

УДК 535.37

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ДОПИРОВАННЫХ КУРКУМИНОИДАМИ ДИФТОРИДА БОРА

© 2024 г. А. И. Щёлоков^{1*}, А. А. Хребтов^{1,2}, Е. В. Федоренко², А. Г. Мирочник²

¹Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

²Институт химии Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: shchelokov.ai@dyfu.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 02.06.2024 г.

Принята к публикации 03.06.2024 г.

Получены полимерные люминесцентные композиции на основе полистирола и поликарбоната, допированные куркуминоидами дифторида бора с различными заместителями в фенильном кольце. Изучено влияние заместителей, полимерной матрицы и концентрации люминофора на спектральные свойства полимерных композиций. Установлено, что влияние электронодонорной силы заместителей люминофоров на эмиссионные характеристики пленок аналогично растворам. Пленки, допированные люминофорами с алкильными заместителями (**1a–5a**), не изменяют эмиссионных характеристик при изменении полимерной матрицы, в то время как для композиций, допированных ба, характерен положительный сольватохромизм. Для всех пленок наблюдается bathochromное смещение люминесценции при увеличении концентрации люминофора до 0.5%. Обнаружено, что пленки, допированные ба, обладают замедленной флуоресценцией.

Ключевые слова: куркуминоиды дифторида бора, полимерные люминесцентные композиции, люминесценция, сольватохромизм, эксимеры, эксиплексы, спектроскопия, замедленная флуоресценция

DOI: 10.31857/S0023119324050027 EDN: TYEUWI

ВВЕДЕНИЕ

Органические флуоресцентные красители давно вызывают интерес у исследователей за счет высоких коэффициентов поглощения, больших квантовых выходов и регулируемых профилей поглощения/эмиссии. Однако большинство органических красителей, например широко известные борди-пирридиновые люминофоры (BODIPY), обладают небольшим Стоксовым сдвигом и не проявляют люминесценции в твердом состоянии, что сильно ограничивает их область применения [1]. В отличие от этих соединений, β -дикетонаты дифторида бора проявляют интенсивную люминесценцию как в растворах, так и в кристаллах [2]. Данный класс люминофоров давно популярен у исследователей благодаря легкодоступности, фотостабильности и высоким эмиссионным характеристикам.

В последнее время внимание исследователей привлекает подкласс β -дикетонатов дифторида бора — куркуминоиды, в которых дифторид бора связан через 1,3- β -дикетогруппу с природным красителем куркумином или его производными. Основными преимуществами куркуминоидов являются высокие квантовые выходы [3, 4] и биосовместимость [5]. Последнее обуславливает интерес к куркуминоидам как к эффективным люминофорам для биовизуализации [6]. На данный момент разработаны люминесцентные зонды для визуализации β -амилоидов при болезни Альцгеймера [7–9], раковых клеток [10, 11], а также ДНК [12]. Абсолютное большинство исследований люминесцентных свойств куркуминоидов касается растворов люминофоров и (реже) твердых фаз. В то же время известно, что включение люминофора

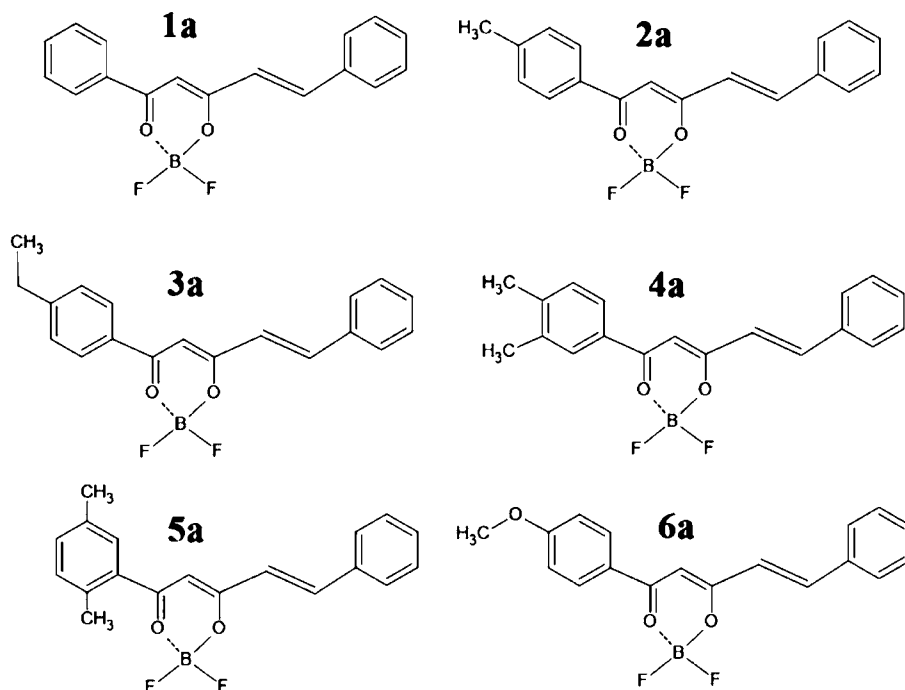


Рис. 1. Структурные формулы куркуминоидов: **1a** – 2,2-дифтор-6-фенил-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин; **2a** – 2,2-дифтор-6-(4'-метилфенил)-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин; **3a** – 2,2-дифтор-6-(4'-этилфенил)-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин; **4a** – 2,2-дифтор-6-(3',4'-диметилфенил)-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин; **5a** – 2,2-дифтор-6-(2',5'-диметилфенил)-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин; **6a** – 2,2-дифтор-6-(4'-метоксифенил)-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборин.

в полимерную матрицу способно повысить квантовый выход люминесценции [13] и увеличить фотостабильность [14, 15]. Кроме того, жесткая структура полимера может способствовать агрегации красителя и появлению таких эффектов, как замедленная флуоресценция (ЗФ) [5]. Таким образом, получение полимерных люминесцентных композиций (ПЛК) открывает новые возможности использования люминофоров.

Целью данной работы является исследование спектральных свойств полимерных люминесцентных композиций на основе полистирола (ПС) и поликарбоната (ПК), допированных куркуминоидами дифторида бора на основе 2,2-дифтор-6-фенил-4-циннамоил-1,3,2-диоксаборина (**1a**), различающиеся заместителями в фенильном кольце (рис. 1), а именно: изучение влияния заместителей, природы полимерной матрицы и концентрации люминофора на люминесцентные свойства ПЛК.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения **1a** и **2a–6a** были получены по методикам [16] и [17] соответственно. ПС марки ПСМ-115 (“НеваРеактив”) и ПК (Acros Organics) предварительно очищены методом переосаждения с помощью гексана (“НеваРеактив”) из раствора в дихлорметане (“НеваРеактив”).

Полимерные пленки на основе ПС и ПК, допированные люминофорами **1a–6a** (концентрации 0,01, 0,05 и 0,5%), получены методом полива из раствора 0,25 г полимера и точных навесок **1a–6a** в 5 мл 1,2-дихлорэтана (“Экос 1”). Растворы по каплям наносились на очищенные стеклянные и полипропиленовые подложки, после чего высушивались в течение 24 ч в закрытой камере. После формирования пленки отделялись от подложек. Растворители производителей “Экос 1” и “НеваРеактив” использовались без дополнительной очистки.

Стационарные спектры возбуждения люминесценции и люминесценции пленок регистрировали на спектрофлуориметре Shimadzu RF5301, спектры поглощения записывали на спектрофотометре Shimadzu UV-2550. В качестве маски была использована черная бумага с узким отверстием ($d = 5$ мм) для возбуждения локального участка пленки и отсеечения вторичной люминесценции [18]. Кинетика затухания люминесценции измерена по технологии время-коррелированного счета одиночных фотонов на лазерном пикосекундном спектрофлуориметре PicoQuant FluoTime 200, источник возбуждения – PicoQuant LDH-PC-375 ($\lambda = 370$ нм). Для активации центров ЗФ использовали лазерную указку Laser pointer ($\lambda = 405$ нм) мощностью

Таблица 1. Спектральные характеристики ПЛК, допированных **1a–6a**

Люминофор	Концентрация, %	Матрица	$\lambda_{\text{полг}}$, нм	$\lambda_{\text{возб}}$, нм	$\lambda_{\text{люм}}$, нм	ϕ [4]
1a	0.01	ПС	398	419	457	0.01
		ПК	395	420	459	
	0.05	ПС	399	422	461	
		ПК	399	421	458	
	0.5	ПС	399	427	469	
		ПК	396	424	466	
2a	0.01	ПС	402	422	463	0.08
		ПК	404	423	462	
	0.05	ПС	402	426	463	
		ПК	399	425	463	
	0.5	ПС	402	429	474	
		ПК	401	429	475	
3a	0.01	ПС	401	422	463	0.08
		ПК	401	424	462	
	0.05	ПС	402	426	463	
		ПК	400	425	464	
	0.5	ПС	403	429	474	
		ПК	401	430	472	
4a	0.01	ПС	404	428	463	0.13
		ПК	404	425	465	
	0.05	ПС	404	429	467	
		ПК	402	429	467	
	0.5	ПС	404	429	473	
		ПК	402	429	470	
5a	0.01	ПС	397	419	458	0.06
		ПК	397	418	458	
	0.05	ПС	396	420	459	
		ПК	396	419	458	
	0.5	ПС	397	424	469	
		ПК	395	424	467	
6a	0.01	ПС	398	381	421	0.95
		ПК	398	383	433	
	0.05	ПС	387	384	435	
		ПК	385	385	439	
	0.5	ПС	397	379	447	
		ПК	396	383	450	

5 мВт. Спектр 3Ф регистрировали спектрометром R-Aero VISION2GO VIS-ER.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Максимумы спектров поглощения, возбуждения люминесценции и люминесценции ПЛК, допированных **1a–6a** при концентрациях 0.01, 0.05 и 0.5%, а также квантовые выходы (ϕ) растворов люминофоров в дихлорметане по данным [4] приведены в табл. 1. Влияние заместителей и полярности полимерной матрицы на люминесцентные свойства ПЛК корректно определять при минимальной концентрации люминофора (0.01%), исключающей образование агрегатов. При концентрации 0.01% для **1a–4a**

наблюдается небольшое батохромное смещение независимо от типа полимерной матрицы, что связано с увеличением электронодонорной силы заместителей и уменьшением энергетической разницы между высшей занятой (ВЗМО) и низшей свободной (НСМО) молекулярными орбиталями. ПЛК, допированные **5a**, являющимся структурным изомером **4a**, обладают наиболее коротковолновыми максимумами возбуждения люминесценции и люминесценции в ряду **1a–5a**, что может быть объяснено отталкиванием метильной группы от диоксоболинного кольца и протона в γ -положении и ослаблением π -сопряжения [4]. Квантовые выходы люминесценции растворов **1a–5a** составляют 0.01–0.13 [4].

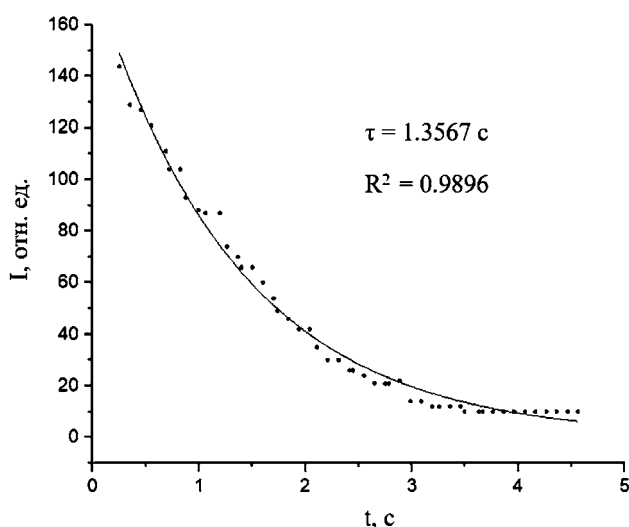


Рис. 2. Кривая затухания послесвечения ПК пленки, допированной **6a**, при концентрации люминофора 0.5%.

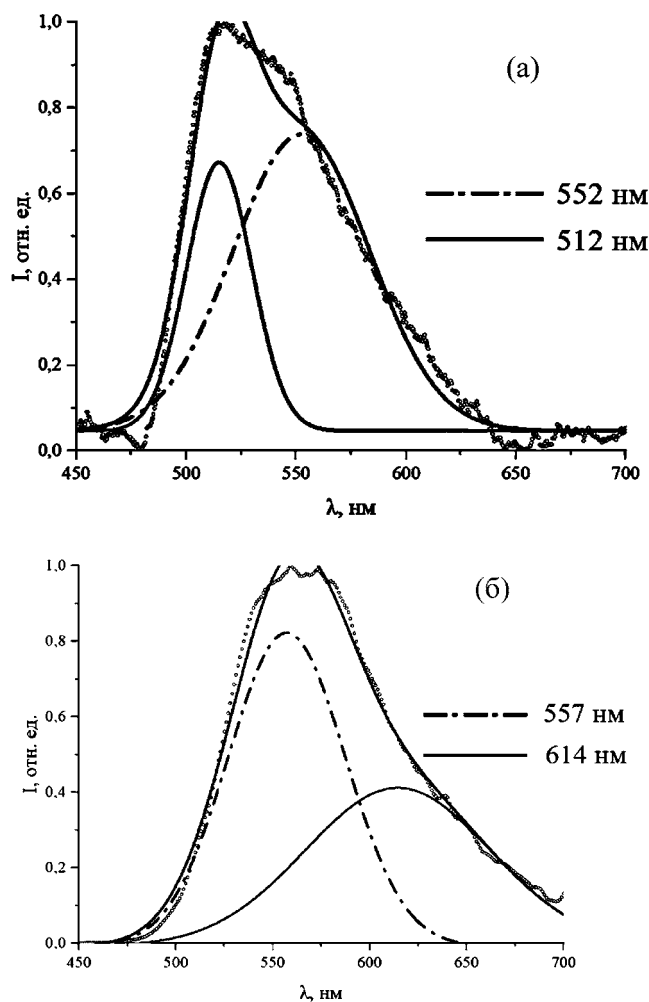


Рис. 3. Спектр замедленной флуоресценции ПК пленки, допированной **6a** при концентрации 0.5% (а), и спектр люминесценции кристаллов **6a** (б), разложенные по функциям Гаусса.

Для ПЛК, допированных **6a**, наблюдается значительное гипсохромное смещение максимумов возбуждения люминесценции и люминесценции относительно других ПЛК с алкильными заместителями. Квантовый выход раствора **6a** возрастает до 0.95 [4]. Согласно данным квантово-химического моделирования [4], для **6a** характерно слабое разделение ВЗМО и НСМО, что ведет к повышению энергий граничных орбиталей и снижению эффективности переноса заряда. Повышению разницы в электронной плотности между хелатным кольцом и фенильным фрагментом будет способствовать наличие акцепторного заместителя или, как в случае **1a–5a**, более слабых электронодонорных заместителей, что эквивалентно введению акцепторов [19]. В целом стоит отметить, что влияние заместителей, определяющих люминесцентное поведение куркуминоидов в растворах, действует также и в полимерных матрицах.

Сравнение спектров ПЛК, допированных **1a–5a** при концентрации 0,01%, не выявило значительных различий в положениях максимумов возбуждения люминесценции и люминесценции при изменении полимерной матрицы (табл. 1). Однако для ПЛК, допированных **6a**, наблюдается батохромное смещение максимумов люминесценции при переходе от неполярного ПС к полярному ПК.

Известно, что для метокси-производных β-дикетонатов характерен положительный сольватохромизм вследствие внутримолекулярного переноса заряда (ВПЗ), вызванного сильным разделением зарядов между донорной (метокси-группа) и акцепторной (BF₂) частями молекулы [4]. Полярное возбужденное состояние **6a** стабилизируется в полярной полимерной матрице, что уменьшает энергетическую разницу S₁→S₀ перехода и приводит к батохромному смещению. Для куркуминоидов **1a–5a** с алкильными заместителями влияние ВПЗ происходит в меньшей степени вследствие более слабого электронодонорного эффекта заместителей, что приводит к отсутствию сольватохромизма.

Отдельно было изучено влияние концентрации люминофора на спектральные свойства ПЛК. При повышении концентрации с 0.01 до 0.05% смещение максимумов незначительно для большинства ПЛК. Однако при повышении концентрации до 0.5% наблюдается значительный батохромный сдвиг максимумов люминесценции независимо от природы полимерной матрицы (табл. 1), что связано с образованием агрегатов, таких как π-агрегаты [4].

ПЛК, допированные **6a** при концентрации 0.5%, обладали послесвечением, индуцируемым

Таблица 2. Результаты анализа кинетики затухания люминесценции **1a** при концентрации 0.5%

Матрица	$\lambda_{\text{рег}}$, нм	τ_1 , нс (A_1 , %)	τ_2 , нс (A_2 , %)	τ_3 , нс (A_3 , %)	$\tau_{\text{ср}}$, нс
ПС	440	0.65 (83.82)	1.373 (14.02)	3.676 (2.15)	0.816
	470	0.665 (74.24)	1.523 (24.55)	6.055 (1.21)	0.941
	500	0.749 (75.3)	1.749 (23)	6.046 (1.7)	1.069
ПК	440	0.784 (100)	—	—	0.784
	470	0.72 (89.36)	1.674 (10.64)	—	0.821
	500	0.669 (72.31)	1.298 (26.47)	4.473 (1.23)	0.882

возбуждением локального участка пленки лазером ($\lambda = 405$ нм) при комнатной температуре аналогично методике [20]. ПК-пленка обладала длительным визуально наблюдаемым (3–4 с) и быстро активируемым (1–2 с) зеленым послесвечением ($\lambda = 517$ нм), в то время как ПС-пленка требовала более длительного времени активации (5–6 с) и характеризовалась слабоинтенсивным послесвечением. Время жизни послесвечения ПК-пленки составляет 1.36 с, кинетика затухания описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 2).

Известно, что для ПЛК, допированных β -дикетонатами дифторида бора, послесвечение является следствием ЗФ, вызванной образованием эксимеров при высокой концентрации люминофора [20]. Разложение спектра ЗФ ПК-пленки на субкомпоненты по функциям Гаусса показывает наличие двух центров люминесценции с максимумами 512 и 552 нм. При этом выделенная субкомпонента 552 нм схожа с положением субкомпоненты 557 нм в спектре люминесценции кристалла используемого люминофора, который также имеет два центра эксимерной люминесценции (557 и 614 нм) [21, 22] (рис. 3).

Таким образом, частичное соответствие субкомпонент ЗФ и кристаллов **6a** (552 и 557 нм) свидетельствует об эксимерной природе ЗФ ПК-пленки, при этом наблюдаемое послесвечение можно отнести к ЗФ типа Р, возникающей при взаимодействии триплетных молекул красителя. Наличие коротковолновой субкомпоненты 512 нм может быть объяснено менее плотным перекрыванием π -систем молекул люминофора ввиду большего свободного объема в ПЛК.

Для ПС характерным является образование эксиплексов в результате взаимодействия молекул

β -дикетонатов дифторида бора с фенильными кольцами полимера [20, 23, 24], что ведет к повышению времени, необходимого для активации центров ЗФ и проявляется в виде менее интенсивного послесвечения. Анализ кинетики затухания люминесценции **1a** при концентрации 0.5% показывает увеличенное среднее время жизни возбужденного состояния люминофора в ПС-матрице относительно ПК (табл. 2). В коротковолновой области спектра люминесценции ($\lambda_{\text{рег}} = 440$ нм) кинетика затухания ПК-пленки описывается моноэкспоненциальной зависимостью. Для ПС уже в коротковолновой области спектра появляются долгоживущие компоненты τ_2 и τ_3 , относящиеся к различным центрам люминесценции. Повышение длины волны регистрации вплоть до 500 нм показывает наличие нескольких центров люминесценции как для ПК, так и для ПС, однако вклад долгоживущих компонент в ПС значительно выше, чем в ПК.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследованы спектральные свойства полимерных люминесцентных композиций на основе ПС и ПК, допированных куркуминоидами дифторида бора при концентрациях 0.01, 0.05 и 0.5%. Для **1a–4a** выявлено батохромное смещение максимумов спектров возбуждения люминесценции и люминесценции ПЛК при увеличении электронодонорной силы заместителей аналогично растворам люминофоров. Люминесценция пленки, допированной **5a**, гипсохромно смещена относительно **1a–4a** ввиду стерических затруднений и ослабления π -сопряжения. Для **6a** наблюдается значительное гипсохромное смещение вследствие повышения энергий ВЗМО и НСМО.

Обнаружено, что ПЛК, допированные **6a**, проявляют положительный сольватохромизм при переходе от ПС к ПК. Для **1a–5a** сольватохромный эффект не наблюдается ввиду слабого электронодонорного эффекта алкильных заместителей.

Выявлено, что при повышении концентрации люминофора до 0.5% происходит значительное батохромное смещение люминесценции вследствие агрегации молекул красителя. ПК-пленка, допированная **6a**, обладает ЗФ типа Р, вызванной образованием эксимеров. Для ПС образование эксимеров конкурирует с формированием слабоинтенсивных эксиплексов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23_23_00461.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu C.L., Chen Y., Shelar D.P. et. al. // J. mater. Chem. 2014. V. 2. № 28. P. 5471–5478.
2. Zhang J., Chen O., Fan Y. et. al. // Dyes and Pigments. 2021. Vol. 193. P. 109500.
3. Mohammed F., Rashid-Doubell F., Cassidy S., Henari F. // Spectrochim. Acta, Part A. 2017. V. 183. P. 439–450.
4. Mirochnik A.G., Puzyrkov Z.N., Fedorenko E.V. et. al. // Spectrochim. Acta, Part A. 2023. V. 291. P. 122319.
5. Kerr C., DeRossa C., Daly M. et. al. // Biomacromolecules. American Chemical Society. 2017. V. 18. № 2. P. 551–561.
6. Kamada K., Namikawa T., Senatore S. et. al. // Chem. Eur. J. 2016. V. 22. № 15. P. 5219–5232.
7. Zhang X., Tian Y., Li Z. et. al. // J. Am. Chem. Soc. 2013. Vol. 135. № 44. P. 16397–16409.
8. Ni R., Villos A., Dean-Bean X. et. al. // Photoacoustics. 2021. V. 23. P. 100285.
9. Ran C., Xu X., Raymond S. et. al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. № 42. P. 15257–15261.
10. Alberti D., Protti N., Franck M. et. al. // ChemMedChem. 2017. V. 12. № 7. P. 502–509.
11. Liu Y., Zhang C., Pan H., Li L., Yu Y., Liu B. // Asian J. Pharmat. Sci. 2021. V. 16. № 4. P. 419–431.
12. Collot M. // Materials Horizons. 2020. V. 8. P. 501–514.
13. Fedorenko E.V., Khrebtov A.A., Mirochnik A.G. et. al. // J. Lumin. 2021. V. 235. P. 118043.
14. Martins M.G., Paiva T.F., Goulart J.S. et. al. // Polym. 2023. V. 273. P. 125870.
15. Ma. Q., Zhang Y., Jiao Y. et. al. // Analyst. 2021. V. 146. № 19. P. 5873–5879.
16. Karasev V.E., Korotkikh O.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 1986. P. 869–872.
17. Görlitz G., Hartmann H., Number B., Wolff J.A. // J. für praktische Chemie. 1999. Vol. 341, № 2. P. 167–172.
18. Khrebtov A.A., Fedorenko E.V., Reutov V.A., Mirochnik A.G., Lim L.A. // Rus. J. Phys. Chem. 2022. V. 96. № 8. P. 1800–1804.
19. Fedorenko E.V., Mirochnik A.G., Beloliptsev A., Isakov V.V. // Dyes and Pigments. 2014. V. 109. P. 181–188.
20. Khrebtov A.A., Fedorenko E.V., Mirochnik A.G. // Polym. 2022. V. 256. P. 125255.
21. Kim E., Felouat A., Zaborova E. et. al. // Org. Biomol. Chem. 2016. V. 14. № 4. P. 1311–1324.
22. Stefan B., Pozgan F., Kim E. et. al. // Dyes and Pigments. 2017. V. 141. P. 38–47.
23. Fedorenko E.V., Lyubykh N.A., Khrebtov A.A., Beloliptsev A.Y., Mirochnik A.G. // Spectrochim. Acta, Part A. 2023. V. 303. P. 123193.
24. Fedorenko E.V., Khrebtov A.A., Mirochnik A.G. et. al. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. № 3. P. 459–462.

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL PROPERTIES OF POYMERIC LUMINESCENT COMPOSITIONS DOPED WITH BORON DIFLUORIDE CURCUMINOIDS

A. I. Shchelokov^{a*}, A. A. Khrebtov^{a,b}, E. V. Fedorenko^b, A. G. Mirochnik^b

^aFar Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

^bRussia Institute of Chemistry, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

*E-mail: shchelokov.ai@dvyfu.ru

Polymeric luminescent compositions based on polystyrene and polycarbonate doped with boron difluoride curcuminoids with different substituents in the phenyl ring have been synthesized. The influence of substituents, polymer matrix and phosphor concentration on the spectral properties of polymer compositions has been studied. It was found that the influence of the electron-donating power of the luminophore substituents on the emission characteristics of the films is similar to that of the solutions. Films doped with alkyl substituents (**1a–5a**) do not change their emission characteristics when the polymer matrix is changed, while compositions doped with **6a** are characterised by positive solvatochromism. For all films, a bathochromic shift of luminescence is observed when the luminophore concentration is increased to 0.5%. The films doped with **6a** were found to exhibit delayed fluorescence.

Keywords: boron difluoride curcuminoids, polymeric luminescent compositions, luminescence, solvatochromism, excimers, exciplexes, spectroscopy, delayed fluorescence

REFERENCES

1. Liu C.L., Chen Y., Shelar D.P. et. al. // J. mater. Chem. 2014. V. 2. № 28. P. 5471–5478.
2. Zhang J., Chen O., Fan Y. et. al. // Dyes and Pigments. 2021. Vol. 193. P. 109500.
3. Mohammed F., Rashid-Doubell F., Cassidy S., Henari F. // Spectrochim. Acta, Part A. 2017. V. 183. P. 439–450.
4. Mirochnik A.G., Puzyrkov Z.N., Fedorenko E.V. et. al. // Spectrochim. Acta, Part A. 2023. V. 291. P. 122319.
5. Kerr C., DeRossa C., Daly M. et. al. // Biomacromolecules. American Chemical Society. 2017. V. 18. № 2. P. 551–561.
6. Kamada K., Namikawa T., Senatore S. et. al. // Chem. Eur. J. 2016. V. 22. № 15. P. 5219–5232.
7. Zhang X., Tian Y., Li Z. et. al. // J. Am. Chem. Soc. 2013. Vol. 135. № 44. P. 16397–16409.
8. Ni R., Villos A., Dean-Bean X. et. al. // Photoacoustics. 2021. V. 23. P. 100285.
9. Ran C., Xu X., Raymond S. et. al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. № 42. P. 15257–15261.
10. Alberti D., Protti N., Franck M. et. al. // ChemMedChem. 2017. V. 12. № 7. P. 502–509.
11. Liu Y., Zhang C., Pan H., Li L., Yu Y., Liu B. // Asian J. Pharmat. Sci. 2021. V. 16. № 4. P. 419–431.
12. Collot M. // Materials Horizons. 2020. V. 8. P. 501–514.
13. Fedorenko E.V., Khrebtov A.A., Mirochnik A.G. et. al. // J. Lumin. 2021. V. 235. P. 118043.
14. Martins M.G., Paiva T.F., Goulart J.S. et. al. // Polym. 2023. V. 273. P. 125870.
15. Ma. Q., Zhang Y., Jiao Y. et. al. // Analyst. 2021. V. 146. № 19. P. 5873–5879.
16. Karasev V.E., Korotkikh O.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 1986. P. 869–872.
17. Görlitz G., Hartmann H., Number B., Wolff J. // J. für praktische Chemie. 1999. Vol. 341, № 2. P. 167–172.
18. Khrebtov A.A., Fedorenko E.V., Reutov V.A., Mirochnik A.G., Lim L.A. // Rus. J. Phys. Chem. 2022. V. 96. № 8. P. 1800–1804.
19. Fedorenko E.V., Mirochnik A.G., Beloliptsev A., Isakov V.V. // Dyes and Pigments. 2014. V. 109. P. 181–188.
20. Khrebtov A.A., Fedorenko E.V., Mirochnik A.G. // Polym. 2022. V. 256. P. 125255.
21. Kim E., Felouat A., Zaborova E. et. al. // Org. Biomol. Chem. 2016. V. 14. № 4. P. 1311–1324.
22. Stefan B., Pozgan F., Kim E. et. al. // Dyes and Pigments. 2017. V. 141. P. 38–47.
23. Fedorenko E.V., Lyubykh N.A., Khrebtov A.A., Beloliptsev A.Y., Mirochnik A.G. // Spectrochim. Acta, Part A. 2023. V. 303. P. 123193.
24. Fedorenko E.V., Khrebtov A.A., Mirochnik A.G. et. al. // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. № 3. P. 459–462.