

**СКЕЛЕТНАЯ ФОТОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕГРУППИРОВКА
7,9-ДИ-ТРЕТ-БУТИЛ-1-ОКСАСПИРО[4.5]ДЕКА-6,9-ДИЕН-2,8-ДИОНА****А.В. Гутнов¹, О.П. Демидов², П.Н. Чаликиди¹, В.Т. Абаев¹**

¹Северо-Осетинский государственный университет, ул. Ватутина, 44-46, г. Владикавказ, Российская Федерация, 362025

²Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, 1, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017

E-mail: gutnov@mail.ru

Обнаружено необычное скелетное фотохимическое превращение 7,9-ди-трет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона (2) в 5,7-ди-трет-бутилспиро[2.5]окта-4,7-диен-6-он (3) и 7,10-ди-трет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-7,9-диен-2,6-дион (4) при облучении разбавленного гексанового раствора (2) УФ-светом высокого давления в течение 1 ч. Продукты были выделены колоночной хроматографией на силикагеле с выходами 74% (соединение 4) и 14% (соединение 3). Оба продукта надежно охарактеризованы методами ЯМР и HRMS. Структура (4) была дополнительно подтверждена методом рентгеноструктурного анализа. По предложенному механизму образование соединения (3) является предположительно гомолитическим, и включает в себя гомолиз лактонной C-O связи исходного соединения (2), выброс CO₂ и внутримолекулярную рекомбинацию бирадикала с образованием циклопропильного кольца. Предположительный механизм образования оксаспиро-диенона (4) из (2) также может иметь как радикальный, так и ионный характер. Было спекулятивно предположено, что начало реакции в какой-то степени напоминает ионную циклизацию Назарова и проходит через стадию электроциклизации и образования оксиаллильных катионов циклопентенильного типа, которые в результате череды превращений сопровождающихся переносом зарядов или радикалов и глубокой перестройкой порядка связей приводят к конечному продукту (4). Исходное оксаспиро-соединение (2) является известным продуктом окислительного превращения 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовой кислоты (1) и ее эфиров, широко распространенных промышленных антиоксидантов для пластмасс и резин. (1), известный как фенозановая кислота или дибуфелон, также является нейропротекторным и антиэпилептическим лекарственным средством, что делает работу интересной как с точки зрения экологии, так и контроля качества при производстве этого фармацевтического препарата.

Ключевые слова: 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовая кислота, 2,5-циклогексадиеноны, пространственно затрудненные фенолы, фотохимия, скелетная перегруппировка

**SKELETAL PHOTOCHEMICAL REARRANGEMENT
OF 7,9-DI-TERT-BUTYL-1-OXASPIRO[4.5]DECA-6,9-DIEN-2,8-DIONE****A.V. Gutnov¹, O.P. Demidov², P.N. Chalikidi¹, V.T. Abaev¹**

¹North Ossetian State University, Vatulina St., 44-46, Vladikavkaz, Russian Federation, 362025

²Department of Chemistry, North Caucasus Federal University, Pushkin str., 1, Stavropol, Russian Federation, 355017

E-mail: gutnov@mail.ru

An unusual skeletal photochemical transformation of 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-dien-2,8-dione (2) to 5,7-di-tert-butylspiro[2.5]octa-4,7-dien-6-one (3) and 7,10-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-7,9-dien-2,6-dione (4) was discovered after irradiation of the dilute hexane solu-

tion of (2) with high-pressure UV light for 1 h. The products were isolated by column chromatography on silica gel in 74% (compound 4) and 14% (compound 3) yields. Both products were reliably characterized by NMR and HRMS techniques. The structure of (4) was further confirmed by X-ray diffraction analysis. According to the proposed mechanism, the formation of compound (3) is presumably homolytic and involves homolysis of the lactone C-O bond of the starting compound (2), CO₂ release and intramolecular recombination of the biradical to form a cyclopropyl ring. The putative mechanism for the formation of oxaspiro-dienone (4) from (2) could also be either radical or ionic in nature. It was speculatively assumed that the beginning of the reaction to some extent resembles the ionic Nazarov cyclization and proceeds through the stage of electrocyclization and formation of oxyallyl cations of cyclopentenyl type, which as a result of a series of transformations accompanied by charge or radical transfer and deep rearrangement of bond order leads to the final product (4). The initial oxaspiro compound (2) is a known oxidative transformation product of 3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenylpropionic acid (1) and its esters, widespread industrial antioxidants for plastics and rubbers. (1), also known as phenosanoic acid or dibufelone, is used as a neuroprotective and antiepileptic drug, making the work interesting from both environmental and quality control perspectives in the production of this pharmaceutical.

Keywords: 3,5-di-tert-butyl-4-hydroxyphenylpropionic acid, 2,5-cyclohexadienones, sterically hindered phenols, photochemistry, skeletal rearrangement

Для цитирования:

Гутнов А.В., Демидов О.П., Чаликиди П.Н., Абаев В.Т. Скелетная фотохимическая перегруппировка 7,9-ди-трет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 2. С. 3–7. DOI: 10.6060/rcj.2025692.1.

For citation:

Gutnov A.V., Demidov O.P., Chalikidi P.N., Abaev V.T. Skeletal photochemical rearrangement of 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-dien-2,8-dione. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 2. P. 3–7. DOI: 10.6060/rcj.2025692.1.

ВВЕДЕНИЕ

3,5-Ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовая кислота и ее эфиры используются в качестве антиоксидантов в различных промышленных областях, таких как производство пластмасс, резины и смазочных материалов. Их использование в качестве добавки в пищевые продукты также одобрено регулирующими органами во многих странах. В 2019 г. 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовая кислота была допущена на российский рынок под названием Дибуфелон® (фенозановая кислота) в качестве препарата для лечения эпилепсии. Лекарство также оказывает нейропротекторное действие, что проявляется улучшением интеллектуально-мнестических и когнитивных функций у пациентов с эпилепсией, способствует уменьшению неврологического дефицита и улучшению повседневной двигательной активности. В этой связи выделение и идентификация продуктов превращений этого класса затрудненных фенолов может представлять большой научный, экологический и фармацевтический интерес, особенно учитывая их потенциальную способность вызывать проблемы

со здоровьем. Понимание того, как 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовая кислота и ее производные разрушаются с течением времени и в различных условиях, может помочь понять профиль ее безопасности и потенциально определить способы повышения ее стабильности в различных областях применения. В конечном счете, выявление и характеристика продуктов ее распада может пролить свет на потенциальные риски, связанные с их воздействием на человека через продукты питания или другие источники.

Наиболее известным в настоящее время продуктом окислительного распада 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовой кислоты и ее эфиров является 7,9-ди-трет-бутил-1-оксаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион (2), чей синтез хорошо задокументирован в литературе в различных вариантах [1–3] исходя из соответствующего метилового эфира (1) (рис. 1).

Синтез в целом включает в себя обработку раствора субстрата (1) синглетным кислородом (O₂ при облучении УФ-светом) и проходит через стадии образования перекиси хинола А и хинола Б (после восстановления), завершаясь лактонизацией в це-

левой продукт (2). Синтез может проводиться как постадийно, с выделением промежуточных продуктов, так и одностадийно, напрямую от (1) к (2).

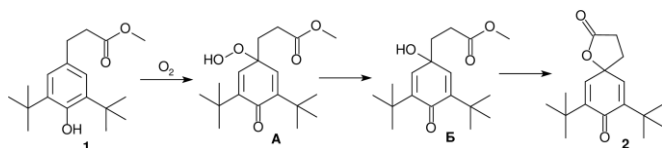


Рис. 1. Синтез 7,9-ди-трет-бутил-1-окаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона (2)

Fig. 1. Synthesis of 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-dien-2,8-dione (2)

Продукт (2) представляет собой навязчивую примесь, которая постоянно обнаруживается хроматографически в аналитических образцах природного и искусственного происхождения [4-7] и источником которой большей частью является использование пластиковых вайлов содержащих 3,5-ди-трет-бутил-4-гидроксифенилпропионовую кислоту и ее эфиры в качестве стабилизаторов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Спектры ЯМР записывали на спектрометре Bruker Avance HD 400 (^1H , 400 МГц; ^{13}C , 101 МГц) при 298 К. Химические сдвиги приведены в ppm относительно остатков ^1H и ^{13}C дейтерированного растворителя. Масс-спектры были получены на приборе Bruker maXis UHR-TOF (ионизация электрораспылением). Точки плавления определялись на приборе REACH Devices. Контроль реакции осуществлялся на газовом хроматографе Thermo Scientific TRACE 1300 с масс-селективным детектором. Реагенты и растворители были технического качества и использовались без дополнительной очистки. 7,9-Ди-трет-бутил-1-окаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион (2) был получен по известной методике [1]. Кристаллографические данные для структуры 4 получены на дифрактометре Agilent SuperNova с использованием микрофокусного источника рентгеновского излучения с медным анодом и двумерного ПЗС-детектора Atlas S2. Кристалл орторомбический, пространственная группа Fdd2 $a = 39,8343(3)$ Å, $b = 26,6967(2)$ Å, $c = 6,06690(10)$ Å, $V = 6451,81(13)$ Å³, $\text{C}_{17}\text{H}_{24}\text{O}_3$, $Z = 16$. Всего измерено 61639 отражений, из них независимых 3261. Отражения были собраны и параметры элементарной ячейки определены и уточнены с помощью специализированного пакета программ CrysAlisPro [8]. Структуры расшифрованы с помощью программы ShelXT [9] и уточнены с помощью программы ShelXL [10]. Атомы водорода включены в уточнение в модели «наездника» в изотропном приближении с зависимыми тепловыми

параметрами. Окончательные параметры уточнения: R_1 0,0311, wR_2 0,0880 [для отражений с $I > 2\sigma(I)$], R_1 0,0313, wR_2 0,0883 (для всех отражений). Молекулярную графику для структуры 4 выполняли с помощью пакета программного обеспечения Olex2 (версия 1.5) [11]. Дополнительные кристаллографические данные для этой статьи (CCDC № 2416034) можно получить в Кембриджском центре кристаллографических данных, <http://www.ccdc.cam.ac.uk>.

5,7-Ди-трет-бутилспиро[2.5]окта-4,7-диен-6-он (3) и 7,10-ди-трет-бутил-1-окаспиро[4.5]дека-7,9-диен-2,6-дион (4). 7,9-ди-трет-бутил-1-окаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-дион (2) (0,276 г, 1 ммоль) растворили в гексане (500 мл) под защитным слоем аргона в 1-литровой круглодонной трехгорлой колбе из стекла пирекс, снабженной магнитной мешалкой, обратным холодильником и термометром. Облучение проводили при помощи ртутно-кварцевой лампы высокого давления ДРШ-500М, расположенной у стенки сосуда. В течение 1 ч наблюдалась полная конверсия субстрата. По окончании реакции растворитель удалялся в вакууме и маслянистый остаток хроматографировался на силикагеле в системе петролейный эфир - этилацетат 5:1. Первым элюировался продукт (3) с $R_f = 0,7$, затем продукт (4) с $R_f = 0,4$. Собранные фракции концентрировались в вакууме. Было выделено 205 мг (74 % выхода) (4) и 32 мг (14 % выхода) (3). Соединение (3) представляло собой медленно кристаллизующееся бесцветное масло. Соединение (4) было перекристаллизовано из смеси гексан-этилацетат, чтобы получить кристаллы, подходящие для рентгеноструктурного анализа.

(3): ^1H ЯМР (DMCO-D_6): 6,33 (синглет, 2H_{Ar}), 1,64 (синглет, 4H_{CH_2}), 1,19 (синглет, $18\text{H}_{\text{t-Bu}}$). MS: 232, 217, 203, 189, 175 (100%).

(4): $T_{\text{пл}}$ 132 °C; ^1H ЯМР (CDCl_3): 6,79 (дублет, $J = 6.9$ Hz, 1H_{Ar}), 6,07 (дублет, $J = 6.8$ Hz, 1H_{Ar}), 2,63 – 2,42 (мультиплет, 3H_{CH_2}), 2,32 – 2,19 (мультиплет, 1H_{CH_2}), 1,18 (синглет, $9\text{H}_{\text{t-Bu}}$), 1,16 (синглет, $9\text{H}_{\text{t-Bu}}$). ^{13}C ЯМР (CDCl_3): 199,92, 176,45, 157,36, 140,82, 135,93, 117,56, 91,16, 37,42, 34,05, 30,05, 28,84, 28,77, 24,64. Масс-спектр высокого разрешения ($[\text{M}+\text{Na}]^+$): найдено 299, 1609, рассчитано 299, 1618.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Работая с образцами 7,9-ди-трет-бутил-1-окаспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона (2) мы обратили внимание на их высокую чувствительность в отношении света даже в кристаллическом состоянии. Для выяснения характера этого разложения образец (2) был растворен в гексане в инертной ат-

мосфере и подвергнут облучению УФ-светом высокого давления в течение 1 ч, до полной конверсии (2). Реакционная смесь состояла из двух продуктов, которые были выделены хроматографически и охарактеризованы как (3) и (4) (рис. 2).

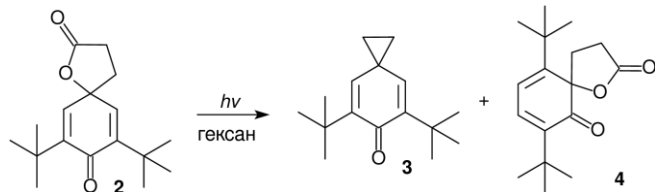


Рис. 2. Фотохимическое превращение 7,9-ди-трет-бутил-1-ок-аспири[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона (2)

Fig. 2. Photochemical transformation of 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-dien-2,8-dione (2)

5,7-Ди-трет-бутилспиро[2.5]окта-4,7-диен-6-он (3) оказался известным веществом, полученным ранее различными методами и надежно охарактеризованным [12, 13]. Механизм его образования является предположительно гомолитическим, и включает в себя гомолиз лактонной С-О связи (В), выброс CO_2 и рекомбинацию бирадикала (Г) с образованием циклопропильного кольца (рис. 3). Начальная стадия подобного распада не является чем-то беспрецедентным. В частности, под действием УФ излучения или солнечного света происходит известный разрыв С-О связи пиранового кольца нафтопиранов (хроменов) [14, 15].

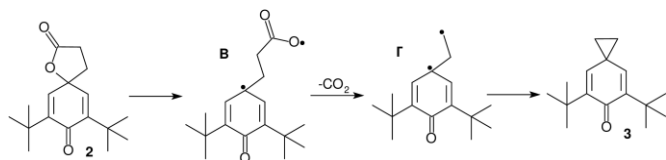


Рис. 3. Механизм образования 5,7-ди-трет-бутил-спиро[2.5]окта-4,7-диен-6-она (3)

Fig. 3. Mechanism of formation for 5,7-di-tert-butylspiro[2.5]octa-4,7-dien-6-one (3)

Установление структуры второго продукта (4) оказалось сложнее. С одной стороны, данные ЯМР (^1H , ^{13}C) и масс-спектрологии указывали на то, что это соединение должно быть очень похоже на исходный (2) и являться, возможно, его изомером, так как единственным их различием по данным этих двух методов было несимметричное расположение *трет*-бутильных групп в продукте (4), в отличие от полной спектральной симметрии в исходном диеноне (2). К счастью, продукт (4) оказался хорошо кристаллизующимся твердым соединением, и нам удалось прояснить его строение рентгеноструктурным анализом (рис. 4).

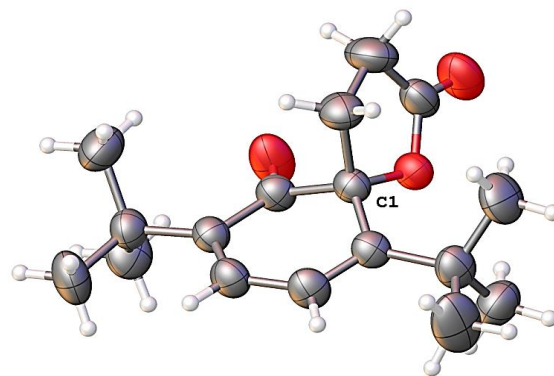


Рис. 4. Рентгеноструктурный анализ 7,10-ди-трет-бутил-1-ок-аспири[4.5]дека-7,9-диен-2,6-диона (4) (CCDC 2416034)

Fig. 4. X-ray of 7,10-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-7,9-dien-2,6-dione (4) (CCDC 2416034)

Отметим, что в кристаллическом состоянии спиро-атом углерода C1 отклоняется от плоскостей, образованных оставшимися пятью атомами ароматического и четырьмя атомами фуранонового фрагментов на 0,376(3) Å и 0,385(3) Å, соответственно. При этом угол скручивания между этими плоскостями составляет 80,33°.

Механизм образования диенона (4) также может носить как радикальный, так и ионный характер. Мы спекулятивно предполагаем, что начало реакции в какой-то степени напоминает ионную циклизацию Назарова [16] и проходит через стадию электроциклизации и образования оксиаллильных катионов циклопентенильного типа, которые в результате череды превращений с переносом зарядов и связей приводят к конечному продукту (4) (рис. 5).

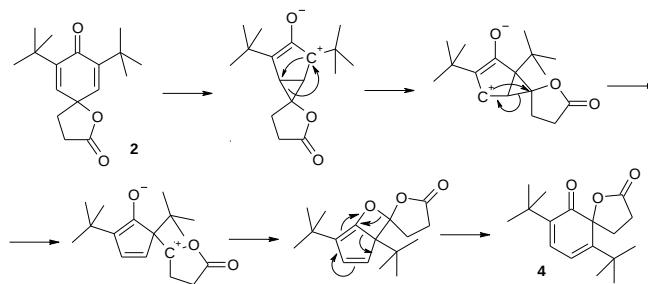


Рис. 5. Механизм образования 7,10-ди-трет-бутил-1-ок-аспири[4.5]дека-7,9-диен-2,6-диона (4)

Fig. 5. Mechanism of formation for 7,10-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-7,9-dien-2,6-dione (4)

Необходимо отметить, что хотя фотохимические перегруппировки не являются редкостью в ряду 2,5-циклогексадиенонов [17-22], все же нам не удалось найти похожего примера, со столь же глубокой перестройкой всего циклогексанового скелета.

ВЫВОДЫ

Было обнаружено необычное скелетное фотохимическое превращение 7,9-ди-tert-бутил-1-окспиро[4.5]дека-6,9-диен-2,8-диона (2) в 5,7-ди-tert-бутилспиро[2.5]окта-4,7-диен-6-он (3) и 7,10-ди-tert-бутил-1-окспиро[4.5]дека-7,9-диен-2,6-дион (4). Если механизм образования (3) предполагается гомолитическим (гомолиз лактонной C-O связи, выброс CO₂ и рекомбинацию бирадикала с образованием циклопропильного кольца), то образование (4) очевидно протекает по многоступенчатому ионному механизму сопровождающемуся полной перестройкой молекулы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

- Volod'kin A.A., Malysheva R.D., Ershov V.V. Oxidation of 4-substituted 2,6-di-tert-butylphenols by oxygen in alkaline medium. *Russ. Chem. Bull.* 1982. V. 31. P. 1417–1420. DOI: 10.1007/BF00954163.
- Jones K.M., Hillringhaus T., Klusmann M. A singlet oxygen approach to oxaspirocycles. *Tetrahedron Letters*. 2013. V. 54. N 25. P. 3294–3297. DOI: 10.1016/j.tetlet.2013.04.064.
- Liang Y.F., Wu K., Liu Z., Wang X., Liang Y., Liu C., Jiao N. CsOH catalyzed aerobic oxidative synthesis of p-quinols from multi-alkyl phenols under mild conditions. *Sci. China Chem.* 2015. V. 58. P. 1334–1339. DOI: 10.1007/s11426-015-5363-4.
- Lopez-Avila V. Mass spectral studies of 7,9-di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione. *Organic Mass Spectrometry*. 1987. V. 22. N 8. P. 557–558. DOI: 10.1002/oms.1210220816.
- Batsalova T., Basheva D., Bardarov K., Bardarov V., Dzhambazov B., Teneva I. Assessment of the cytotoxicity, antioxidant activity and chemical composition of extracts from the cyanobacterium *Fischerella major* Gomont. *Chemosphere*. 2019. V. 218. P. 93–103. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.097.
- Witkowska-Banaszcak E., Długaszevska J. Essential oils and hydrophilic extracts from the leaves and flowers of *Succisa pratensis* Moench. and their biological activity. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2017. V. 69. N 11. 1531–1539. DOI: 10.1111/jphp.12784.
- Perveen K., Alwathnani H.A. Antifungal Activity of Methanol, Acetone and Diethyl Ether Extracts of Cyanobacteria Against Plant Pathogenic Fungi. *Asian Journal of Chemistry*. 2013. V. 25. N 13. P. 7531–7534. DOI: 10.14233/ajchem.2013.15062.
- CrysAlisPro, version 1.17.1.38.41, Rigaku Oxford Diffraction, Oxford, 2015.
- Sheldrick G.M. SHELXT – Integrated space-group and crystal-structure determination. *Acta Crystallogr., Sect. A: Found. Adv.* 2015. V. 71. N 1. P. 3–8. DOI: 10.1107/S2053273314026370.
- Sheldrick G.M. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallogr., Sect. C: Struct. Chem.* 2015. V. 71. N 1. P. 3–8. DOI: 10.1107/S2053229614024218.
- Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J., Howard J.A.K., Puschmann H. OLEX2: a complete structure solution, refinement and analysis program. *J. Appl. Crystallogr.* 2009. V. 42. P. 339–341. DOI: 10.1107/S0021889808042726.
- Volod'kin A.A., Ershov V.V., Volod'kina V.I., Ostapets-Sveshnikova G.D., Pobedimskii D.G. Reactivity of sterically hindered phenols, containing the CX-CY group in the para-position. *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Division of Chemical Science*. 1971. V. 20. N 2. P. 315–321. DOI: 10.1007/BF00869032.
- Woolhouse A.D. 1,3-Dipolar cycloaddition to a 1,4-quinone methide: 2,6-Di-tert-butyl-4-methylenecyclohexa-2,5-dienone. *Australian Journal of Chemistry*. 1977. V. 30. P. 1145–1152. DOI: 10.1071/CH9771145.
- Горелик А.М., Венидиктова О.В., Айт А.О. Фотохромные гибридные хромены с обратимой модуляцией флуоресценции на основе кислородсодержащих гетероциклов. *Рос. хим. жс. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. T. LXVIII. № 1. С. 13–17. DOI: 10.6060/RJ.2024681.3. Gorelik A.M., Venidiktova O.V., Ayt A.O. Hybrid photochromic chromenes with reversible modulation of fluorescence based on hydrogen containing heterocyclic compounds. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 1. P. 1317. DOI: https://doi.org/10.6060/RJ.2024681.3.
- Барачевский В.А. Отрицательный фотохромизм: последние достижения. *Рос. хим. жс. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. T. LXV. № 3. С. 6–18. DOI: 10.6060/rcj.2021653.1. Barachevsky V.A. Negative photochromism: recent advances. *Ros. Khim. Zh.* 2021. V. 65. N 3. P. 618. DOI: https://doi.org/10.6060/rcj.2021653.1.
- Vinogradov M.G., Turova O.V., Zlotin S.G. Nazarov reaction: current trends and recent advances in the synthesis of natural compounds and their analogs. *Org. Biomol. Chem.* 2017. V. 15. P. 8245–8269. DOI: 10.1039/C7OB01981E.
- Margaretha P. Photochemistry of 4,4-Dialkoxy-2,5-cyclohexadienones. *Helv. Chim. Acta*. 1976. V. 59. N 2. P. 661–664. DOI: 10.1002/hlca.19760590232.
- Schultz A.G., Lavieri F.P., Macielag M., Plummer M. 2,5-Cyclohexadien-1-one to bicyclo[3.1.0]hexenone photorearrangement. Development of the reaction for use in organic synthesis. *J. Am. Chem. Soc.* 1987. V. 109. N 13. P. 3991–4000. DOI: 10.1021/ja00247a027.
- Schultz A.G., Reilly J. 2,5-Cyclohexadien-1-one photochemistry. Reversible type B oxyallyl zwitterion formation from photorearrangements of bicyclo[3.1.0]hex-3-en-2-ones. *J. Am. Chem. Soc.* 1992. V. 114. N 13. P. 5068–5073. DOI: 10.1021/ja00039a017.
- Schuster D.I., Patel D.J. Photochemistry of 4-methyl-4-trichloromethyl-2,5-cyclohexadienone. II. Mechanistic studies and characterization of the excited state. *J. Am. Chem. Soc.* 1968. V. 90. N 19. P. 5145–5152. DOI: 10.1021/ja01021a016.
- Matsuura T., Meng J.B., Ito Y., Irie M., Fukuyama K. Solid state photochemistry of 2,5-cyclohexadienones. *Tetrahedron*. 1987. V. 43. N 11. P. 2451–2456. DOI: 10.1016/S0040-4020(01)81650-1.
- Matsuura T., Sata Y., Ogura K., Mori M. Protoinduced reactions. XXIII. A novel photorearrangement of santonin in the solid state. *Tetrahedron Lett.* 1968. V. 9. N 44. P. 4627–4630. DOI: 10.1016/S0040-4039(00)72896-6.

Поступила в редакцию (Received) 15.01.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 25.04.2025