

ФОТОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МОЛЕКУЛАХ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ-ЗОНДОВ В ПРИСУТСТВИИ СОЛЕЙ ЖЕЛЧНЫХ КИСЛОТ

А. С. Татиколов*, П. Г. Пронкин

УДК 535.35:547.97:547.93

*Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля Российской АН,
119334, Москва, ул. Косыгина, 4, Россия; e-mail: tatikolov@mail.ru*

(Поступила 24 мая 2018)

Методом импульсного фотолиза изучены первичные фотохимические процессы в молекулах полиметиновых красителей-зондов 3,3'-ди(γ -сульфопропил)-4,5,4',5'-дibenзо-9-этилтиакарбocyанин-бетаина (ДЭЦ) и 3,3',9-триметилтиакарбocyанин-иодида (Cyan 2) в мицеллярных системах солей желчных кислот (СЖК) холата натрия, дезоксихолата натрия и таурохолата натрия, а также для сравнения додецилсульфата натрия (ДСН). При импульсном фотолизе воздушно-насыщенных водных растворов красителей в присутствии мицелл СЖК и ДСН наблюдаются сигналы, обусловленные фотоизомеризацией транс-изомеров красителей и обратной темновой изомеризацией образующихся цис-фотоизомеров. Времена жизни фотоизомеров 60–190 мкс. При импульсном фотолизе растворов Cyan 2 и ДЭЦ в отсутствие кислорода, в присутствии мицелл СЖК и ДСН наряду с фотоизомеризацией происходят переход красителей в возбужденное триплетное состояние и последующий обратный переход (интеркомбинационная конверсия) в исходное синглетное состояние. Для сравнения методом триплет-триплетного переноса энергии с антрацена получены спектры триплет-триплетного поглощения изомеров данных красителей в полярных (этанол, изопропанол) и неполярном (диоксане) растворителях. Сделан вывод о сходном фотохимическом поведении красителей в мицеллярных системах СЖК и ДСН.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, мицелла, соли желчных кислот, полиметиновые красители-зонды, транс-цис-фотоизомеризация, триплетное состояние.

Primary photochemical processes in molecules of polymethine dye probes 3,3'-di(γ -sulfoethyl)-4,5,4',5'-dibenzo-9-ethylthiacarbocyanine betaine (DEC) and 3,3',9-trimethylthiacarbocyanine iodide (Cyan 2) in the micellar systems of bile salts sodium cholate, sodium deoxycholate, and sodium taurocholate, as well as, for comparison, sodium dodecyl sulfate (SDS), have been studied by flash photolysis. Upon flash photolysis of aerated aqueous solutions of the dyes in the presence of micelles of bile salts and SDS, signals due to photoisomerization of the trans-isomers of the dyes and back dark isomerization of cis-photoisomers formed are observed. The lifetimes of the photoisomers are in the range of 60–190 μ s. Moreover, upon flash photolysis of deoxygenated solutions of Cyan 2 and DEC in the presence of micelles of bile salts and SDS, in addition to photoisomerization, the transition of the dyes to the excited triplet state and the subsequent backward transition (intersystem crossing) to the initial singlet state occur. For comparison, the triplet-triplet absorption spectra of the isomers of the dyes have been obtained by the method of triplet-triplet energy transfer from anthracene in polar (ethanol, isopropanol) and nonpolar (dioxane) solvents. A conclusion is drawn about the similar photochemical behavior of the dyes in the micellar systems of bile salts and SDS.

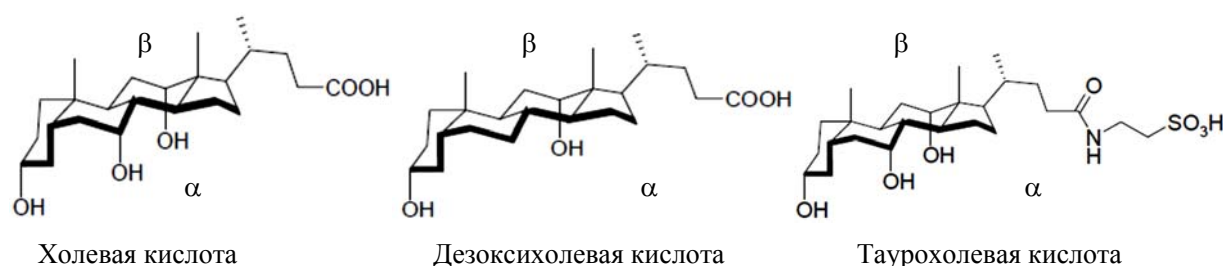
Keywords: surfactants, micelle, bile salts, polymethine dye probes, trans-cis photoisomerization, triplet state.

PHOTOCHEMICAL PROCESSES IN MOLECULES OF POLYMETHINE DYE PROBES IN THE PRESENCE OF BILE SALTS

А. С. Татиколов*, П. Г. Пронкин (N. M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow, 119334, Russia; e-mail: tatikolov@mail.ru)

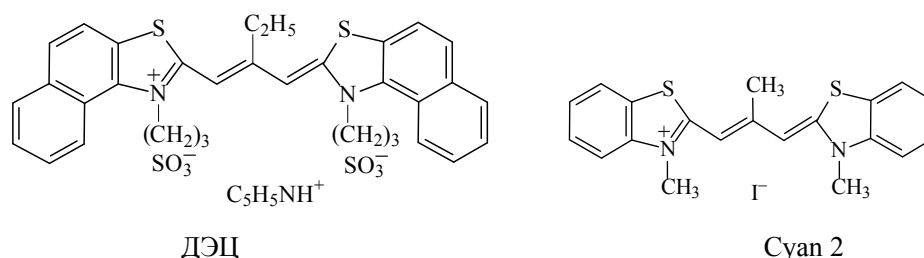
* Автор, с которым следует вести переписку.

Введение. Полиметиновые красители (ПК) широко используются в различных областях науки и техники, например, в качестве зондов для молекулярно-организованных систем, в частности мицелл и везикул, образованных поверхностно-активными веществами (ПАВ) [1—4]. Это обусловлено прежде всего зависимостью фотофизических и фотохимических свойств ПК от молекулярного микроокружения. В связи с этим в ряде работ изучались фотохимические процессы в молекулах ПК при их взаимодействии с синтетическими ПАВ: анионными (додецилсульфат натрия (ДСН)), катионными (цетилтриметиламмоний бромид (СТАВ)), нейтральными (Тритон X-100), а также образующими обратные мицеллы (АОТ, Тритон X-100) [5—8]. Однако помимо синтетических имеется большой класс биологически важных ПАВ — соли желчных кислот, структура молекул которых существенно отличается от структуры синтетических ПАВ. Их молекула имеет стероидный скелет, вогнутая сторона (α) которого гидрофильна благодаря присутствию OH-групп, а выпуклая сторона (β) с ангулярными метильными группами гидрофобна. В настоящей работе исследованы соли желчных кислот (СЖК) — холевой, дезоксихолевой и таурохолевой:



Особая структура молекул СЖК определяет их поведение: при повышении концентрации вначале образуются первичные мицеллы (за счет гидрофобных взаимодействий между выпуклыми областями молекул) с числом агрегации 2—10, затем вторичные (за счет водородных связей между первичными мицеллярными ассоциатами) с числом агрегации 10—100 [9]. Соответственно, для СЖК часто выделяют две критические концентрации мицеллообразования — ККМ1 и ККМ2 [10—13]. Некоторые авторы считают, что понятие ККМ вообще неприменимо к СЖК [14, 15]. Недавно были изучены спектрально-флуоресцентные свойства ПК в присутствии СЖК и показано, что спектрально-флуоресцентное поведение красителей в растворах, содержащих СЖК, существенно отличается от такового в присутствии обычного ПАВ — ДСН [16]. В то же время фотохимические процессы в молекулах ПК в системах, включающих в себя СЖК, ранее не изучались.

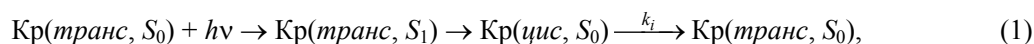
В настоящей работе методом импульсного фотолиза исследованы фотохимические процессы в молекулах анионного и катионного ПК в мицеллярных системах СЖК: холата натрия (NaC), дезоксихолата натрия (NaDC) и таурохолата натрия (NaTC). Для сравнения взят синтетический анионный ПАВ — ДСН, поскольку СЖК являются анионными. Изучены ПК-зонды, использованные ранее для обнаружения и исследования биомакромолекул [17—20]: анионный краситель 3,3'-ди(γ -сульфопропил)-4,5,4',5'-дibenзо-9-этилтиакарбоцианин-бетаин (ДЭЦ) и катионный краситель 3,3',9-триметилтиакарбоцианин-йодид (Суан 2):



Эксперимент. Красители ДЭЦ и Суан 2 получены от проф. Б. И. Шапиро (НИИ “Химфотопроект”, Москва) и проф. С. М. Ярмольюка (Институт молекулярной биологии и генетики НАН Украины); их чистота проверена методом тонкослойной хроматографии. Холат натрия (NaC), дезоксихолат натрия (NaDC), таурохолат натрия (NaTC) и додецилсульфат натрия (ДСН) приобретены у компании Sigma-Aldrich. В качестве растворителей использованы дистиллированная вода и этанол, изопропанол, диоксан (х.ч.). При изучении фотохимии красителей в присутствии СЖК и ДСН взяты концен-

трации ПАВ, достаточные для образования мицелл ($>ККМ2$). При приготовлении раствора Суан 2 в воде или диоксане предварительно готовился концентрированный раствор Суан 2 в диметилсульфоксиде, малое количество которого затем растворялось в воде или диоксане (разбавление 1:1000). При приготовлении раствора ДЭЦ в диоксане вначале готовился более концентрированный раствор красителя в воде, который затем разбавлялся диоксаном (1:25). Переход красителя в *транс*-форму в диоксане контролировался по спектру поглощения: возникала полоса поглощения с максимумом 610 нм для ДЭЦ или 560 нм для Суан 2 [16]. Спектры поглощения регистрировались на спектрофотометре СФ-2000. Эксперименты по импульсному фотолизу проводились на установке с возбуждением светом ксеноновой лампы ИФП-5000, длительность вспышки на полувысоте 10 мкс, энергия 50 Дж, использовалась кварцевая кювета с оптической длиной пути 20 см. Фотовозбуждение красителей осуществлялось через светофильтры ЖС-10; в экспериментах по триплет-триплетному переносу энергии возбуждение донора энергии (антрацена) — через светофильтры УФС-6. Освобождение растворов от кислорода при регистрации триплет-триплетного поглощения проводилось на вакуумной установке. Все эксперименты выполнены при температуре 22 ± 2 °С.

Результаты и их обсуждение. Одно из основных фотохимических свойств ПК — *транс-цис*-фотоизомеризация относительно одной из С–С-связей полиметиновой цепи с последующей обратной темновой изомеризацией образующегося фотоизомера. Поскольку процесс протекает через S_1 -состояние красителя, имеющее короткое время жизни (<1 нс), кислород воздуха на процесс фотоизомеризации практически не влияет. Используемые ПК являются *мезо*-алкилзамещенными. Вследствие стерического влияния *мезо*-заместителя тиакарбоцианиновые красители ДЭЦ и Суан 2 в воде и других полярных растворителях находятся главным образом в виде *цис*-изомеров [20–22]. Как правило, *цис*-изомеры *мезо*-замещенных тиакарбоцианиновых красителей не фотоизомеризуются [23]. В соответствии с этим при импульсном фотолизе ДЭЦ и Суан 2 в водных растворах сигнал фотоизомера не обнаружен. Не обнаружено сигнала и при импульсном фотолизе в отсутствие кислорода, что указывает на отсутствие перехода красителей в триплетное состояние при прямом фотовозбуждении. В то же время при связывании с мицеллами СЖК (и ДСН) данные красители, по крайней мере частично, переходят в форму *транс*-изомера [23]; при этом можно ожидать фотоизомеризации образовавшегося *транс*-изомера. Действительно, при импульсном фотолизе воздушно-насыщенных водных растворов Суан 2 в присутствии мицелл NaDC, NaC и NaTC наблюдаются слабые сигналы отрицательного поглощения (выцветания) в области стационарного спектра поглощения *транс*-изомера красителя (~560 нм), объясняющиеся расходом исходного *транс*-изомера в результате фотоизомеризации в *цис*-изомер и последующего возврата *транс*-изомера в результате обратной темновой изомеризации образовавшегося *цис*-фотоизомера (рис. 1):



где Кр — молекула *транс*- или *цис*-изомера красителя в основном (S_0) или возбужденном (S_1) синглетном состоянии; $k_i = 1/\tau_i$ — константа скорости обратной *цис-транс*-изомеризации (τ_i — время жизни фотоизомера).

В присутствии ДСН наблюдаются более интенсивные, чем в случае СЖК, сигналы выцветания в области 560 нм и поглощения в коротковолновой области (480–530 нм), соответствующей спектру поглощения *цис*-фотоизомера (рис. 1, вставки) (отсутствие зарегистрированных сигналов в коротковолновой области для Суан 2 в присутствии NaDC, NaC и NaTC, очевидно, объясняется слишком малой их интенсивностью).

При импульсном фотолизе воздушно-насыщенного раствора ДЭЦ в присутствии NaDC наблюдаются слабые сигналы выцветания вблизи максимума поглощения исходного *транс*-изомера красителя (~610 нм) и поглощения как в более коротковолновой, так и в более длинноволновой области, что, как и в случае Суан 2, очевидно, обусловлено образованием и последующей гибелью *цис*-фотоизомера красителя в соответствии со схемой (1). Дифференциальный спектр поглощения ДЭЦ в присутствии NaDC приведен на рис. 2. Не удалось зарегистрировать сигналы, соответствующие фотоизомеризации ДЭЦ в присутствии NaC, NaTC, а также ДСН. Это, возможно, обусловлено меньшей степенью *цис*→*транс*-конверсии и, следовательно, меньшим образованием изомеризующегося *транс*-изомера в присутствии этих ПАВ по сравнению с NaDC [16].

Времена жизни фотоизомеров Суан 2 и ДЭЦ (τ_i) в присутствии мицелл ПАВ приведены в табл. 1. Величины τ_i для Суан 2 гораздо меньше, чем для *цис*-фотоизомера соответствующего Суан 2 по структуре красителя 3,3'-диэтилтиакарбоцианина (DTC), не имеющего *мезо*-заместителя (2–7 мс

в различных растворителях [24]). Это можно объяснить понижением изомеризационного барьера вследствие стерического влияния *мезо*-заместителя, приводящего к искажению плоской структуры *цис*-изомера красителя.

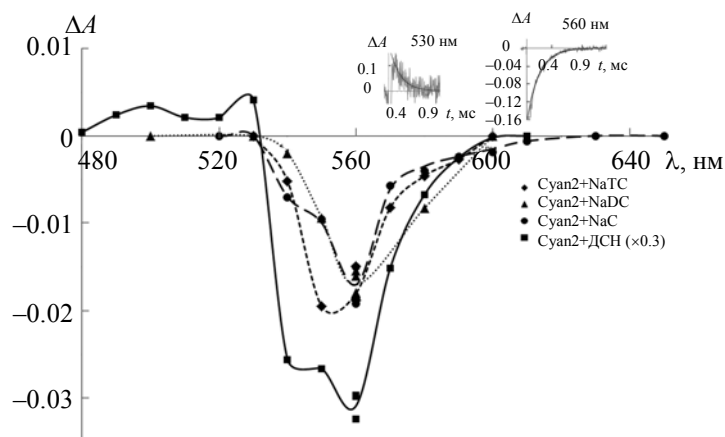


Рис. 1. Дифференциальные спектры поглощения фотоизомера, полученные при импульсном фотолизе воздушно-насыщенных водных растворов Суан 2 (0.6—0.8 мкМ) в присутствии NaTC (0.02 М), NaDC (0.1 М), NaC (0.04 М) и ДСН (0.08 М) к моменту времени 80 мкс после переднего фронта вспышки; на вставке — кинетики гибели фотоизомера Суан 2 в присутствии ДСН при $\lambda = 530$ и 560 нм и их экспоненциальные аппроксимации

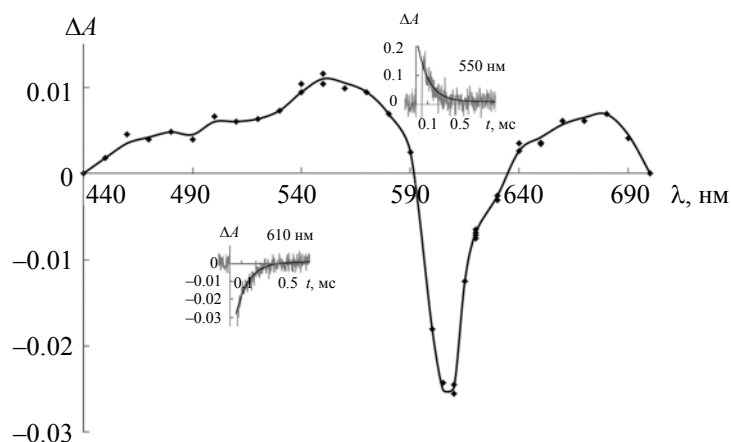
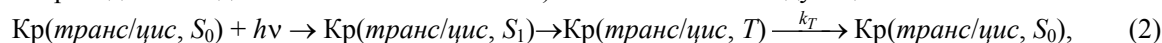


Рис. 2. Дифференциальные спектры поглощения фотоизомера, полученные при импульсном фотолизе воздушно-насыщенных водных растворов ДЭЦ (1.5 мкМ) в присутствии NaDC (0.05 М) к моменту времени 80 мкс после переднего фронта вспышки; на вставках — кинетики гибели фотоизомера ДЭЦ при $\lambda = 550$ и 610 нм и их экспоненциальные аппроксимации

Т а б л и ц а 1. Времена жизни (мкс) фотоизомеров красителей (τ_i) и красителей в триплетном состоянии (τ_T) в присутствии мицелл ПАВ

ПАВ	Суан 2		ДЭЦ	
	τ_i	τ_T	τ_i	τ_T
NaDC	130—150	~90	~110	~60
NaC	~60	~35	нет сигнала	~55
NaTC	80—90	50—60	нет сигнала	~40
ДСН	190	~100	нет сигнала	нет сигнала

Импульсный фотолиз более концентрированных растворов Суан 2 и ДЭЦ в присутствии мицелл СЖК и ДСН в отсутствие кислорода наряду с фотоизомеризацией приводит к появлению слабых сигналов поглощения в длинноволновой области (для Суан 2 в области 600—750 нм, для ДЭЦ >600 нм, рис. 3 и 4). Так как эти сигналы практически не наблюдаются в воздушно-насыщенных растворах (тушатся кислородом), можно сделать вывод, что они принадлежат красителям в триплетном состоянии. Образование и гибель красителей в триплетном состоянии (путем обратного интеркомбинационного перехода в исходное синглетное состояние) можно описать следующей схемой:



где $k_T = 1/\tau_T$ — константа скорости интеркомбинационной конверсии $T \rightarrow S_0$; τ_T — время жизни красителя в триплетном состоянии. Величины τ_T приведены в табл. 1.

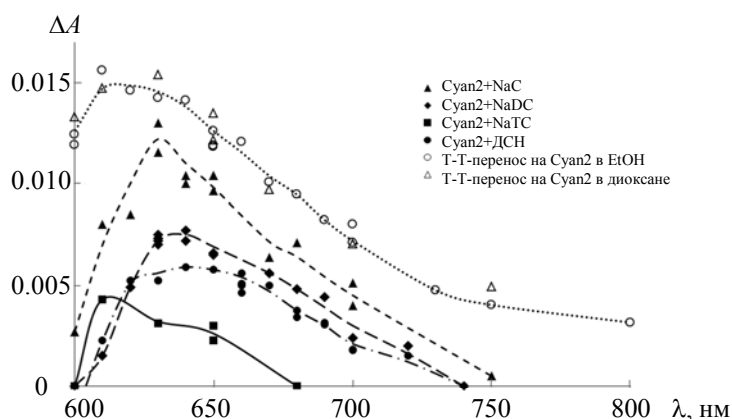


Рис. 3. Дифференциальные триплет-триплетные спектры поглощения, полученные при импульсном фотолизе водных растворов Суан 2 (7—10 мкМ) в отсутствие кислорода, в присутствии NaTC (0.02 М), NaDC (0.05 М), NaC (0.04 М) и ДСН (0.07 М) к моменту времени 60 мкс после переднего фронта вспышки; а также полученные путем триплет-триплетного переноса энергии с антрацена на краситель в различных растворителях

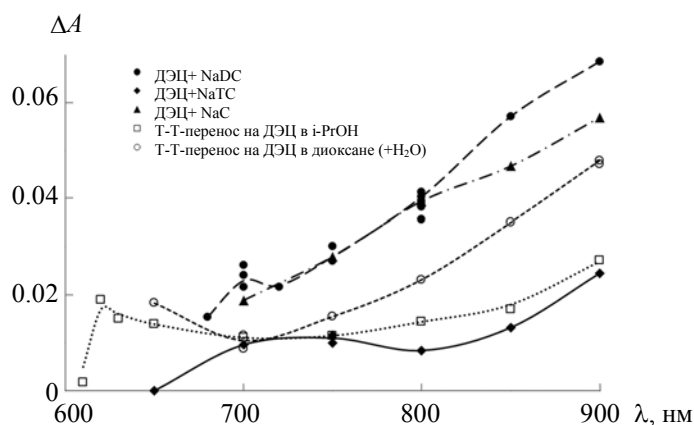


Рис. 4. Дифференциальные спектры триплет-триплетного поглощения, полученные при импульсном фотолизе водных растворов ДЭЦ (15—20 мкМ) в отсутствие кислорода, в присутствии NaTC (0.02 М), NaDC (0.03 М) и NaC (0.07 М) к моменту времени 60 мкс после переднего фронта вспышки; а также полученные путем триплет-триплетного переноса энергии с антрацена на краситель в различных растворителях

Переход в триплетное состояние при импульсном фотолизе ряда мезо-замещенных тиакрбацианиновых красителей в комплексе с мицеллами ДСН, СТАВ и Тритон Х-100 наблюдался ранее

[5, 6] и объяснялся интеркомбинационной конверсией в триплетное состояние при фотовозбуждении *транс*-изомера, образующегося при связывании красителя с ПАВ. Поскольку в гомогенном жидком растворе квантовый выход в триплетное состояние тиокарбонильных близок к нулю, можно предположить, что рост квантового выхода в триплетное состояние для Суан 2 и ДЭЦ в присутствии СЖК, так же как и рост флуоресценции для этих красителей [16], объясняется подавлением конкурирующих процессов безызлучательной диссипации (путем внутримолекулярных вращений и колебаний) энергии возбуждения состояния S_1 вследствие повышения жесткости молекулы красителя при ее связывании с ПАВ [25], аналогично имевшему место при связывании ДТС с ДНК [26, 27].

Следует отметить, что фотоизомеризация и интеркомбинационная конверсия в триплетное состояние наблюдались также для *цис*-изомеров *мезо*-замещенных красителей Суан 2 и 3,3'-диэтил-9-метилтиокарбонильнина в комплексах с ДНК и хондроитин-4-сульфатом [28]. При этом спектры триплет-триплетного поглощения Суан 2 качественно близки к полученным в настоящей работе. Поскольку при связывании с ПАВ не наблюдается полной *цис*→*транс*-конверсии красителей (с ПАВ связывается как *цис*-, так и *транс*-изомер) [16], при импульсном фотолизе в принципе можно ожидать перехода в триплетное состояние обоих фотоизомеров. Для идентификации изомеров Суан 2 и ДЭЦ в триплетном состоянии в комплексе с ПАВ проведены эксперименты по триплет-триплетному переносу энергии с антрацена на *цис*- или *транс*-изомеры красителей в растворителях различной полярности (в зависимости от полярности могли получиться *цис*- или *транс*-изомеры) [20—23]. Для получения *цис*-изомеров эксперименты по триплет-триплетному переносу энергии осуществлялись в полярных растворителях (этанол, изопропанол), а для получения *транс*-изомеров — в неполярном диоксане. Полученные спектры триплет-триплетного поглощения для *цис*- и *транс*-изомеров оказались близки (рис. 3 и 4), что не позволяет однозначно приписать их тому или иному изомеру в триплетном состоянии.

Из сравнения результатов, полученных для красителей в присутствии СЖК и обычного ПАВ (ДСН), можно заключить, что фотохимическое поведение красителей в обеих мицеллярных системах качественно сходно.

Заключение. При импульсном фотолизе воздушно-насыщенных водных растворов Суан 2 и ДЭЦ в присутствии мицелл солей желчных кислот и ДСН наблюдаются сигналы, обусловленные фотоизомеризацией *транс*-изомеров красителей и обратной темновой изомеризацией образующихся *цис*-фотоизомеров. Времена жизни фотоизомеров находятся в интервале 60—190 мкс. При импульсном фотолизе растворов Суан 2 и ДЭЦ в отсутствие кислорода, в присутствии мицелл солей желчных кислот и ДСН наряду с фотоизомеризацией наблюдается переход красителей в возбужденное триплетное состояние и последующий обратный переход (интеркомбинационная конверсия) в исходное синглетное состояние. Для сравнения методом триплет-триплетного переноса энергии с антрацена получены спектры триплет-триплетного поглощения данных красителей в полярных (этанол, изопропанол) и неполярном (диоксане) растворителях, которые соответствовали триплетному состоянию *цис*- и *транс*-изомеров. Близость полученных спектров не позволила достоверно приписать спектры триплет-триплетного поглощения красителей в присутствии поверхностно-активных веществ триплетному состоянию того или иного изомера. Полученные результаты указывают на сходство фотохимического поведения красителей в мицеллярных системах обоих классов поверхностно-активных веществ — природных (солей желчных кислот) и их синтетического аналога (ДСН).

Авторы благодарны проф. Б. И. Шапиро и проф. С. М. Ярмолюку за предоставление полиметиновых красителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-03-00735).

- [1] J. T. McPhee, E. Scott, N. E. Levinger, A. Van Orden. *J. Phys. Chem. B*, **115** (2011) 9585—9592
- [2] M. I. Viseu, A. S. Tatikolov, R. F. Correia, S. M. B. Costa. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **280** (2014) 54—62
- [3] F. Moyano, S. S. Quintana, R. D. Falcone, J. J. Silber, N. M. Correa. *J. Phys. Chem. B*, **113** (2009) 4284—4292
- [4] S. S. Quintana, F. Moyano, R. D. Falcone, J. J. Silber, N. M. Correa. *J. Phys. Chem. B*, **113** (2009) 6718—6724
- [5] A. K. Chibisov, V. I. Prokhorenko, H. Gerner. *Chem. Phys.*, **250** (1999) 47—60

- [6] Л. С. Атабекян, А. К. Чибисов. ХВЭ, **41** (2007) 122—128 [L. S. Atabekyan, A. K. Chibisov. High Energy Chem., **41** (2007) 91—96]
- [7] A. S. Tatikolov, S. M. B. Costa. Photochem. Photobiol. Sci., **1** (2002) 211—218
- [8] A. Datta, D. Mandal, S. K. Pal, K. Bhattacharyya. Chem. Phys. Lett., **278** (1997) 77—82
- [9] S. Mukhopadhyay, U. Maitra. Curr. Sci., **87** (2004) 1666—1683
- [10] G. Li, L. B. McGown. J. Phys. Chem., **98** (1994) 13711—13719
- [11] K. Matsuoka, Y. Moroi. Biochim. Biophys. Acta, **1580** (2002) 189—199
- [12] R. Ninomiya, K. Matsuoka, Y. Moroi. Biochim. Biophys. Acta, **1634** (2003) 116—125
- [13] K. Matsuoka, M. Suzuki, C. Honda, K. Endo, Y. Moroi. Chem. Phys. Lipids, **139** (2006) 1—10
- [14] A. Djavanbakht, K. M. Kale, R. Zana. J. Coll. Interf. Sci., **59** (1977) 139—148
- [15] B. Lindman, N. Kamenka, H. Fabre, J. Ulmius, T. Wieloch. J. Coll. Interf. Sci., **73** (1980) 556—565
- [16] A. S. Tatikolov, P. G. Pronkin, I. G. Panova. Spectrochim. Acta, A, *Spectral-fluorescent study of the interaction of polymethine dye probes with biological surfactants – bile salts*, in press
- [17] I. G. Panova, N. P. Sharova, S. B. Dmitrieva, R. A. Poltavtseva, G. T. Sukhikh, A. S. Tatikolov. Anal. Biochem., **361** (2007) 183—189
- [18] А. С. ТАТИКОЛОВ, Т. М. АКИМКИН, А. С. КАШИН, И. Г. ПАНОВА. ХВЭ, **44** (2010) 252—255 [A. S. Tatikolov, T. M. Akimkin, A. S. Kashin, I. G. Panova. High Energy Chem., **44** (2010) 224—227]
- [19] А. С. ТАТИКОЛОВ, И. Г. ПАНОВА. ХВЭ, **48** (2014) 116—122 [A. S. Tatikolov, I. G. Panova. High Energy Chem., **48** (2014) 87—92]
- [20] Т. М. АКИМКИН, А. С. ТАТИКОЛОВ, С. М. ЯРМОЛЮК. ХВЭ, **45** (2011) 252—259 [Т. М. Akimkin, A. S. Tatikolov, S. M. Yarmoluk. High Energy Chem., **45** (2011) 222—228]
- [21] A. S. Tatikolov, S. M. B. Costa. Chem. Phys. Lett., **346** (2001) 233—240
- [22] A. K. Chibisov, G. V. Zakharova, H. Görner. Phys. Chem. Chem. Phys., **1** (1999) 1455—1460
- [23] V. Khimenko, A. K. Chibisov, H. Görner. J. Phys. Chem. A, **101** (1997) 7304—7310
- [24] A. S. Tatikolov, S. M. B. Costa. Chem. Phys. Lett., **440** (2007) 73—78
- [25] R. Humphry-Baker, M. Gratzel, R. Steiger. J. Am. Chem. Soc., **102** (1980) 847—848
- [26] M. Y. Anikovskiy, A. S. Tatikolov, V. A. Kuzmin. Int. J. Photoenergy, **1** (1999) 35—39
- [27] М. Ю. АНИКОВСКИЙ, А. С. ТАТИКОЛОВ, Л. А. ШВЕДОВА, В. А. КУЗЬМИН. Изв. АН. Сер. хим., № 7 (2001) 1134—1137 [M. Y. Anikovskiy, A. S. Tatikolov, L. A. Shvedova, V. A. Kuzmin. Rus. Chem. Bull., Int. Ed., **50**, N 7 (2001) 1190—1193]
- [28] A. S. Tatikolov, T. M. Akimkin, P. G. Pronkin, S. M. Yarmoluk. Chem. Phys. Lett., **556** (2013) 287—291