

УДК 541.14:544.522.12

## ТУШЕНИЕ ФОСФОРЕСЦЕНЦИИ ТРОЙНЫХ КОМПЛЕКСОВ НАФТАЛИН– $\beta$ -ЦИКЛОДЕКСТРИН–ЦИКЛОГЕКСАН КИСЛОРОДОМ

© 2025 г. Д. Е. Махров<sup>1, 2</sup>, Д. С. Ионов<sup>1,\*</sup>, И. В. Ионова<sup>1</sup>, М. В. Алфимов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ “Курчатовский институт”, Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники,  
отделение Центр фотохимии, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

\*E-mail: dmitriy.ionov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.07.2024 г.

После доработки 06.09.2024 г.

Принята к публикации 07.09.2024 г.

Изучен процесс тушения долгоживущей фосфоресценции тройных комплексов нафталин– $\beta$ -цикло덱стрин–циклогексан, локализованных в матрице двойных комплексов  $\beta$ -цикло덱стрин–циклогексан, в водной суспензии кристаллогидратов и порошке, образующемся в результате высыхания кристаллогидратов. В суспензии кинетики фосфоресценции моноэкспоненциальны, а тушение происходит динамически, бимолекулярная константа тушения составляет  $k_q = 0.87 \times 10^5 \text{ с}^{-1}\text{M}^{-1}$ . В порошке кинетики фосфоресценции не моноэкспоненциальны, что обусловлено, по-видимому, различной структурой окружения молекул нафталина. Неоднородность окружения выражается в наличии распределения констант скорости безызлучательных процессов и уменьшении доступности молекул нафталина для взаимодействия с кислородом.

**Ключевые слова:** фосфоресценция, нафталин, комплексы включения,  $\beta$ -цикло덱стрин

**DOI:** 10.31857/S0023119325010036 **EDN:** SPVWBC

### ВВЕДЕНИЕ

Многие сферы человеческой деятельности, включая контроль физиологических процессов, химических реакций, (био)технологических процессов, защиту от коррозии, хранение продуктов, получение полупроводников, аэрокосмические исследования, контроль безопасности и др., требуют непрерывного мониторинга содержания кислорода. В последние годы для количественного определения  $O_2$  стали активно использоваться оптические датчики. Технология оптических датчиков позволяет создавать миниатюрные энергоэффективные приборы, которые могут работать непрерывно, иметь малое время отклика и показывать высокую чувствительность [1].

Одним из подходов при оптическом детектировании  $O_2$  является тушение триплетных возбужденных состояний молекулярным кислородом. Для оптического обнаружения  $O_2$  в основном используются фосфоресцирующие комплексы переходных металлов, такие как полипиридиловые комплексы Ru(II) и порфирины Pt(II) [2, 3]. Однако все больший интерес вызывают безметалловые органические люминофоры, обладающие долгоживущей фосфоресценцией при комнатной температуре и имеющие ряд преимуществ: простота синтеза, низкая токсичность и стоимость, хорошая технологичность [4, 5]. Длительное время жизни фосфоресценции таких

материалов позволяет реализовать подход для создания датчика, в основе которого лежит измерение времени жизни люминесценции. Такие датчики наиболее устойчивы к влиянию внешних факторов: дрейфа интенсивности источника, чувствительности фотоприемника и др.

Перспективной системой при создании новых сенсорных материалов для детектирования кислорода являются супрамолекулярные комплексы включения цикло덱стрина с аренами, обладающие фосфоресценцией при комнатной температуре (ФКТ) [6]. При образовании комплексов происходит встраивание молекулы “гостя” (ароматического углеводорода) в гидрофобную полость “хозяина” (цикло덱стрина), что проявляется в изменении фотофизических свойств молекулы “гостя”: квантового выхода, наблюдается сдвиг и/или изменение формы спектров, появление долгоживущей флуоресценции, фосфоресценции при комнатной температуре и др. [7–11]. В зависимости от числа глюкопиранозных звеньев в молекуле цикло덱стрина можно варьировать размер полости, подбирая оптимальный вариант для разных молекул-гостей [12]. Изменяя состав комплексов, можно управлять их чувствительностью к кислороду [13], спектральным составом люминесценции [14] и длиной волн возбуждения люминесценции [15, 16]. Цель данной работы

заключалась в исследовании процесса тушения ФКТ тройных комплексов нафталин– $\beta$ -циклодекстрин–циклогексан кислородом как в суспензиях, описанных ранее, так и в порошках, получаемых при высыхании суспензий, которые могут представлять интерес как потенциальные сенсорные материалы для создания датчиков кислорода.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовали следующие соединения:  $\beta$ -циклодекстрин ( $\beta$ -CD), полученный от ООО «Кемикал Лайн», нафталин (Naph) (Sigma-Aldrich) и циклогексан (CyH) (Scharlau).  $\beta$ -циклодекстрин предварительно очищали от примесей осаждением с циклогексаном [17]. Тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH получали добавлением 43 мкл раствора нафталина в циклогексане заданной концентрации к 10 мл раствора  $\beta$ -CD в воде (8 мМ). Мольное соотношение Naph: $\beta$ -CD в получаемых образцах составляло 1:100. Мольное соотношение  $\beta$ -CD : CyH при этом составляло 1:5. Для приготовления водного раствора  $\beta$ -CD использовали деионизированную воду с удельным сопротивлением 18 МОм·см ( $t = 25^\circ\text{C}$ ). Приготовленные суспензии, содержащие тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH, оставляли при комнатной температуре в герметичных емкостях не менее, чем на 4 ч.

Кристаллический порошок, содержащий тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH, получали из кристаллов. Для этого суспензии в герметичных емкостях помещали в жидкостной термостат и выдерживали 24 ч при температуре 90°C до полного растворения осадка. Затем суспензии медленно охлаждали до комнатной температуры со скоростью 0.1°C/ч. Полученные кристаллы размером 1–2 мм извлекали из водного раствора и оставляли на воздухе при комнатной температуре до полного высыхания, что приводило к их разрушению.

Для проведения измерений спектров люминесценции, а также для исследования кинетики затухания люминесценции использовали спектрофлуориметр FluoTime 300 (PicoQuant, Германия). Для измерения спектра люминесценции и кинетики затухания флуоресценции перед входной щелью монохроматора ФЭУ спектрофлуориметра устанавливали светофильтр HOYA UV30. Для измерения кинетики затухания фосфоресценции использовали интерференционный светофильтр ФОТООПТИК LL-t 500. В качестве источника возбуждающего света использовался диод PLS-270 ( $\lambda_{\text{ex}} = 275 \text{ нм}$ ). При измерении времени жизни фосфоресценции светодиод работал в циклическом режиме. Время облучения

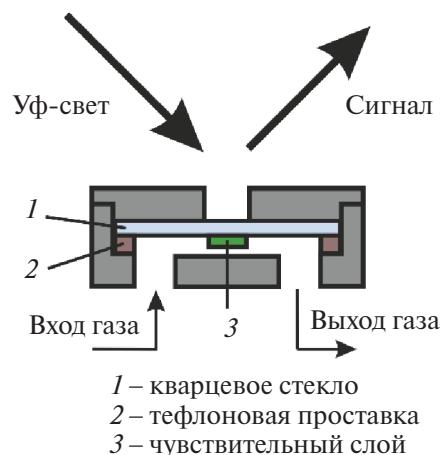


Рис. 1. Ячейка для оптических измерений кристаллического порошка, содержащего комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH.

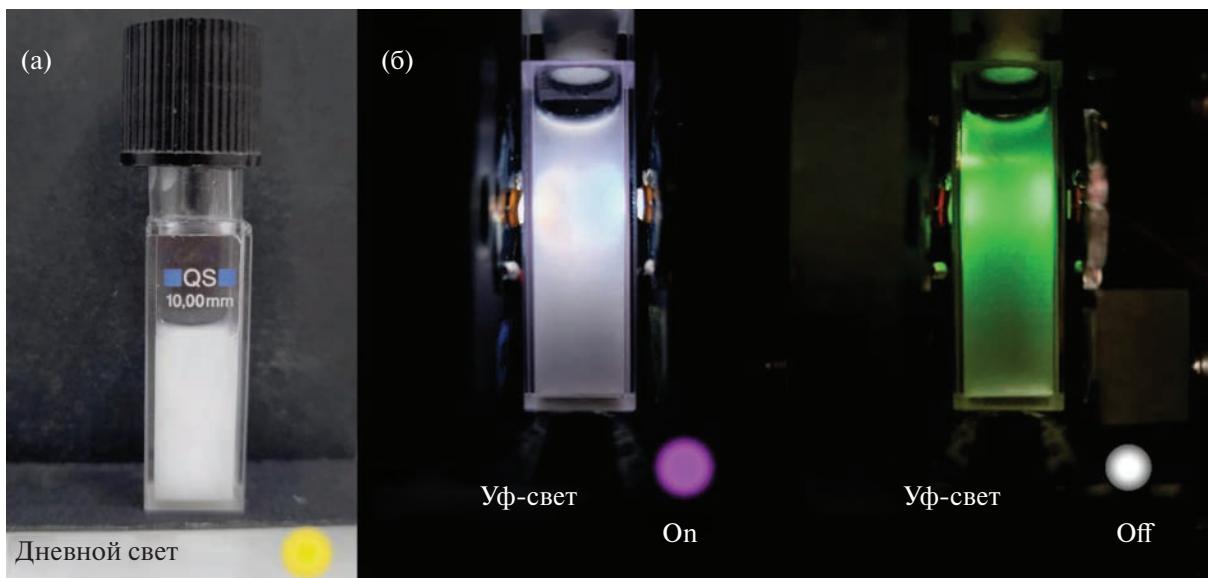
образцов составляло не более 150 мс, время измерения – 10 с. Фитинг полученных кинетик осуществлялся в программе EasyTau3 (PicoQuant, Германия).

Оптические измерения тройных комплексов Naph– $\beta$ -CD–CyH в растворе проводили в кварцевой кювете, расположенной под углом 30° к возбуждающему лучу. Кристаллический порошок, содержащий комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH, наносили на кварцевое стекло слоем 100 мкм и далее помещали в герметичную ячейку (рис. 1), расположенную под углом 45° к возбуждающему лучу.

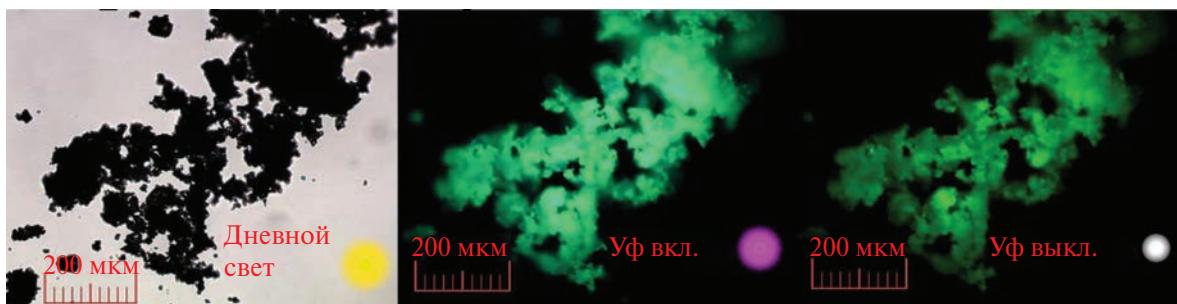
Концентрацию кислорода регулировали динамическим методом при помощи системы ротаметров. Для этого смешивали синтетический воздух и азот ( $\geq 99.9995$  об. % N<sub>2</sub>), подаваемые с различными скоростями потока, поддерживая суммарную скорость потока газа 600 мл/мин. Продувание раствора смесью газов осуществляли в течение 5 мин. Продувание кристаллического порошка производили в герметичной ячейке в течение 15 мин.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При добавлении раствора Naph в CyH к водному раствору  $\beta$ -CD происходит образование тройных комплексов включения Naph– $\beta$ -CD–CyH, которые в виде примеси распределены в матрице кристаллов двойных комплексов  $\beta$ -CD–CyH. Слаборастворимые комплексы включения практически сразу выпадают в виде белого кристаллического осадка [18]. Полученная дисперсная система, содержащая тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CyH, представлена на рис. 2а. При облучении суспензии в УФ ( $\lambda_{\text{ex}} = 275 \text{ нм}$ ) наблюдается фосфоресценция даже в присутствии кислорода (рис. 2б).



**Рис. 2.** Суспензия, содержащая тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CuH при мольном соотношении Naph :  $\beta$ -CD 1 : 100, на воздухе при обычном дневном свете (а) и при облучении УФ с  $\lambda_{\text{ex}} = 275$  нм (б).



**Рис. 3.** Микрофотографии полученного кристаллического порошка Naph– $\beta$ -CD–CuH и его люминесценция ( $\lambda_{\text{ex}} = 275$  нм).

Через несколько минут после извлечения кристаллов из раствора они мутнеют, а при дальнейшем нахождении на воздухе – разрушаются. Поскольку данные системы представляют собой кристаллогидраты, такая нестабильность на воздухе, вероятно, связана с испарением воды. Если поместить кристалл в среду с влажностью 100%, то разрушения не происходит, что подтверждает указанное выше предположение. Микрофотография полученных кристаллических порошков, содержащих тройные комплексы Naph– $\beta$ -CD–CuH, представлена на рис. 3. Средний размер микрокристаллов порошка составляет 20–30 мкм. В образце наблюдается ФКТ на воздухе при облучении его УФ-светом ( $\lambda_{\text{ex}} = 275$  нм).

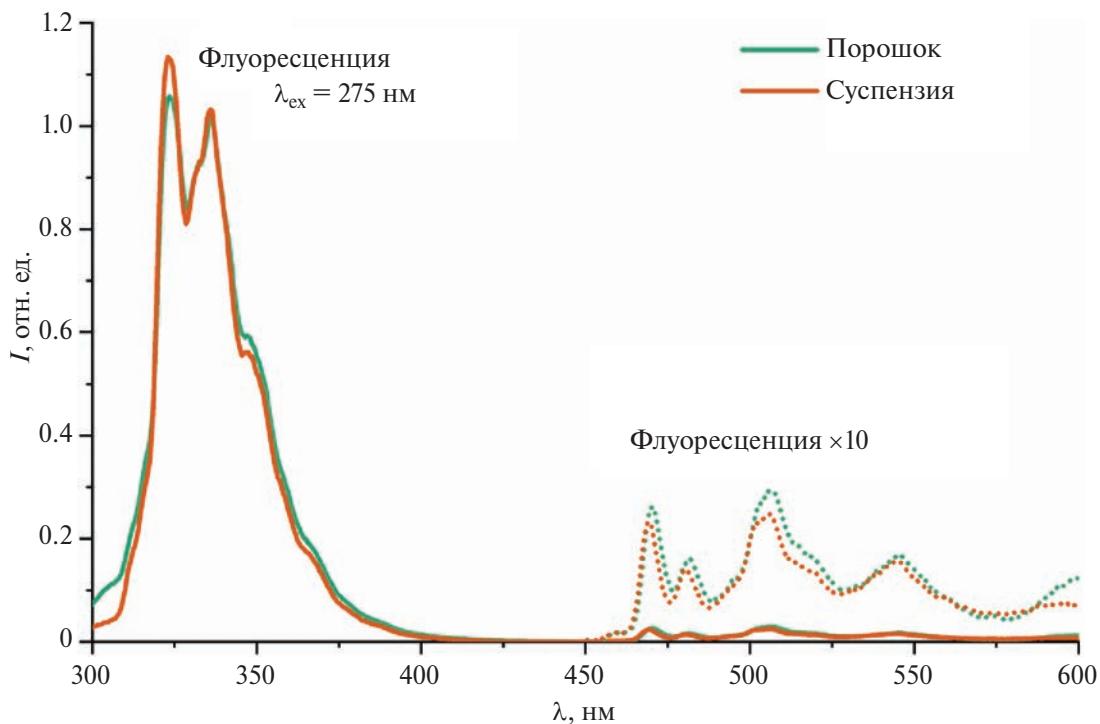
#### Стационарная люминесцентная спектроскопия

Спектры люминесценции образцов в растворе и твердой фазе, измеренные в отсутствие кислорода, представлены на рис. 4. В области 300–400 нм наблюдается флуоресценция нафтилина, в области

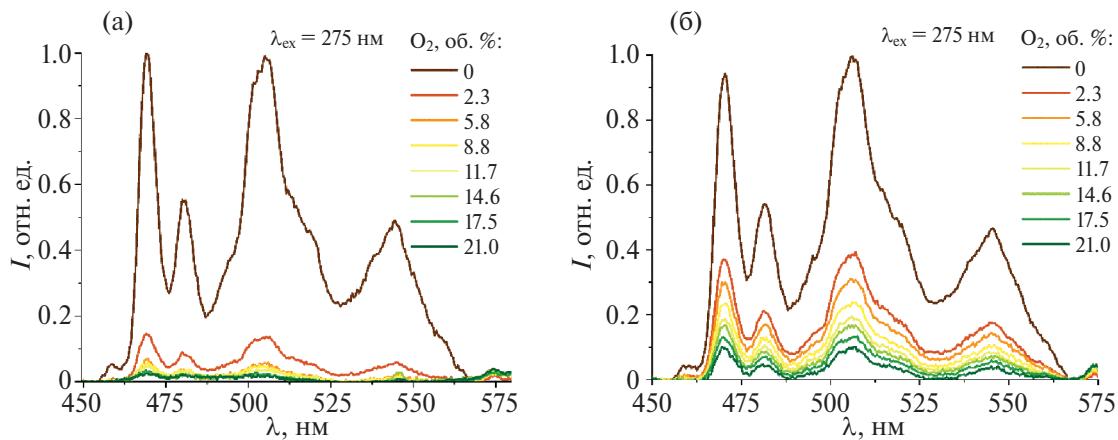
450–600 нм – фосфоресценция. При переходе от суспензий к твердой фазе наблюдаются незначительные различия в спектрах люминесценции в области 300–330 нм, которые связаны, предположительно, с рассеянным светом диода, используемого для возбуждения люминесценции. Соотношение интенсивностей флуоресценции и фосфоресценции в суспензиях и твердых образцах практически не отличается.

Форма спектра флуоресценции при длительном облучении порошков не изменяется, а ее интенсивность уменьшается, что, вероятно, является следствием фотохимических реакций нафтилина. Фотопродуктами в этом случае могут быть нафтол-1 или нафтол-2 [19, 20]. Также нафтилин может быть подвержен реакции фотоокисления в присутствии синглетного кислорода, который образуется в процессе тушения триплетов [21, 22].

В отсутствие кислорода для суспензий и порошков наблюдается фосфоресценция комплексов. По



**Рис. 4.** Спектры люминесценции тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в супензии и в твердой фазе, измеренные в отсутствие кислорода при комнатной температуре ( $\lambda_{\text{ex}} = 275 \text{ нм}$ ).



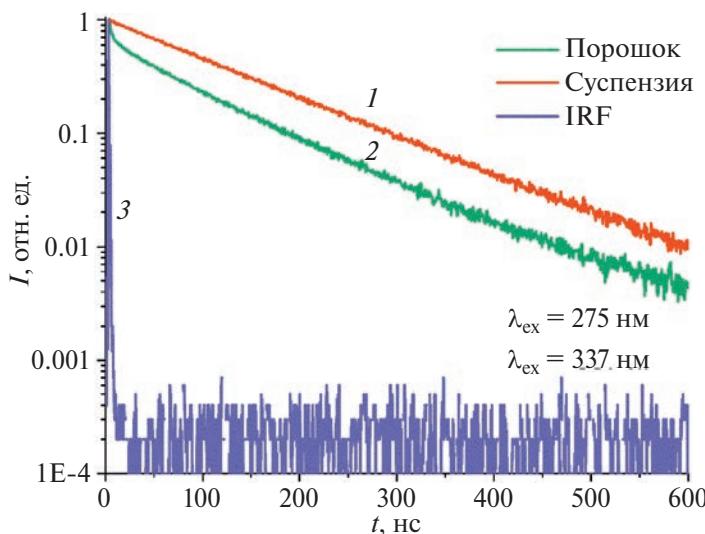
**Рис. 5.** Концентрационная зависимость спектров ФКТ комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в супензии (а) и в твердой фазе (б) от содержания  $O_2$  в газовой фазе ( $\lambda_{\text{ex}} = 275 \text{ нм}$ ).

мере увеличения содержания кислорода ее интенсивность снижается в результате тушения триплетов нафтилина кислородом (рис. 5). При этом влияние кислорода на интенсивность ФКТ сильнее проявляется в растворе, что может свидетельствовать об уменьшении коэффициента диффузии кислорода в твердой фазе, получаемой после высыхания кристаллогидратов.

#### Времяразрешенная люминесцентная спектроскопия

Кинетику затухания флуоресценции супензий моноэкспоненциальная с временем жизни  $\tau_{\text{fl}}$  =

= 125 нс (рис. 6). Кинетику затухания флуоресценции твердых образцов не удается описать одной экспонентой, поскольку появляется короткая составляющая с  $\tau_{\text{fl1}} = 2.6 \text{ нс}$  (рис. 6). Характерное время второго экспоненциального члена  $\tau_{\text{fl2}} = 102 \text{ нс}$  короче, чем время жизни флуоресценции полученного в супензиях. Наиболее вероятно, что изменение времени жизни флуоресценции обусловлено возрастанием константы скорости безызлучательных процессов, связанных с изменением окружения нафтилина в процессе разрушения кристаллогидратов. Наличие короткой компоненты предположительно



**Рис. 6.** Кинетические кривые затухания флуоресценции тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в супензии (1) и в твердой фазе (2), измеренные в отсутствии кислорода при комнатной температуре. (3) – аппаратная функция прибора (IRF). Длина волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}} = 275$  нм.

связано либо с рассеянным светом источника, либо с продуктами фотодеградации нафталина. Концентрация кислорода не влияет на кинетику затухания флуоресценции.

Кинетика затухания ФКТ как в растворе, так и в твердой фазе сильно зависит от концентрации кислорода (рис. 7). Такая зависимость объясняется появлением дополнительного процесса гибели триплетных состояний нафталина вследствие их динамического тушения молекулярным кислородом.

Кинетика затухания ФКТ дисперсий может быть аппроксимирована одной экспонентой. В случае кристаллического порошка кинетика затухания ФКТ описывается моделью с двумя экспоненциальными членами. Измеренные времена жизни ФКТ при содержании кислорода в интервале 0–21 об. % приведены в табл. 1. Так, в растворе тушение ФКТ комплексов значительно сильнее, чем для комплексов

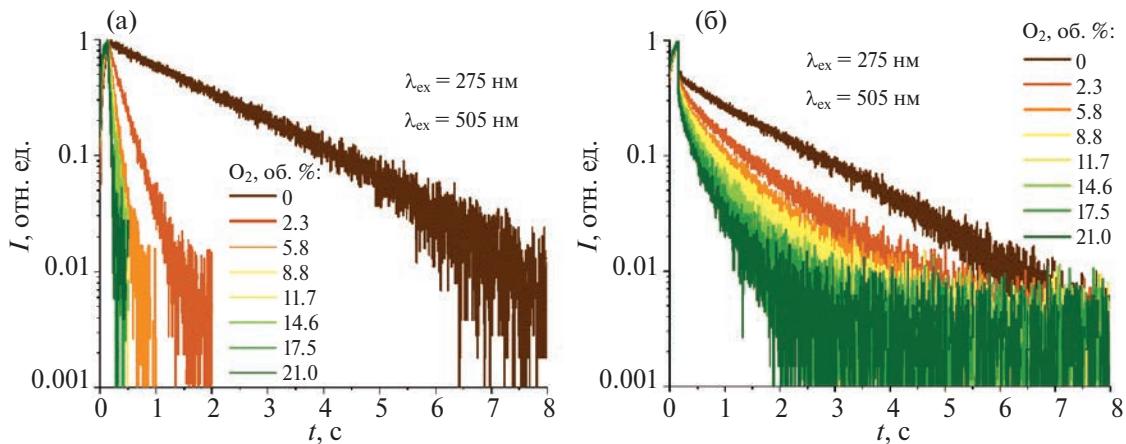
в твердой фазе. Уже при 2.3 об. % O<sub>2</sub> в растворе тушится более 50% триплетов нафталина, в твердой фазе – менее 10%.

На начальном участке кинетики затухания ФКТ твердых образцов наблюдается резкое падение интенсивности с кинетикой в субмикросекундном диапазоне, которая отсутствует в кривых затухания ФКТ супензии и, по-видимому, связана с рассеянным светом флуоресценции; вклад этой составляющей не зависит от концентрации кислорода.

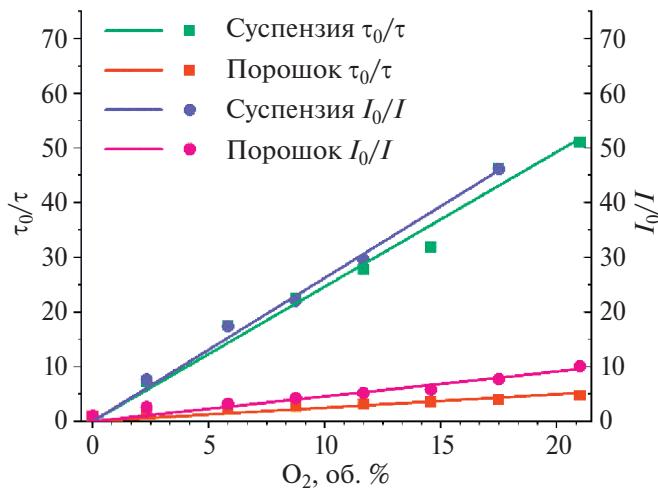
В случае кристаллического порошка кинетика затухания ФКТ описывается биэкспоненциальной моделью. При этом по мере добавления кислорода значительно увеличивается вклад быстрой составляющей по амплитуде. Причины немоноэкспоненциальности в кинетике затухания ФКТ кристаллического порошка, содержащего тройные комплексы Naph- $\beta$ -CD-CuH, могут быть связаны с появлением

**Таблица 1.** Времена жизни ФКТ ( $\tau$ ) тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в супензии, результаты биэкспоненциального фитинга кинетик затухания ФКТ в твердой фазе ( $\tau_i$  – времена жизни,  $A_i$  – вклады соответствующих экспонент,  $\tau_{\text{Av},A}$  – среднее время жизни) при содержании кислорода в интервале 0–21 об. %

$\Phi_{\text{O}_2}$ , об. %	Супензия	Кристаллический порошок				
		$\tau$ , мс	$\tau_1$ , мс	$\tau_2$ , мс	$A_1$ , %	$A_2$ , %
0.0	1941	1810	324	90	10	1661
2.3	264	1247	257	59	41	841
5.8	111	1055	234	52	48	661
8.9	86	980	231	46	54	576
11.7	70	873	208	43	57	494
14.6	61	773	177	45	55	445
17.5	42	741	174	37	63	384
21.0	38	623	149	38	62	329



**Рис. 7.** Кинетические кривые затухания фосфоресценции тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в суспензии (а) и в твердой фазе (б), измеренные при комнатной температуре при различном содержании  $O_2$  ( $\lambda_{\text{ex}} = 275 \text{ нм}$ ).



**Рис. 8.** Зависимости времен жизни  $\tau$  и интенсивностей  $I$  ФКТ тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в суспензии и в твердой фазе от содержания  $O_2$  в координатах Штерна–Фольмера.

молекул нафтилина с различными константами скорости безызлучательных переходов при разрушении кристаллогидратов, а также их различной доступностью для кислорода.

Различия в процессе тушения кислородом ФКТ тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в растворе и твердой фазе хорошо демонстрируют зависимости  $\tau$  и  $I$  ФКТ, представленные в координатах Штерна–Фольмера (рис. 8):

$$\frac{I_0}{I} = \frac{\tau_0}{\tau} = 1 + k_q \tau_0 [O_2] = 1 + K_{SV} [O_2], \quad (1)$$

где  $I_0(\tau_0)$  и  $I(\tau)$  — интенсивность (время жизни) люминесценции в отсутствии и в присутствии кислорода соответственно,  $k_q$  — константа скорости бимолекулярного тушения люминесценции,  $K_{SV}$  — константа Штерна–Фольмера,

**Таблица 2.** Константы Штерна–Фольмера ( $K_{SV}$ ) и константы скорости тушения ФКТ ( $k_q$ ) тройных комплексов Naph- $\beta$ -CD-CuH в суспензии и твердой фазе

Параметр	Суспензия	Порошок	Суспензия, по растворенной концентрации $O_2$
$K_{SV}^*, M^{-1}$	$6.5 \times 10^3$	$0.93 \times 10^3$	$2.08 \times 10^5$
$K_{SV}^{**}, M^{-1}$	$5.8 \times 10^3$	$0.43 \times 10^3$	$1.89 \times 10^5$
$k_q^*, M^{-1} \cdot c^{-1}$	$3.2 \times 10^3$	$0.56 \times 10^3$	$1.03 \times 10^5$
$k_q^{**}, M^{-1} \cdot c^{-1}$	$3.3 \times 10^3$	$0.26 \times 10^3$	$0.95 \times 10^5$

\* Константа определена по отношению интенсивностей стационарных спектров фосфоресценции на длине волны 505 нм.

\*\* Константа определена по отношению времени жизни фосфоресценции измеренному на длине волны 505 нм.

При расчете времени жизни ФКТ порошка использовалось среднее время жизни по амплитуде ( $\tau_{Av,A}$ ), рассчитанное по формуле:

$$\tau_{Av,A} = \sum_{i=1}^{n_{\text{Exp}}} A_i \tau_i / \sum_{i=1}^{n_{\text{Exp}}} A_i, \quad (2)$$

$A_i > 0$        $A_i > 0$

Значения констант Штерна–Фольмера и констант скорости бимолекулярного тушения представлены в табл. 2. При расчете констант Штерна–Фольмера концентрация кислорода была пересчитана в М при температуре 20°C и давлении 101.3 кПа (1% =  $4.159 \times 10^{-4}$  М). Кроме этого, константы для суспензий были рассчитаны на основе концентрации растворенного кислорода с учетом растворимости кислорода 0.0013 моль · кг<sup>-1</sup> · бар<sup>-1</sup> [23]. В суспензиях константы Штерна–Фольмера, полученные из стационарных спектров фосфоресценции

и времен жизни фосфоресценции, совпадают в рамках точности эксперимента, что говорит о чисто динамическом характере процесса тушения. В случае порошков константа Штерна—Фольмера, полученная из стационарных спектров фосфоресценции, почти в два раза больше константы, полученной на основании времен жизни, что ожидаемо в случае немоноэкспоненциальной кинетики люминесценции [24]. Полученные значения бимолекулярных констант значительно меньше диффузионной константы в воде, которую можно оценить как  $1.2 \times 10^{10} \text{ M}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  [25], и, по-видимому, соответствуют диффузионной константе кислорода в кристаллогидратах. Значения констант скорости бимолекулярного тушения в случае порошков в 5–10 раз меньше, чем соответствующие значения для суспензий, что указывает на замедление диффузии кислорода при разрушении кристаллогидратов. Замедление диффузии свидетельствует об изменении упаковки циклодекстринов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе изучен процесс тушения долгоживущей фосфоресценции тройных комплексов Naph— $\beta$ -CD—СуН, локализованных в матрице двойных комплексов  $\beta$ -CD—СуН, в водной суспензии и порошке. В суспензии кинетики фосфоресценции моноэкспоненциальны, а тушение происходит динамически с константами, определяемыми, предположительно, скоростью диффузии кислорода в кристаллогидратах. В порошке, образующемся при разрушении кристаллогидратов, затухание фосфоресценции имеет сложную кинетику, что обусловлено, по-видимому, различной структурой окружения нафталина, а также значительно меньшей доступностью молекулы нафталина для кислорода.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа по получению комплексов и изучению оптических свойств была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-13-00443). Измерение времен жизни флуоресценции выполнено с использованием оборудования ЦКП “Структурная диагностика материалов” НИЦ “Курчатовский институт” в рамках госзадания НИЦ “Курчатовский институт”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu M., Jahanzamin J., Yan X. et al. Organic and Inorganic Materials Based Sensors. Wiley, 2024. P. 1105–1127.
2. Wang X., Wolfbeis O.S. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. № 10. P. 3666–3761.
3. Quenched-phosphorescence Detection of Molecular Oxygen / ed. Papkovsky D.B., Dmitriev R.I. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2018. 368 p.
4. Zhou Y., Qin W., Du C. et al. // Angewandte Chem. Int. Ed. 2019. V. 58. № 35. P. 12102–12106.
5. Lehner P., Staudinger C., Borisov S.M. et al. // Nat. Commun. 2014. V. 5. № 1. P. 4460.
6. Назаров В.Б., Авакян В.Г., Алфимов М.В. и др. // Известия Академии Наук. Серия Химическая. 2003. С. 1–7.
7. Nazarov V.B., Vershinnikova T.G., Alfimov M.V. // Russian Chemical Bulletin. 1999. V. 48. № 10. P. 1998–2000.
8. Nazarov V.B., Avakyan V.G., Alfimov M.V. // Naphthalene: Structure, properties and applications / ed. G.I. Antsyforov, A.F. Ivanski. NY: Nova Science Publishers Inc., 2012. P. 127–153.
9. Nazarov V.B., Gerko V.I., Alfimov M.V. // Russian Chemical Bulletin. 1997. V. 46. № 8. P. 1386–1388.
10. Nazarov V.B., Gerko V.I., Alfimov M.V. // JETP Lett. 1997. V. 65. № 7. P. 528–531.
11. Livshits V.A., Nazarov V.B., Ionova I.V. et al. // Nanotechnol. Russ. 2011. V. 6. № 11–12. P. 677–704.
12. Nazarov V.B., Avakyan V.G., Vershinnikova T.G. et al. // Russian Chemical Bulletin. 2012. V. 61, № 3. P. 665–667.
13. Nazarov V.B., Avakyan V.G., Rudyak V.Y. et al. // J. Lumin. 2011. V. 131. № 9. P. 1932–1938.
14. Nazarov V.B., Avakyan V.G., Vershinnikova T.G. et al. // Russian Chemical Bulletin. 2000. V. 49. № 10. P. 1699–1706.
15. Nazarov V.B., Avakyan V.G., Alfimov M.V. // J. Lumin. 2020. V. 219. P. 116909.
16. Nazarov V.B., Avakian V.G., Alfimov M.V. // High Energy Chem. 2019. V. 53. № 2. P. 108–114.
17. Li W., Corke H., Zhang L. // Starch. 1996. V. 48. № 10. P. 382–385.
18. Ионов Д.С., Ионова И.В., Мазалов М.А. и др. // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. № 2. С. 91–99.
19. Mcconkey B.J., Hewitt L.M., Dixon D.G. et al. // Water Air Soil Pollut. 2002. V. 136. P. 347–359.
20. Vialaton D., Richard C., Baglio D. et al. // J. Photochem. Photobiol. A. 1999. V. 123. P. 15–19.
21. Li J., Wang L., Li J. et al. // Chemistry – A Eur. J. 2022. V. 28. № 34.
22. Fudickar W., Linker T. // Chem. Photo Chem. 2021. V. 5. № 11. P. 1004–1008.
23. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69 / ed. Linstrom P.J., Mallard W.G. Gaithersburg MD, 20899: National Institute of Standards and Technology, 2023.
24. Krasnansky R., Koike K., Thomas J.K. // J. Phys. Chem. 1990. V. 94. № 11. P. 4521–4528.
25. Principles of Fluorescence Spectroscopy Lakowicz J.R. / ed. J.R. Lakowicz. Boston, MA: Springer US, 2006. № ISBN 0-306-46093-9. 954 p.

# QUENCHING OF PHOSPHORESCENCE OF TRIPLE COMPLEXES OF NAPHTHALENE- $\beta$ -CYCLODEXTRIN-CYCLOHEXANE WITH OXYGEN

D. E. Makhrov<sup>a, b</sup>, D. S. Ionov<sup>a, \*</sup>, I. V. Ionova<sup>a</sup>, M. V. Alfimov<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*NRC Kurchatov Institute, Kurchatov complex of crystallography and photonics,  
Photochemistry Center department, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

\*E-mail: dmitriy.ionov@gmail.com

The process of quenching of long-lived phosphorescence of ternary complexes naphthalene- $\beta$ -cyclodextrin-cyclohexane, localized in the matrix of double complexes  $\beta$ -cyclodextrin-cyclohexane, in aqueous suspension of crystalline hydrates and powder formed by drying of crystalline hydrates has been studied. In the suspension, the phosphorescence kinetics are monoexponential and the quenching is dynamic; the bimolecular quenching constant is equal  $k_q = 0.87 \times 10^5 \text{ s}^{-1}\text{M}^{-1}$ . In the powder, the phosphorescence kinetics are not monoexponential, which is apparently due to the different surrounding structure of the naphthalene molecules. The inhomogeneity of the environment is expressed in the presence of a distribution of the rate constants of radiation-free processes and a decrease in the availability of naphthalene molecules for interaction with oxygen.

**Keywords:** phosphorescence, naphthalene, inclusion complexes,  $\beta$ -cyclodextrin