

ционная устойчивость водных суспензий получена для образцов, отожженных в атмосфере воздуха при 430 °С.

Наиболее стабильные спектральные свойства по истечении трех месяцев с момента изготовления проявляются у суспензий на основе УДА, отожженных при 750 °С в вакууме и при 430 °С в атмосфере воздуха.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ**

1. Тарасевич, Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений: учеб. пособие / Б.Н.Тарасевич // МГУ им. М.В.Ломоносова, химич. фак.-т.- 2012. –Т.1 – С.55.

### **ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНЫХ ЗАМЕСТИТЕЛЕЙ НА СПОСОБНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫМИ КРАСИТЕЛЯМИ**

**Д. С. Тарасов, М. П. Самцов, А. А. Луговский, А. С. Сташевский**

---

*Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко  
Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь,  
e-mail: dmitrij-tarasov@list.ru*

Проведены исследования влияния присутствия в молекуле индотрикарбоцианинового красителя двух полиэтиленгликолей с молекулярной массой 300 на его спектрально-люминесцентные и фотофизические свойства. Установлено, что наличие полиэтиленгликолей в молекуле красителя становится препятствием отдалению противоиона от катиона в малополярных растворителях, что приводит к смещению ионного равновесия в сторону увеличения доли контактных ионных пар. Наличие объемных заместителей в молекуле индотрикарбоцианинового красителя приводит к тому, что в малополярных средах отсутствует зависимость квантового выхода генерации синглетного кислорода от концентрации красителя.

**Ключевые слова:** индотрикарбоцианиновый краситель; ионные пары; синглетный кислород; полиэтиленгликоль.

### **INFLUENCE OF BULKY SUBSTITUENTS SINGLET OXYGEN GENERATION ABILITY**

**D. S. Tarasau, M. P. Samtsov, A. A. Lugovski, A.S. Stasheuski**

---

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University,  
Kurchatova str.7, 220045 Minsk,Belarus,  
Corresponding author: D. S. Tarasau (dmitrij-tarasov@list.ru)*

The influence of two polyethylene glycols with a molecular weight of 300 in the indotricarbocyanine dye molecule on its spectral and photophysical properties have been studied. It established that the polyethylene glycols in the dye molecule structure create a barrier to move away the counterion from the cation in low-polar solvents, which leads to a

shift in the ionic equilibrium toward the predominance of contact ion pairs. The bulky substituents in the indotricarbocyanine dye molecule leads to the fact that in low-polar media there is no dependence of the of generation singlet oxygen quantum yield on the dye concentration.

**Key words:** indotricarbocyanine dye; ion pairs; singlet oxygen; polyethylene glycol.

## ВВЕДЕНИЕ

Катионные полиметиновые красители (ПК) благодаря широкому разнообразию фотофизических процессов с их участием нашли широкое распространение в ряде областей человеческой деятельности [1]. Важное значение для стабильности ПК в растворах играет процесс фотосенсибилизированного образования синглетного кислорода. В результате снятия запрета на реакции взаимодействия с большинством органических соединений молекулярный кислород в возбужденном синглетном состоянии становится высокоактивным интермедиатом. В работе [2] для более простого индотрикарбозианинового красителя НТС1, без объемных заместителей в полиметиновой цепи и концевых группах, нами выявлено концентрационное усиление образования синглетного кислорода в малополярных растворителях вследствие проявления эффекта тяжелого атома противоиона молекулы ПК. Анализ спектрально-люминесцентных и фотофизических свойств красителя НТС с различными противоионами ( $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{ClO}_4^-$ ) позволил заключить, что при концентрациях менее  $10^{-7}$  М молекулы красителя НТС в хлороформе находятся преимущественно в форме свободных ионов. При концентрациях больше  $10^{-7}$  М раствор красителя представляет собой равновесную смесь контактных ионных пар и свободных ионов. Изменение распределения молекул красителя НТС между различными ионными формами обуславливает изменение квантового выхода генерации синглетного кислорода и квантового выхода флуоресценции при варьировании концентрации. В тоже время вопрос влияния объемных заместителей в структуре трикарбозианиновых красителей на состояние ионных равновесий и эффективность генерации синглетного кислорода остается открытым.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования выступали индотрикарбозианиновые красители ПК1 - содержащий две цепочки полиэтиленгликоля и ПК2, у которого отсутствуют указанные заместители. В ранее выполненных исследованиях на лабораторных животных был продемонстрирован высокий потенциал ПК2 для использования в качестве фотосенсибилизатора для ФДТ. Низкая растворимость ПК2 в водных средах является существенным недостатком для его использования в качестве фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии. В связи с этим в лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А.Н. Севченко был осуществлен синтез модифицированного красителя ПК1 ковалентно связанный с двумя цепочками ПЭГ300.

Регистрация спектров поглощения в диапазоне 325-999 нм осуществлялась с помощью однолучевого спектрофотометра PV 1251A фирмы SOLAR и MC 122 фирмы Proscan. Основным прибором для спектрально-люминесцентных измерений являлся модернизированный спектрофлуориметр Fluorolog.

Люминесценцию синглетного кислорода в спектральной области 1270 нм регистрировали с помощью установки, созданной в лаборатории фотоники молекул Инсти-

тута фізікі НАН Беларусі [3]. Для возбуждения красителей использовано излучение полупроводникового лазера с  $\lambda = 667$  нм. Методика проведения измерений подробно описана в работе [4]. Квантовый выход образования синглетного кислорода ( $\gamma_{\Delta}$ ) определялся относительным методом. В качестве эталона был использован 5, 10, 15, 20-тетракис(4-N-метилпиридил)порфирин ( $\gamma_{\Delta} = 0,77 \pm 0,04$ ) [5]. В хлороформе стандартом выступал краситель НІТС с противоионом  $\text{ClO}_4$  ( $\gamma_{\Delta} = 0,005 \pm 0,001$ ) [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучена эффективность генерации синглетного кислорода ( $^1\text{O}_2$ ) новыми трикарбоцианиновыми красителями в высокополярном этаноле при изменении их концентрации. В результате проведенных исследований установлено, что в этанольных растворах при изменении концентрации каждого из красителей в пределах  $10^{-8}$ – $10^{-4}$  М квантовый выход образования  $^1\text{O}_2$  постоянен для обоих красителей:  $\gamma_{\Delta} = 0,050 \pm 0,008$  для ПК1 и  $\gamma_{\Delta} = 0,031 \pm 0,005$  для ПК2. Наряду с регистрацией величины сигнала люминесценции  $^1\text{O}_2$  определялась также длительность свечения кислорода при фотосенсибилизации эталонными и исследуемыми соединениями, она составила  $12 \pm 1$  мкс.

Наряду с исследованиями эффективности генерации синглетного кислорода проведено изучение влияния концентрации растворов красителя в полярных растворителях на их спектрально-люминесцентные и фотофизические свойства. Спектры поглощения красителей близки по форме и положению во всем диапазоне концентраций при неизменном молярном коэффициенте поглощения (рис. 1).

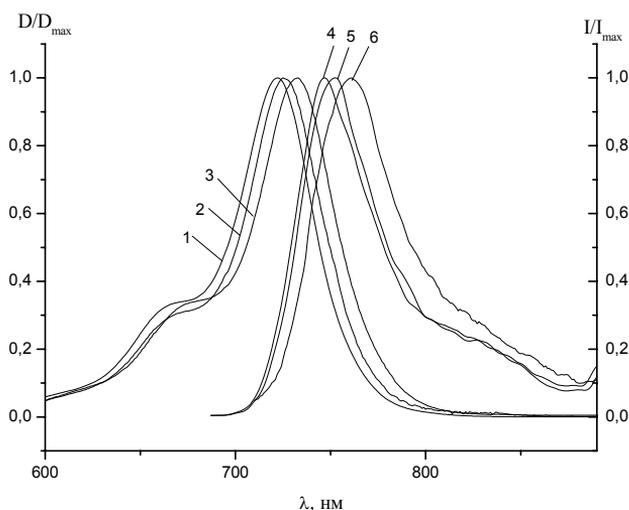


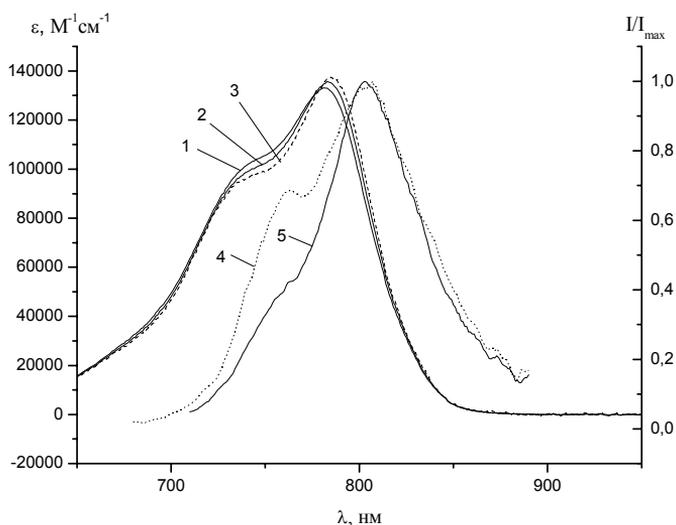
Рисунок 1. – Спектры поглощения (1–3) красителя и флуоресценции (4–6) красителей без ПЭГ (2, 5) и с ПЭГ (1, 3, 4, 6) в этаноле (1, 2, 4, 5) и хлороформе (3, 6)

Спектры флуоресценции, квантовый выход и длительность флуоресценции, степень поляризации флуоресценции для растворов красителей в этаноле совпадают для всех катионных аналогов и остаются неизменными в указанном диапазоне концентраций. При этом кинетика затухания флуоресценции красителей в этаноле представляет собой одну экспоненту, спектры флуоресценции не зависят от длины волны

возбуждающего света, спектры возбуждения флуоресценции не изменяются с длиной волны регистрации и по форме совпадают со спектрами поглощения красителей. Полученные результаты подтверждают высокую степень чистоты красителей, а также о гомогенности растворов в исследованном диапазоне концентраций и о полной диссоциации молекул красителей.

В малополярных растворителях при увеличении концентрации обнаружен рост выхода образования синглетного кислорода для красителя без ПЭГ. При увеличении его концентрации в хлороформе от  $C_{кр} = 2,6 \cdot 10^{-7}$  М до  $C_{кр} = 5,8 \cdot 10^{-5}$  М квантовый выход увеличивается с  $0,022 \pm 0,002$  до  $0,104 \pm 0,016$  соответственно. В то же время квантовый выход генерации синглетного кислорода красителем с ПЭГ постоянен в диапазоне концентраций  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  М и составляет  $0,031 \pm 0,002$ .

В малополярном хлороформе длинноволновая полоса спектров поглощения исследованных красителей смещается в длинноволновую область и претерпевает уширение (рис. 2).



**Рисунок 2. – Спектры поглощения (1, 2, 3) красителя без ПЭГ при различных концентрациях:  $6,2 \cdot 10^{-6}$  М – (1);  $3,1 \cdot 10^{-6}$  М – (2);  $1,5 \cdot 10^{-6}$  М – (3) и флуоресценции (4, 5) при возбуждении  $\lambda = 670$  нм – (4);  $\lambda = 700$  нм – (5)**

Наибольшие деформации и уширение спектра поглощения в малополярном хлороформе обнаруживается у красителя без ПЭГ. Так основная полоса поглощения данного красителя имеет 2 выраженных максимума. В спектрах поглощения красителя с ПЭГ неизменной остается форма и положение при изменении его концентрации в широком диапазоне ( $10^{-7}$ – $10^{-4}$  М), спектры поглощения красителей без ПЭГ деформируются при изменении концентрации. Разбавление растворов приводит к уменьшению поглощения в области длинноволнового максимума и росту интенсивности в коротковолновой части основной полосы поглощения. В спектрах поглощения данного красителя при различных концентрациях проявляется изобестическая точка на  $\lambda = 776$  нм. Из этого следует, что растворы красителя без ПЭГ в хлороформе представляет собой двухкомпонентную систему. При этом положение и форма спектра флуоресценции красителя без ПЭГ зависит от длины волны возбуждения – в

спектре флуоресценции проявляются два максимума, что свидетельствует о способности к флуоресценции обоих поглощающих центров. В связи с тем, что Н-агрегаты катионных полиметиновых красителей, как правило, не обладают флуоресценцией, то проявление двух компонент в растворе не обусловлено ассоциацией красителей. Из этого следует, что в малополярном хлороформе красителя без ПЭГ проявляется равновесные смеси двух ионных форм: свободных ионов и контактных пар. Увеличение доли контактных ионных пар при повышении концентрации красителя, вследствие проявления влияния тяжелого атома, противоиона  $Bg^+$ , приводит к росту квантового выхода генерации этим красителем синглетного кислорода.

Спектр флуоресценции красителя с ПЭГ в хлороформе сохраняет форму при изменении длины волны возбуждения. Из этого следует, что краситель не ассоциирован и существует в одной ионной форме. Повышение концентрации анионов путем введения дополнительной соли растворимого в органических растворителях тетрабутиламмоний бромида в разбавленный раствор красителя без ПЭГ в хлороформе приводит к росту поглощения в коротковолновом максимуме и соответствующему падению в длинноволновом. Это указывает на то, что коротковолновый максимум соответствует контактным ионным парам, а длинноволновый максимум – свободным ионам. Следует отметить, что положение спектра поглощения красителя с ПЭГ в хлороформе практически совпадает со спектром поглощения контактных ионных пар красителя без ПЭГ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наличие объемных заместителей (полиэтиленгликолей) в молекуле красителя в малополярных растворителях становится препятствием отдалению противоиона от катиона, что приводит к смещению ионного равновесия в сторону преобладания контактных ионных пар. Различное состояние ионного равновесия в малополярных средах красителей с и без ПЭГ обуславливает различия в поведении зависимости квантового выхода генерации синглетного кислорода от концентрации красителя.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Cyanines during the 1990s: A Review / A. Mishra [et al.] // Chem. Rev. – 2000. – V. 100. – P. 1973-2012.
2. Концентрационное увеличение квантового выхода образования синглетного кислорода индотрикарбоцианиновым красителем / М.П. Самцов [и др.] // ЖПС. – 2014. – Т. 81, № 2. – 219-227.
3. Высококчувствительные лазерные флуорометры для ближнего инфракрасного и видимого диапазонов / А.С. Сташевский, В.А. Галиевский, Б.М. Джагаров // Приборы и методы измерений. – 2011. – №. 1. – С. 25–31.
4. Генерация синглетного кислорода индотрикарбоцианиновым красителем НТСИ / К.Н. Каплевский [и др.] // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. – 2012. – №. 2. – С. 7–11.
5. Two-photon photosensitized production of singlet oxygen in water / Frederiksen P. K. [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2005. – V. 127, №. 1. – P. 255-269.