{-1/2}$ , (c)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 10 \mu s$ ,  $a = 0.5 \mu s^{-1/2}$ .

## Уравнения

Пусть после импульсного возбуждения интенсивность люминесценции доноров (нормированная на единицу в начальный момент времени) затухает согласно уравнению

$$I_D(t) = e^{-\frac{t}{\tau_D} - k_D(t)}. \quad (1)$$

В этом уравнении функция  $k_D(t)$  определяется механизмом FRET от донора к акцептору; и мы предполагаем, что в отсутствие FRET ( $k_D(t) = 0$ ) интенсивность люминесценции убывает экспоненциально со скоростью  $1/\tau_D$  ( $\tau_D$  — время жизни возбужденного состояния донора).

В случае диполь-дипольного механизма FRET в трехмерных средах [17,18]

$$k_D(t) = a\sqrt{t}. \quad (2)$$

Параметр  $a$  определяется критическим радиусом FRET и концентрацией акцепторов. В средах другой размерности (например, фрактальных) зависимость  $k_D(t)$  другая [30,31]:

$$k_D(t) = at^{d/s} \quad (3)$$

и определяется размерностью среды  $d$  и механизмом FRET ( $s = 6, 8, 10$  соответственно для диполь-дипольного, диполь-квадрупольного и квадруполь-квадрупольного механизмов). При обменном механизме

переноса энергии [32] выражение для  $k_D(t)$  более сложное [17,18,33].

В случае контактного переноса энергии (осуществляемому только при непосредственном контакте донора и акцептора, т.е. при короткодействующем взаимодействии, обусловленном, например, малым критическим радиусом FRET или обменным взаимодействием донора и акцептора) [5,7,34–36]

$$k_D(t) = \bar{N}(1 - \exp(-kt)), \quad (4)$$

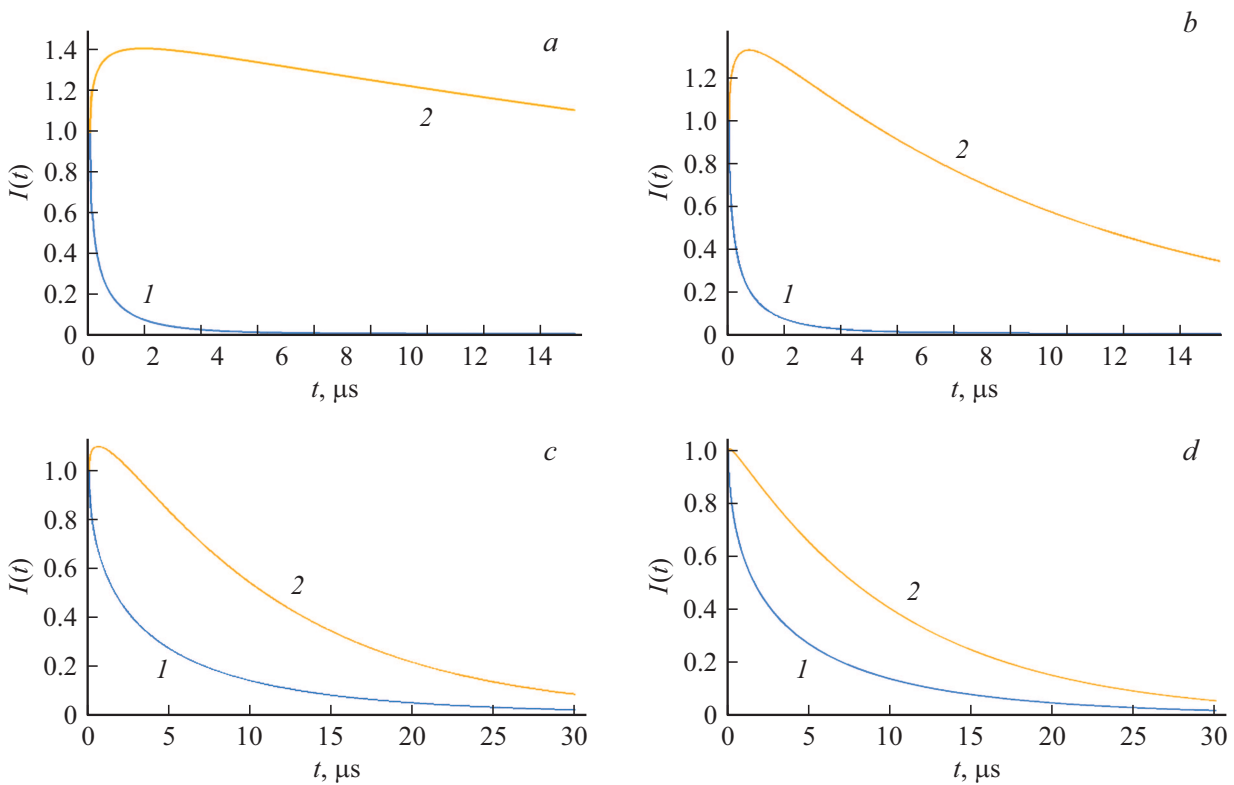
где  $\bar{N}$  — среднее число акцепторов (ловушек) на доноре (QD),  $k$  — скорость переноса энергии с донора на один акцептор (ловушку).

Из уравнения (1) для кинетики люминесценции получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dI_D}{dt} = -\frac{1}{\tau_D} I_D - \frac{dk_D}{dt} I_D. \quad (5)$$

Первое слагаемое в правой части формулы (5) обусловлено излучательными и безызлучательными переходами в самом доноре со скоростью  $1/\tau_D$ . Во втором слагаемом множитель  $dk_D/dt$  имеет смысл скорости передачи энергии возбуждения от донора к акцепторам.

Будем далее предполагать, что люминесценция акцепторов при их прямом импульсном возбуждении также



**Рис. 2.** Кинетика затухания люминесценции доноров (1) (синяя кривая,  $I$ ) и кинетика сенсibilизированной люминесценции (13) (желтая кривая, 2) при диполь-дипольном механизме FRET (2). В начальный момент времени возбуждены доноры и акцепторы ( $D/A = 0.5$  —  $a$ - $c$ ,  $D/A = 0.1$  —  $d$ ). Значения параметров: (а)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 50 \mu s$ ,  $a = 2 \mu s^{-1/2}$ , (б)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 10 \mu s$ ,  $a = 2 \mu s^{-1/2}$ , (с, д)  $\tau_D = 25 \mu s$ ,  $\tau_A = 10 \mu s$ ,  $a = 0.5 \mu s^{-1/2}$ . Участок ESL практически исчезает при увеличении доли акцепторов, возбужденных в начальный момент времени (рис. с и д).

затухает экспоненциально со скоростью  $1/\tau_A$  ( $\tau_A$  — время жизни возбужденного состояния акцептора). Тогда кинетика сенсibilизированной люминесценции акцепторов (в соответствии с уравнением (5)) подчиняется уравнению

$$\frac{dI_A}{dt} = -\frac{1}{\tau_A} I_A + \frac{dk_D(t)}{dt} I_D. \quad (6)$$

Второе слагаемое в правой части этой формулы (в соответствии с предыдущей интерпретацией уравнения (5)) описывает возбуждение акцепторов за счет FRET со скоростью  $dk_D/dt$ .

Уравнение (6) решаем при начальных условиях

$$I_D(0) = 1, \quad I_A(0) = 0, \quad (7)$$

т. е. полагаем, что в начальный момент времени возбуждены только доноры, а акцепторы находятся в основном состоянии.

Решение уравнения (6) с учетом (1) и (7) имеет вид

$$I_A(t) = e^{-t/\tau_A} \int_0^t e^{t'/\tau_A} \frac{dk_D(t')}{dt'} I_D(t') dt'. \quad (8)$$

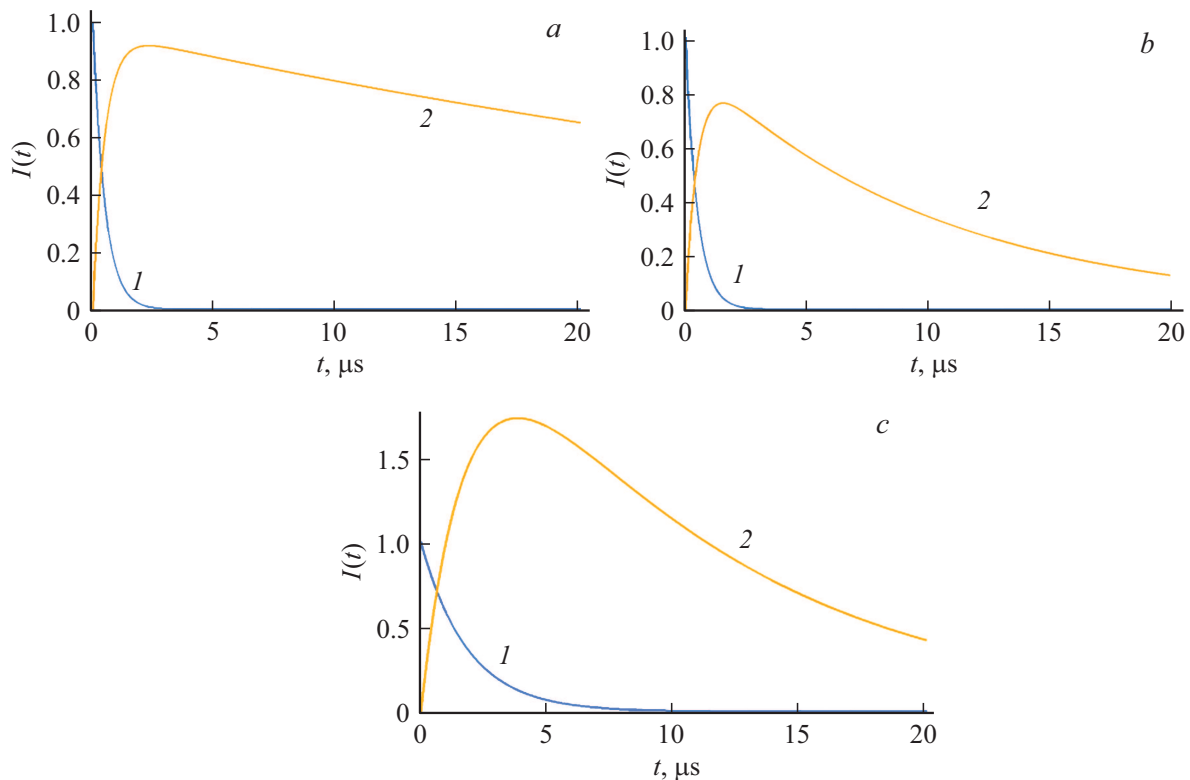
После интегрирования выражения (8) по частям получаем

$$I_A(t) = e^{-t/\tau_A} - I_D(t) + \left( \frac{1}{\tau_A} - \frac{1}{\tau_D} \right) e^{-t/\tau_A} \times \int_0^t e^{t'/\tau_A} I_D(t') dt'. \quad (9)$$

Кинетика затухания люминесценции доноров (1) и кинетика сенсibilизированной люминесценции акцепторов (9) при диполь-дипольном механизме FRET (2) представлены на рис. 1. На начальных временах наблюдается ESL. На больших временах люминесценция акцепторов затухает экспоненциально со скоростью  $1/\tau_A$ .

Заметим, что в уравнении (9) не конкретизируется вид функции  $I_D(t)$  (т. е. механизм переноса энергии,  $k_D(t)$ ). Поэтому в уравнение (9) в качестве  $I_D(t)$  (нормированной кинетики затухания люминесценции доноров) может использоваться экспериментально измеренная кинетика. Последняя может быть аппроксимирована, например, суммой трех экспонент:

$$I_D(t) = A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2} + A_3 e^{-t/\tau_3}, \quad (10)$$



**Рис. 3.** Кинетика затухания люминесценции доноров (1) при  $k_D(t) = kt$  (синяя кривая, 1) и кинетика сенсibilизированной люминесценции (14) (желтая кривая, 2) при различных значениях параметров. (a)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 50 \mu\text{s}$ ,  $k = 2 \mu\text{s}^{-1}$ , (b)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 10 \mu\text{s}$ ,  $k = 2 \mu\text{s}^{-1}$ , (c)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 10 \mu\text{s}$ ,  $k = 0.5 \mu\text{s}^{-1}$ .

где коэффициенты  $A_i$  ( $A_1 + A_2 + A_3 = 1$ ) и времена  $\tau_i$  — параметры аппроксимации. Подставляя экспериментальную кинетику (10) в уравнение (9), рассчитываем кинетику сенсibilизированной люминесценции  $I_A(t)$ . При ее совпадении с экспериментальной кинетикой сенсibilизированной люминесценции,  $I_{\text{expA}}(t)$ , можно делать обоснованный вывод о наличии FRET между донорами и акцепторами.

Подгоночным параметром в такой процедуре аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции  $I_{\text{expA}}(t)$  является единственная константа  $b$  (пропорциональная скорости радиационного затухания акцептора):  $I_{\text{expA}}(t) = bI_A(t)$ . Остальные параметры, входящие в (9) ( $\tau_A$ ,  $\tau_D$  и  $I_D(t)$ ), могут быть найдены из независимых экспериментов.

Если в начальный момент времени возбуждены и доноры, и акцепторы, то уравнение (6) следует решать при начальных условиях

$$I_D(0) = D, \quad I_A(0) = A. \quad (11)$$

Здесь параметры  $D$  и  $A$  характеризуют степень начального возбуждения доноров и акцепторов соответственно.

При начальных условиях (11) решение уравнения (6) приобретает вид

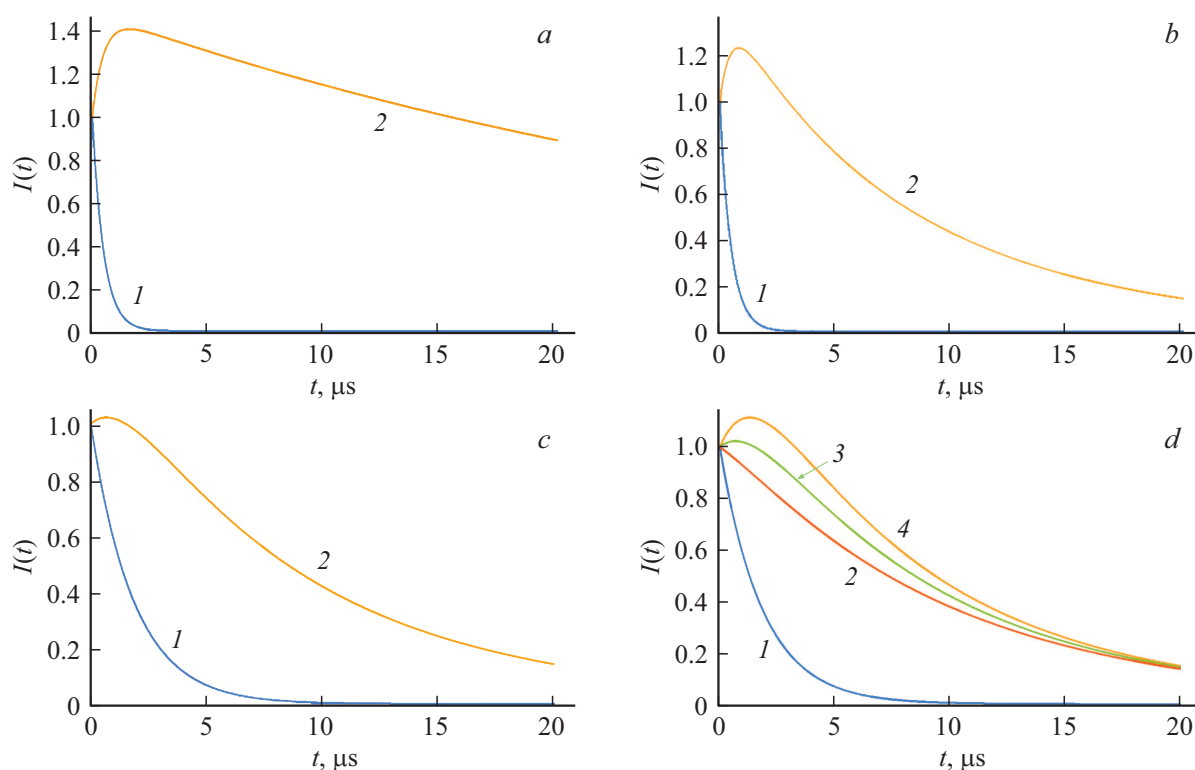
$$I_A(t) = Ae^{-t/\tau_A} + D \left( e^{-t/\tau_A} - I_D(t) + \left( \frac{1}{\tau_A} - \frac{1}{\tau_D} \right) \times e^{-\frac{t}{\tau_A}} \int_0^t e^{t'/\tau_A} I_D(t') dt' \right), \quad (12)$$

где первое слагаемое описывает люминесценцию акцепторов, возбужденных непосредственно в начальный момент времени, а второе — сенсibilизированную люминесценцию.

Нормируя кинетику (12) в начальный момент времени на единицу ( $I_A(0) = 1$ ), получаем

$$I_A(t) = e^{-t/\tau_A} + \frac{D}{A} \left( e^{-t/\tau_A} - I_D(t) + \left( \frac{1}{\tau_A} - \frac{1}{\tau_D} \right) e^{-\frac{t}{\tau_A}} \times \int_0^t e^{t'/\tau_A} I_D(t') dt' \right), \quad (13)$$

Кинетика сенсibilизированной люминесценции акцепторов, рассчитанная по формуле (13), при отличном от нуля начальном возбуждении акцепторов ( $D/A = 0.5$ )



**Рис. 4.** Кинетика затухания люминесценции доноров (1) при  $k_D(t) = kt$  (нижняя, синяя кривая, 1) и кинетика сенсibilизированной люминесценции (15) (желтая кривая, 2). В начальный момент времени возбуждены доноры и акцепторы.  $D/A = 0.5$  (a, b, c), 0.1 (красная, 2), 0.5 (зеленая, 3) и 0.9 (желтая, 4) (d). Значения параметров: (a)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 50 \mu\text{s}$ ,  $k = 2 \mu\text{s}^{-1}$ , (b)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 10 \mu\text{s}$ ,  $k = 2 \mu\text{s}^{-1}$ , (c, d)  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 10 \mu\text{s}$ ,  $k = 0.5 \mu\text{s}^{-1}$ . Участок ESL исчезает при увеличении доли акцепторов, возбужденных в начальный момент времени (рис. d).

представлена на рис. 2. На начальном промежутке времени наблюдается ESL. Однако с увеличением доли возбужденных акцепторов (т.е. при уменьшении отношения  $D/A$ ) время ESL сокращается, и даже ESL практически не наблюдается (рис. 2, d). В этих условиях основной вклад в люминесценцию акцепторов дают те акцепторы, которые были возбуждены в начальный момент времени.

Уравнение (13) можно использовать для аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции,  $I_{\text{expA}}(t)$ . Если известны времена жизни  $\tau_A$ ,  $\tau_D$  и нормированная кинетика затухания люминесценции доноров  $I_D(t)$  ( $I_D(0) = 1$ ), то единственным подгоночным параметром является отношение  $D/A$  — параметр, равный отношению количества возбужденных доноров к количеству возбужденных акцепторов в начальный момент времени.

Рассмотрим упрощенный случай, когда  $k_D(t) = kt$ , т.е. скорость переноса энергии ( $k$ ) не зависит от времени. Тогда из (9) получаем

$$I_A(t) = \frac{k}{1/\tau_D - 1/\tau_A + k} \times e^{-t/\tau_A(1 - e^{-(1/\tau_D - 1/\tau_A + k)t})}. \quad (14)$$

Кинетики затухания люминесценции доноров и соответствующие им кинетики сенсibilизированной люминесценции (14) при различных значениях параметров изображены на рис. 3.

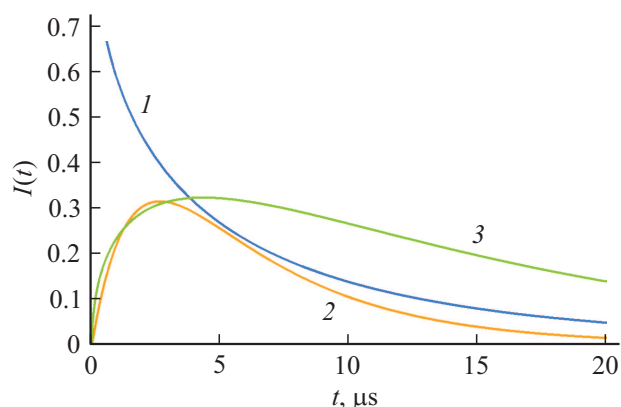
Если учесть, что одновременно возбуждаются доноры и акцепторы, то из (13) при  $k_D(t) = kt$  получаем

$$I_A(t) = e^{-t/\tau_A} \left[ 1 + \frac{D}{A} \frac{k}{1/\tau_D - 1/\tau_A + k} \times (1 - e^{-(1/\tau_D - 1/\tau_A + k)t}) \right]. \quad (15)$$

Кинетики затухания люминесценции доноров и соответствующие им кинетики сенсibilизированной люминесценции акцепторов (15) при различных значениях параметров изображены на рис. 4. С увеличением степени возбуждения акцепторов (с уменьшением  $D/A$  от 0.5 до 0.1, рис. 4, c и 4, d) участок ESL практически исчезает.

Уравнение (15) использовалось для аппроксимации экспериментальных данных в работе [15].

Обращает внимание качественная схожесть кривых, представленных на рис. 1, 3 и рис. 2, 4. Конечно, существует количественное различие в их временном поведении, что иллюстрирует рис. 5, на котором сравниваются кинетики сенсibilизированной люминесценции (9)



**Рис. 5.** Кинетика затухания люминесценции доноров (1) (синяя кривая, 1), кинетика сенсibilизированной люминесценции (9) (желтая кривая, 2) при диполь-дипольном механизме FRET и упрощенная кинетика (14) (зеленая, 3). Значения параметров:  $\tau_D = 25 \mu\text{s}$ ,  $\tau_A = 10 \mu\text{s}$ ,  $a = 0.3 \mu\text{s}^{-1/2}$ ,  $k = 0.5 \mu\text{s}^{-1}$ .

и (14). На начальном временном участке ( $t < 3 \mu\text{s}$ ) кинетики (9) и (14) различаются мало (при выбранных значениях параметров). Значительное различие наблюдается на больших временах.

Отметим, что процесс сенсibilизированной люминесценции в некоторых чертах похож на процесс замедленной люминесценции (delay luminescence), в котором триплетные состояния молекул играют роль доноров энергии возбуждения для синглетных состояний. Как отмечается в работе [37], замедленная люминесценция наблюдается в QD при обратимом захвате носителей заряда ловушками [38,39]. Уравнения, описывающие кинетику затухания люминесценции QD в этом случае, были представлены в работах [38,39] и использовались для анализа кинетики люминесценции коллоидных CdSe/ZnS QD и гибридных наноструктур InP/InAsP/InP [16].

## Выводы

Получены простые уравнения (9) и (13), описывающие кинетику сенсibilизированной люминесценции акцепторов. В этих уравнениях не конкретизируется механизм FRET. Параметрами уравнений (9) и (13) являются (i) время жизни возбужденного состояния акцептора  $\tau_A$ , (ii) время жизни возбужденного состояния донора  $\tau_D$ , (iii) нормированная кинетика затухания люминесценции доноров  $I_D(t)$ , (iv) параметр  $b$  (когда функция (9) используется для аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции  $I_{\text{expA}}(t)$ ,  $I_{\text{expA}}(t) = bI_A(t)$ ) или отношение количества возбужденных доноров  $D$  к количеству возбужденных акцепторов  $A$  в начальный момент времени,  $D/A$  (когда функция (13) используется для аппроксимации  $I_{\text{expA}}(t)$ ; в этом случае  $I_{\text{expA}}(t)$  нормируется на единицу:  $I_{\text{expA}}(0) = 1$ ). Поскольку первые три параметра ( $\tau_A$ ,  $\tau_D$  и  $I_D(t)$ ) можно определить из независимых

экспериментов, то  $b$  и  $D/A$  — единственные подгоночные параметры при аппроксимации экспериментальной кинетики сенсibilизированной люминесценции  $I_{\text{expA}}(t)$  соответственно функциями (9) или (13).

Уравнения (9) и (13) могут предоставить дополнительные количественные доказательства наличия FRET в системе доноров и акцепторов.

## Список литературы

- [1] Kagan C.R., Murray C.B., Bawend M.G. // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. P. 8633. doi 10.1103/PhysRevB.54.8633
- [2] Klimov V.I. // J. Phys. Chem. B. 2003. V. 107. P. 13782. doi 10.1021/jp036497r
- [3] Guyot-Sionnest P., Wehrenberg B., Yu D. // J. Chem. Phys. 2005. V. 123. P. 074709. doi 10.1063/1.2004818
- [4] Zenkevich E., Cichos F., Shulga A., Petrov E.P., Blaudeck T., von Borczyskowski C. // J. Phys. Chem. B. 2005. V. 109. N 18. P. 8679. doi 10.1021/jp040595a
- [5] Koole R., Luigjes B., Tachiya M., Pool R., Vlugt T.J.H., de Mello Donegá C., Meijerink A., Vanmaekelbergh D. // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 111. P. 11208. doi 10.1021/jp072407x
- [6] Aharoni A., Oron D., Banin U., Rabani E., Jortner J. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 057404. doi 10.1103/PhysRevLett.100.057404
- [7] Sadhu S., Tachiya M., Patra A. // J. Phys. Chem. C. 2009. V. 113 (45). P. 19488. doi 10.1021/jp906160z
- [8] Stewart M.H., Huston A.L., Scott A.M., Efros A.L.L., Melinger J.S., Boeneman Gemmill K., Trammell S.A., Blanco-Canosa J.B., Dawson P.E., Medintz I.L. // ACS Nano. 2012. V. 6. P. 5330.
- [9] Orlova A.O., Kurochkina M.A., Gromova Y.A., Maslov V.G., Bodunov E.N., Baranov A.V., Fedorov A.V. // Proc. SPIE 9126. Nanophotonics. V. 912617 (2 May 2014). doi 10.1117/12.2052170
- [10] Keuleyan S., Kohler J., Guyot-Sionnest P. // J. Phys. Chem. C. 2014. V. 118. P. 2749. doi 10.1021/jp409061g
- [11] Preeyanka N., Dey H., Seth S., Rahaman A., Sarkar M. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. V. 22. P. 12772. doi 10.1039/D0CP01845G
- [12] Bodunov E.N., Danilov V.V., Panfutova A.S., Simões Gamboa A.L. // Ann. Phys. (Berlin) 2016. V. 528. P. 272. doi 10.1002/andp.201500350
- [13] Popov A.V., Vanetsev A.S., Keevend K., Kaldvee K., Puust L., Baranchikov A.E., Ryabova A.V., Fedorenko S.G., Kiisk V., Sildos I., Kikas J., Steiner R., Loschenov V.B., Orlovskii Yu.V. // J. Luminescence. 2016. V. 169. Part B. P. 722. doi 10.1016/j.jlum.2015.03.015
- [14] Stroyuk O., Raevskaya A., Spranger F., Gaponik N., Zahn D.R.T. // ChemPhysChem. 2019. V. 20(12). P. 1640–1648. doi 10.1002/cphc.201900088
- [15] Кулагина А.С., Хребтов А.И., Резник Р.Р., Убийвовк Е.В., Литвин А.П., Скурлов И.Д., Цырли Г.Э., Бодунов Е.Н., Данилов В.В. // Опт. и спектр. 2020. Т. 128. № 1. С. 122–127; Kulagina A.S., Khrebtov A.I., Reznik R.R., Ubyivovk E.V., Litvin A.P., Skurlov I.D., Cirilin G.E., Bodunov E.N., Danilov V.V. // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. N 1. P. 119. doi 10.1134/S0030400X20010129

- [16] *Хребтов А.И., Кулагина А.С., Данилов В.В., Громова Е.С., Скурлов И.Д., Литвин А.П., Резник Р.Р., Штром И.В., Цырлин Г.Э.* // ФТП. 2020. Т. 54. В. 9. С. 952. doi 10.21883/FTP.2020.09.49838.32; *Khrebtov A.I., Kulagina A.S., Danilov V.V., Gromova E.S., Skurlov I.D., Litvin A.P., Reznik R.R., Shtrom I.V., Girlin G.E.* // Semiconductors. 2020. V. 54. P. 1141. doi 10.1134/S1063782620090158
- [17] *Ермолаев В.Л., Бодунов Е.Н., Свешникова Е.Б., Шахвердов Т.А.* Безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения. Л.: Наука, 1977. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/285333876\\_Radiationless\\_Transfer\\_of\\_Electronic\\_Excitation\\_Energy](https://www.researchgate.net/publication/285333876_Radiationless_Transfer_of_Electronic_Excitation_Energy); *Ermolaev V.L., Bodunov E.N., Sveshnikova E.B., Shakhverdov T.A.* Radiationless Transfer of Electronic Excitation Energy. Leningrad: Nauka, 1977. [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/285333876\\_Radiationless\\_Transfer\\_of\\_Electronic\\_Excitation\\_Energy](https://www.researchgate.net/publication/285333876_Radiationless_Transfer_of_Electronic_Excitation_Energy)
- [18] *Valeur B., Berberan-Santos M.N.* Molecular Fluorescence: Principles and Applications. 2012.
- [19] *Ermolaev V.L., Sveshnikova E.B., Bodunov E.N.* // Phys.-Usp. 1996. V. 39. P. 261. doi 10.1070/PU1996v039n03ABEH000137
- [20] *Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Valeur B.* // Chem. Phys. 2005. V. 315. P. 171. doi 10.1016/j.chemphys.2005.04.006
- [21] *Берберан-Сантос М.Н., Бодунов Е.Н., Мартиню Ж.М.Г.* // Опт. и спектр. 1999. Т. 87. № 1. С. 74; *Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Martinho J.M.G.* // Opt. Spectrosc. 1999. V. 87. N 1. P. 66.
- [22] *Бодунов Е.Н.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 74. № 3. С. 518; *Bodunov E.N.* // Opt. Spectrosc. 1993. V. 74. N 3. P. 311.
- [23] *Bodunov E.N.* // J. App. Spectrosc. 1977. V. 26(6). P. 814. doi 10.1007/BF01124496
- [24] *Bodunov E.N., Berberan-Santos M.N.* // Opt. Spectrosc. 2015. V. 119. P. 22. doi 10.1134/S0030400X1507005X
- [25] *Bodunov E.N., Malyshev V.A.* // J. App. Spectrosc. 1984. V. 41 (4). P. 1123. doi 10.1007/BF00659500
- [26] *Бодунов Е.Н.* // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 3. С. 405; *Bodunov E.N.* // Opt. Spectrosc. 1998. V. 84. N 3. P. 350.
- [27] *Weber G., Shinitzky M.* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1970. V. 65. P. 823.
- [28] *Бодунов Е.Н., Колобкова Е.В., Ермолаев В.Л.* // Опт. и спектр. 1978. Т. 44. № 2. С. 252; *Bodunov E.N., Kolobkova E.V., Ermolaev V.L.* // Opt. Spectrosc. 1978. V. 44. N 2. P. 146.
- [29] *Popov A.V., Fedorenko S.G., Krut'ko V.A., Iskhakova L.D., Kotova M.G., Timofeeva E.E., Kononkova N.N., Orlovskii Yu.V.* // J. Alloys and Compounds. 2020. V. 822. P. 153654. doi 10.1016/j.jallcom.2020.153654
- [30] *Klafter J., Blumen A.* // J. Chem. Phys. 1984. V. 80. P. 875. doi 10.1063/1.446743
- [31] *Берберан-Сантуш М.Н., Бодунов Е.Н., Мартиню Ж.М.Г.* // Опт. и спектр. 1996. Т. 81. № 2. С. 243; *Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Martinho J.M.G.* // Opt. Spectrosc. 1996. V. 81. N 2. P. 217.
- [32] *Dexter D.L.* // J. Chem. Phys. 1953. V. 21. P. 836. doi 10.1063/1.1699044
- [33] *Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N.* // Opt. Spectrosc. 2004. V. 97. N 3. P. 375. doi 10.1134/1.1803641
- [34] *Bodunov E.N., Simões Gamboa A.L.* // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. P. 10637. doi 10.1021/acs.jpcc.8b02779
- [35] *Bodunov E.N., Antonov Yu.A., Simões Gamboa A.L.* // J. Chem. Phys. 2017. V. 146. P. 114102. doi 10.1063/1.4978396
- [36] *Bodunov E.N., Simões Gamboa A.L.* // Semiconductors. 2018. V. 52. N 5. P. 587. doi 10.1134/S1063782618050044
- [37] *Ермолаев В.Л.* // Опт. и спектр. 2018. Т. 125. № 2. С. 247; *Ermolaev V.L.* // Opt. Spectrosc. 2018. V. 125. P. 256. doi 10.1134/S0030400X18080052
- [38] *Bodunov E.N., Simões Gamboa A.L.* // Semiconductors. 2019. V. 53. N 16. P. 2133. doi 10.1134/S1063782619120078
- [39] *Bodunov E.N., Simões Gamboa A.L.* // J. Phys. Chem. C. 2019. V. 123. P. 25515. doi 10.1021/acs.jpcc.9b07619