

УДК 539.1.044:535.683

## ОРГАНИЧЕСКАЯ ФОТОХРОМИКА

© 2022 г. В. А. Барачевский\*

Центр фотохимии ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, ул. Новаторов, д. 7а, к. 1, Москва, 119421 Россия

\*E-mail: barachevsky@mail.ru

Поступила в редакцию 27.06.2021 г.

После доработки 23.08.2021 г.

Принята к публикации 28.08.2021 г.

Проведен анализ результатов целевых фундаментальных исследований фотохромизма органических соединений, систем и материалов на их основе, выполненных в ЦФ РАН. Разработаны научные основы создания фотохромных материалов для светомодулирующих устройств и светочувствительных регистрирующих сред для трехмерной (3D)-оптической памяти с приемлемыми функциональными свойствами. Достигнуты практически значимые успехи в разработке фотохромных наночастиц, фотохромных оптических сенсоров, светоадаптивных покрытий с отрицательным фотохромизмом. Отмечена перспективность применения фотохромных соединений в биомедицинских технологиях.

*Ключевые слова:* фотохромизм, модуляторы света, оптическая память, наночастицы, оптические сенсоры, светоадаптивные покрытия, биомедицина

DOI: 10.31857/S002311932201003X

### ВВЕДЕНИЕ

В области фотохимии фотохромные вещества и системы на их основе благодаря обратимости свойств фотопродуктов занимают особое место.

Явление фотохромизма заключается в фотоиндуцированном обратимом изменении спектральных свойств веществ и систем, чаще всего в видимом диапазоне спектра.

Различают положительный (прямой) и отрицательный (обратный) фотохромизм, проявляющийся в обратимом фотоокрашивании и фотообесцвечивании веществ и систем соответственно. При импульсном облучении реализуется двухфотонный фотохромизм, обусловленный нелинейным поглощением возбуждающего света веществом.

В основе органического фотохромизма лежат фотофизические процессы (триплет-триплетное поглощение, синглет-синглетное просветление) и многочисленные обратимые фотохимические реакции, которые сопровождаются либо перестройкой валентных связей, либо изменением конфигурации молекул.

Фотохромные вещества и системы делятся на термически обратимые (возвращаются в исходное состояние спонтанно и при нагревании) и термически необратимые (испытывают обратимые превращения только под действием света).

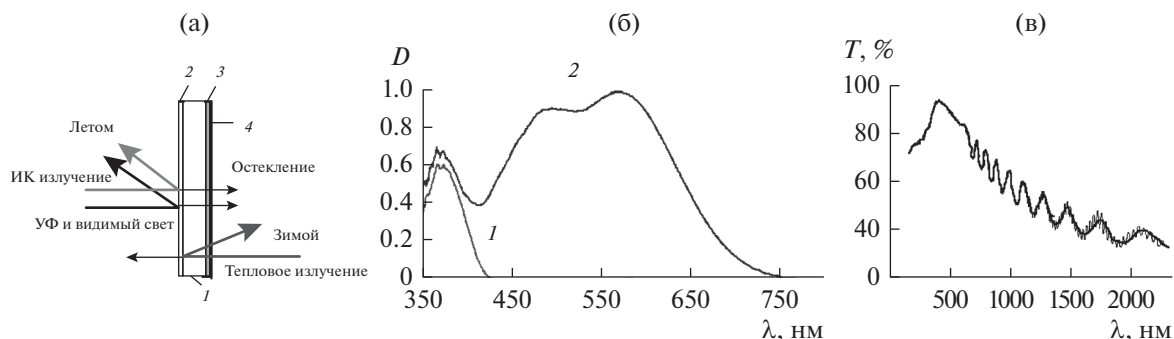
Наряду с фотоиндуцированным обратимым изменением спектров поглощения обратимо изменяются и другие свойства (электрические,

магнитные, нелинейно-оптические, поляризационные, механические и др.), что открывает перспективы создания инновационных фотохромных материалов различного назначения.

С самого начала интенсивного развития этого направления (середина прошлого века) явление фотохромизма использовалось для решения практических задач на основе результатов фундаментального исследования этого явления. В связи с практической ориентацией исследований в области фотохромизма целесообразно ввести понятие органическая фотохромика. Органическая фотохромика является частью молекулярной фотоники, изучающей взаимосвязанные фотофизические и фотохимические процессы в органических веществах и системах, проявляющих обратимые фотопревращения, и их функциональные свойства.

Изучение фотохромизма органических соединений характеризуется высокой активностью, о чем свидетельствуют рост научных публикаций, большое количество обзоров и книг, в том числе последняя из них [1], а также регулярное проведение международных симпозиумов по фотохромизму.

В России исследования по фотохромизму были начаты в середине прошлого века по инициативе академика А.Н. Теренина [2–7]. Изучался не только механизм фотохромных превращений фотохромных соединений из класса спиропиранов,



**Рис. 1.** (а) Принцип работы и структура солнцезащитной энергосберегающей фотохромной пленки: 1 – лавсановая пленка, 2 – ИК отражающий слой, 3 – токопроводящее нагревательное покрытие, 4 – фотохромный полимерный слой. (б) Спектры поглощения фотохромного полимерного слоя до (1) и после (2) облучения солнечным светом. (в) Спектр пропускания металлизированного ИК отражающего слоя.

но и возможность его применения в фотографии и оптической памяти.

Результаты развития этих исследований в Центре фотохимии (ЦФ) РАН неоднократно анализировались [8–10]. К настоящему времени выполнен большой объем фундаментальных исследований. Основное внимание уделялось синтезу и изучению свойств фотохромных органических соединений и систем на их основе. Синтезирован ряд новых спирооксазинов и хроменов. Исследован механизм фотохромных превращений и зависимости структура – свойства для соединений из классов спиропиранов, спирооксазинов, хроменов, формазанов, феноксизамещенных хинонов, азокрасителей, диарилэтеннов и фульгимидов. Особое внимание уделялось изучению свойств гибридных фотохромных соединений и фотохромных полимеров, а также фотоиндуцированных процессов флуоресценции, агрегации, анизотропии, образования комплексов с ионами и наночастицами металлов. Результаты фундаментальных исследований позволили осуществить успешный целенаправленный синтез фотохромных соединений и систем на их основе и обеспечить их применение в разработке научных основ создания фотохромных материалов для современных информационных технологий (трехмерной оперативной и архивной оптической памяти, бессеребряных светочувствительных материалов, реверсивных оптических хемосенсоров и др.), а также для светомодулирующих оптических устройств, в том числе нанофотопереключателей.

В данном обзоре представлены результаты исследований, полученные в основном в ЦФ РАН, в том числе с участием Российских и зарубежных ученых, в области органической фотохимии в соответствии с направлениями применения фотохромных материалов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФОТОХРОМИКИ

### *Светомодулирующие устройства*

В области разработки фотохромных модуляторов света, помимо ранее созданных фотохромных офтальмологических полимерных линз [11–13] разработаны рецептура и технология, изготовлены образцы многослойных фотохромных полимерных пленок (рис. 1а), фотохромный слой которых содержит хромен с широким спектром поглощения фотоиндуцированной формы (рис. 1б) [14]. Эти пленки наклеиваются на существующее остекление зданий и транспортные средств. Благодаря использованию дополнительного металлизированного слоя, отражающего инфракрасное излучение (рис. 1в), такие пленки не только защищают от солнечного излучения, но и являются энергосберегающими.

В разработке находятся фотохромные многослойные волноводные полимерные материалы, которые в сочетании с малогабаритными импульсными диодными УФ-лазерами способны обеспечить защиту органа зрения от ослепления в отсутствие внешнего активирующего излучения [15].

Одной из основных проблем использования фотохромных материалов в модуляторах света является недостаточная скорость темновой релаксации фотоиндуцированной окраски. Эта проблема может быть решена путем создания либо полимерных матриц с большим свободным молекулярным объемом [16], либо композитных полимерно-жидкостных фотохромных слоев с использованием нанодисперсии фотохромных соединений в масле и водорастворимых полимеров [17]. Это обусловлено тем, что скорость темновой релаксации фотоиндуцированной формы фотохромных соединений в растворах выше по сравнению с полимерными и золь-гелевыми матрицами.

Биимидазолильные фотохромные соединения с временем жизни фотоиндуцированной формы до нескольких секунд могут быть использованы в средствах защиты от мощного импульсного светового излучения [18]. Спектральные характеристики фотоиндуцированной формы и время ее жизни зависят от структуры этих фотохромных соединений.

### Информационные технологии

Разработка научных основ создания многослойных регистрирующих сред для трехмерной оптической памяти сверхбольшой информационной емкости с флуоресцентным считыванием информации завершена и ожидает практического воплощения [19]. Она основана на двухфотонном возбуждении светочувствительных веществ в каждом слое многослойной регистрирующей среды. Оперативная (реверсивная) оптическая память была реализована с использованием фотохромных диарилэтенов (ДАЭ 1) и органического флуорофора (феналенон  $\Phi$  1), а также явления индуктивно-резонансного переноса энергии возбуждения (FRET-эффект). Модуляция флуорес-

ценции феналенона  $\Phi$  1 достигалась попеременным облучением УФ и видимым излучением в результате фотохромных превращений диарилэтенов (схема 1, рис. 2). Считывание люминесцентного сигнала осуществлялось при возбуждении флуоресценции вне полос поглощения обеих форм диарилэтенов (420 нм).

Архивная оптическая память основана на необратимом фотопревращении нелюминесцентных хромонов во флуоресцирующие фотопродукты (схема 2, рис. 3).

Показано, что информационная емкость оптических дисков стандартного размера может превышать 2.5 Тбайт [19].

Для разработки устройств кодирования-декодирования оптической информации (оптические нейронные сети) представляют интерес гибридные мультихромные фотохромные системы [20]. Они обеспечивают разнообразие окрасок фотохромных соединений при фото- [21] и химическом [22] воздействии.

Продолжаются исследования по использованию фотохромных соединений для определения ионов металлов в жидких средах. Благодаря раз-

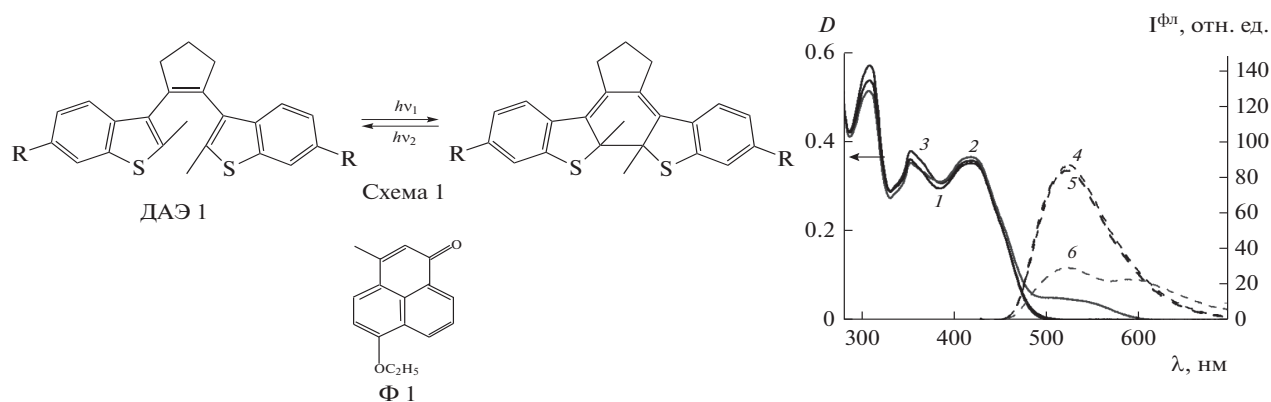


Рис. 2. Спектры поглощения (1–3) и флуоресценции (4–6) фотохромной ПММА пленки, содержащей феналенон ( $\Phi$  1) и диарилэтены (ДАЭ 1), до (1, 5) и после (2, 6) УФ облучения и последующего воздействия видимого света [3, 4].

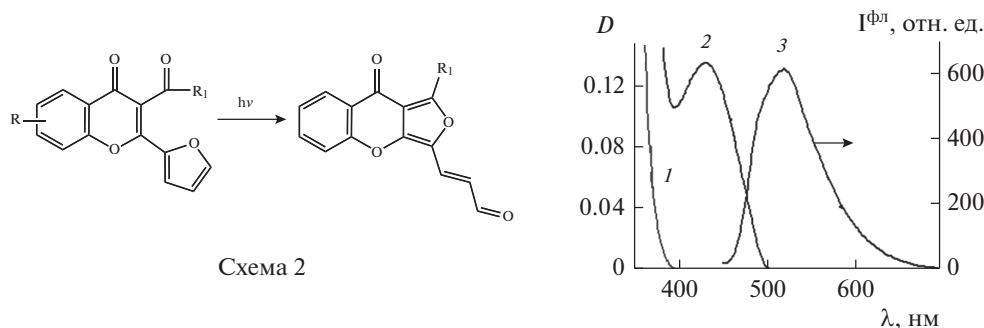
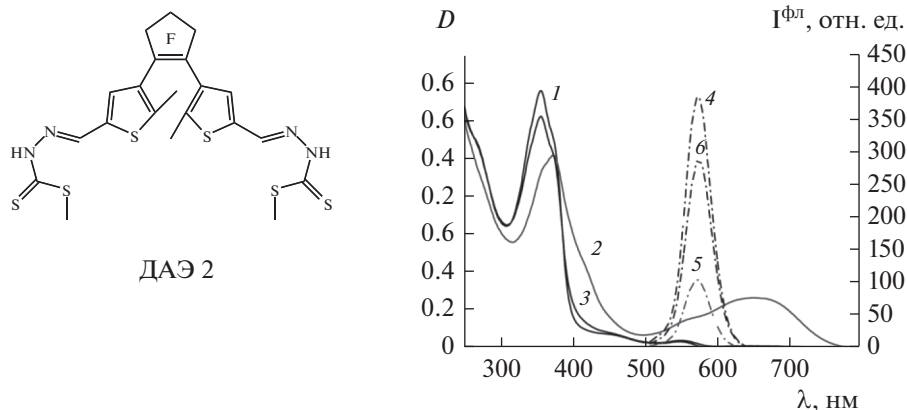


Рис. 3. Спектры поглощения (1, 2) и флуоресценции (3) хромона в полистирольной пленке толщиной 130 мкм.



**Рис. 4.** Спектры поглощения (1–3) и флуоресценции при возбуждении светом с длиной волны 500 нм (4–6) диарилэтена ДАЭ 2 с КТ CdSe/ZnS в хлороформе до (1, 4), после УФ (2, 5), затем видимым облучения (3, 6).

нообразию синтезированных фотохромных спиросоединений и хроменов возможно создание оптических сенсоров для определения ионов металлов с широким спектральным диапазоном и высокой селективностью, а также чувствительностью за счет люминесцентных свойств соединений [23–27].

Дальнейшие исследования направлены на разработку методов селективного определения ионов металлов в смеси ионов, содержащихся в водных растворах [28].

### Нанотехнологии

Среди основных современных тенденций развития фотохимии – создание фотохромных наночастиц [29]. Выявлена перспективность разработки и применения фотохромных наночастиц на основе спиросоединений (спиропиранов и спирооксазинов), а также диарилэтенных в виде нанодиагностов, собственно наночастиц и особенно систем типа “ядро–оболочка” с использованием наночастиц благородных металлов (Ag и Au), квантовых точек, диоксида кремния и наноалмазов [30]. Разработаны методики получения и изготовлены образцы твердофазных композитных Ag- и Au-содержащих наноструктурированных систем с оболочкой из молекул фотохромных диарилэтенных [30–32]. При использовании флуорофоров в составе фотохромных наночастиц они проявляют обратимую модуляцию не только флуоресценции, но и фотопроводимости, которая обусловлена фотоиндуцированным изменением сопряжения в молекулах фотохромных диарилэтенных [33]. Модуляция интенсивности флуоресценции достигается за счет FRET-эффекта, который обеспечивается перекрытием полос излучения флуорофора и поглощения фотоиндуцированной формы фотохромных соединений. Особый интерес представляет фотоиндуцированная модуляция

интенсивности излучения квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS (рис. 4) [34] и CdSe [35].

Недавно совместно с белорусскими учеными впервые были приготовлены и исследованы фотохромные полимерные наносферы, в которых молекулы фотохромных диарилэтенных ковалентно связаны с поверхностью КТ [36]. Такие наносферы характеризуются высокой стабильностью свойств и обеспечивают модуляцию интенсивности излучения КТ в соответствии с фотохромными превращениями.

Для создания светочувствительных оптоэлектронных устройств особый интерес представляют фотохромные наночастицы на основе фуллеренов, ковалентно связанных с молекулами спиропиранов [37–40] и диарилэтенных [41–43]. С использованием этих гибридных соединений получены и испытаны с положительным результатом образцы оптических полевых транзисторов [39]. В связи с этим представляют интерес полученные фотохромные наночастицы на основе графена и оксида графена [44, 45].

### Светоадаптивные покрытия

Фотохромные красители открывают возможности создания фотохромных тканей, меняющих окраску и ее интенсивность в зависимости от освещенности и спектрального состава активирующего излучения, для различных применений, в частности для создания многофункциональной одежды, камуфляжных покрытий [46]. Разработка последних зависит от результатов изыскания фотохромных соединений с отрицательным фотохромизмом, т.е. обесцвечивающихся под действием видимого излучения [47].

Впервые показана возможность создания полимерных покрытий с отрицательным фотохромизмом на основе комплексов молекул спиропи-

ранов с ионами металлов [48, 49]. Отрицательный фотохромизм проявляют водорастворимые спиропираны с длинноцепочечными заместителями [50]. С использованием синтезированных фотохромных систем разработаны образцы фотохромных материалов на бумажной и тканевой основе, которые характеризуются практически приемлемыми фотоиндуцированными изменениями окраски и скоростями фотообесцвечивания на солнечном свете [51].

Среди последних достижений следует обратить внимание на синтез новых фотохромов с отрицательным фотохромизмом из класса нитрилсодержащих соединений [52, 53]. Положение полос поглощения этих соединений, расположенных в видимой области спектра, зависит от природы заместителей. Отрицательный фотохромизм проявляют новые функционализированные спиропираны [54, 55].

#### *Биомедицинские технологии*

Фотохромные соединения с обратным фотохромизмом представляют большой интерес для биомедицинских исследований по причине высокой проницаемости видимого и близкого ИК излучения (650–900 нм) через биологические объекты.

На основе фотохромных спиропиранов, диарилэтанов и фульгимидов получены фотохромные ретинали и показана возможность их использования для создания искусственных аналогов природного бактериородопсина [56–58].

Применение фотохромных соединений в биомедицинских исследованиях становится одним из приоритетных направлений в области органической фотохромики [59, 60]. Наибольшие успехи достигнуты в разработке и применении фотохромных средств визуализации биобъектов и биопроцессов. Они находят применение в биосенсорике, в разработке фотоуправляемых биомембран и в реализации процессов доставки лекарств в организме. Перспективными представляются результаты разработки фотохромных нуклеотидов и пептидов, проявляющих фотоуправляемую биологическую и каталитическую активность в биологических объектах.

В качестве фотофармакологических агентов могут использоваться новые гибридные индолиновые спиропираны [61].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований в области органической фотохромики, полученные в ЦФ РАН, способствуют успешному развитию этого направления в фотохимии органических соединений.

В ходе исследований созданы научные основы и частично реализована разработка фотохромных материалов для модуляторов света и устройств трехмерной оптической памяти. Успешно развиваются исследования по созданию фотохромных наночастиц, гибридных фотохромных соединений, фотохромных систем с отрицательным фотохромизмом для инновационных приложений фотоники.

Достигнутые результаты были получены в сотрудничестве с учеными ИОХ РАН, ФИЦ ХФ РАН, ИПХФ РАН, ИОФ РАН, ИНЭОС РАН, МЦАИ РАН, ИБХФ РАН, РХТУ, ЮФУ, Института нефтехимии и катализа РАН, Института органического синтеза УрРАН, Уральского государственного лесотехнического университета, ОАО ЦНИТИ, Московской государственной академии тонкой химической технологии, Томского ГУ, Гродненского ГУ (Белоруссия), Белорусского ГУ (Белоруссия), Института физики полупроводников НАНУ (Украина), Средиземноморского университета, Франция, Университета П. Сабатье III, Франция.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Photochromic Materials: Preparation, Properties and Applications / Eds. Tian H. and Zhang J. Germany, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2016.
2. Теренин А.Н. Молекулярная фотоника красителей и родственных органических соединений. Л.: Наука, 1967. С. 616.
3. Савостьянова М.В., Воробьев Ф.Г., Поляков Ю.Н. и др. // Оптико-механ. пром. 1966. № 4. С. 9.
4. Савостьянова М.В., Чиков К.Н. // Оптико-механ. пром. 1966. № 11. С. 8.
5. Савостьянова М.В. // Труды ГОИ. 1968. Т. 36. В. 165. С. 70.
6. Лашков Г.И., Савостьянова М.В., Шабля А.В. и др. // В: Молекулярная фотоника. Л.: Наука, 1970. С. 299.
7. Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977. С. 279.
8. Barachevsky V.A. // J. Photochem. Photobil. A. 2008. V. 196. P. 180.
9. Барачевский В.А. // В: Центр фотохимии РАН. Фундаментальные и прикладные исследования. Итоги и перспективы / Под ред. М.В. Алфимова. М.: ООО “НПЦ «Маска»”, 2013. С. 349.
10. Barachevsky V.A. // J. Photochem. Photobil. A. 2018. V. 354. С. 61.

11. *Gromov S.P., Sergeev S.S., Fedorova O.A. et al.* Eur. Patent // EP 1044979. 2000 [RU № 99106201 A, 2001].
12. *Arsenov V.D., Gorelik A.M., Strokach Yu.P. et al.* Eur. Patent // EP 1044978. 2000 [RU № 99106202 A, 2001].
13. *Arsenov V.D., Gorelik A.M., Strokach Yu.P. et al.* Eur. Patent // EP 1038870. 2000 [RU № 99106203 A, 2001].
14. *Барачевский В.А., Айм А.О., Горелик А.М. и др.* // Рос. хим. журн. 2016. Т. LX. № 4. С. 24.
15. *Айм А.О., Барачевский В.А.* // Материалы XIV Всероссийской научной конференции “Технологии и материалы для экстремальных условий. МЦАИ РАН. М., 2019. С. 19297.
16. *Голубков С.С., Баранов О.В., Валова Т.М. и др.* // ВМС. Серия Б. 2021. Т. 63. № 1. С. 66.
17. *Torres-Pierna H., Ruiz D., Roscini C.* // Mater. Horiz. 2020. V. 7. P. 2749.
18. *Yamashita H., Ikezawa T., Kobayashiet Y. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2015. V. 137. Is. 15. P. 4952.
19. *Barachevsky V.A., Krayushkin M.M., Kiyko V.V.* // In: Photon-Working Switches. Eds. *Yokoyama Y., Nakatani K.* Springer Japan KK. 2017. P. 181.
20. *Liubimov A.V., Venidiktova O.V., Valova T.M. et al.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2018. V. 17. P. 1365.
21. *Higashiguchi K., Matsuda K., Tanifuji N. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2005. V. 127. Is. 25. P. 8922
22. *Qin T., Han J., Geng Y. et al.* // Chem.-Eur. J. 2018. V. 24. Is. 48. P. 12539.
23. *Barachevsky V.A.* // Rev. J. Chem. 2013. V. 3. P. 52.
24. *Валова Т.М., Венидиктова О.В., Барачевский В.А.* // Рос. хим. журн. 2020. Т. LXIV. № 3. С. 41.
25. *Chernyshev A.V., Solov'eva E.V., Voloshin N.A. et al.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2021. V. 413. Art. 113259.
26. *Fedorov Y.V., Shepel N.E., Peregodov A.S. et al.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2019. V. 371. P. 453.
27. *Smolentsev A.B., Glebov E.M., Korolev V.V. et al.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2013. V. 12. P. 1803.
28. *Zhang H., Zhong T., Jiang N. et al.* // Spectrochim. Acta. Part A. 2020. V. 233. Art. 118191.
29. *Barachevsky V.A.* // Org. Photonics. Photovolt. 2015. V. 3. P. 8.
30. *Барачевский В.А.* // Кристаллография. 2018. V. 63. № 2. P. 293.
31. *Василюк Г.Т., Аскирка В.Ф., Герман А.Е. и др.* // Журн. прикл. спектр. 2017. Т. 84. № 4. С. 56.
32. *Василюк Г.Т., Маскевич С.А., Аскирка В.Ф. и др.* // Журн. прикл. спектр. 2017. Т. 84. № 5. С. 710.
33. *Barachevsky V.A., Venidiktova O.V., Kobeleva O.I. et al.* // Conf. Publ. Nanotechnology. 2015 IEEE 15th Internat. Conf. 2015. P. 358.
34. *Барачевский В.А., Кобелева О.И., Венидиктова О.В. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 4. С. 820.
35. *Barachevsky V.A., Venidiktova O.V., Valova T.M. et al.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2019. V. 18. P. 2661.
36. *Scherbovich A.A., Maskevich S. A., Karpach P.V. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2020. V. 124. № 49. P. 27064.
37. *Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Tulyabaev A.R et al.* // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 71151.
38. *Pomogaev V.A., Barachevsky V.A., Tuktarov A.R. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2018. V. 122. № 2. P. 505.
39. *Tuktarov A.R., Salikhov R.B., Khuzin A.A. et al.* // Mend. Commun. 2019. V. 29. P.160.
40. *Khuzin A.A., Tuktarov A.R., Barachevsky V.A. et al.* // RSC Adv. 2020. V. 10. P. 15888.
41. *Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Akhmetov A.R. et al.* // Tetrahedr. Lett. 2015. V. 56. № 52. P. 7154.
42. *Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Akhmetov A.R. et al.* // Mend. Commun. 2016. V. 26. P. 143.
43. *Туктаров А.Р., Ахметов А.Р., Хузин А.А. и др.* // Журн. Орг. хим. 2017. Т. 53. № 6. P. 874.
44. *Венидиктова О.В., Барачевский В.А., Хузин А.А. и др.* // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 6. С. 1025.
45. *Венидиктова О.В., Горелик А.М., Барачевский В.А. и др.* // Рос. хим. журн. 2020. Т. LXIV. № 3. С. 33.
46. *Parhizkar M., Zhao Y.* // In: Handbook of Smart Textiles. Ed. Tao X. Singapore: Springer Science + Business Media. 2015. P. 155.
47. *Barachevsky V.A.* // Rev. J. Chem. 2017. V. 7. № 3. P. 334.
48. *Барачевский В.А., Валова Т.М.* // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. № 3. P. 377.
49. *Барачевский В.А., Валова Т.М.* // Журн. прикл. химии. 2021. Т. 94. № 3. С. 44.
50. *Барачевский В.А., Валова Т.М., Атабекян Л.С. и др.* // Химия высоких энергий. 2017. Т. 51. № 6. С. 436.
51. *Мартынов И.Ю., Савельев М.А., Венидиктова О.В. и др.* // Рос. хим. журн. 2016. Т. LX. № 4. P. 39.
52. *Belikov M.Yu., Ievlev M.Yu., Fedoseev S.V. et al.* // New J. Chem. 2019. V. 43. P. 8414.
53. *Belikov M.Yu., Ievlev M.Yu., Fedoseev S.V. et al.* // Research. Chem. Intermed. 2020. V. 46. P. 3477.
54. *Metelitsa A., Chernyshev A., Voloshin N. et al.* // Dyes and Pigments. 2021. V. 186. Atr. 109070.
55. *Pugachev A.D., Ozhogin I.V., Lukyanova M.B. et al.* // J. Molecul. Struct. 2021. V. 1229. Art. 129615.
56. *Demina O.V., Varfolomeev S.D., Lukin A.Y. et al.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005. V. 431. P. 509.
57. *Belikov N., Lukin A., Laptev A. et al.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2008. V. 196. P. 262.
58. *Barachevsky V.A., Khodonov A.A., Belikov N.E. et al.* // Dyes and Pigments. 2012. V. 92. P. 831.
59. *Cheng H., Yoon J., Tian H.* // Coord. Chem. Rev. 2018. V. 372. P. 66.
60. *Барачевский В.А.* // В: Материалы 13 Всероссийской научной конференции “Технологии и материалы для экстремальных условий (прогнозные исследования и инновационные разработки)”, М.: МЦАИ РАН, 2018. С. 10.
61. *Ozhogin I.V., Zolotukhin P.V., Mukhanov E.L. et al.* // Bioorgan. Medic. Chem. Lett. 2021. V. 31. Art. 127709.