

ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

УДК 544.5

СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЛЮТЕЦИЙСОДЕРЖАЩИХ ТЕТРАПИРРОЛОВ

© 2014 г. Е. Г. Ермолина\*, Р. Т. Кузнецова\*, И. П. Поздняков\*\*, В. Ф. Плюснин\*\*,  
С. С. Смола\*\*\*, Н. Н. Семенишин\*\*\*

\*Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета  
634050, Томск, Новособорная пл., 1

E-mail: erm.phch@gmail.com

\*\*Институт химической кинетики и горения СО РАН

630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3

\*\*\*Физико-химический институт им. А.В. Богатского НАН Украины

Украина, 65080, Одесса, Люстдорфская дорога, 86

Поступила в редакцию 12.11.2013 г.

В окончательном виде 13.01.2014 г.

Измерены спектрально-кинетические характеристики триплетных состояний комплексов тетрафенилпорфирина и трифенилкоррола с аминополикарбоновой кислотой (EDTA или DTPA) или ее комплексом с лютецием в качестве заместителя, а также комплекса коррола с Ga(III) в качестве центрального комплексообразователя. Измерены спектры наведенного поглощения комплексов из триплетно-возбужденного состояния (эффективный максимум при 460–470 нм), константы тушения триплетных состояний кислородом при комнатной температуре ( $2 \times 10^8$ – $7 \times 10^8$  M<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>). Для некоторых производных определены квантовые выходы (0.44–0.55) и коэффициенты экстинкции триплетного состояния ( $\lg \varepsilon_T = 4.81$ –4.89). Эффективность заселения и кинетика дезактивации триплетных состояний определяется структурой порфириноида, особенно центральным комплексообразователем, и мало зависит от присутствия тяжелого атома на периферии молекулы. На основе результатов обсуждены возможности применения новых соединений для создания различных оптических устройств.

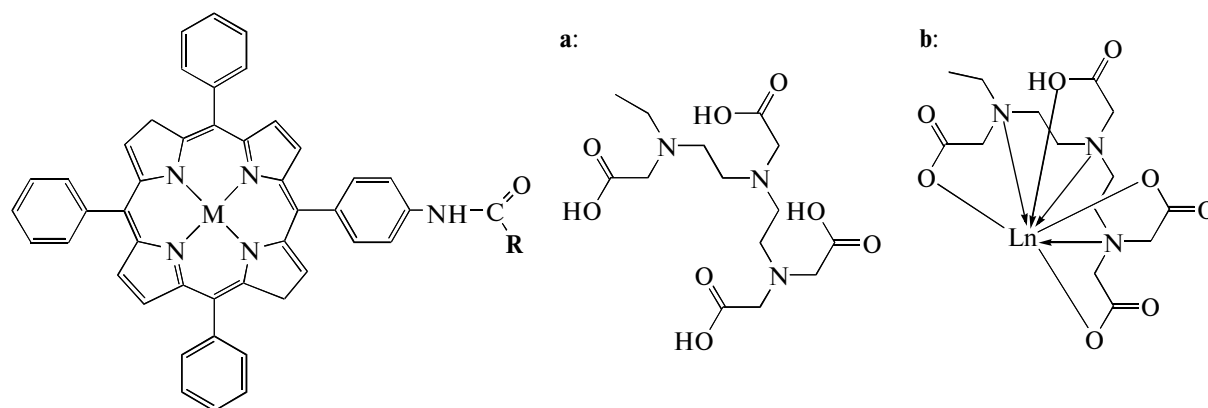
DOI: 10.7868/S0023119714040048

Порфирины — это класс молекул, отличающийся ключевой ролью во множестве важных биологических процессов. Поэтому они находятся в фокусе всевозможных исследований — от фундаментального изучения их химического многообразия и фотофизических свойств до практического исследования их фотосинтетических и каталитических функций. Фотофизика порфиринов довольно сложна и включает такие ультрабыстрые процессы, как электронная и колебательная релаксация, а также перенос энергии и заряда. Понимание этих процессов, а также влияния на них растворителя и широкого круга заместителей на периферии молекулы и иона металла в центре макрокольца — важная цель работ в этой области [1–3].

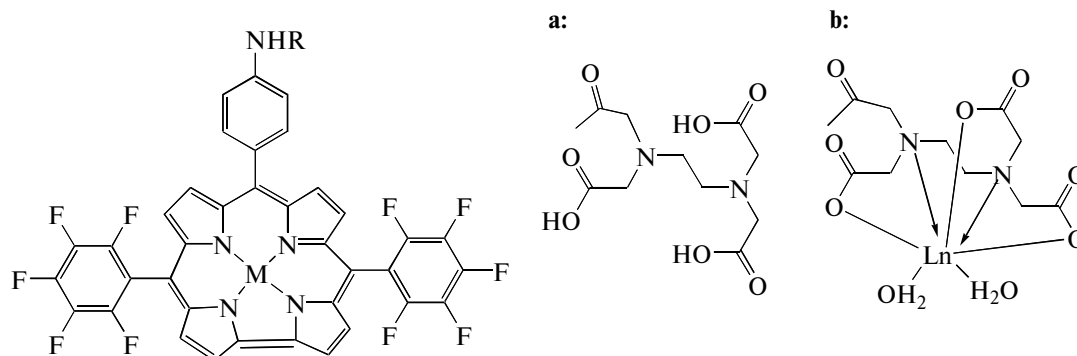
Корролы — синтетические ароматические макроциклы семейства порфиринов, отличающиеся отсутствием одного из мезо-атомов углерода между пиррольными циклами. Впервые синтез корролов осуществлен в 1965 г. [4], но активные исследования свойств этих соединений начались в 1990-е, когда был предложен доступный метод их синтеза [5]. Интерес к этим соединениям растет, как и круг их возможных применений [6].

Исследование спектрально-люминесцентных свойств корролов показало, что им, как и порфиринам, присуще интенсивное поглощение в высокоэнергетической области спектра (около 420 нм) и умеренное поглощение в низкоэнергетической области (около 500–600 нм). Однако корролы от порфиринов выгодно отличают более высокие квантовые выходы флуоресценции (до 70% у корролов [7] в противовес нескольким процентам порфиринов), что делает их перспективными компонентами фотоактивных многокомпонентных систем. Несмотря на активные исследования электрохимических, каталитических и сенсорных свойств корролов [6], планомерному изучению фотофизических свойств данного класса молекул посвящено незначительное количество работ [8, 9], особенно это касается свойств триплетных состояний.

Свойства триплетных состояний порфириноидов особенно ярко проявляются в комплексах, содержащих тяжелые ионы, например лантаниды, из-за усиления ими процесса интерконверсии. Комплексы корролов с лантанидами, координированными непосредственно с донорными ато-



**Рис. 1.** Структура исследуемых производных тетрафенилпорфирина:  $H_2TPP-DTPA - M = 2H$ ,  $R = a$ ;  $ZnTPP-LuDTPA - M = Zn(II)$ ,  $R = b$ ,  $Ln = Lu(III)$ .



**Рис. 2.** Структура исследуемых производных 5,15-ди(пентафторфенил)-10-(4-аминофенил)коррола:  $H_3Cor - M = 3H$ ,  $R = H$ ;  $H_3Cor-LuEDTA - M = 3H$ ,  $R = b$ ;  $GaCor - M = Ga$ ,  $R = H$ ;  $GaCor-EDTA - M = Ga$ ,  $R = a$ .

мами макрокольца, получены впервые в [10]. Ввиду лабильности лантанид-тетрапирролов в данной работе использовано введение лантанид-иона не в центр макроцикла коррола, а в периферический заместитель, образующий стабильные комплексы с лантанид-ионами, которые представляют большой интерес с точки зрения управления фотофизическими свойствами корролов [11, 12].

Таким образом, цель настоящей работы – сравнительное исследование спектрально-кинетических и фотофизических параметров производных тетрафенилпорфирина и трифенилкоррола, содержащих в одном из фенильных циклов свободный комплексон или комплексонат лютеция, в зависимости от интенсивности возбуждения, растворителя и других параметров.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали свободное основание тетрафенилпорфирина и его комплекс с цинком, содержащие в одном из фенильных циклов диэтилен-триаминопентауксусную ( $H_2TPP-DTPA$ ) кислоту

или ее комплекс с лютецием ( $H_2TPP-LuDTPA$ ) (рис. 1), а также свободное основание трифенилкоррола и его комплекс с галлием, содержащие в одном из фенильных циклов этилендиаминтетрауксусную ( $GaCor-EDTA$ ) кислоту или ее комплекс с лютецием ( $H_3Cor-LuEDTA$ ) (рис.2). DTPA и EDTA выбраны в качестве комплексообразующих агентов благодаря высоким константам устойчивости их комплексов с лантанидами ( $\lg \beta > 20$  для DTPA и  $\lg \beta > 15$  для EDTA [11]). Методика синтеза соединений подробно представлена в [11, 12].

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Спектры поглощения и люминесценции растворов при 298 и 77 К регистрировались на спектрометрах CM-2203 (SOLAR) и Cary Eclipse (Varian) с криостатом Optistat DN (Oxford Instruments). Квантовые выходы излучения определялись по стандартной методике с погрешностью 10% при использовании в качестве эталона  $ZnTPP$  [13].

Спектры флуоресценции были зарегистрированы на спектрофлуориметре FLSP920 (Edinburg In-

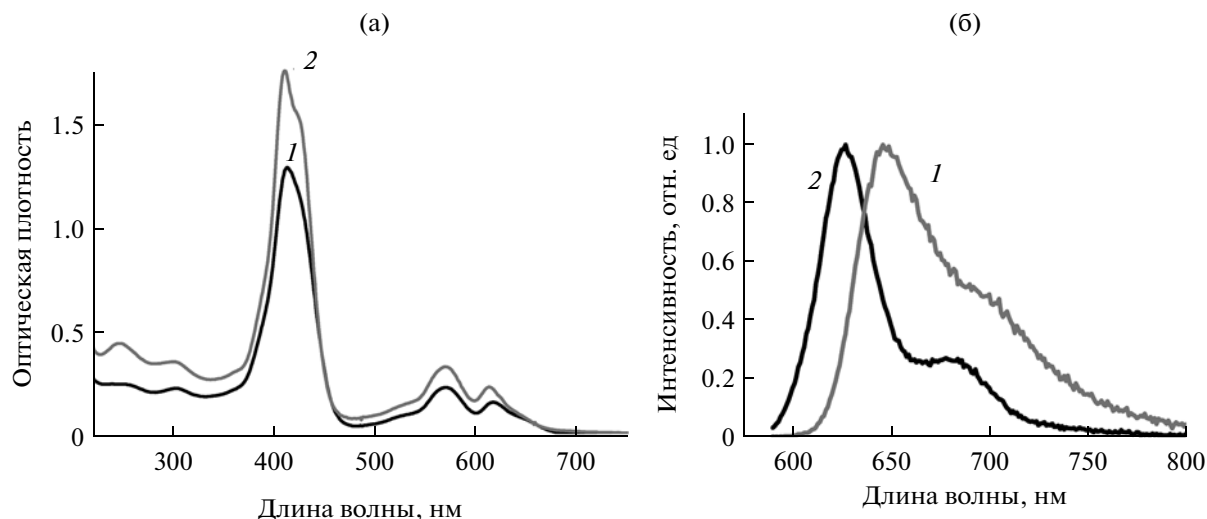


Рис. 3. (а) Спектры поглощения  $H_3CoG$  (1) и  $H_3CoG-LuEDTA$  (2) в этаноле. (б) Спектры флуоресценции  $H_3CoG$  (1) и  $GaCoG$  (2) в этаноле,  $\lambda_{возб} = 550$  нм, 298 К.

struments). В качестве источника возбуждения использовалась ксеноновая лампа Xe900 ( $\lambda_{ex} = 550$  и 420 нм).

Спектры наносекундного импульсного фотолиза измерялись на установке, разработанной в лаборатории фотохимии ИХКГ СО РАН и подробно описанной в [14]. Источник возбуждения – вторая (532 нм) гармоника Nd:YAG-лазера с длительностью импульса 5 нс и энергией в импульсе 0.1–10 мДж. Источник зондирующего света – ксеноновая лампа ДКСШ-150. Чувствительность установки по оптической плотности – до  $5 \times 10^{-4}$ , спектральный диапазон 300–750 нм, временное разрешение – 50 нс. Все эксперименты по фотолизу проводились в стандартных кварцевых кюветках с длиной оптического пути 1 см при  $T = 298$  К. Растворители – этанол и толуол марки ВЧЖХ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектрально-люминесцентные свойства исследованных соединений, измеренные при комнатной температуре в стандартных условиях, представлены на рис. 3 и в табл. 1. Спектры поглощения тетрафенилпорфирина и его производных, как и производных коррола, содержат интенсивный максимум в высокоэнергетической области спектра, называемый также полосой Sore или В-полосой ( $\lambda_{abs} = 420-425$  нм), и умеренное поглощение в виде нескольких Q-полос в низкоэнергетической области спектра ( $\lambda_{abs} = 500-650$  нм) (табл. 1). При комплексообразовании металла с макрокольцом за счет повышения симметрии количество Q-полос в спектре уменьшается. При введении в один из фенильных

циклов заместителя комплексона (EDTA, DTPA) или его комплекса с лютецием (LuDTPA, LuEDTA) спектры поглощения изменяются незначительно: проявляется сдвиг максимумов полос до 3 нм и некоторое перераспределение интенсивности Q-полос. Спектры флуоресценции содержат 2 колебательные полосы, введение металла в центр макрокольца сдвигает максимумы спектров флуоресценции гипсохромно на 20 нм, введение комплексон(ат)а – на 5 нм (рис. 3).

По аналогии с порфиринами полученные для свободных корролов и их металлокомплексов полосы отнесены к излучению из нижнего возбужденного синглетного состояния.

Для свободных оснований коррола излучение из состояния  $T_1$  зарегистрировать не удалось, что указывает на значительно более эффективную интеркомбинационную конверсию в канале  $T_1-S_0$  у корролов по сравнению с порфиринами, вызванную искажением плоскостного строения макроцикла. Тем не менее триплетные состояния корролов могут быть зарегистрированы даже при комнатной температуре при использовании метода лазерного импульсного фотолиза.

Спектры триплет-триплетного ( $T-T$ ) поглощения исследованных соединений (рис. 4, 5), полученные методом лазерного импульсного фотолиза, имеют эффективный максимум при 450–470 нм, в области около 420 и 600 нм на спектр  $T-T$ -поглощения накладывается просветление из-за исчезновения молекул в  $S_0$ -состоянии, что существенно искажает спектр поглощения из возбужденных состояний. По этой причине определение абсолютного максимума  $T-T$ -поглощения затруднено, но можно предположить, что он близок к максимуму полосы Sore (420 нм). Типичные спектры  $T-T$ -по-

**Таблица 1.** Спектрально-люминесцентные свойства комплексон(ат)замещенных порфиринов и корролов в этаноле. <sup>a</sup>  $T = 298$  К, <sup>b</sup>  $T = 77$  К,  $\lambda_{\text{возб}} = 550$  нм

| Соединение                | $\lambda_{\text{max}}^B$ , нм<br>$\lambda_{\text{max}}^Q$ , нм | $\lambda_{\text{max}}^{\text{fl}}$ , нм <sup>a</sup> | $\varphi^{\text{fl}}$ , % <sup>a</sup> | $\lambda_{\text{max}}^{\text{phs}}$ , нм <sup>b</sup> | $\varphi^{\text{phs}}$ , % <sup>b</sup> |
|---------------------------|--|--|--|---|---|
| H <sub>2</sub> TPP        | 417<br>515 551<br>596 651                                      | 650<br>716   | 4.0                                    | 850   | 0.007                                   |
| H <sub>2</sub> TPP-DTPA   | 414<br>514 549<br>590 646                                      | 651<br>716   | 3.3                                    | 650<br>716<br>850                                     | 2.5                                     |
| ZnTPP                     | 422<br>558 596   | 602<br>656   | 3.0                                    | 781   | 1.5                                     |
| ZnTPP-LuDTPA              | 422<br>558 597   | 603<br>655<br>710                                    | 4.1                                    | 784   | 4.3                                     |
| H <sub>3</sub> Cor        | 420<br>575 626   | 647<br>700   | 2.3                                    | 630<br>714  | 0.09                                    |
| H <sub>3</sub> Cor-LuEDTA | 422<br>579 624   | 639<br>695   | 2.8                                    | 624<br>800  | 0.19                                    |
| GaCor                     | 424<br>580 612   | 627<br>680   | 8.2                                    | 613<br>666<br>833                                     | 0.2                                     |
| GaCor-EDTA                | 423<br>578 609   | 622<br>676   | 7.0                                    | 608<br>662<br>730<br>826                              | 0.2                                     |

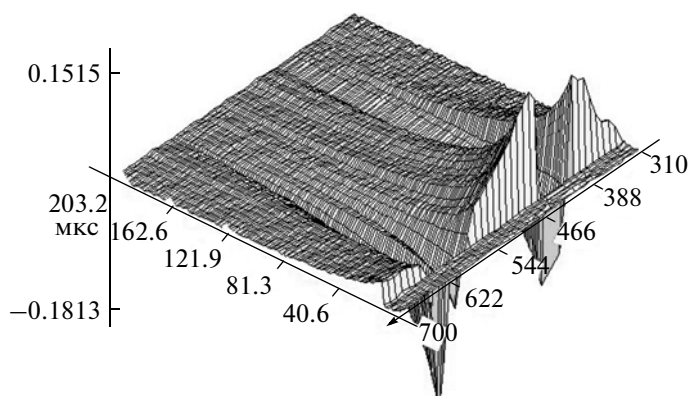
глошения комплексон(ат)замещенного порфириноида в координатах “изменение оптической плотности — длина волны, нм — время, мкс” представлены на рис. 4.

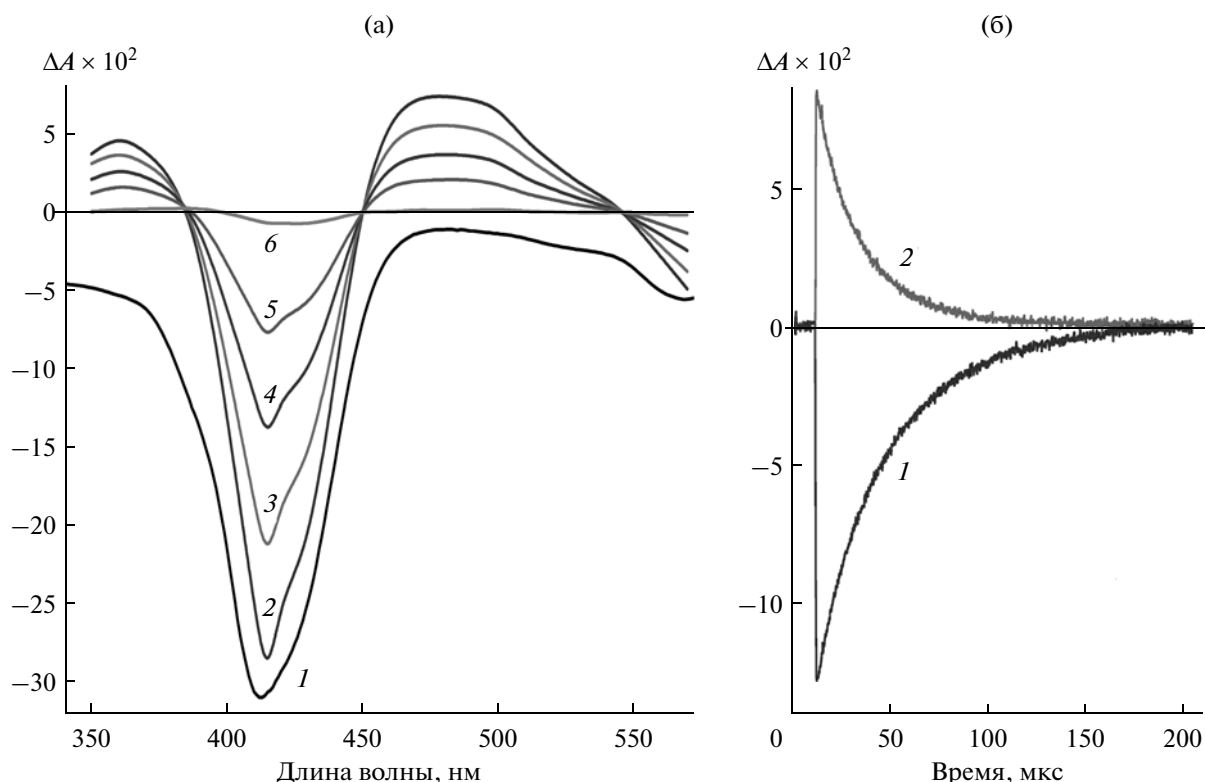
Были определены константы тушения триплетных состояний кислородом и времена жизни триплетных состояний в присутствии кислорода (табл. 2). Меньшие значения времен жизни корролов по сравнению с соответствующими порфиринами подтверждают предположение о более высоких скоростях расселения триплетов в канале  $T_1 \rightarrow S_0$ . Данные таблицы показывают, что время жизни производных коррола в присутствии кислорода в этаноле и толуоле практически совпадает, для металлокомплексов корролов время жизни в присутствии кислорода воздуха почти в 2 раза больше, чем для свободных оснований.

В обескислороженных растворах кинетика дезактивации триплетных состояний определяется процессами  $T-T$ -аннигиляции и тушения остаточным кислородом:  $T_1 + T_1 \rightarrow S_0 + S_1, k_{TT}$ ;  $T_1 + {}^1O_2 \rightarrow S_0 + O_2, k_q$ , где  $S_0$  — молекула красителя в основном состоянии,  $S_1$  — молекула красителя в нижнем возбужденном синглетном состоянии,  $T_1$  — молеку-

ла красителя в нижнем возбужденном триплетном состоянии,  $O_2$  — молекула кислорода.

Можно показать, что в случае данных реакций наблюдаемая константа скорости ( $k_{obs}$ ) дезактивации триплетных состояний, вычисленная из об-

**Рис. 4.** Спектр  $T-T$ -поглощения GaCor в толуоле при 298 К в среде аргона.



**Рис. 5.** Лазерный импульсный фотолиз  $\text{H}_3\text{Cor}$  в обескислороженном этанольном растворе: (а) инвертированный спектр поглощения коррола (1) и спектры промежуточного поглощения, зарегистрированные через 0.2 (2), 10 (3), 26 (4), 50 (5) и 190 (6) мкс после лазерного импульса; (б) кинетические кривые на 400 (1) и 480 (2) нм.

работки начального участка кинетических кривых по закону первого порядка, будет иметь вид:

$$k_{obs} = k_1 + \frac{2k_2}{\epsilon l} \Delta A_0.$$

Полученные линейные зависимости  $k_{obs}$  от начальной амплитуды  $T$ - $T$ -поглощения ( $\Delta A_0$ ) при разных интенсивностях возбуждения (рис. 6) позволили для всех соединений определить величину

$2k_{T-T}/\epsilon_T l$  (табл. 2). Введение заместителя-комплексоната в структуру коррола уменьшает соотношение ( $2k_{T-T}/\epsilon_T l$ ) в 2–3 раза, поскольку объемный заместитель замедляет диффузию триплетных молекул в растворе (табл. 2, рис. 6).

Используя зависимость  $\Delta A_0$  от энергии возбуждения, получили произведение  $\epsilon_T \phi_T$ , значение которого для соединений в толуоле превышает аналогичные значения в этаноле, что может

**Таблица 2.** Свойства триплетных состояний комплексон(ат)замещенных порфиринов и корролов

| Соединение                    | Растворитель | $\lambda_{\text{набл. max}}$ , нм | $\epsilon_T \phi_T$ , $\text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ | $k_q(\text{O}_2)$ , $\text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$ | $\tau(\text{O}_2)$ , нс | $2k_{T-T}/\epsilon_T l$ , $\text{с}^{-1}$ |
|-------------------------------|--------------|-----------------------------------|--|---|-------------------------|---|
| $\text{H}_2\text{TPP-DTPA}$   | Этанол       | 450                               | 5600   | $2.9 \times 10^8$                                 | 500                     | $6.8 \times 10^4$                         |
| $\text{ZnTPP}$                | Этанол       | 460                               | 35700  | $2.0 \times 10^8$                                 | 700                     | $1.6 \times 10^4$                         |
| $\text{ZnTPP-LuEDTA}$         | Этанол       | 460                               | 30900  | $2.0 \times 10^8$                                 | 710                     | $1.4 \times 10^4$                         |
| $\text{H}_3\text{Cor}$        | Этанол       | 480                               | 9500   | $6.2 \times 10^8$                                 | 230                     | $4.9 \times 10^4$                         |
|                               | Толуол       | 480                               | 17200  | $4.1 \times 10^8$                                 | 220                     | $5.1 \times 10^4$                         |
| $\text{H}_3\text{Cor-LuEDTA}$ | Этанол       | 460                               | 16400  | $6.8 \times 10^8$                                 | 210                     | $2.8 \times 10^4$                         |
| $\text{GaCor}$                | Этанол       | 470                               | 10600  | $3.2 \times 10^8$                                 | 440                     | $4.6 \times 10^4$                         |
|                               | Толуол       | 460                               | 15200  | $2.1 \times 10^8$                                 | 440                     | $6.0 \times 10^4$                         |
| $\text{GaCor-EDTA}$           | Этанол       | 460                               | 14300  | $3.0 \times 10^8$                                 | 480                     | $2.1 \times 10^4$                         |

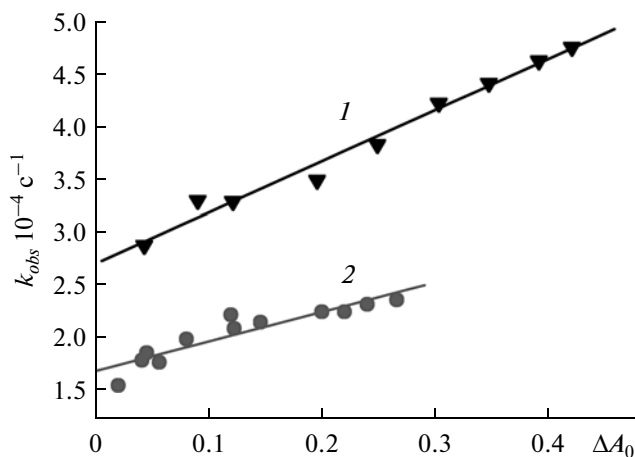
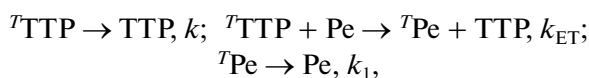


Рис. 6. Зависимость  $k_{obs}$  от начальной амплитуды  $T-T$ -поглощения ( $\Delta A_0$ ) для  $H_3CoG$  (1) и  $H_3CoG-EDTA$  (2) в этаноле.

быть вызвано либо увеличением коэффициента поглощения из  $T_1$ -состояния, либо увеличением значения квантового выхода интеркомбинационной конверсии в данном растворителе (табл. 2).

Для определения величины  $\varepsilon_T$  и далее  $\phi_T$  может быть использован метод переноса энергии в бескислорожденных растворах с исследуемой молекулы на акцептор с известным значением коэффициента  $T-T$ -поглощения. В качестве акцептора был выбран перилен (Per) [15], не имеющий собственного поглощения на длине волны возбуждения и обладающий максимумом  $T-T$ -поглощения на 490 нм, где поглощение порфириноидов из  $S_0$  минимально. Концентрация перилена подобрана таким образом, что более 95% триплетных состояний находящегося в растворе порфирина участвовали в переносе энергии на перилен. В этих условиях можно было пренебречь процессами  $T-T$ -аннигиляции и тушения остаточным кислородом.



где  $k_0, k_1$  – наблюдаемые константы скорости дезактивации триплетных состояний порфирина и перилена (релаксация  $T_1$ -состояния, тушение остаточным кислородом),  $k_{ET}$  – константа скорости переноса энергии.

Полученные спектры промежуточного поглощения в системе  $ZnTPP + Pe$  показаны на рис. 7. При увеличении задержки после возбуждения спектр  $T-T$ -поглощения  $ZnTPP$  ( $\lambda_{max} = 470$  нм) переходит в спектр поглощения  $Pe$  ( $\lambda_{max} = 490$  нм). Обработка кинетических кривых на 490 нм при разной энергии возбуждения (разной  $\Delta A_0$ , рис. 8) по биэкспоненциальному закону дает значения изменения оптической плотности за счет периле-

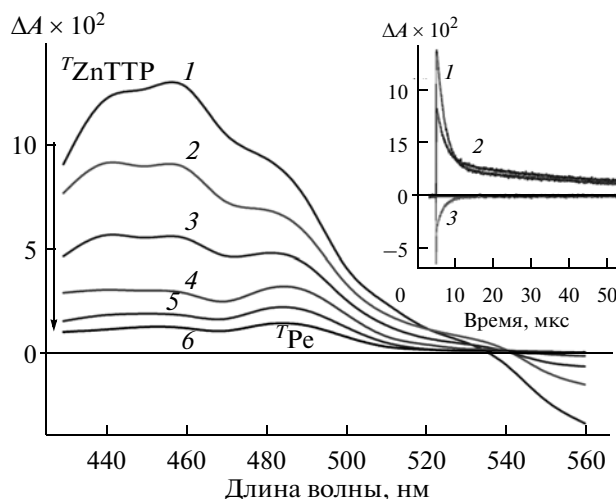


Рис. 7. Спектры промежуточного поглощения в бескислорожденном растворе  $ZnTPP + Pe$ , зарегистрированные через 0.05 (1), 1.2 (2), 2.8 (3), 6.0 (4), 20 (5) и 47 (6) мкс после лазерного импульса; на вставке – кинетические кривые на 460 (1), 490 (2) и 560 (3) нм.  $[Per] = 1.7 \times 10^{-4}$  М.

на и порфирина отдельно ( $\Delta A_0^{per}$  и  $\Delta A_0^{por}$ ) и позволяет построить линейную зависимость поглощения из триплетного состояния перилена ( $\Delta A_{per}$  на

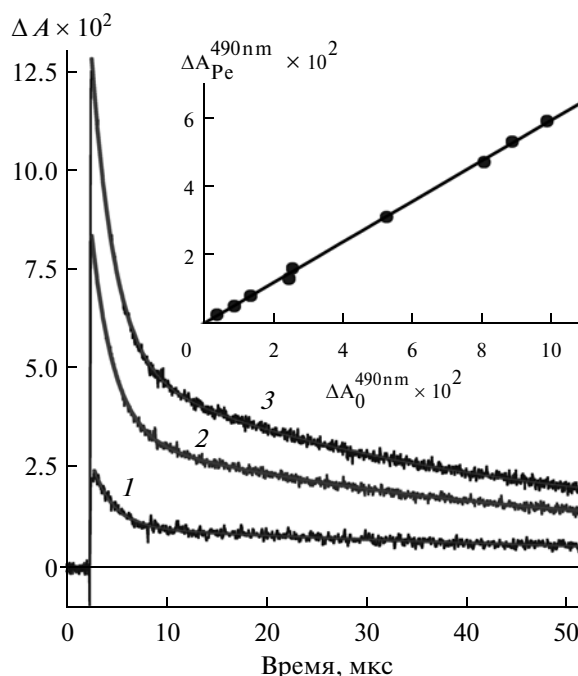


Рис. 8. Кинетические кривые, полученные при возбуждении системы  $ZnTPP + Pe$ . Энергия возбуждения 0.18 (1), 0.45 (2) и 1.0 (3) мДж/имп. На вставке: зависимость оптической плотности триплетного состояния перилена на длине волны 490 нм от  $\Delta A_0$ .  $[Per] = 1.7 \times 10^{-4}$  М.

**Таблица 3.** Коэффициенты  $T-T$ -поглощения и квантовые выходы в триплетное состояние, полученные методом переноса энергии на перилен

| Соединение   | Набл. макс., нм | $\varepsilon_T \phi_T, \text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ | $\varepsilon_T, \text{M}^{-1} \text{cm}^{-1}$ | $\phi_T$ |
|--------------|-----------------|--|---|----------|
| ZnTRP        | 460             | 35700  | 65100   | 0.55     |
| ZnTRP–LuDTPA | 460             | 30900  | 78300   | 0.44     |

490 нм) от  $\Delta A_0$  (рис. 8, на вставке), тангенс угла наклона которой позволяет вычислить искомый коэффициент поглощения триплетного состояния донора (ZnTRP). Результаты обработки приведены в табл. 3.

Полученные результаты близки к литературным данным и показывают, что спектроскопия и фотоника порфиринов, и корролов близки. Приведенное в [16] значение квантового выхода в триплет для ZnTRP = 0.83 получено в бензоле. Различие между этим значением и полученным в данной работе 0.55 объясняется различием в природе растворителей (бензола и этанола), существенно влияющем на растворимость кислорода [17], положение электронных уровней и скорость интеркомбинационной конверсии. Значения коэффициента  $T-T$ -поглощения в указанной работе составляет  $73000 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , что, с учетом погрешности, близко к полученным в данном исследовании значениям.

Введение тяжелых атомов в периферию тетрапиррольного цикла даже незначительно уменьшает выход в триплеты, в отличие от их введения в центр макрокольца. Следует отметить, что аналогичный эффект отмечен нами для порфириновых соединений [18], а в [19, 20] получен аналогичный результат для производных фталоцианина.

Процесс переноса энергии удалось обнаружить только в случае с металлокомплексами порфиринов ZnTRP и ZnTRP–LuDTPA. Для корролов такой процесс не обнаружен, очевидно, триплетный уровень свободных и металлокомплексов корролов лежит ниже триплетного уровня перилена (Per), который составляет  $148 \text{ кДж/моль}$  (808 нм) [16], что согласуется с увеличением безызлучательной  $T_1 \rightarrow S_0$  дезактивации корролов.

Из результатов следует, что триплетные состояния изученных соединений эффективно взаимодействуют с кислородом и могут быть использованы как в качестве оптических сенсоров на кислород, так и для генерирования синглетного кислорода, а также для ослабления мощного импульсного излучения микросекундной длительности в области 330–380 и 450–550 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта

№ 12-02-90008-Бел\_a и Стипендии Президента РФ 6667.2013.4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bialkowski B., Stepanenko Y., Nejbauer M., Radzewicz C., Waluka J.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2012. V. 234. P. 100.
2. *Mataga N., Chosrowjan H., Taniguchi S.* // J. Photochem. Photobiol. C. 2005. V. 6. P. 37.
3. *Baskin J.S., Yu H.Z., Zewail A.H.* // J. Phys. Chem. A. 2002. V. 106. P. 9837.
4. *Johnson W., Kay I.T.* // J. Chem. Soc. 1965. P. 1620.
5. *Gross Z., Galili N., Saltsman I.* // Angew. Chem., Int. Ed. 1999. V. 38. P. 1427.
6. *Aviv I., Gross Z.* // Chem. Commun. 2007. P. 1987.
7. *Mahammed A., Gross Z.* // J. Inorganic Biochemistry. 2002. V. 88. P. 305.
8. *Ventura B., Esposti A.D., Koszarna B., Gryko D.T., Flamigni L.* // New J. Chem. 2005. V. 29. P. 1559.
9. *Ding T., Aleman E.A., Modarelli D.A., Ziegler C.J.* // J. Phys. Chem. A. 2005. V. 109. P. 7411.
10. *Buckley H.L., Anstey M.R., Gryko D.T., Arnold J.* // Chem. Commun. 2013. V. 49. P. 3104.
11. *Semenishyn N., Gross Z.* // Dalton Trans. 2013. V. 42. P. 3775.
12. *Semenishyn N., Rusakova N., Mazepa A., Korovin Yu.* // Macroheterocycles. 2009. V. 2. P. 57.
13. *Harriman A.* // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1. 1980. V. 76. P. 1978.
14. *Pozdnyakov I.P., Plyusnin V.F., Grivin V.P., Vorobyev D. Yu., Bazhin N.M., Vauthey E.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2006. V. 182. P. 75.
15. *Clarke R.H., Hochstrasser R.M.* // J. Mol. Spectr. 1969. V. 32. P. 309.
16. *Hurley J.K., Sinai N., Linschitz H.* // Photochem. Photobiol. 1983. V. 38. P. 9.
17. *Battino R.* // Solubility Data Series. V. 7. Oxygen and Ozone / Ed. Battino R. Oxford: Pergamon Press, 1981. P. 55.
18. *Кузнецова П.Т., Ермолина Е.Г., Гадиров П.М., Майер Г.В., Семенишин Н.Н., Русакова Н.В., Коровин Ю.В.* // Химия высоких энергий. 2010. Т. 44. № 2. С. 168.
19. *Bulgakov R.A., Kuznetsova N.A., Dolotova O.V., Solovieva L.I., Mack J., Chidawanyika W.J., Kaliya O.L., Nyokong T.* // J. Porph. Phthal. 2012. V. 16. P. 1217.
20. *Bulgakov R.A., Kuznetsova N.A., Dolotova O.V., Shevchenko E.N., Plyutinskaya A.D., Kaliya O.L., Nyokong T.* // Macroheterocycles. 2012. V. 5. P. 350.