

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 2-ИЛИДЕН-1,3-ДИТИОЛАНОВ

К.В. Липин, С.В. Федосеев, С.А. Блинов

Константин Владимирович Липин (ORCID 0000-0002-3643-9387)*

Кафедра химической технологии и защиты окружающей среды, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: lipinkost@mail.ru *

Сергей Владимирович Федосеев (ORCID 0000-0002-0749-2613)

Кафедра органической и фармацевтической химии, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: sergey.fedoseev88@gmail.com

Сергей Александрович Блинов (ORCID 0009-0009-9001-6033)

Межкафедральная учебная лаборатория, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр. Московский, 15, Чебоксары, Российская Федерация, 428015

E-mail: blinov.s.a.work@gmail.com

Целью данной работы является изучение фотопоглощающих свойств 2-илиден-1,3-дитиоланов. На сегодняшний день существует несколько способов синтеза целевых 1,3-дитиоланов: взаимодействие галогеналканов с дицианоэтен-1,1-бистиолами натрия, трехкомпонентный one-pot метод, синтез с применением ПАВ. Из всего многообразия методов для синтеза целевых 1,3-дитиоланов был выбран способ с наибольшими выходами, заключающийся во взаимодействии хлоралканов с дицианоэтен-1,1-бистиолами натрия. Для изучения влияния заместителей на оптические свойства были отобраны и синтезированы шесть 1,3-дитиоланов. Из этих соединений был выбран «модельный» образец для изучения сольватохромизма – 2-(1,3-дитиолан-2-илиден)малононитрил. Как показали исследования, растворитель не оказывает заметного влияния на оптическую активность. Замена водорода в дитиолановом цикле на хлор или метильную группу не оказывает значительного влияния на интенсивность и смещение сигнала. Максимум поглощения наблюдается при длине волны 305-308 нм. Замена одной из цианогрупп при двойной связи 2-илиден-1,3-дитиолана также не оказывает заметного влияния на оптические свойства. Смещение максимума поглощения удалось добиться при замене обоих заместителей при двойной связи. Батохромный сдвиг наблюдается при использовании 2-(1,3-дитиолан-2-илиден)-5,5-диметилциклогексан-1,3-диона. Максимум поглощения в этом случае проявляется при 332 нм. Все изученные 1,3-дитиоланы обладают фотостабилизирующими свойствами. При этом максимум поглощения у большинства представителей наблюдается при 306-308 нм, что относится к наиболее опасному и разрушающему ультрафиолетовому излучению типа В. Путем варьирования заместителей можно добиться батохромного сдвига максимума поглощения в область ультрафиолета А.

Ключевые слова: 1,3-дитиогетероциклы, 1,3-дитиоланы, серосодержащие гетероциклы

Для цитирования:

Липин К.В., Федосеев С.В., Блинов С.А. Синтез и оптические свойства 2-илиден-1,3-дитиоланов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 20–26. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.6987.

For citation:

Lipin K.V., Fedoseev S.V., Blinov S.A. Synthesis and optical properties of 2-ylidene-1,3-dithiolanes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 9. P. 20–26. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.6987.

SYNTHESIS AND OPTICAL PROPERTIES OF 2-YLIDENE-1,3-DITHIOLANES

K.V. Lipin, S.V. Fedoseev, S.A. Blinov

Konstantin V. Lipin (ORCID 0000-0002-3643-9387)*

Department of Chemical Technology and Environmental Protection, Chuvash State University, Moskovskiy ave., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: lipinkost@mail.ru*

Sergey V. Fedoseev (ORCID 0000-0002-0749-2613)

Department of Organic and Pharmaceutical Chemistry, Chuvash State University, Moskovskiy ave., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: sergey.fedoseev88@gmail.com

Sergey A. Blinov (ORCID 0009-0009-9001-6033)

Interdepartmental Educational Laboratory, Chuvash State University, Moskovskiy ave., 15, Cheboksary, 428015, Russia

E-mail: blinov.s.a.work@gmail.com

The purpose of this work is to study the photoabsorbing properties of 2-ylidene-1,3-dithiolane. Today, there are several methods for the synthesis of target 1,3-dithiolane: the interaction of haloalkanes with sodium dicyanoethene-1,1-bisthiolates, the three-component one-pot method, synthesis using surfactants. Of the variety of methods for the synthesis of target 1,3-dithiolane, the method with the highest yields was chosen, which consists in the interaction of chloroalkanes with sodium dicyanoethene-1,1-bisthiolates. To study the effect of substituents on the optical properties, six 1,3-dithiolane were selected and synthesized. From these compounds, a “model” sample was chosen for studying solvatochromism – 2-(1,3-dithiolan-2-ylidene)malononitrile. It was shown that the solvent does not have a noticeable effect on the optical activity. Replacing the hydrogen in the dithiolane ring with a chlorine or methyl group did not significantly affect the intensity or shift of the signal. Maximum absorption was observed at a wavelength of 305-308 nm. Replacing one of the cyano groups at the double bond of 2-ylidene-1,3-dithiolane also did not have a noticeable effect on the optical properties. A shift in the absorption maximum was achieved by replacing both substituents at the double bond. A bathochromic shift was observed when using 2-(1,3-dithiolan-2-ylidene)-5,5-dimethylcyclohexane-1,3-dione. The absorption maximum in this case appeared at 332 nm. All studied 1,3-dithiolane had photostabilizing properties. At the same time, the absorption maximum for most representatives was observed at 306-308 nm, which belongs to the most dangerous and destructive ultraviolet radiation of type B. By varying the substituents, a bathochromic shift of the absorption maximum to the ultraviolet A region was achieved.

Key words: 1,3-dithioheterocycles, 1,3-dithiolanes, sulfur containing heterocycles

ВВЕДЕНИЕ

Серосодержащие соединения распространены в природе и часто встречаются в синтезах гетероциклов с ценными свойствами. Отдельно можно выделить производные 2-илиден-1,3-дителиана, которые применяются для создания материалов с полезными электронными и оптическими свойствами [1-8].

Так, на их основе уже созданы органические проводники и сверхпроводники [1], полевые транзисторы [2], амбиполярные материалы [3], «мягкие» материалы [4], полупроводники [5]. Также они демонстрируют интересные оптические свойства, прежде всего, поглощение ближнего инфракрасного излучения [9-13], что создает предпосылки для применения их в фототермической терапии.

Среди 2-илиден-1,3-дитиолонов найдены соединения с биологической активностью: инсектицидной [14-16], антимикробной [17, 18] и противоопухоловой [19, 20].

Нашим коллективом описаны синтезы 2-илиден-1,3-дитиолонов на основе взаимодействия 2,2-дизамещенных этен-1,1-бистиолатов натрия с галогензамещенными реагентами [21-25]. В продолжение работ по созданию полупромышленного синтеза органических продуктов [26], был масштабирован способ получения 2-(1,3-дитиолан-2-илиден)малононитрила [27].

Несмотря на большой интерес к дитиолам, замещенным электроноакцепторными группами, и широкий спектр их полезных оптических свойств, на сегодняшний день мало изучены их фотопоглощающие свойства. Целью данной работы является изучение оптических свойств, в частности фотопоглощения, 1,3-дитиолонов, замещенных электроноакцепторными группами.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Чистоту синтезированных соединений контролировали методом ТСХ на пластинках Sorbfil ПТСХ-АФ-А-УФ, проявляли с помощью УФ облучения, паров иода, термического разложения, элюент – этилацетат. Температуру плавления определяли на приборе OptiMelt МРА100. ИК спектры снимали на приборе ИК-Фурье-спектрометре ФСМ-1202 в тонком слое (суспензия в вазелиновом масле). Элементный анализ выполнен на СНН-анализаторе Perkin Elmer-2400. Спектры ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker DRX-500, рабочая частота 500.13 МГц (для ^1H), 125 МГц (^{13}C), внутренний стандарт – ТМС. Масс-спектры снимали на приборе Shimadzu GCMS-QP 2010 SE (электронный удар 70 эВ). Спектры поглощения сняты на спектрофотометре СФ-56.

Получение 2-илиден-1,3-дитиолонов (общая методика). К раствору 0,003 моль этен-1,1-бис(тиолята) натрия в 5 мл ДМФА прибавляли 0,01 моль галогеналкана. Реакционную массу перемешивали при комнатной температуре в течение 3 ч до окончания реакции (ТСХ), упаривали и прибавляли 4-5-кратным избытком воды. Образовавшийся осадок отфильтровывали, при необходимости перекристаллизовывали из пропанола-2.

2-(1,3-дитиолан-2-илиден)малононитрил 1а [21]. Выход 89%, т.пл. 199-200 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 2208 ($\text{C}\equiv\text{N}$), 1457 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 3,28 с (2H, CH_2), 3,95 с (2H, CH_2). Спектр ^{13}C ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 41,62 (CH_2), 64,82 ($\underline{\text{C}}(\text{CN})_2$), 113,56 (CN), 191,70 ($\underline{\text{C}}(\text{S})_2$).

Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 168 (30) [M] $^+$. Найдено, %: С 42,93; Н 2,37; N 16,60. $\text{C}_6\text{H}_4\text{N}_2\text{S}_2$. Вычислено, %: С 42,83; Н 2,40; N 16,65.

2-(4-Метил-1,3-дитиолан-2-илиден)малононитрил 1б [21]. Выход (94%), т.пл. 95-96 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 2208 ($\text{C}\equiv\text{N}$), 1460 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 1,50 д (3H, J 6.7 Гц, CH_3), 3,76-3,82 дд (1H, J 12,1, 5,6 Гц, CH_2), 4,07 дд (1H, J 12,1, 5,2 Гц, CH_2), 4,59-4,67 м (1H, CH). Спектр ^{13}C ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 18,59 (CH_3), 47,52 (CH_2), 53,73 (CH), 64,72 ($\underline{\text{C}}(\text{CN})_2$), 113,46 (CN), 190,56 ($\underline{\text{C}}(\text{S})_2$). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 182 (20) [M] $^+$. Найдено, %: С 46,15; Н 3,34; N 15,32. $\text{C}_7\text{H}_6\text{N}_2\text{S}_2$. Вычислено, %: С 46,13; Н 3,32; N 15,37. M 182,26.

2-Циано-2-(1,3-дитиолан-2-илиден)ацетамид 1в [21]. Выход 86%, т.пл. 199-200 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 3435 (NH_2), 2192 ($\text{C}\equiv\text{N}$), 1656 ($\text{C}=\text{O}$), 1458 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 3,53-3,62 м (4H, 2CH_2), 7,25-7,45 уш. с (2H, CONH_2). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 186 (11) [M] $^+$. Найдено, %: С 38,73; Н 3,23; N 15,02. $\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_2\text{OS}_2$. Вычислено, %: С 38,69; Н 3,25; N 15,04. M 186,25.

Этил 2-(1,3-дитиолан-2-илиден)-2-цианоацетат 1г [22]. Выход 92%, т.пл. 104-105 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 2200 ($\text{C}\equiv\text{N}$), 1706 ($\text{C}=\text{O}$), 1461 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 1,22-1,25 т (3H, J 7,1 Гц, CH_3), 3,68-3,75 м (4H, 2SCH_2), 4,18-4,23 к (2H, J 7,1 Гц, CH_2). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 215 (20) [M] $^+$. Найдено, %: С 44,85; Н 4,40. $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2\text{S}_2$. Вычислено, %: С 44,63; Н 4,21. M 215,29.

2-(4-Хлор-1,3-дитиолан-2-илиден)малононитрил 1д [23]. Выход 71%, т.пл. 133-134 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 2214 (CN), 1460 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 4,27 дд (1H, J_2 13,6 Гц, J_3 1,3 Гц, CH_2), 4,54 дд (1H, J_2 13,6 Гц, J_3 3,8 Гц, CH_2), 6,91 дд (1H, J_2 3,8 Гц, J_3 1,3 Гц, CHCl). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 204 (14) [M , ^{37}Cl] $^+$, 202 (40) [M , ^{35}Cl] $^+$. Найдено, %: С 36,56; Н 1,80; N 13,53. $\text{C}_6\text{H}_3\text{ClN}_2\text{S}_2$. Вычислено, %: С 35,56; Н 1,49; N 13,82. M 202,67.

5,5-Диметил-2-(1,3-дитиолан-2-илиден)циклогексан-1,3-дион 1е [22]. Выход 85%, т.пл. 202 °С. ИК спектр, ν , см^{-1} : 1710 ($\text{C}=\text{O}$), 1458 ($\text{C}=\text{C}$). Спектр ^1H ЯМР (ДМСО- d_6), δ , м.д.: 0,96 с (6H, 2CH_3), 2,47 с (4H, 2COCH_2), 3,39 с (4H, 2SCH_2). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн.}}$, %): 242 (30) [M] $^+$. Найдено, %: С 54,75; Н 5,99. $\text{C}_{11}\text{H}_{14}\text{O}_2\text{S}_2$. Вычислено, %: С 54,52; Н 5,82. M 242,35.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

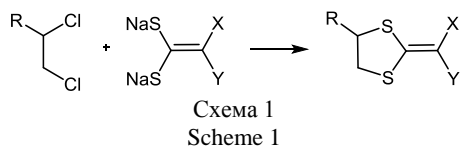
Фотостабилизаторы (светопоглотители, фотопоглотители, светостабилизаторы, УФ абсорберы) применяются во многих областях деятельности,

где требуется защита от ультрафиолетового излучения. По механизму действия фотостабилизаторы делятся на абсорберы ультрафиолета, экранирующие добавки, тушители возбужденных состояний и антиоксиданты. Наиболее широко применяются абсорберы ультрафиолета. Они входят в состав косметологических солнцезащитных средств [28], и защитных добавок к полимерным и другим строительным материалам [29], ингибиторов обесцвечивания красителей в тканях и других материалах, оптической солнцезащитной техники (светофильтры), защитных пленок для различных объектов [30].

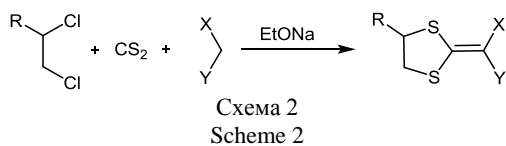
Все перечисленные области нуждаются в новых эффективных фотостабилизаторах для повышения своей конкурентоспособности. Поэтому разработка методов синтеза новых фотостабилизаторов – одна из наиболее актуальных областей современной органической химии.

В последние годы силами коллектива сотрудников химико-фармацевтического факультета ЧГУ им. И.Н. Ульянова разработано несколько методов синтеза 1,3-дителианов [21-27].

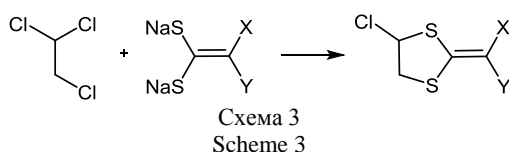
Так, был разработан метод синтеза 1,3-дителианов, заключающийся во взаимодействии дихлоралканов с дицианоэтен-1,1-бистиолатом натрия (Схема 1) [21].



В дальнейшем был разработан трехкомпонентный *one-pot* метод синтеза 1,3-дителианов, позволяющий исключить стадию получения 2,2-дицианоэтен-1,1-бистиолатов натрия [22].

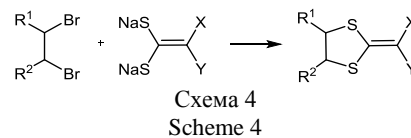


Благодаря разработанным подходам удалось вовлечь во взаимодействие менее активный трихлорэтан и получить хлорзамещенные 1,3-дителианы [23].



При изучении способов синтеза 1,3-дителианов с применением ПАВ был разработан экологичный способ получения целевых продуктов, согласующийся с принципами «зеленой химии» [24].

Диметил- и этилзамещенные 1,3-дителианы были получены при использовании в качестве реагента дибромбутанов [25].



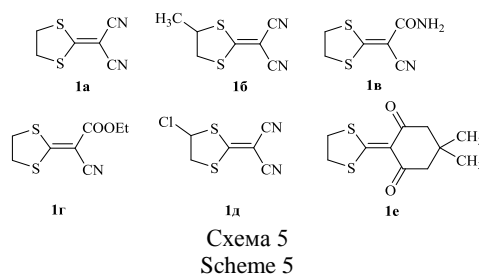
На основе лабораторных методов была разработана полупромышленная технологическая схема получения 2-(1,3-дителиан-2-илиден)малононитрила [27].

Благодаря полученным результатам на сегодняшний день накоплена достаточная синтетическая база для успешного поиска и выявления перспективных фотостабилизаторов на основе 1,3-дителианов.

Из всего многообразия методов для синтеза целевых 1,3-дителианов был выбран способ с наибольшими выходами, заключающийся во взаимодействии хлоралканов с дицианоэтен-1,1-бистиолатом натрия [21, 23].

Первоначально был отобран «модельный» образец для первичных исследований и выявления влияния растворителя. В качестве образца использовали 2-(1,3-дителиан-2-илиден)малононитрил **1a**. Из растворителей были опробованы ацетонитрил, этилацетат, этанол, тетрагидрофуран, 1,4-диоксан, изопропиловый спирт, бензол, дихлорметан, N,N-диметилформамид, диметилсульфоксид, ацетон, пиридин, уксусная кислота, вода. Как показали исследования, растворитель не оказывает заметного влияния на положение максимума полосы поглощения 2-(1,3-дителиан-2-илиден)малононитрила.

Для изучения оптических свойств было отобрано несколько наиболее интересных структур с различным функциональным окружением (Схема 5). Такой набор 1,3-дителианов позволяет оценить влияние заместителей в дителиановом цикле и при двойной связи на оптические свойства.



Все спектры поглощения сняты при концентрации образца $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л в этилацетате. На рисунке представлены спектры поглощения 1,3-дителианов.

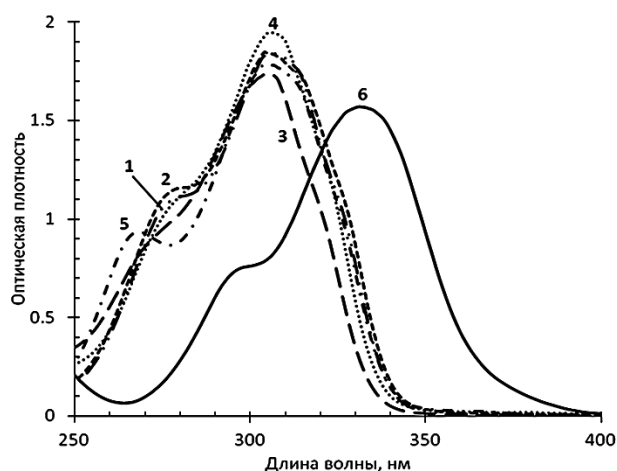


Рисунок. Спектры поглощения 1,3-дителианов: 1 – 1а, 2 – 1б, 3 – 1в, 4 – 1г, 5 – 1д, 6 – 1е
 Figure. Absorption spectra of 1,3-dithiolane: 1 – 1а, 2 – 1б, 3 – 1в, 4 – 1г, 5 – 1д, 6 – 1е

Таблица

Оптические свойства 1,3-дителианов
 Table. Optical properties of 1,3-dithiolane

Шифр	Структурная формула	Длина волны максимума поглощения, нм	Коэффициент экстинкции, л/(моль·см)
1а	<chem>N#CC=C(S1SCS1)C#N</chem>	308	18395
1б	<chem>C[C@@H]1SCS1=C(C#N)C#N</chem>	305	18483
1в	<chem>NC(=O)C=C(S1SCS1)C#N</chem>	306	17386
1г	<chem>CCOC(=O)C=C(S1SCS1)C#N</chem>	308	19441
1д	<chem>ClC1SCS1=C(C#N)C#N</chem>	306	17861
1е	<chem>CC1(C)C(=O)C(=C(S2SCS2)C#N)C(=O)C1</chem>	332	15684

Из данных рисунка можно сделать несколько выводов. Замена водорода в дителиановом цикле на хлор (соединение 1д) или метильную

группу (соединение 1б) не оказывает значительного влияния на интенсивность и смещение сигнала. Максимум поглощения наблюдается при длине волны 305-308 нм. Замена одной из цианогрупп при двойной связи дителиана (соединения 1в, г) также не оказывает заметного влияния на оптические свойства.

Смещения максимума поглощения удалось добиться при замене обоих заместителей при двойной связи. Батохромный сдвиг наблюдается при использовании 2-(1,3-дителиан-2-илиден)-5,5-диметилциклогексан-1,3-диона 1е. Максимум поглощения в этом случае проявляется при 332 нм.

Оптические свойства изученных соединений сведены в таблицу.

Таким образом, все изученные 1,3-дителианы обладают фотостабилизирующими свойствами. При этом максимум поглощения у большинства представителей наблюдается при 306-308 нм, что относится к наиболее опасному и разрушающему ультрафиолетовому излучению типа В (280-315 нм). Путем варьирования заместителей можно добиться батохромного сдвига максимума поглощения в область ультрафиолета А. Для поглощения ультрафиолетового излучения обоих типов рекомендуется применять смеси 1,3-дителианов.

Полученные в ходе проведенных исследований фотостабилизаторы могут быть рекомендованы к применению в области производства строительных полимерных материалов (трубы ПВХ, изоляция проводов, сайдинг-панели). Для рекомендации к применению полученных соединений в косметических солнцезащитных средствах необходимы дополнительные исследования токсичности, фармакодинамики и фармакокинетики.

ВЫВОДЫ

Исследованы фотопоглощающие свойства широкого ряда 2-илиден-1,3-дителианов. Найдено, что все полученные 1,3-дителианы обладают фотостабилизирующим эффектом с максимумом поглощения в области 306-332 нм. Положительные результаты данного исследования могут найти применение в области науки и техники, позволят улучшить потребительские качества выпускаемой продукции.

Исследование проведено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, соглашение № 075-15-2019-737 (проект МК-5518.2018.3).

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

The study was carried out within the framework of a grant from the President of the Russian

Federation for state support of young Russian scientists, agreement No. 075-15-2019-737 (project MK-5518.2018.3).

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

ЛИТЕРАТУРА

- Hu Yu., Wang Zh., Zhang X., Yang X., Ge C., Fu L., Gao X. // *Org. Lett.* 2017. V. 19. P. 468–471. DOI: 10.1021/acs.orglett.6b03614.
- Li J., Hu Y.-H., Ge C.-W., Gong H.-G., Gao X.-K. // *Chin. Chem. Lett.* 2018. V. 29. P. 423–428. DOI: 10.1016/j.ccl.2017.06.008.
- Luo H., He D., Zhang Y., Wang Sh., Gao H., Yan J., Cao Y., Cai Zh., Tan L., Wu Sh., Wang L., Liu Z. // *Org. Lett.* 2019. V. 21. P. 9734–9737. DOI: 10.1021/acs.orglett.9b03891.
- Chen M., Jiao X., Li J., Wu W., Xin H., McNeill Ch. R., Gao X. // *Langmuir.* 2019. V. 35. P. 6188–6195. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b00463.
- Chen M., Li J., Jiao X., Yang X., Wu W., McNeill Ch. R., Gao X. // *J. Mater. Chem. C.* 2019. V. 7. P. 2659–2665. DOI: 10.1039/C8TC06273K.
- Khade V.V., Thube A.S., Dharpurea P.D., Bhat R.G. // *Org. Biomol. Chem.* 2022, V. 20. P. 1315-1319. DOI: 10.1039/D1OB02154K.
- Bresciani G., Marchetti F., Ciancaleoni G., Pampaloni G. // *Eur. J. Org. Chem.* 2021. V. 2021. P. 1615. DOI: 10.1002/ejoc.202100124.
- Safa K.D., Alyari M. // *J. Sulphur Chem.* 206. V. 37. P. 340-348. DOI: 10.1080/17415993.2016.1146721.
- Mebrouk K., Chotard F., Le Goff-Gaillard C., Arlot-Bonnemains Y., Fourmigué M., Camerel F. // *Chem. Commun.* 2015. V. 51. P. 5268-5270. DOI: 10.1039/C4CC08231A.
- Mebrouk K., Camerel F., Jeannin O., Heinrich B., Donnio B., Fourmigué M. // *Inorg. Chem.* 2016. V. 55. P. 1296-1303. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b02648.
- Zheng B., Sabatini R.P., Fu W.-F., Eum M.-S., Brennessel W.W., Wang L., McCamant D.W., Eisenberg R. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015. V. 112. P. E3987-E3996. DOI: 10.1073/pnas.1509310112.
- Lv H., Ruberu T.P.A., Fleischauer V.E., Brennessel W.W., Neidig M.L., Eisenberg R. // *J. Am. Chem. Soc.* 2016. V. 138. P. 11654-11663. DOI: 10.1021/jacs.6b05040.
- Dong R., Pfeffermann M., Liang H., Zheng Z., Zhu X., Zhang J., Feng X. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. P. 12058-12063. DOI: 10.1002/anie.201506048.
- Fadda A.A., El Salam M.A., Tawfik E.H., Anwar E.M., Etman H.A. // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 39773–39785. DOI: 10.1039/C7RA06087D.
- Li J.-J., Liang X.-M., Jin Sh.-H., Zhang J.-J., Yuan H.-Zh., Qi Sh.-H., Chen F.-H., Wang D.-Q. // *J. Agric. Food Chem.* 2010. V. 58. P. 2659-2663. DOI: 10.1021/jf903665f.
- Selvi A.A., Manonmani H.K. // *J. Immunoass. Immunoch.* 2013. V. 34. P. 149-165. DOI: 10.1080/15321819.2012.699492.
- Fadda A.A., Fekri A., Bayoumy N.M. // *RSC Adv.* 2015. V. 5. P. 80844–80852. DOI: 10.1039/C5RA14723A
- Mahmoud M.R., Abu El-Azm F.S.M., Ali A.T., Ali Y.M. // *Synth. Commun.* 2017. V. 47. P. 1591–1600. DOI: 10.1080/00397911.2017.1336776.
- Ismail M.F., Elsayed G.A. // *Synth. Commun.* 2018. V. 48. P. 892–905. DOI: 10.1080/00397911.2018.1428345.

REFERENCES

- Hu Yu., Wang Zh., Zhang X., Yang X., Ge C., Fu L., Gao X. // *Org. Lett.* 2017. V. 19. P. 468–471. DOI: 10.1021/acs.orglett.6b03614.
- Li J., Hu Y.-H., Ge C.-W., Gong H.-G., Gao X.-K. // *Chin. Chem. Lett.* 2018. V. 29. P. 423–428. DOI: 10.1016/j.ccl.2017.06.008.
- Luo H., He D., Zhang Y., Wang Sh., Gao H., Yan J., Cao Y., Cai Zh., Tan L., Wu Sh., Wang L., Liu Z. // *Org. Lett.* 2019. V. 21. P. 9734–9737. DOI: 10.1021/acs.orglett.9b03891.
- Chen M., Jiao X., Li J., Wu W., Xin H., McNeill Ch. R., Gao X. // *Langmuir.* 2019. V. 35. P. 6188–6195. DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b00463.
- Chen M., Li J., Jiao X., Yang X., Wu W., McNeill Ch. R., Gao X. // *J. Mater. Chem. C.* 2019. V. 7. P. 2659–2665. DOI: 10.1039/C8TC06273K.
- Khade V.V., Thube A.S., Dharpurea P.D., Bhat R.G. // *Org. Biomol. Chem.* 2022, V. 20. P. 1315-1319. DOI: 10.1039/D1OB02154K.
- Bresciani G., Marchetti F., Ciancaleoni G., Pampaloni G. // *Eur. J. Org. Chem.* 2021. V. 2021. P. 1615. DOI: 10.1002/ejoc.202100124.
- Safa K.D., Alyari M. // *J. Sulphur Chem.* 206. V. 37. P. 340-348. DOI: 10.1080/17415993.2016.1146721.
- Mebrouk K., Chotard F., Le Goff-Gaillard C., Arlot-Bonnemains Y., Fourmigué M., Camerel F. // *Chem. Commun.* 2015. V. 51. P. 5268-5270. DOI: 10.1039/C4CC08231A.
- Mebrouk K., Camerel F., Jeannin O., Heinrich B., Donnio B., Fourmigué M. // *Inorg. Chem.* 2016. V. 55. P. 1296-1303. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b02648.
- Zheng B., Sabatini R.P., Fu W.-F., Eum M.-S., Brennessel W.W., Wang L., McCamant D.W., Eisenberg R. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2015. V. 112. P. E3987-E3996. DOI: 10.1073/pnas.1509310112.
- Lv H., Ruberu T.P.A., Fleischauer V.E., Brennessel W.W., Neidig M.L., Eisenberg R. // *J. Am. Chem. Soc.* 2016. V. 138. P. 11654-11663. DOI: 10.1021/jacs.6b05040.
- Dong R., Pfeffermann M., Liang H., Zheng Z., Zhu X., Zhang J., Feng X. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. P. 12058-12063. DOI: 10.1002/anie.201506048.
- Fadda A.A., El Salam M.A., Tawfik E.H., Anwar E.M., Etman H.A. // *RSC Adv.* 2017. V. 7. P. 39773–39785. DOI: 10.1039/C7RA06087D.
- Li J.-J., Liang X.-M., Jin Sh.-H., Zhang J.-J., Yuan H.-Zh., Qi Sh.-H., Chen F.-H., Wang D.-Q. // *J. Agric. Food Chem.* 2010. V. 58. P. 2659-2663. DOI: 10.1021/jf903665f.
- Selvi A.A., Manonmani H.K. // *J. Immunoass. Immunoch.* 2013. V. 34. P. 149-165. DOI: 10.1080/15321819.2012.699492.
- Fadda A.A., Fekri A., Bayoumy N.M. // *RSC Adv.* 2015. V. 5. P. 80844–80852. DOI: 10.1039/C5RA14723A
- Mahmoud M.R., Abu El-Azm F.S.M., Ali A.T., Ali Y.M. // *Synth. Commun.* 2017. V. 47. P. 1591–1600. DOI: 10.1080/00397911.2017.1336776.
- Ismail M.F., Elsayed G.A. // *Synth. Commun.* 2018. V. 48. P. 892–905. DOI: 10.1080/00397911.2018.1428345.

20. **Shaker S.A., Marzouk M.I.** // *Molecules*. 2016. V. 21. P. 155. DOI: 10.3390/molecules21020155.
21. **Липин К.В., Ершов О.В., Беликов М.Ю., Федосеев С.В.** // *Журн. орг. химии*. 2017. Т. 53. № 1. С. 148-150. DOI: 10.1134/S1070428017010304.
22. **Липин К.В., Ершов О.В., Беликов М.Ю., Федосеев С.В.** // *Журн. орган. химии*. 2019. Т. 55. С. 314-316. DOI: 10.1134/S1070428019020246.
23. **Липин К.В., Ершов О.В.** // *Журн. орг. химии*. 2019. Т. 55. С. 1947-1949. DOI: 10.1134/S0514749219120218.
24. **Липин К.В., Ершов О.В.** // *Журн. орг. химии*. 2020. Т. 56. С. 1303-1306. DOI: 10.31857/S0514749220080194.
25. **Липин К.В., Ершов О.В.** // *Журн. орг. химии*. 2021. Т. 57. С. 1346-1349. DOI: 10.1134/S1070428021090244.
26. **Липин К.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 6. С. 72-79. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6187
27. **Липин К.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 4. С. 68-73. DOI: 10.6060/ivkkt.20206304.6124
28. **Geisler A.N., Austin E., Nguyen J., Hamzavi I., Jagdeo J., Lim H.W.** // *J. of the Am. Acad. of Dermatol.* 2021. V. 84. P. 1233-1244. DOI: 10.1016/j.jaad.2020.11.074
29. **Polo-Mendoza R., Martinez-Arguelles G., Walubita L.F., Moreno-Navarro F., Giustozzi F., Fuentes L., Navarro-Donado T.** // *Constr. Build. Mater.* 2022. V. 350. P. 128889. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128889
30. **Abou-Dahech M., Boddu S. HS., Bachu R.D., Babu R.J., Shahwan M., Al-Tabakha M.M., Tiwari A.K.** // *Arab. J. Chem.* 2022. V. 15. P. 104212. DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.104212.
20. **Shaker S.A., Marzouk M.I.** // *Molecules*. 2016. V. 21. P. 155. DOI: 10.3390/molecules21020155.
21. **Lipin K.V., Ershov O.V., Belikov M.Y., Fedoseev S.V.** // *Russ. J. Org. Chem.* 2017. V. 53. N 1. P. 147-149. DOI: 10.1134/S1070428017010304.
22. **Lipin K.V., Ershov O.V., Belikov M.Y., Fedoseev S.V.** // *Russ. J. Org. Chem.* 2019. V. 55. N 2. P. 276-278. DOI: 10.1134/S1070428019020246.
23. **Lipin K.V., Ershov O.V.** // *Russ. J. Org. Chem.* 2019. V. 55. P. 1979-1981. DOI: 10.1134/S0514749219120218.
24. **Lipin K.V., Ershov O.V.** // *Russ. J. Org. Chem.* 2020. V. 56. P. 1498-1500. DOI: 10.31857/S0514749220080194.
25. **Lipin K.V., Ershov O.V.** // *Russ. J. Org. Chem.* 2021. V. 57. P. 1559-1561. DOI: 10.1134/S1070428021090244.
26. **Lipin K.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 6. P. 72-79. DOI: 10.6060/ivkkt.20206306.6187.
27. **Lipin K.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 4. P. 68-73. DOI: 10.6060/ivkkt.20206304.6124
28. **Geisler A.N., Austin E., Nguyen J., Hamzavi I., Jagdeo J., Lim H.W.** // *J. Am. Acad. Dermatol.* 2021. V. 84. P. 1233-1244. DOI: 10.1016/j.jaad.2020.11.074
29. **Polo-Mendoza R., Martinez-Arguelles G., Walubita L.F., Moreno-Navarro F., Giustozzi F., Fuentes L., Navarro-Donado T.** // *Constr. Build. Mater.* 2022. V. 350. P. 128889. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128889
30. **Abou-Dahech M., Boddu S. HS., Bachu R.D., Babu R.J., Shahwan M., Al-Tabakha M.M., Tiwari A.K.** // *Arab. J. Chem.* 2022. V. 15. P. 104212. DOI: 10.1016/j.arabjc.2022.104212.

Поступила в редакцию 10.10.2023

Принята к опубликованию 05.03.2024

Received 10.10.2023

Accepted 05.03.2024