

## ФОТОХРОМНЫЕ ОРГАНО-СИЛИКАТНЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ

**В. А. Барачевский**

*ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БАРАЧЕВСКИЙ – к.ф.-м.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Центра фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, старший научный сотрудник ФГБУН Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН. E-mail: barachevsky@mail.ru.*

*119421, г. Москва, ул. Новаторов, 7а, к.1, Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.*

*117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 6, ФГБУН Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук (МЦАИ РАН).*

*Представлен анализ последних достижений в области разработки фотохромных наночастиц диоксида кремния и их применения.*

**Ключевые слова:** фотохромизм, спектры поглощения, спектры флуоресценции, механизм превращений, наночастицы, диоксид кремния.

## PHOTOCHROMIC ORGANO-SILICA NANOPARTICLES

**V.A. Barachevsky**

*7A, Novatorov st., b. 1, Moscow, 119421, Russia. Photochemistry Center of FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences.*

*65, Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia. Interdepartment Center of Analytical Research in the field of Physics, Chemistry, and Biology, Presidium of Russian Academy of Sciences.*

*The analysis of the recent advances in the field of the development of photochromic silica nanoparticles is presented.*

**Key words:** photochromism, absorption spectra, fluorescence spectra, transformation mechanism, nanoparticles, silica.

### Введение

В последние годы значительный практический интерес привлекают фотохромные наночастицы, которые испытывают обратимое фотоиндуцированное изменение своих свойств [1, 2]. Одним из направлений их разработки является создание фото-

хромных наночастиц на основе наночастиц диоксида кремния (ДК). Такие наночастицы используются в биомедицинских исследованиях [3], для получения фотохромных тканей [4] и других целей.

Данная статья представляет обзор с анализом результатов исследований, выполненных в этом направлении.

## Структура и свойства фотохромных силикатных наночастиц

Наночастицы ДК могут использоваться для получения фотохромных наночастиц, проявляющих как положительный, так и отрицательный фотохромизм. Наночастицы первого типа обратимо окрашиваются под действием УФ излучения, а наночастицы второго типа обратимо обесцвечиваются при возбуждении видимым светом.

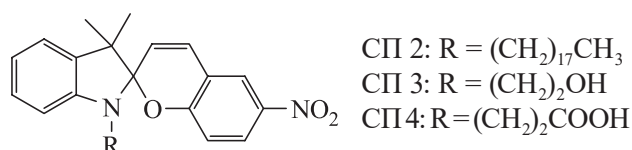
### Наночастицы со спиропиранами

В большинстве случаев фотохромные наночастицы проявляют положительный фотохромизм. Их получение основано на физическом или химическом взаимодействии молекул термически обратимых спиропиранов с поверхностью наночастиц ДК. Фотохромные превращения соединений этого типа, в частности СП 1 заключаются в фотоиндуцированном разрыве –С–О–связи в пирановом фрагменте бесцветной циклической формы **A** и последующей темновой *цис-транс*-изомеризации с образованием окрашенной мероцианиновой формы **B** (схема 1) [2].

При отключении активирующего УФ излучения фотоиндуцированная мероцианиновая форма **B** спонтанно возвращается в исходное бесцветное состояние. Скорость обесцвечивания возрастает при облучении видимым светом или при нагревании.

Такой положительный фотохромизм с высокой скоростью темновой релаксации фотоиндуцированной формы **B** проявляют латексные пленки, содержащие частицы ДК размером 3–5 мкм с введенными в них молекулами спиропирана СП 1 [5].

Сравнительное исследование фотохромных превращений спиропиранов СП 2–СП 4 с различными заместителями при атоме азота индолинового фрагмента в матрице ДК – пергидрополисилозана показало, что в отличие от октодецил-содержащего спиропирана СП 2, гидроксил- (СП 3) и карбоксил- (СП 4) замещенные соединения характеризуются низкой скоростью спонтанного обесцвечивания мероцианиновой формы [6].



Как показано на схеме 2, в случае спиропиранов СП 3 (а) и СП 4 (б) это обусловлено образованием водородных связей между гидроксильной или карбоксильной группами и кислородом ДК.

Положительный фотохромизм проявляют молекулы спиропирана СП 5, присоединенные к наночастицам ДК размером 927 нм посредством полимерного полиметилметакрилатного спейсера [7–9]. При этом фотовозбуждение можно осуществлять двухфотонным способом лазерным излучением с длиной волны излучения 780 нм [8].

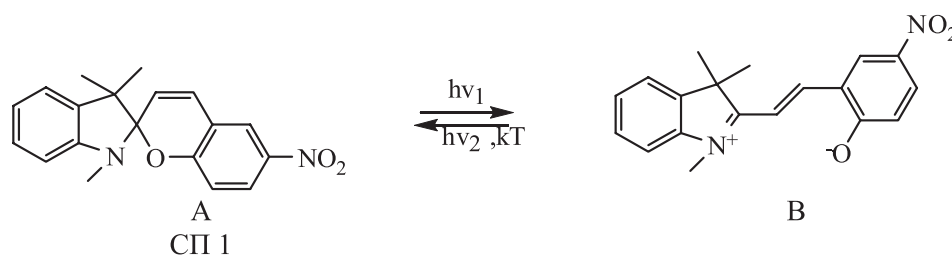


Схема 1. Фотохромные превращения спиропирана СП 1 с положительным фотохромизмом

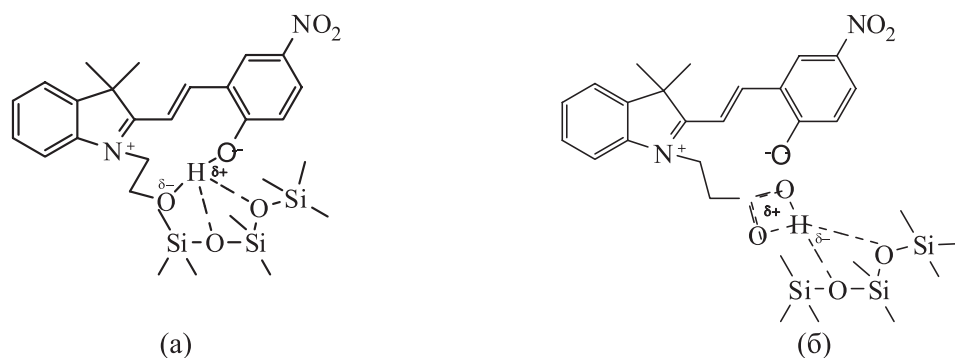
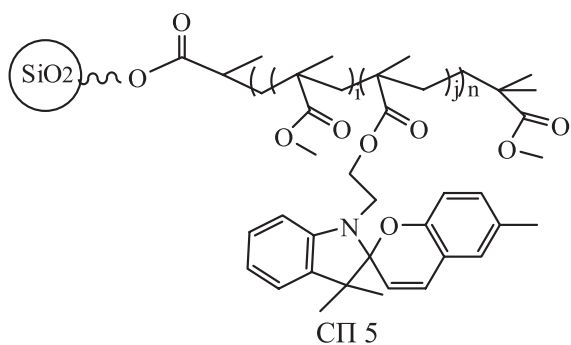


Схема 2. Структуры адсорбатов мероцианиновых форм СП 3 (а) и СП 4 (б) с поверхностью ДК



Установлено, что наиболее эффективные фотохромные превращения наблюдаются для полимерных цепей, содержащих 20 % спиропирановых и 80 % метилметакрилатных фрагментов.

Подобные фотохромные свойства проявляют силилированные спиропираны СП 6 и СП 7

с длинными метиленовыми спейсерами, ковалентно связанными с наночастицами ДК [10].

Выяснено, что скорость темнового обесцвечивания мероцианиновой формы спиропирановых фрагментов возрастает с увеличением длины спейсера и зависит от полярности растворителя. Сравнительное исследование фотохромизма длинноцепочечного спиропирана СП 8 и фотохромных наночастиц на его основе в этиленгликоле показало, что в отличие от фотохромной наночастицы соединение СП 7 в этом растворителе проявляет отрицательный фотохромизм (рис. 1) [11].

Результаты спектрально-кинетического исследования фотохромизма спиропирана СП 9 в водно-этанольных растворах без и в присутствии наночастиц ДК свидетельствуют о химическом характере

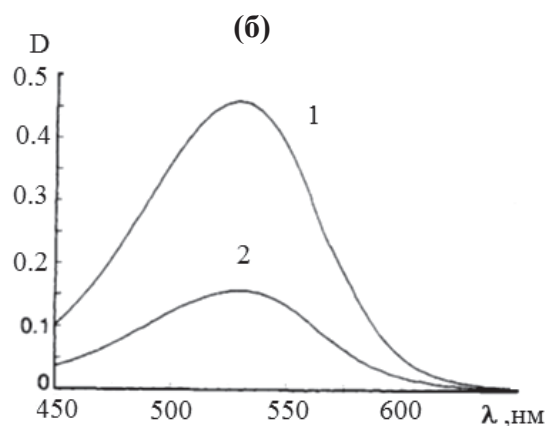
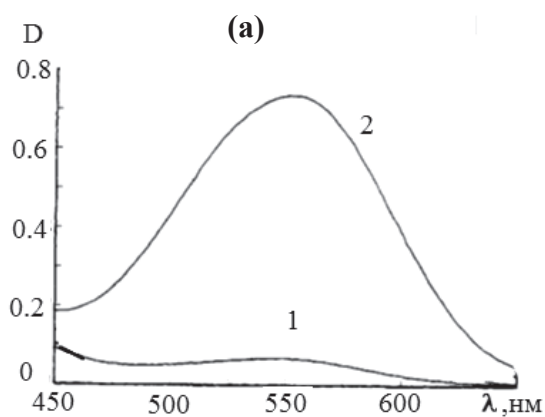
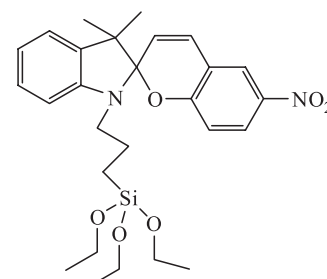
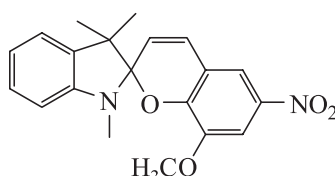
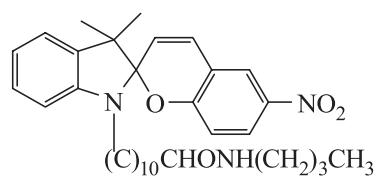
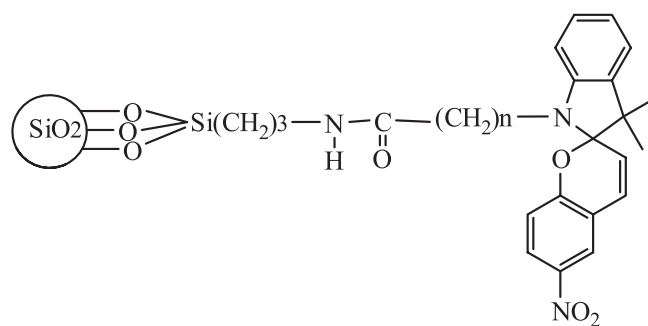
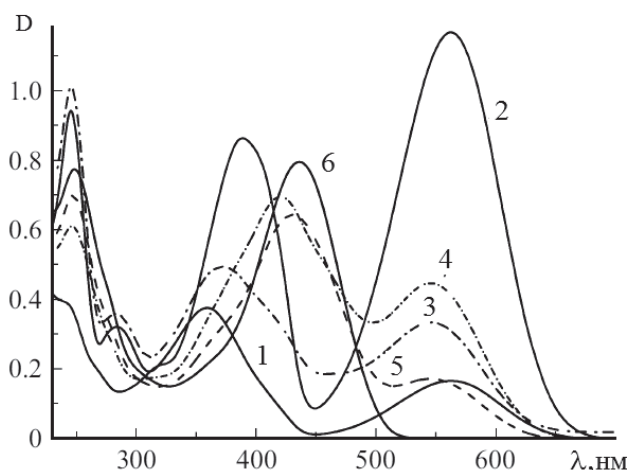


Рис. 1. Спектры поглощения фотохромных наночастиц со СП 7 (а) и фотохромного соединения СП 8 (б) в этиленгликоле до (1) и после облучения УФ светом (2а) и видимым излучением (2б)

взаимодействия молекул спиропирана с поверхностью наночастиц ДК (рис. 2) [12].



**Рис. 2.** Спектры поглощения водно-спиртового раствора соединения СП 9 без (1,2) и в присутствии наночастиц ДК (3–6) до (1,3), после УФ облучения (2,4), воздействия видимым светом (5) и термической релаксации (6)

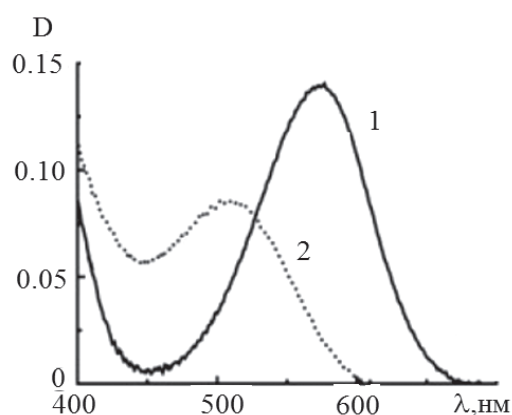
Из рис. 2 видно, что спиропиран СП 9 в водно-этанольном растворе характеризуется наличием полосы поглощения в видимой области спектра вследствие того, что часть молекул спиропирана в полярном растворителе присутствует в мероцианиновой форме. При добавлении в раствор наночастиц ДК интенсивность длинноволновой полосы поглощения возрастает, а также появляется плечо полосы поглощения при 420 нм (рис. 2, кр. 3). УФ облучение приводит к дальнейшему повышению интенсивности этих полос поглощения (рис. 2, кр.4). Под действием видимого света интенсивность полосы поглощения при 560 нм падает, а поглощение с максимумом при 420 нм возрастает (рис. 2, кр. 5). Полоса, возникающая после длительной темновой релаксации (рис. 2, кр. 6), стабильна и не изменяется под действием УФ и видимого света. Эту полосу поглощения следует отнести к образованию протонированной мероцианиновой фор-

мы. Отсутствие отрицательного фотохромизма, возможно, обусловлено агрегацией и кристаллизацией этой формы на поверхности наночастиц ДК.

Фотохромные наночастицы ДК с химически связанными молекулами силилированного спиропирана СП 10 проявляют отрицательный фотохромизм [13].

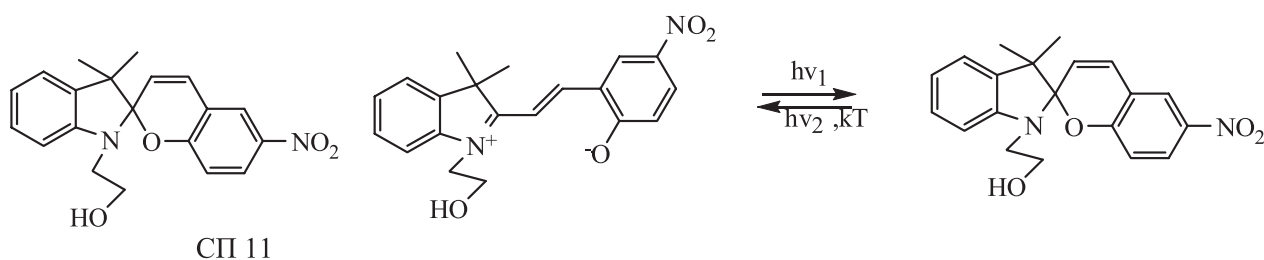
Отрицательный фотохромизм обнаружен для гидроксил-замещенного спиропирана СП 11 [14, 15].

Сразу после введения спиропирана СП 11 в раствор, содержащий ДК, соединение проявляет положительный фотохромизм с появлением фотоиндуцированной полосы поглощения мероцианиновой формы спиропирана (схема 1; рис.3, кр.1).



**Рис. 3.** Спектры поглощения мероцианиновой формы спиропирана СП 11 сразу после введения в раствор ДК (1) и через 312 часов (2)

Однако спустя 312 часов раствор окрашивался с появлением гипсохромно смещенной полосы поглощения мероцианиновой формы (рис. 3, кр. 2). Максимум спектра поглощения мероцианиновой формы смещался с 574 нм до 510 нм. При этом проявлялся отрицательный фотохромизм (схема 2). Появление окраски раствора связано с протонированием мероцианиновой формы спиропирана СП 11, что подтверждается результатами электрохимических исследований [15].



**Схема 3.** Схема фотохромных превращений СП 11 с отрицательным фотохромизмом

Термическая изомеризация спиропирановой формы в мероцианиновую с образованием протонных комплексов мероцианиновой формы наблюдалась в водных [16] и водно-ацетонитрильных [17] растворах гидроксилсодержащих нитрозамещенных спиропиранов.

Отрицательный фотохромизм обнаружен и для покрытий, включающих спиропиран СП 1 и пергидрополисилозан, после превращения последнего в ДК в процессе обработки парами водного раствора аммиака [18, 19]. Введение в состав покрытия полиметилметакрилата (ПММА) приводило к повышению эффективности фотохромных превращений спиропирана (рис. 4) [20]. С увеличением концентрации ПММА покрытия проявляют не отрицательный, а положительный фотохромизм [21].

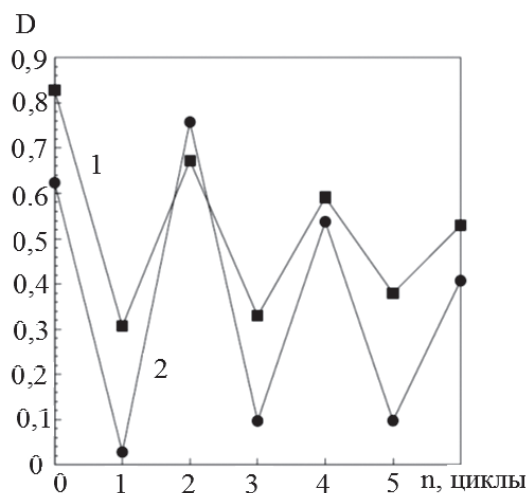


Рис. 4. Модуляция поглощения при 500 нм пленки ДК, содержащей спиропиран СП 1 в ПММА в концентрации 0 (1) и 0,2 вес.% (2) при попеременном облучении видимым и УФ светом

Нитрозамещенный спиропиран СП 1 использовался для получения мезопористых силикатных стекол, проявляющих отрицательный фотохромизм вследствие образования протонного комплекса мероцианиновой формы спиропирана с гидроксильными поверхностными группами стекла [22].

Подобные результаты получены с тем же спиропираном в случае использования дендритных волокнистых нанокремнеземов как в растворах (рис. 5) [23], так и в твердом состоянии (в кле) [24].

Возможность получения наночастиц с отрицательным фотохромизмом обусловлена наличием на поверхности ДК поверхностных групп, вступающих в специфическое взаимодействие с молекулами фотохромных соединений.

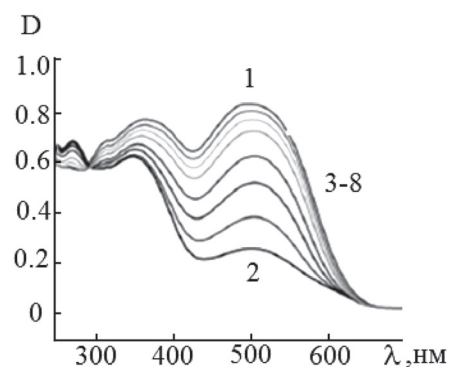
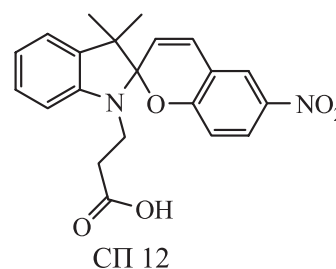


Рис. 5. Фотоиндуцированное изменение спектров поглощения спиропирана СП 1, содержащегося в наночастицах кремнезема, в толуоле до (1), после УФ облучения (2) и темновой релаксации в течение 8,5 часов (3)

С использованием функционализированных силилированных молекул нитрозамещенного спиропирана СП 11 и флуоресцирующего красителя Родамина В были получены наночастицы ДК, обеспечивающие обратимую модуляцию флуоресценции за счет FRET – эффекта (рис. 6) [25].

Фотохромный спиропиран СП 12 был использован для получения фотонных кристаллов на основе золи ДК [26]. Эти кристаллы обеспечивали включение-выключение флуоресценции мероцианиновой формы спиропирана в результате либо фотохромных превращений этого соединения, или при переменном воздействии кислоты и основания.



Гидрокси-содержащий нитрозамещенный спиропиран СП 9 был использован для получения мезоструктурированных пленок ДК с обратимыми термо- и фотохромными свойствами [27].

#### Наночастицы со спирооксазинами

Для получения фотохромных тканей с положительным фотохромизмом использовались соединения из класса спирооксазинов, которые проявляют фотохромные превращения, подобные

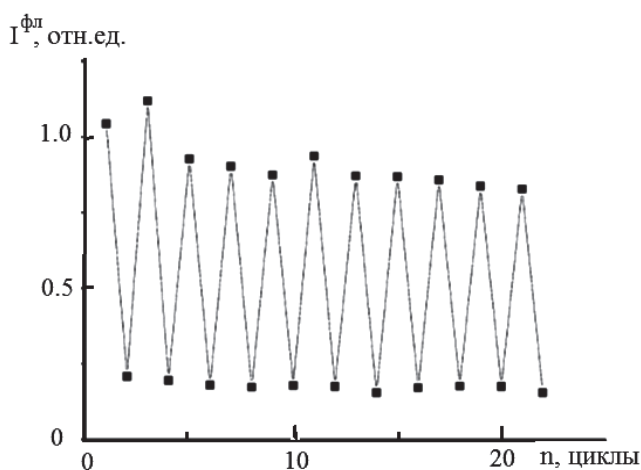
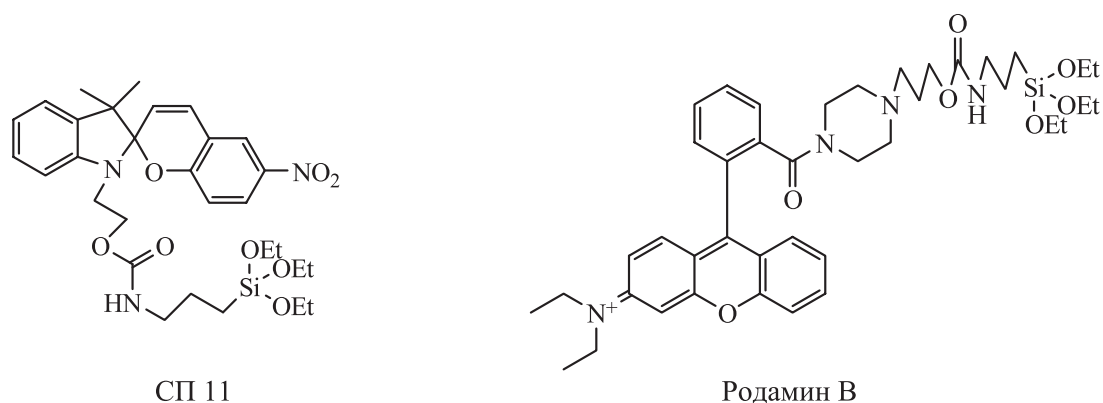


Рис. 6. Модуляция интенсивности флуоресценции Родамина В при 593 нм в водно-этанольном растворе фотохромными превращениями спиропирана СП 11 при попеременном облучении светом с длинами волн 350 и 590 нм

спиропиранам, но отличаются менее выраженной фотодеградацией (схема 4).

Фотохромный спирооксазин СО 1 в водно-этанольном растворе не проявляет спектральных изменений в присутствии наночастиц ДК ни в темноте, ни под действием света [12]. Наблюдаемое снижение скорости темновой релаксации фотоиндуцированной мерооксазиновой формы может свидетельствовать о физической адсорбции молекул на поверхности наночастиц.

Положительный фотохромизм проявляют фотохромные ксерогели на основе спирооксазинов [28]. С использованием спирооксазина СО 2, ко-

торый вводился в ксерогель в качестве фрагмента методом фотополимеризации, были получены фотохромные покрытия, содержащие фоточувстви-

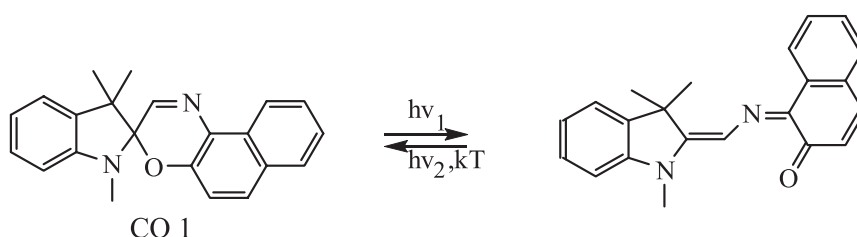
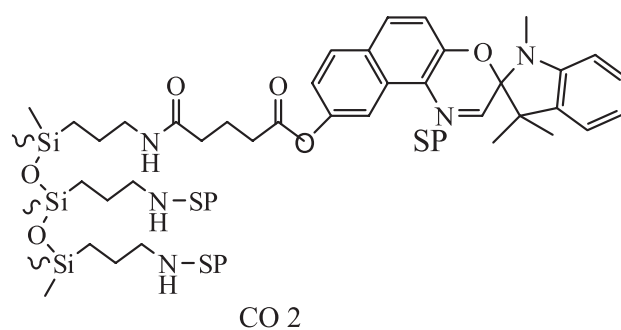


Схема 4. Фотохромные превращения спирооксазина СО 1

тельные наночастицы ДК [29]. Эти покрытия характеризовались эффективными фотохромными превращениями, высокой прочностью и приемлемой устойчивостью к погодным условиям.

### Наночастицы с хроменами

Наибольшее внимание уделяется созданию фотохромных наночастиц на основе ДК с использованием фотохромных хроменов, которые по сравнению со спиросоединениями обладают высокой устойчивостью к необратимым фотопревращениям. По этой причине они используются в коммерчески успешных фотохромных офтальмологических линзах.

Механизм фотохромных превращений хроменов аналогичен тем, которые описаны выше для спиропиранов и спирооксазинов (схема 5).

Судя по результатам спектрально-кинетического исследования влияния наночастиц на фото-

хромизм хромена XP 1 в водно-этанольном растворе, это соединение испытывает физическую адсорбцию на поверхности наночастиц ДК [12].

Для функционализации наночастиц ДК были синтезированы гидрокси-содержащие хромены XP 2-XP 5 и их силилированные аналоги XP 6-XP 9 [30].

На их основе были приготовлены соответствующие фотохромные наночастицы ДК, на поверхности которых молекулы находились либо в адсорбированном состоянии вследствие водородной связи с поверхностными гидроксильными группами (а), либо в ковалентно-связанном состоянии (б) (схема 6).

Обнаружено, что все полученные фотохромные наночастицы проявляют фотохромные превращения с двухстадийной темновой релаксацией фотоиндуцированной окрашенной формы.

Наиболее оптимальными фотохромными свойствами обладали силилированные наночастицы SiO<sub>2</sub>@XP 8 и SiO<sub>2</sub>@XP 9, которые характери-

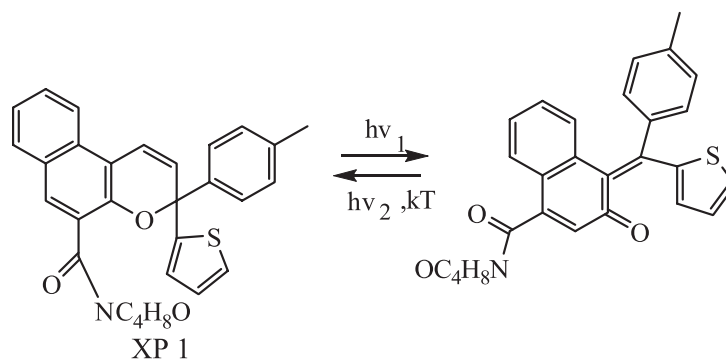
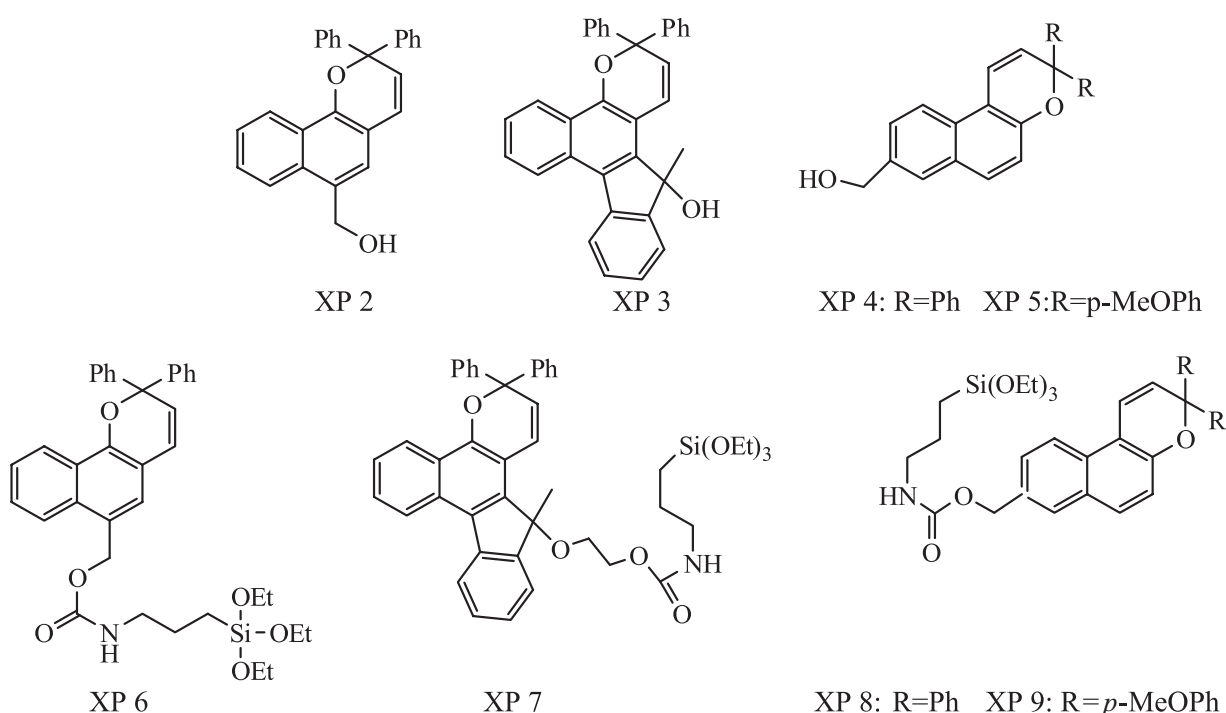


Схема 5. Фотохромные превращения хромена XP 1



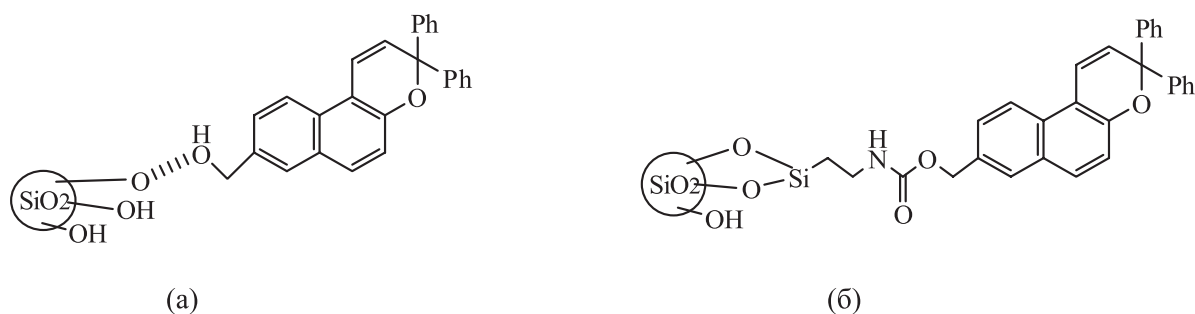


Схема 6. Структуры фотохромных наночастиц ДК на основе хроменов с водородной (а) и химической (б) связями молекул с поверхностью наночастиц

зовались эффективным фотоокрашиванием в течение 1 мин и быстрым темновым обесцвечиванием в течение 2 минут, а также высокой цикличностью фотохромных превращений (рис. 7).

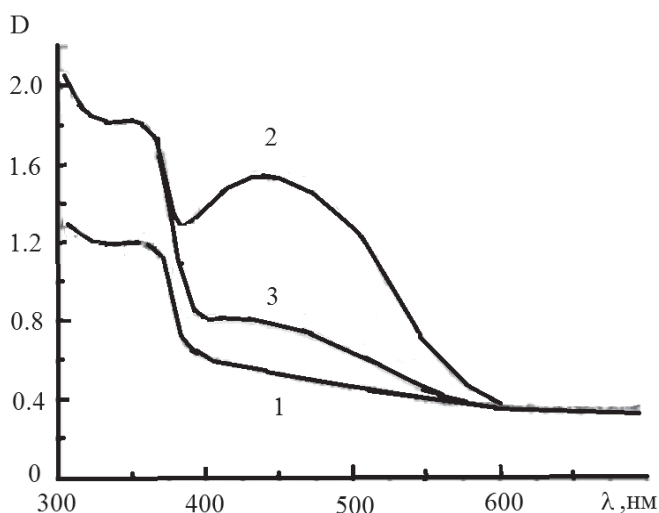


Рис. 7. Спектры поглощения водного раствора фотохромных наночастиц  $\text{SiO}_2\text{@XP 8}$  до (1), после УФ облучения (2) и последующей темновой релаксации (3)

Фотохромные наночастицы  $\text{SiO}_2\text{@XP 6}$  и  $\text{SiO}_2\text{@XP 7}$  также эффективно окрашивались под действием УФ излучения, но медленно возвращались в исходное состояние (более 2 часов). Наименьшая эффективность фотоокрашивания, сопровождающаяся медленной спонтанной релаксацией фотоиндуцированного состояния в исходное, обнаружена для наночастиц  $\text{SiO}_2\text{@XP 2}$  и  $\text{SiO}_2\text{@XP 4}$ .

Фотохромные соединения этого типа были использованы для получения чернил для струйной и паст для трафаретной печати на тканях [31]. С использованием фотохромных наночастиц  $\text{SiO}_2\text{@XP 6}$  и  $\text{SiO}_2\text{@XP 7}$  получены светочувствительные поливинилиден-фторидные волокна [32].

В случае венилиден-содержащих нафтофуранов НФ 1 и НФ 2 наблюдается обратная картина эффективности фотохромных превращений молекул хроменов на поверхности наночастиц ДК с адсорбированными (а) и ковалентно-связанными (б) молекулами фотохромных соединений (схема 7) [33].

Фотохромные превращения обнаружены только для наночастиц с адсорбированными нафтофуранами (рис. 8).

Различие объясняется тем, что в случае адсорбированных молекул, как и в случае растворов [34, 35], протонированные силанольные поверхностные группы при УФ облучении отдают протон фотохромной молекуле, приводя к раскрытию фуранового цикла и образованию третичного катиона нафтофурана, который стабилизируется на поверхности наночастицы (схема 8). В отсутствие фотовозбуждения молекула возвращается в исходное состояние.

В случае фотохромных наночастиц с ковалентно-связанными молекулами нафтофуранов на поверхности наночастиц присутствует незначительное количество силанольных групп, которые могут вступать во взаимодействие с фотохромными молекулами. Кроме того, большое расстояние между фотохромными молекулами и поверхностью наночастиц ДК препятствует стабилизации образующихся катионов.

Нафтофуран НФ 3 без гидроксильной группы также проявляет фотохромные превращения на силикагеле, но не в растворах и не в твердофазных пленках (схема 9) [34].

Спектральные проявления окрашенной формы подобны тем, которые наблюдаются в растворах с добавлением кислоты [35].

#### Наночастицы с диарилэтенами

В отличие от спиросоединений и хроменов фотохромные соединения из класса диарилэтен



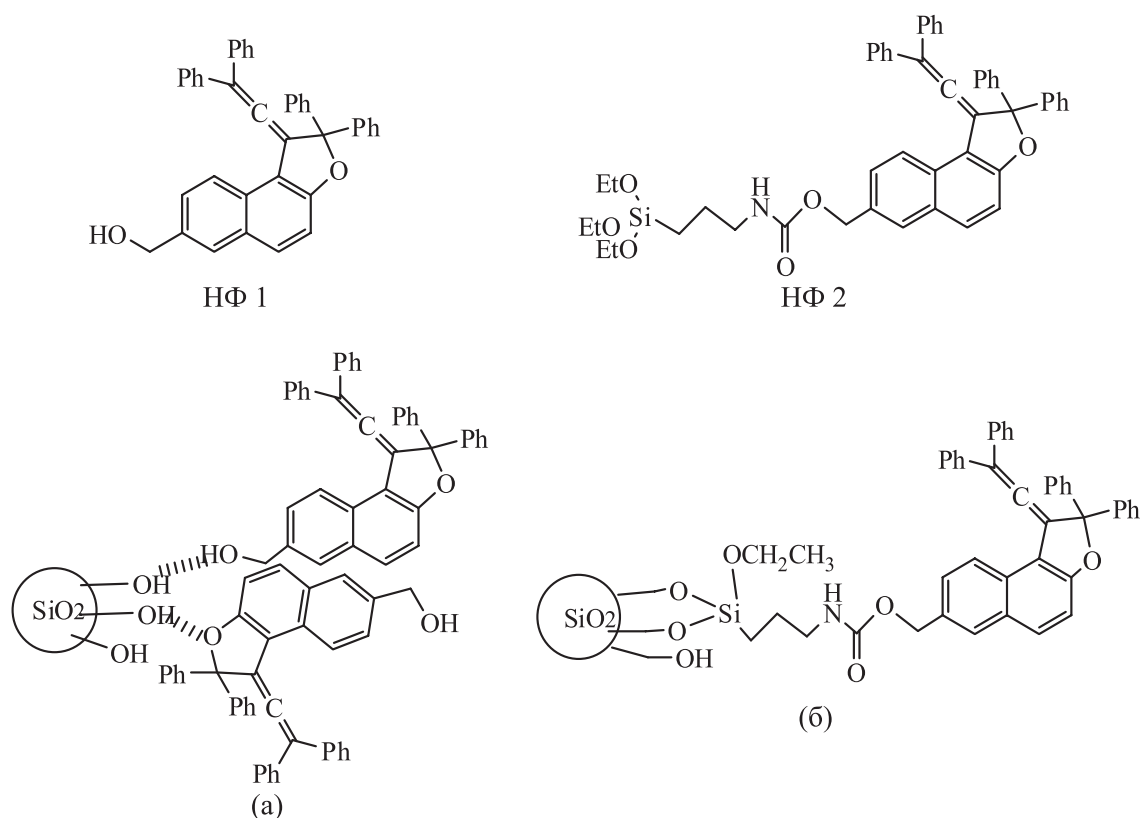


Схема 7. Структуры фотохромных наночастиц ДК на основе нафтофуранов с водородной (а) и химической (б) связями молекул с поверхностью наночастиц

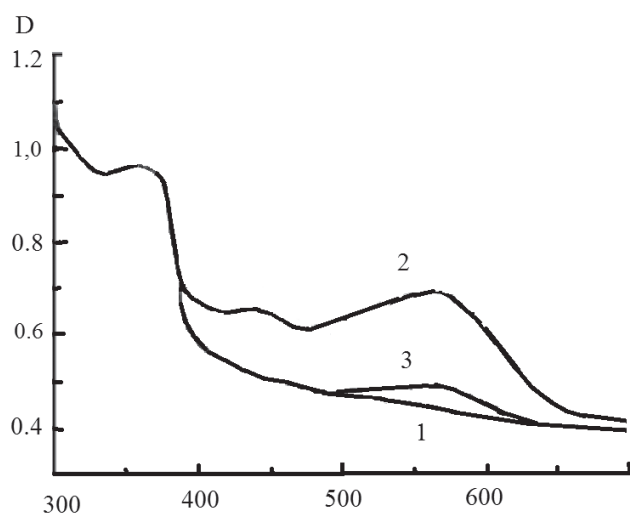


Рис. 8. Спектры поглощения водного раствора фотохромных наночастиц  $\text{SiO}_2@НФ 1$  до (1), после УФ облучения (2) и последующей темновой релаксации (3)

характеризуются термически необратимыми фотопревращениями исходной А и фотоиндуцированной В форм (схема 10).

В результате спектрально-кинетического исследования взаимодействия молекул диарилэтенов ДАЭ 1–ДАЭ 3 в водно-этанольных растворах по-

казано, что характер адсорбции молекул этих соединений на поверхности наночастиц ДК зависит от строения молекул и природы заместителей [12].

Диарилэтен ДАЭ 1, судя по спектрам поглощения открытой и циклической форм, не испытывает ковалентного взаимодействия с поверхностью наночастиц ДК. Однако в отличие от раствора, не содержащего наночастиц ДК, для него обнаружена темновая релаксация фотоиндуцированного циклического изомера В в исходную открытую форму А в присутствии наночастиц ДК. Это может свидетельствовать о взаимодействии молекул фотохромного соединения с поверхностью наночастиц ДК.

Для соединений ДАЭ 2 и ДАЭ 3 кроме термической релаксации обнаружены спектральные сдвиги полос поглощения фотоиндуцированных циклических изомеров и появление новых полос поглощения (рис. 9). Подобные результаты получены для твердофазных пленок. Эти результаты свидетельствуют о химической адсорбции функционализированных молекул на поверхности наночастиц ДК.

Для химического связывания молекул диарилэтена с поверхностью ДК, как и в случае спириранов и хроменов, осуществляли их силилирование с получением соединения ДАЭ 4 [36].

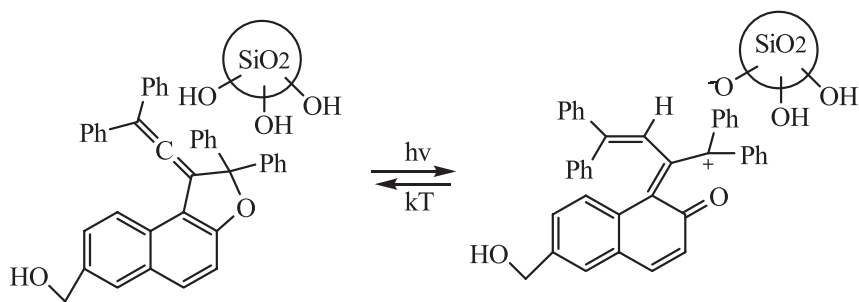


Схема 8. Фотохромные превращения нафтофурана НФ 1 на поверхности наночастиц ДК

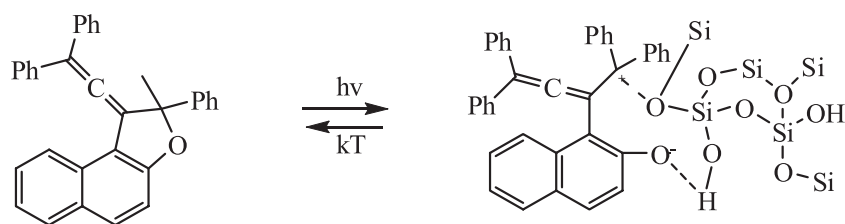


Схема 9. Фотохромные превращения нафтофурана НФ 3 на поверхности наночастиц ДК

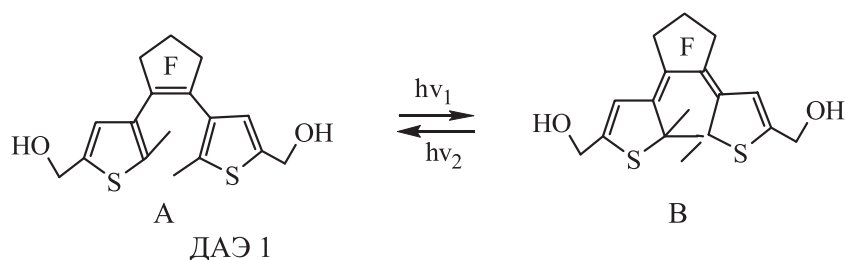
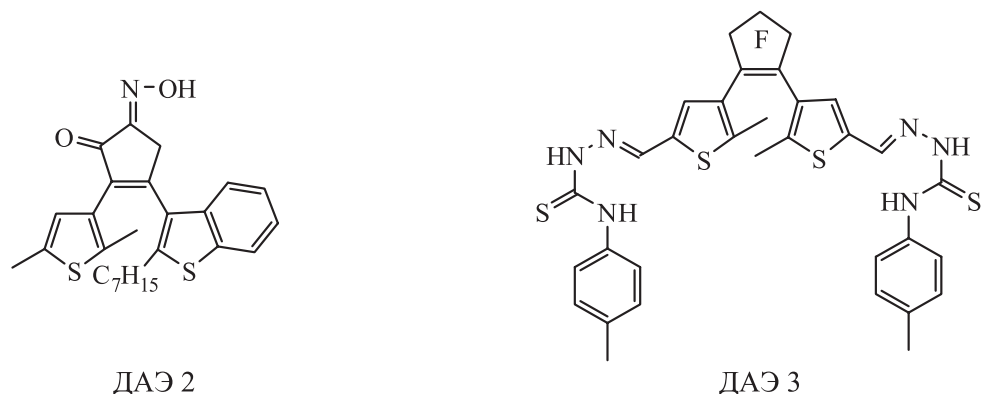


Схема 10. Фотохромные превращения диарилэтена ДАЭ 1



Изучено фотоиндуцированное изменение абсорбционных и флуоресцентных свойств фотохромных наночастиц ДК, модифицированных молекулами диарилэтена ДАЭ 5 (схема 11), при двухфотонном возбуждении фотохромных

превращений. Установлено, что сечение двухфотонного возбуждения молекул составляет 30 GM [37].

С использованием фотохромного диарилэтена ДАЭ 6 были получены фотохромные наноча-

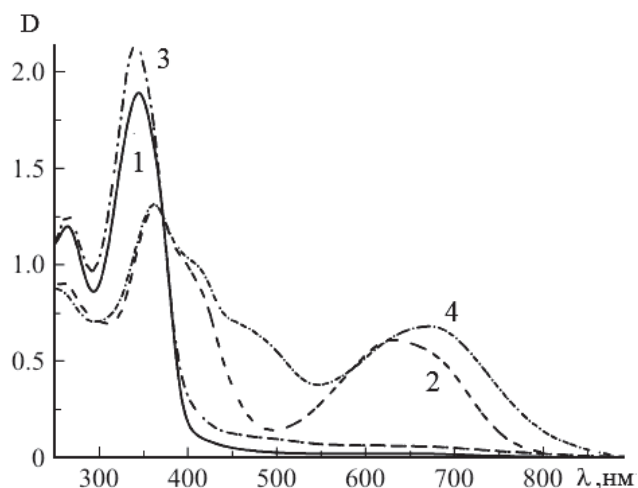


Рис. 9. Спектры поглощения водно-спиртового раствора соединения ДАЭ 3 без (1,3) и в присутствии наночастиц  $\text{SiO}_2$  (2,4) до (1,3) и после УФ облучения (3,4)

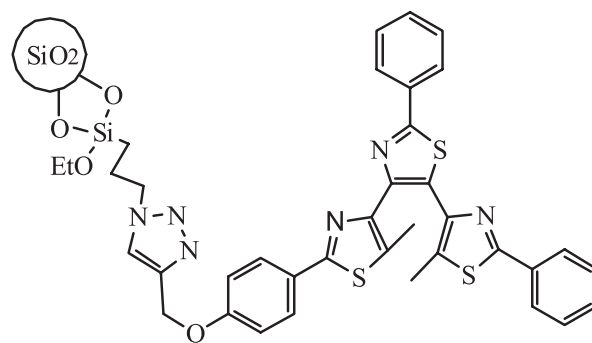
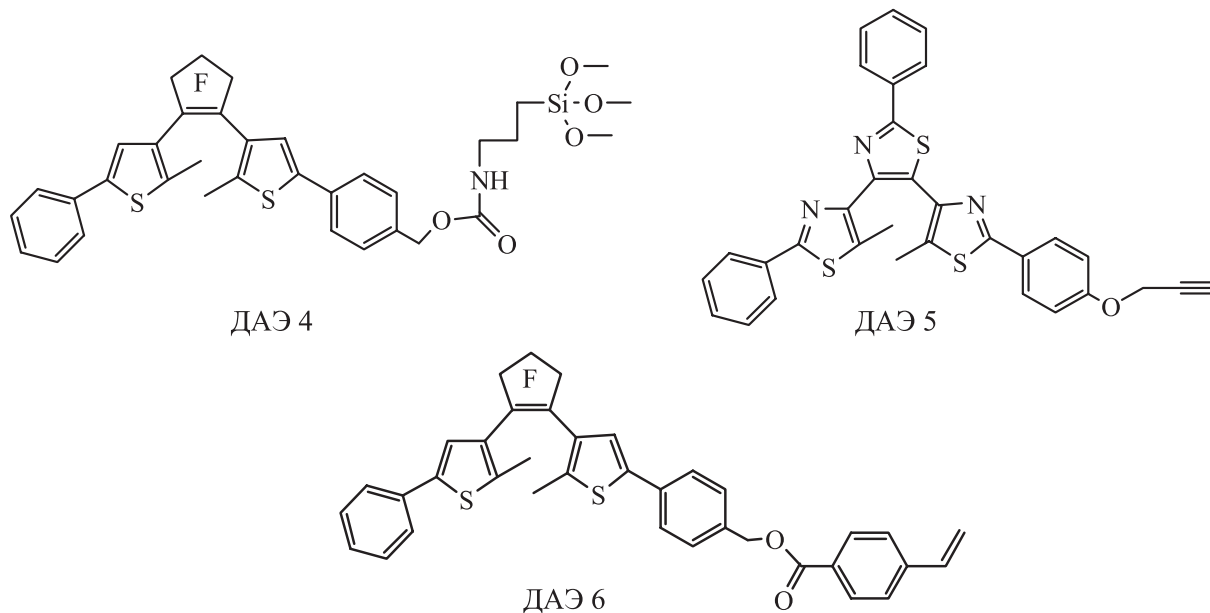


Схема 11. Структура фотохромной наночастицы ДК на основе диарилэтена ДАЭ 5

Показано, что диада ДАЭ 7, содержащая флуорофор Родамин 101 и фотохромный диарилэтен и химически привитая на поверхности ДК, обеспечивает высокоциклическую модуляцию интенсивности



стицы ДК, покрытые блок-сополимерами (ФНЧ 1 и ФНЧ 2, схема 12) [38].

Эти наночастицы проявляли эффективные фотохромные превращения (рис. 10).

флуоресценции красителя фотохромными превращениями соединения за счет фотоиндуцированного резонансного переноса энергии возбуждения от флуорофора к фотохрому (FRET эффект) (рис. 11) [39].

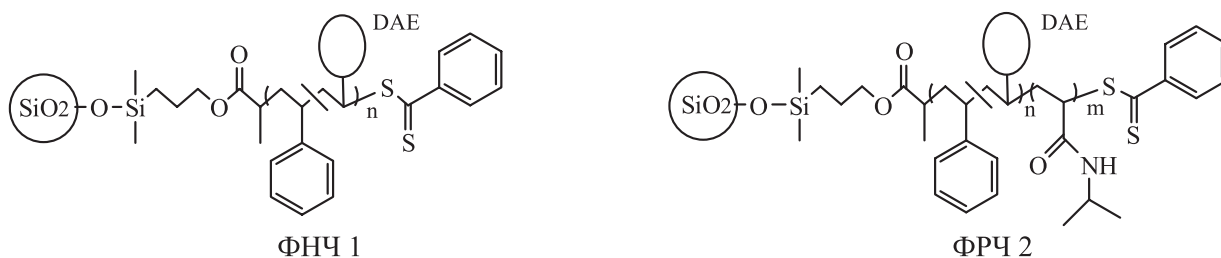


Схема 12. Структуры фотохромных наночастиц ФНЧ 1 и ФНЧ 2 на основе диарилэтена ДАЭ 6

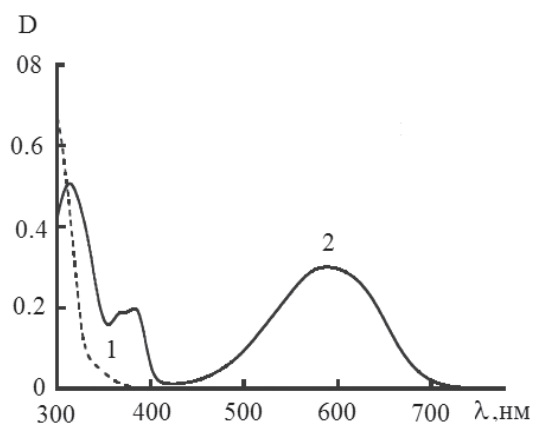


Рис. 10. Спектры поглощения фотохромной частицы ФНЧ 1 в тетрагидрофуране до (1) и после УФ облучения в фотостационарном состоянии

Модуляция интенсивности флуоресценции за счет FRET –эффекта наблюдалась для фуллерен-силикатных фотохромных наночастиц размером 85 нм Ф-1 с химически связанными молекулами диарилэтена (схема 13) [40].

Анализ результатов исследования разработки фотохромных наночастиц ДК свидетельствует об интенсивном развитии этого направления нанопhotoхромизма гибридных органико-неорганических соединений типа ядро-оболочка. Для их получения были использованы все наиболее известные фотохромные соединения из классов термически обратимых спиропиранов, спирооксазинов и хроменов, а также термически необратимых диарилэтенов. При этом фотохромные наночастицы ДК были получены как путем физической или химической адсорбции молекул на поверхности ДК, так и химической прививкой к поверхности наночастиц.

Особый практический интерес вызывают фотохромные наночастицы ДК с отрицательным фотохромизмом на основе протонированных комплексов спиропиранов, а также наночастицы с химически привитыми молекулами хроменов и нафтофуранов, проявляющие положительный фотохромизм. Создание таких фотохромных наночастиц открывает перспективы разработки

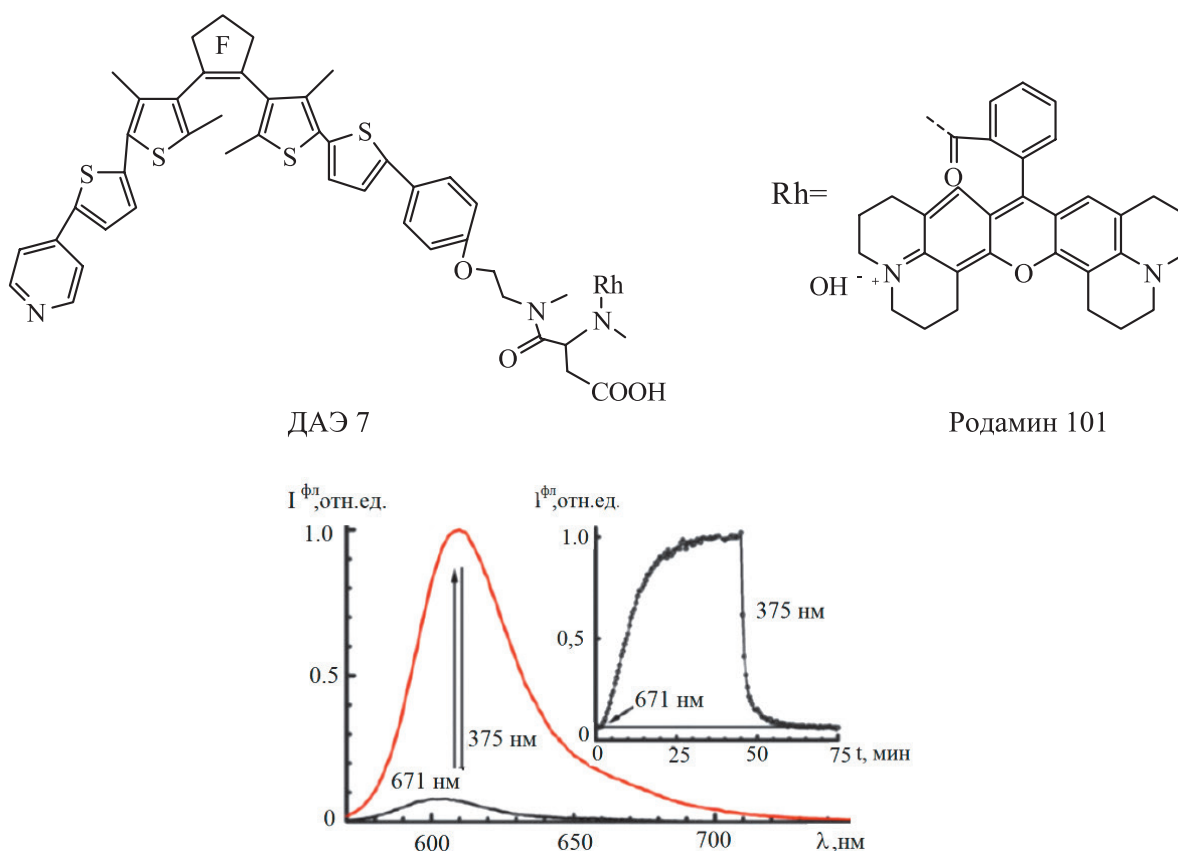


Рис. 11. Фотоиндуцированное изменение спектров флуоресценции и кинетика модуляции флуоресценции (врезка) красителя Родамин 101 фотохромными превращениями диарилэтенового фрагмента фотохромной диады ДАЭ 7 в этаноле при попеременном облучении УФ (375 нм) и видимым (671 нм) излучениями

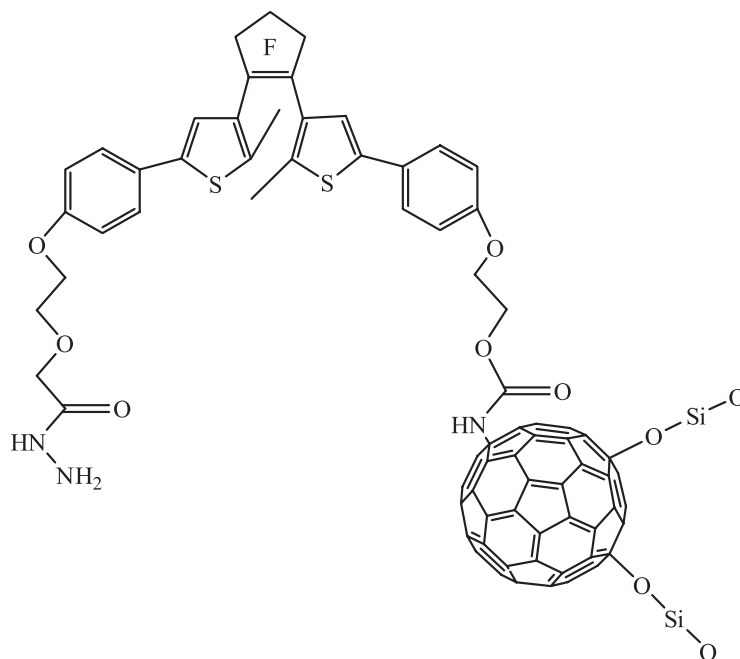


Схема 13. Структура фотохромной наночастицы ДК Φ-1 на основе фотохромного диарилэтена и фуллерена

фотохромных тканей различного функционального применения с динамическим изменением окраски.

Фотохромные наночастицы на основе термически необратимых диарилэтен, отличающихся от других упомянутых фотохромных соединений рекордной цикличностью фотоуправляемых превращений, могут использоваться для создания фотопереклюкателей излучения, а также для флуоресцентной визуализации биообъектов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-03-00650).

#### Литература

1. Barachevsky V.A. *Org. Photonics. Photovolt.* 2015. V. 3. P. 8.
2. *Photochromic Materials: Preparation, Properties and Applications* Eds. H. Tian and J. Zhang. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany. 2016.
3. Cheng H., Yoon J., Tian H. *Coord. Chem. Rev.* 2018. V. 372. P. 66.
4. K. Ayazi-Yazdi S., Karimi L., Mirjalili M., Karimnejad M. *J. Text. Inst.* 2017. V. 108. P. 856.
5. Andersson N., Alberius P., Ortegren J., Lindgrem M., Bergstrom L. *J. Mater. Chem.* 2005. V. 15. P. 3507.
6. Kinashi K., Harada Y., Ueda Y. *Thin Solid Films.* 2008. V. 516. P. 2532.
7. Bell N.S., Piech M. *Langmuir.* 2006. V. 22. P. 1420.
8. Piech M., George M.C., Bell N.S., Braun P.V. *Langmuir.* 2006. V. 22. P. 1379.
9. Piech, M. and Bell, N. S., *Macromolecules*, 2006, V. 39, P. 915.
10. Ueda M., Kudob K., Ichimura K. *J. Mater. Chem.* 1995. V. 5. P. 1007.
11. Ueda M., Kimbt H.B., Ichimura K. *J. Mater. Chem.* 1994. V. 4. P. 883.
12. Барачевский В.А., Кобелева О.И., Горелик А.М. Краюшкин М.М. *Опт. спектр.* 2018. Т. 125. С. 348. [Opt. Spectr. 2018. V. 125. P. 362].
13. Calero P., Aznar E., Lloris J.M., Marcos M.D., Martinez-Manez R., Ros-Lis J.V., Soto J., Sancenon F. *Chem. Commun.* 2008. V. 14. P.1668.
14. Kinashi K., Nakamura S., Imamura M., Ishida K., Ueda Y. *J. Phys. Org. Chem.* 2012. V. 25. P. 462.
15. Kinashi K., Nakamura S., Ono Y., Ishida K., Ueda Y. *J. Photochem. Photobiol. A.* 2010. V. 213. P. 136.
16. Shiraishi Y., Itoh M., Hirai T. *J. Phys. Chem. Chem. Phys.* 2010. V. 12. P. 13737.
17. Валова Т.М., Барачевский В.А., Хузин А.А., Туктаров А.Р. *Журн. общ. химии.* 2019. Т. 89. С. 1375 [Rus. J. Gener. Chem. 2019. V. 89. P. 1783].
18. Yamano A., Kozuka H. *J. Phys. Chem. B.* 2009. V. 113. P. 5769.
19. Yamano A., Kozuka H. *J. Phys. Chem. B.* 2009. V. 113. P. 10548.
20. Yamano A., Kozuka H. *J. Sol-Gel Sci.* 2010. V. 53. P. 661.
21. Yamano A., Kozuka H. *Thin Solid Films.* 2011. V. 519. P. 1772.
22. Okabe Y., Ogawa M. *RSC Adv.* 2015. V. 5 (123). P. 101789.
23. Yamaguchi T., Maity A., Polshettiwar V., Ogawa M. *J. Phys. Chem. A.* 2017. V. 121. P. 8080.
24. Yamaguchi T., Maity A., Polshettiwar V., Ogawa M. *Inorg. Chem.* 2018. V. 57. P. 3671.
25. May F., Peter M., Hutten A., Prodi L., Mattay J. *Chem. Eur. J.* 2012. V. 18. P. 814.

26. Zhang Y.Q., Wang J.X., Shang Y.L., Song Y.L., Jiang L. *Appl Phys A*. 2011. V. 102. P. 531.
27. Malfatti L., Costacurta S., Kidchob T., Innocenzi P., Casula M., Amenitsch H., Dattilo D.D., Maggini M. *Micropor. Mesopor. Mater.* 2009. V. 120. P. 375.
28. Chang C.-C., Chen L., Cheng L.-P. *J. Coat. Technol. Res.* 2013. V. 10. P. 73.
29. Suh H.-J., Keum S.-R., Koh K., Kim S.-H. *Dyes and Pigments*. 2007. V. 72. P. 363.
30. Pinto T.V., Costa P., Sousa C.M., Sousa C.A.D., Monteiro A.A., Pereira C., Soares O.S.G.P., Silva C.S.M., Pereira M.F.R., Coelho P.J., Freire C. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 8. P. 7221.
31. Pinto T.V., Costa P., Sousa C.M., Sousa C.A.D.C.A.D., Pereira C., Silva C.J.S.M., Pereira M.F.R., Coelho P.J., Freire C. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. V. 8. P. 28935.
32. Pinto T.V., Cardos N., Costa P., Sousa C.M., Durães N., Silva C., Coelho P.J., C. Pereira, C. Freire. *Appl. Surf. Sci.* 2019. 470. P. 951–958.
33. Pinto T.V., Sousa C.M., Sousa C.A.D., Aboelhassan M.M., Peixoto A.F., Pereira C., Coelho P.J., Freire C. *Dalton Trans.* 2017. V. 46. P. 9076.
34. Sousa C.M., Berthet J., Delbaere, Coelho P.J. *J. Org. Chem.* 2013. V. 78. P. 6956.
35. Sousa C.M., Berthet J., Delbaere S., Coelho P.J. *Dyes and Pigments*. 2017. V. 137. P. 593.
36. Okada H., Nakajima N., Tanaka T.T., Iwamoto M. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. V. 44. P. 7233.
37. Ouhenia-Ouadahi K., Laurent G., Barrez E., Yu P., Metivier R., Debarre A. *J. Phys. Chem. C*. 2018. V. 122. P. 6984.
38. Seno R., Kobatake S. *Dyes and Pigments*. 2015. V. 114. P. 166.
39. Folling J., Polyakova S., Belov V., van Blaaderen A., Bossi M.L., Hell S.W. *Small*. 2008. V. 4. P. 134.
40. Jeong J., Yun E., Choi Y., Jung H.-Y., Chung S.J., Song N.W., Chung B.H. *Chem. Commun.* 2011. V. 47. P. 10668.