

УДК 544.527.123

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НОВЫХ НАФТИЛНИТРОКСИЛЬНЫХ РАДИКАЛОВ

© 2011 г. А. Г. Матвеева*, ***, Е. М. Глебов*, ***, В. В. Королев*, ***, И. П. Поздняков*, ***,
В. Ф. Плюснин*, ***, Д. В. Стась*, ***, В. А. Резников **, ***

*Институт химической кинетики и горения СО РАН
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

**Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

***Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: glebov@kinetics.nsc.ru

Поступила в редакцию 02.03.2011 г.
В окончательном виде 13.04.2011 г.

Методом времязрешенной флуоресценции исследованы люминесцентные характеристики нескольких 3- и 2-имидазолиновых производных нафталина. Для 2-имидазолиновых производных, в которых имидазолиновый фрагмент связан непосредственно с нафталиновым, зарегистрирована слабая ($\phi < 0.001$) люминесценция общей π -системы, содержащей радикальную группу и нафталиновое ядро. Для 3-имидазолиновых производных, где нафталиновый и имидазолиновый фрагменты разделены этиленовым мостиком, наблюдается люминесценция со спектром, аналогичным спектру люминесценции свободного нафталина. Квантовый выход люминесценции и время жизни синглетного возбужденного состояния 3-имидазолиновых производных примерно в 50 раз меньше, чем для свободного нафталина, вследствие внутримолекулярного тушения флуоресценции люминофора стабильным радикалом.

Спин-меченые люминофоры представляют интерес в качестве фотопереключаемых магнитных материалов [1, 2], оптических сенсоров на радикалы [3, 4] и модельных соединений для изучения спинового катализа [5, 6]. Спиновый катализ химической реакции парамагнетиками происходит в триадах парамагнитных частиц, где третий электронный спин инициирует спиновую конверсию в паре других частиц [5, 6]. Для исследований спинового катализа требуются соединения, в которых парамагнитный фрагмент присоединен к одному из партнеров радикальной пары, в том числе спин-меченые люминофоры. Несмотря на сильное внутримолекулярное тушение, в ряде случаев удавалось наблюдать слабую флуоресценцию спин-меченых люминофоров [7, 8]. Возможность использования таких соединений в качестве светящихся меток представляет интерес для создания связанных трехспиновых систем в радиационно-химических исследованиях [9–11].

Для решения перечисленных задач необходима информация о люминесценции систем типа флуорофор – нитроксильный радикал. Измерение квантового выхода люминесценции таких систем затруднительно ввиду малости измеряемой величины ($\phi \sim 0.001$). Флуоресценция спин-меченого соединения может быть замаскирована примесями ис-

ходных молекул или диамагнитными примесями, строение и свойства которых близки к характеристикам исходного люминофора.

По этим причинам для определения параметров люминесценции спин-меченых соединений необходимо применять времязрешенную технику. Уменьшение квантового выхода на два порядка приводит к аналогичному сокращению времени жизни люминесценции [8]. Совершенствование техники люминесценции и появление пикосекундных диодных лазеров расширило возможности исследования флуорофоров, ковалентно связанных с нитроксильными радикалами [13–17].

В работе исследованы люминесцентные свойства ряда парамагнитных производных нафталина. Изученные соединения отличаются по типу радикального фрагмента и по типу связывания нафталина и радикала. Для выяснения связи между структурой и люминесцентными свойствами были изучены структурные аналоги 3-имидазолиновых радикалов с этиленовым мостиком между нафталином и имидазолином. В них нитроксильная группа, несущая неспаренный электрон, заменена на третичный амин – другой известный тушитель люминесценции нафталина [18, 19].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения **1–5** синтезировали известным методом [11]. Синтез новых соединений **6** и **7** проводили по аналогии с методиками [20, 21].

Структурные формулы исследованных соединений приведены на схеме 1. Диамагнитные соединения **1, 2** являются структурными аналогами радикалов **3, 4** соответственно.

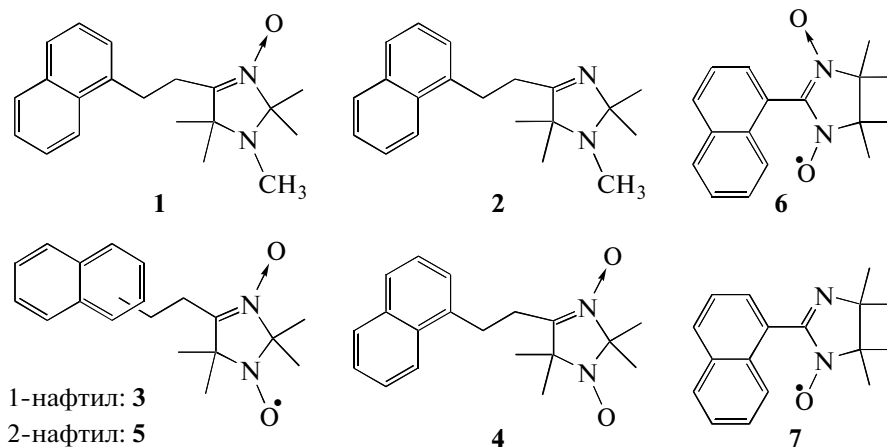


Схема 1. Спин-меченые производные нафталина и их структурные аналоги.

В качестве растворителей использовались ацетонитрил марки “ос. ч.” (Криохром) и *n*-додекан (Fluka, 99%). *n*-Додекан дополнительно очищался последовательным промыванием концентрированной серной кислотой и водой с последующей сушкой и двукратным пропусканием через колонку с окисью алюминия. Кислород удалялся продувкой образцов аргоном. Поглощение образцов на длине волны возбуждения составляло 0.1–0.2.

Спектры и кинетические кривые люминесценции записывались на спектрофлуориметре FLSP920 (“Edinburgh Instrument”). Люминесценцию возбуждали излучением ксеноновой лампы Хе900 или лазерного диода EPLED-280 ($\lambda_{\text{ex}} = 280$ нм, длительность импульса 600 пс). Квантовые выходы люминесценции определялись по методике [22]. В качестве стандарта для вычисления квантовых выходов использовалось значение квантового выхода флуоресценции нафталина в ацетонитриле ($\phi_n = 0.23$ [12]). ЭСП образцов регистрировались на спектрофотометре HP 8453 (Agilent Technologies).

При малых квантовых выходах для определения времен люминесценции необходимо вносить поправку на рассеяние возбуждающего света (релеевское рассеяние, многократные отражения от стенок кюветы) и слабую люминесценцию примесей в растворителе. Поправка производилась по формуле

$$f(t)_{\text{corr}} = f(t) - f(t)_{\text{solv}} \times 10^{-D_i}, \quad (1)$$

где $f(t)$ и $f(t)_{\text{solv}}$ – экспериментальные кривые для раствора исследуемого соединения и чистого растворителя (при одном и том же времени накопления сигнала). При определении времен люминесценции учитывалось, что кинетические кривые

представляют собой свертку кинетики люминесценции с аппаратной функцией прибора. Аппаратную функцию определяли регистрацией рассеянного света от матового кварцевого стекла на 280 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Квантовые выходы и времена спада люминесценции

Примеры скорректированных по формуле (1) кривых спада люминесценции вместе с аппроксимирующими функциями приведены на рис. 1. Кинетика люминесценции обычно неэкспоненциальна, и для расчета ее параметров использовали функцию

$$f(t)_{\text{corr}} = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + A_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (2)$$

где τ_i – времена спада составляющих экспонент. В таблицах 1–3 приведены интегральные доли этих компонент α_i и относительные амплитуды β_i

$$\alpha_i = \frac{A_i \tau_i}{A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2 + A_3 \tau_3}, \quad \beta_i = \frac{A_i}{A_1 + A_2 + A_3}. \quad (3)$$

Для получения информации о диамагнитных производных **1** и **2** регистрировались кинетики люминесценции в полярном и неполярном растворителях (ацетонитрил и додекан, табл. 2). Для 2-имидазолиновых производных **6** и **7**, имеющих двухполосную люминесценцию, кинетические кривые снимались на двух длинах волн (табл. 3). Характерные спектры поглощения и люминесценции исследуемых соединений показаны на рис. 2. Информация об ЭСП всех исследованных соединений содержится в табл. 4.

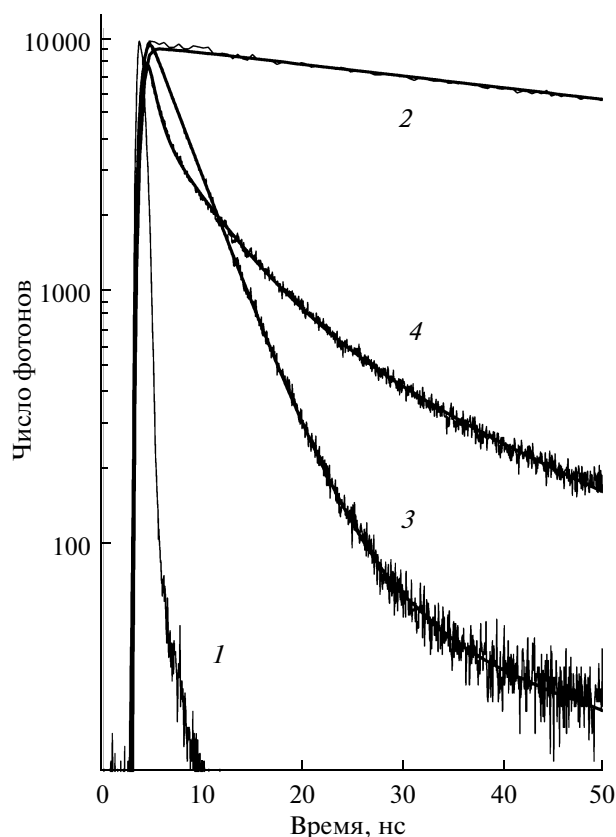


Рис. 1. Кинетики люминесценции ($\lambda_{\text{ex}} = 280$ нм, ацетонитрил без кислорода): 1 – аппаратная функция, 2–4 – экспериментальные кинетики и результат обработки по уравнению (2); 2 – нафталин, 3 – соединение 1, 4 – соединение 3. Параметры аппроксимации представлены в табл. 1 и 2.

Общая характеристика исследованных соединений

Все исследованные соединения разбиваются на два класса согласно типу заместителя: 3-имидазолиновые (1–5) и 2-имидазолиновые (6, 7). Они отличаются также структурой мостика, связывающего нафталиновый и имидазолиновый фрагменты. В 3-имидазолиновых производных это CH_2CH_2 мо-

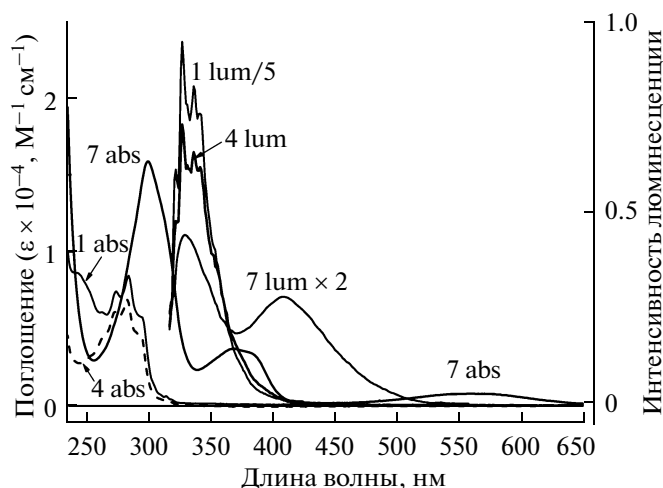


Рис. 2. Спектры поглощения и люминесценции ($\lambda_{\text{ex}} = 280$ нм) соединений 1, 4, 7 в ацетонитриле.

стик, в соединениях 6 и 7 фрагменты связаны непосредственно.

Спектры поглощения и люминесценции 3-имидазолиновых производных (радикалов 3–5 и диамагнитных соединений 1, 2) близки к спектрам нафталина с небольшим (10–15 нм) сдвигом в длинноволновую область. УФ-спектры соединений 1, 3, 5 имеют дополнительную полосу на 245 нм, обусловленную поглощением нитронной группы имидазолинового кольца. Собственное поглощение нитроксильной группы соответствует запрещенному $n-\pi$ -переходу ($\epsilon_{420} \sim 10 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ [19]). Из-за отсутствия сопряжения между нафталином и имидазолином взаимное влияние хромофоров в этих соединениях невелико.

Для соединений 6 и 7 связь нафталинового и имидазолинового фрагментов выражена более ярко. Если в 3-имидазолинах (3–5) спиновая плотность неспаренного электрона локализована на нитроксильной группе (спектры ЭПР этих радикалов представляют собой характерный триплет [23]), то в 2-имидазолинах (6, 7) неспаренный элек-

Таблица 1. Квантовые выходы ($\lambda_{\text{ex}} = 280$ нм), времена ($\lambda_{\text{reg}} = 336$ нм), интегральные α_i и мольные β_i доли времен спада люминесценции 3-имидазолиновых парамагнитных производных нафталина в ацетонитриле

Соединение	$\Phi_{\text{фл}}^1$	τ , нс (α ; β , %)			
		τ_1	τ_2	τ_3	τ^2
Нафталин	0.23 ³	91 (100; 100)			91
3	0.003	0.9 (12.5; 62)	6.5 (44.5; 30)	23 (43; 8)	5.3
4	0.004	0.2 (18; 96)	5.3 (8; 2)	43 (74; 2)	1.8
5	0.005	0.4 (38.5; 95)	5.4 (18; 3)	22 (43; 5.2)	2.0

¹ Для соединений 3–5 представлен наблюдаемый квантовый выход (оценка верхней границы истинного квантового выхода).

² Параметр τ определялся по формуле (4), см. текст.

³ По данным [12].

Таблица 2. Квантовые выходы ($\lambda_{ex} = 280$ нм), времена ($\lambda_{reg} = 336$ нм) и интегральные доли (α_i) времен спада люминесценции 3-имидазолиновых диамагнитных производных нафталина **1** и **2**

Соединение	$\Phi_{фл}$	τ_1 , нс (α , %)	τ_2 , нс (α , %)
Ацетонитрил			
Нафталин	0.23 ¹	91 (100)	
1	0.017	4 (95)	28 (5)
2	0.054	0.7 (5)	61 (95)
Додекан			
1	0.042		14 (100)
2	0.088		35 (100)

¹По данным [12].

трон делокализован по всей сопряженной системе •O–N–C–N–O (спектр ЭПР на рис. 3). В радикалах с сопряженной системой •O–N–C–N–O (**6**) атомы азота эквивалентны, а в радикалах с сопряженной системой •O–N–C–N (**7**) константа СТВ на “втором” атоме азота вдвое меньше, чем на “радикальном”. ЭСП нитронил(имино)нитроксильной группы, в отличие от спектра изолированной нитроксильной группы, имеет довольно интенсивные ($\epsilon \sim 10^3 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$) полосы в видимой области ($\lambda = 560$ нм (**6**), $\lambda = 408$ нм (**7**), табл. 4). Эти полосы обусловлены $n-\pi^*$ -переходом с участием неподеленной пары электронов атомов кислорода [24]. Благодаря этому переходу соединения **6** и **7** окрашены: нитронилнитроксильный (НН) радикал **6** – синий, иминонитроксильный (ИН) радикал **7** – красный. Как правило, полосы поглощения ИН-радикалов сдвинуты в коротковолновую область по сравнению с близкими по строению НН-радикалами за счет большего размера O–N–C–N–O-группы по сравнению с O–N–C–N-группой [24]. Сопряжение между нитронил(имино)нитроксильной группой и ароматическим фрагментом может быть как сильным [1], так и слабым [25] в зависимости от геометрии молекулы.

Люминесценция 2-имидазолиновых парамагнитных производных нафталина

Для соединений **6** и **7** сопряжение между нафтильным фрагментом и нитронил(имино)нитроксильной группой является существенным. На это указывает, во-первых, присутствие в спектре ЭПР соединения **6** небольшой константы СТВ на атоме водорода нафтильного фрагмента (рис. 3). Во-вторых, в ЭСП **6** и **7** нельзя однозначно выделить индивидуальные полосы поглощения нафталина и 2-имидазолина.

Люминесценция соединений **6**, **7** состоит из двух полос (рис. 2). Полоса с максимумом в области 330–336 нм может соответствовать либо люминесценции нафталинового фрагмента молекулы, либо диамагнитной примеси. Ее спектр возбуждения практически совпадает со спектром поглощения нафталина, а не соединений **6**, **7**, что свидетельствует в пользу примесного характера данной полосы. Квантовый выход в коротковолновой полосе мал ($\sim 2 \times 10^{-3}$, табл. 3). Кинетика люминесценции соединений **6** и **7** хорошо аппроксимируется тремя и двумя экспонентами соответственно. Наибольшее время близко к времени спада люминесценции нафталина. Долгоживущая компонента обеспечивает основную долю люминесценции в коротковолновой полосе и лишь небольшую – в длинноволновой. Это позволяет отнести коротковолновую полосу и долгоживущую компоненту к люминесценции диамагнитной примеси. Короткие времена τ_1 и τ_2 для **6** и τ_1 для **7** относятся к люминесценции парамагнитных частиц.

Разложение спектров люминесценции соединений **6** и **7** (рис. 2) на два гауссовых контура позволило разделить вклады от люминесценции примеси и собственно исследуемых соединений и оценить истинные квантовые выходы люминесценции **6** (8×10^{-4}) и **7** (7×10^{-4}) (табл. 3). Для производных **3–5**, в которых люминесценция примеси спектрально не отделена от люминесценции самих соединений, провести такое разделение невозможно.

Таблица 3. Квантовые выходы ($\lambda_{ex} = 280$ нм, $\lambda_{fl} = 336$ и 410 нм), времена и интегральные доли (α_i) времен спада люминесценции 2-имидазолиновых парамагнитных производных нафталина в ацетонитриле

Соединение (λ_{fl} , нм)	$\Phi_{фл}$ ¹	τ_1 , нс (α , %)	τ_2 , нс (α , %)	τ_3 , нс (α , %)
Нафталин (336)	0.23 ²	91 (100)		
6 (336)	0.0020	1.4 (14)	7.5 (22)	61 (64)
6 (410)	(0.0008)	1.4 (18)	7.5 (77)	61 (5)
7 (336)	0.0016	7.2 (35)	44 (65)	
7 (410)	(0.0007)	7.2 (93)	44 (7)	

¹В скобках приведены истинные значения квантового выхода.

²По данным [12].

Таблица 4. Максимумы полос поглощения (нм) в спектрах парамагнитных и диамагнитных производных **1–7** нафталина (в скобках $\epsilon \times 10^{-3}$, $M^{-1}cm^{-1}$; sh – плечо)

1	2	3	4	5	6	7
224 (80.0)	224 (42.2)	224 (73.6)	224 (86.7)	224 (92.1)	210 (40.2)	222 (52.1)
243 sh (8.6)	243 (3.9)	242 sh (9.6)		246 sh (15.4)	224 (44.1)	
274 (7.4)	273 (6.5)	273 (6.5)	273 (6.1)	277 sh (5.4)	300 (15.8)	264 (8.4)
284 (8.4)	283 (4.5)	284 (7.3)	283 (6.9)	287 sh (3.5)	368 (3.7)	283 (8.5)
295 sh (5.7)	293 sh (3.1)	295 sh (4.9)	293 sh (4.6)		382 sh (3.4)	283 (8.5)
					560 (0.8)	408 (0.4)

Люминесценция 3-имидазолиновых парамагнитных производных нафталина

Квантовые выходы люминесценции парамагнитных соединений **3–5** в ацетонитриле примерно на два порядка меньше, чем для нафталина (табл. 1). Кривые спада люминесценции этих радикалов хорошо описываются трехэкспоненциальными функциями (табл. 1). Последняя компонента с большим временем τ_3 обусловлена наличием диамагнитной примеси. Кинетика люминесценции собственно парамагнитных соединений является биэкспоненциальной. Наблюдаемые значения квантовых выходов (табл. 1) для **3–5** представляют собой оценки верхних границ этих величин. Для дальнейших оценок использовался параметр τ , представляющий собой результат усреднения времен (τ_1, τ_2) с учетом их интегральных долей [8]

$$\tau = \alpha_1\tau_1 + \alpha_2\tau_2. \quad (4)$$

Отношение квантовых выходов люминесценции спин-меченых производных ϕ_p и нафталина ϕ_d должно равняться отношению соответствующих времен люминесценции τ_p/τ_d , если имеется один дополнительный канал тушения с константой

скорости k_q , а константы скорости излучательных и безизлучательных переходов для парамагнитного производного и нафталина одинаковы [8]. В этом случае

$$\phi_d/\phi_p = \tau_d/\tau_p, \quad k_q = 1/\tau_p - 1/\tau_d, \quad (5)$$

где ϕ_d, ϕ_p и τ_d, τ_p – квантовые выходы и времена люминесценции нафталина и радикала. При $\phi_d = 0.23$ и $\tau_d = 98.2$ нс для нафталина и $\phi_p \approx 0.004$ время люминесценции радикалов должно составлять $\tau_p \sim 2$ нс. Это соотношение хорошо выполняется для **4** и **5**, но соединение **3** выпадает из этого ряда.

Константа скорости тушения люминесценции нафталина ковалентно связанным имидазолиновым радикалом, рассчитанная по формуле (5), равна 3×10^8 с⁻¹. Для люминофоров с более коротким временем люминесценции, чем у нафталина (например, для паратерфенила $\phi_n = 1$ и $\tau_n = 1$ нс [22]), квантовые выходы люминесценции спин-меченых производных при такой скорости тушения могут достигать 10^{-2} , что существенно выше, чем для парамагнитных производных нафталина.

Люминесценция 3-имидазолиновых диамагнитных производных нафталина

Представляет интерес сравнить люминесцентные свойства парамагнитных 3-имидазолинов **3–5** и диамагнитных аналогов **1, 2**. Квантовые выходы люминесценции **1** и **2** в полярном растворителе (ацетонитрил) на порядок меньше, чем для нафталина (табл. 2), при этом кривые спада люминесценции являются биэкспоненциальными. В неполярном растворителе (додекан) квантовые выходы больше, а кривые спада люминесценции становятся моноэкспоненциальными.

Биэкспоненциальная кинетика соединений **1** и **2** может быть объяснена наличием двух конформаций с разными временами жизни люминесценции – “свернутой” и “открытой” (рис. 4). Примеры влияния конформационного равновесия на фотофизику молекул известны [26]. Мы предположили, что спад люминесценции **1** и **2** определяется внутримолекулярным переносом электрона между нафталином и третичной аминной группой имидазолинового фрагмента. Этот процесс более эффективен в

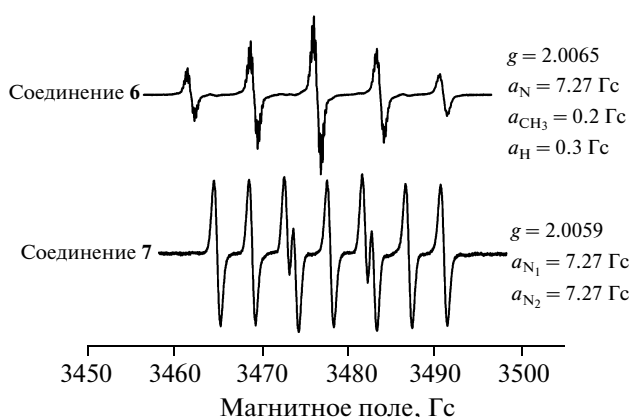


Рис. 3. Спектры ЭПР соединений **6, 7**. Спектры промоделированы с указанными параметрами с помощью программы WinSim v. 0.96. В качестве стандарта для измерения g -фактора использовался ДФПГ.

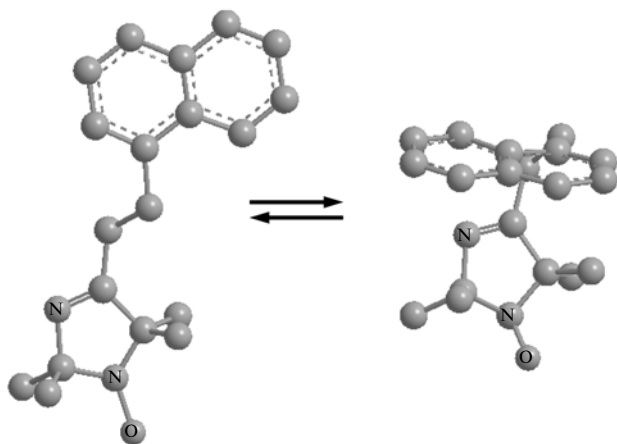


Рис. 4. Пространственное расположение фрагментов молекулы при переходе между “свернутой” и “развернутой” конформациями в соединениях 1–4.

“свернутой” конформации. Существование двух конформеров подтверждается данными ЯМР. Для соединения 1 доля “свернутой” конформации в равновесии больше, чем для 2 [11], что объясняет более эффективное тушение люминесценции в случае 1.

Свободная энергия Гиббса для переноса электрона возрастает при уменьшении диэлектрической проницаемости растворителя [27]. Квантовый выход люминесценции 1 и 2 при переходе от полярного растворителя (ацетонитрил) к неполярному (додекан) увеличивается в 2–3 раза при исчезновении быстрой компоненты (табл. 2). Это свидетельствует в пользу тушения по механизму переноса электрона. Таким образом, для диамагнитных производных (1, 2) биекспоненциальность кинетики люминесценции объясняется наличием двух конформаций. Биекспоненциальность кривых спада люминесценции парамагнитных производных (3–5) также может объясняться конформационным равновесием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированы два новых представителя спин-меченых люминофоров, 2-имидазолиновые производные нафталина. Измерены квантовые выходы и времена их люминесценции, а также исследован ряд ранее полученных 3-имидазолиновых производных. Методом времязрешенной флуориметрии измерены малые квантовые выходы флуоресценции парамагнитных производных нафталина в условиях, когда она маскируется интенсивной люминесценцией диамагнитных примесей.

Для 2-имидазолиновых производных зарегистрирована люминесценция общей π -системы нафталина и нитроксильного радикала с квантовым выходом $\phi \sim 0.001$. В 3-имидазолиновых радикалах, где нафталиновый и имидазолиновый фрагменты

разделены этиленовым мостиком, характерное значение константы скорости тушения люминесценции нафталинового фрагмента составляет $3 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$ ($\phi \sim 0.004$). Теоретически такая константа позволяет при замене нафталина паратерфенилом получить значение $\phi \sim 0.01$, что открывает возможность использования структур данного типа как спин-меченых люминофоров в радиационно-химических исследованиях.

Авторы благодарят д.х.н. Н.П. Грицан за полезные замечания при обсуждении статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 11-03-00268), ИНТАС (проект 05-10000008-80) и Программы Отделения химии и наук о материалах РАН на 2009–2011 гг. (грант № 5.1.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsuda K., Irie M. // Chem. Eur. J. 2001. V. 7. № 16. P. 3466.
2. Teki Y., Miyamoto S., Nakatsuji M., Miura Y. // J. Am. Chem. Soc. 2001. V. 123. № 2. P. 294.
3. Medvedeva N., Martin V.V., Weis A.L., Likhstenshten G.I. // J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2004. V. 163. № 1–2. P. 45.
4. Blinco J.P., Keddie D.J., Wade T., Barker Ph. J., George G.A., Bottle S. E. // Polymer Degr. Stab. 2008. V. 93. № 9. P. 1613.
5. Мунеев Б.Ф. // Журн. физ. химии. 1992. Т. 66. № 11. С. 2992.
6. Buchachenko A.L., Ruban L.V., Step E.N., Turro N.J. // Chem. Phys. Lett. 1995. V. 233. № 3. P. 315.
7. Herblein S.E., Blough N.V. // J. Phys. Chem. B. 1998. V. 102. № 42. P. 8170.
8. Green S.A., Simpson D.J., Zhou G., Ho P.S., Blough N.V. // J. Am. Chem. Soc. 1990. V. 112. № 20. P. 7337.
9. Lukzen N.N., Usov O.M., Molin Yu.N. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2002. V. 4. № 21. P. 5249.
10. Sviridenko F.B., Stass D.V., Kobzeva T.V., Tretyakov E.V., Klyatskaya S.V., Mshvidobadze E.V., Vasilevsky S.F., Molin Yu.N. // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. № 9. P. 2807.
11. Matveeva A.G., Sviridenko F.B., Korolev V.V., Kuibida L.V., Stass D.V., Shundrin L.A., Reznikov V.A., Grampp G.G. // J. Phys. Chem. A. 2008. V. 112. № 2. P. 183.
12. Grabner G., Rechthaler K., Mayer B., Kohler G., Rotkiewicz K. // J. Phys. Chem. A. 2000. V.104. № 7. P. 1365.
13. Ishii K., Takeuchi S., Kobayashi N. // J. Phys. Chem. A. 2001. V. 105. № 28. P. 6794.
14. Mitsui M., Kobori Y., Kawai A., Obi K. // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108. № 4. P. 6794.
15. Likhstenshtein G.I. // Pure Appl. Chem. 2008. V. 80. № 10. P. 2125.
16. Yeganeh S., Wasielewski M.R., Ratner M.A. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. № 6. P. 2268.

17. Colvin M.T., Giacobbe E.M., Cohen B., Miura T., Scott A.M., Wasielewski M.R. // *J. Phys. Chem. A*. 2010. V. 114. № 4. P. 1741.
18. Pina F., Lima J.C., Lodeiro C., de Melo J.S., Diaz P., Albelda M.T., Garcia-Espana E. // *J. Phys. Chem. A*. 2002. V. 106. № 35. P. 8207.
19. Nuin E., Andreu I., Torres M.J., Jimenez M.C., Miranda M.A. // *J. Phys. Chem. B*. 2011. V. 115. № 5. P. 1158.
20. Osiecki J.H., Ullman E.F. // *J. Am. Chem. Soc.* 1968. V. 90. № 4. P.1078.
21. Ullman E.F., Call L., Osiecki J.H. // *J. Org. Chem.* 1970. V. 35. № 11. P. 3623.
22. Eaton D.F. // *Pure Appl. Chem.* 1988. V. 60. № 7. P. 1107.
23. Володарский Л.Б., Григорьев И.А., Диканов С.А., Резников В.А., Шукин Г.И. // *Имидазолиновые нитроксильные радикалы*. Новосибирск: Наука, 1988. С. 98.
24. Tretyakov E.V., Samoilova R.I., Ivanov Yu.V., Plyusnin V.F., Pashchenko S.V., Vasilevsky S.F. // *Mendeleev Commun.* 1999. V. 9. № 3. P. 92.
25. Lescop C., Bussiere G., Beaulac R., Belisle H., Belorizky E., Rey P., Reber C., Luneau D. // *J. Phys. Chem. Sol.* 2004. V. 65. № 4. P. 773.
26. Lukas A.S., Bushard P.J., Weiss E.A., Wasielewski M.R. // *J. Am. Chem. Soc.* 2003. V. 125. № 13. P. 3921.
27. Чибисов Н.Н. // *Успехи химии*. 1981. Т. 50. № 7. С. 1769.