

УДК 541(14+64):547.244

НОВЫЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИСИЛОКСАНОВ И БИС- β -ДИКЕТОНАТОВ БОРА

© 2023 г. Э. Е. Ким^a, Т. М. Ильина^{a,b}, Ю. Н. Кононевич^{a,*}, Д. С. Ионов^c, Д. А. Ханин^a, Г. Г. Никифорова^a, А. М. Музафаров^{a,d}

^aИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук
119334 Москва, ул. Вавилова, 28, Россия

^bРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
125047 Москва, Миусская пл., 9, Россия

^cЦентр фотохимии ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” Российской академии наук
119421 Москва, ул. Новаторов, 7а, Россия

^dИнститут синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук
117393 Москва, Профсоюзная ул., 70, Россия

*e-mail: kononevich.yuriy@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Впервые получены сшитые полисилоксаны с комплексами бис-добензоилметаната бора, выполняющими функцию узлов сшивки полимерных сеток; изучены их физико-химические, механические, термические и флуоресцентные свойства. Показано, что исследуемые полимеры проявляют эластичные свойства, демонстрируют высокую термическую и термоокислительную стабильность, а также обладают интенсивной флуоресценцией в широком диапазоне длины волн (400–700 нм).

DOI: 10.31857/S2308114723700371, EDN: GCBIOS

ВВЕДЕНИЕ

Материалы, обладающие люминесцентными свойствами, в последние два десятилетия представляются весьма перспективными объектами исследования в области полимерной химии и материаловедения, поскольку их используют в органической электронике, сенсорике, биомедицине и других сферах науки и техники [1–3]. Люминофорами здесь могут служить органические красители, квантовые точки, комплексы металлов и другие [4–7].

Одним из наиболее популярных классов органических флуорофоров в настоящее время являются различные бор-содержащие комплексы. Такие комплексы ввиду ценных фотофизических свойств широко применяют при разработке новых флуоресцентных материалов [8–10], наделенных уникальными оптическими [11, 12], механохромными [13–19], фотохромными [20, 21] и сенсорными характеристиками [22–26].

Среди обширного ряда известных флуоресцентных борных комплексов следует выделить ионные – бис- β -дикетонаты бора [27, 28]. Открытые в середине XX века путем взаимодействия β -дикетонов с трихлоридом бора [29, 30], данные комплексы тем не менее еще недостаточно изуче-

ны и до сих пор вызывают интерес исследователей. В частности, это обусловлено тем, что бис- β -дикетонаты бора обладают высоким коэффициентом экстинкции, флуоресценцией в широком диапазоне длины волн, а также многими другими характеристиками, имеющими большой потенциал для применения [31]. Так, бис- β -дикетонаты бора на основе производных куркумина используют в качестве основных [32] или промежуточных соединений для получения биологически активных куркуминов [33, 34]. Мезоструктурированные тонкие пленки на основе диоксида кремния, модифицированные добензоилметаном, могут применяться в качестве селективного сенсора на BCl_3 и BF_3 в газообразном состоянии [35]. Бис- β -дикетонаты бора с алифатическими заместителями у лиганда проявляют сильные термохромные свойства в диапазоне температуры от 25 до -196°C [36]. Комплексы авобензона с бором обладают сольватохромной флуоресценцией в растворе, а в твердом состоянии – эмиссия комплексов меняет цвет в присутствии паров воды [37].

Известно, что силоксаны различного строения активно применяют как матрицы при получении новых люминесцентных материалов [6, 38–45],

это связано с их высокой термической стабильностью, гибкостью, эластичностью, низкой токсичностью, биосовместимостью и гидрофобностью. В предыдущих публикациях [46, 47] была продемонстрирована перспективность использования полисилоксанов, модифицированных β -дикетонатами бора или европия в качестве новых люминесцентных материалов, обладающих сенсорными свойствами.

В настоящей работе получены новые флуоресцентные материалы на основе полисилоксанов, сшитых за счет взаимодействия между фрагментами β -дикетонов, распределенных по полимерной цепи, и трихлоридом бора с образованием флуоресцентного комплекса, а также изучены их механические, термические и флуоресцентные свойства.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

Полисилоксаны **1a**, **1b** получали согласно методике [48]. Трихлорид бора (1 моль/л раствор в гексане) и дибензоилметан синтезировали из коммерческого источника (ABCR), комплекс бис-дибензоилметаната бора **4** – по описанной ранее методике [31]. Все реагенты применяли без предварительной очистки. Растворители перед использованием очищали: тетрагидрофуран осушали и перегоняли над CaH_2 , дихлорметан – над P_2O_5 .

Спектры ЯМР ^1H записывали на спектрометре “Bruker Avance II” (400 МГц). Химические сдвиги приводили относительно сигнала хлороформа ($\delta = 7.25$ м.д.).

ИК-спектры снимали на ИК-фурье-спектрометре “Shimadzu IRTecser-100”. Образцами служили таблетки KBr и тонкие пленки.

Анализ молекулярно-массовых характеристик полимеров осуществляли методом ГПХ с помощью хроматографа “Shimadzu Prominent System”, оснащенного детектором RID-20A, в толуоле (1 мл/мин). Колонку ГПХ “Phenogel 10^5 \AA ” откалибровали по полистирольным стандартам.

Термогравиметрический анализ выполняли на синхронном термоанализаторе “Shimadzu DTG-60H” с образцами массой ~ 10 мг при скорости нагревания 10 град/мин на воздухе и в аргоне. Температуру, при которой обнаружили потерю массы 5%, считали температурой начала деструкции.

Дифференциальную сканирующую калориметрию выполняли с помощью DSC-3 “Mettler-Toledo” при скорости нагревания 10 град/мин в атмосфере аргона.

Механические свойства образцов определяли на разрывной машине “LLOYD Instruments LR5K Plus” со скоростью растяжения 100 мм/мин.

Эффективность образования сшитых сеток исследовали путем анализа гель-фракции образцов, высушенных до постоянной массы в вакуумной печи (1 мбар, $T = 80^\circ\text{C}$). Далее несшитые олигомеры и прекурсоры извлекали из образцов путем экстракции тетрагидрофураном в аппарате Сокслета в течение 14 ч. После экстракции образцы сушили в вакуумной печи при тех же условиях до постоянной массы. Гель-фракцию образцов рассчитывали согласно следующему уравнению:

$$\text{Гель-фракция (\%)} = W_1/W_0 \times 100,$$

где W_0 и W_1 – масса высушенных образцов до и после экстракции соответственно.

Спектры поглощения записывали на спектрофотометре “Shimadzu UV-1900”, спектры флуоресценции – на спектрофлуориметре “Shimadzu RF-6000”. Деаэрированный раствор 9,10-дифенилантрацена в циклогексане ($\Phi_f = 0.9$) использовали как стандарт для определения квантового выхода флуоресценции.

Кинетику затухания флуоресценции изучали на времяразрешенном флуоресцентном спектрометре “Fluotime 300” (“Picoquant”). Лазер “LDH-D-C-375” служил в качестве источника возбуждения ($\lambda_{\text{ex}} = 375$ нм). При измерении коротких времен жизни до 10 мкс прибор работал в режиме время-коррелированного счета фотонов (Time-Correlated Single Photon Counting – TCSPC), если больше 10 мкс, то прибор работал в режиме мультисканального масштабирования (Multi-Channel Scaling – MCS).

Для возбуждения можно использовать не только одиночные импульсы, но и “очередь”, частота следования импульсов при этом выбирается максимально возможной. Также можно задавать частоту повторения “очередей”, а регулируя количество импульсов в “очереди” – длительность вспышки света. Форма фронта такой вспышки будет определяться характеристиками одиночного импульса, ширина на полувысоте которого для рассматриваемой системы составит ~ 40 пс.

Аппроксимацию полученных данных осуществляли в программе “Easytau2” (“Picoquant”) с использованием мультиэкспоненциальной модели.

Синтез соединений 3a, 3b

К раствору полимера **1a** (408 мг, 0.34 ммоль) или **1b** (578 мг, 0.193 ммоль) в сухом ТГФ (10 мл) при комнатной температуре добавляли раствор BCl_3 в гексане с концентрацией 1 моль/литр (175 мкл для **3a** и 96.7 мкл для **3b**). Реакционную смесь интенсивно перемешивали несколько се-

Таблица 1. Молекулярно-массовые характеристики соединений 1a, 1b

| Соединение | <i>n</i> | <i>m</i> | $M_n \times 10^{-3}$ | <i>D</i> |
|------------|----------|----------|----------------------|----------|
| 1a | 12 | 43 | 52.8 | 3.6 |
| 1b | 36 | 10 | 30.9 | 1.9 |

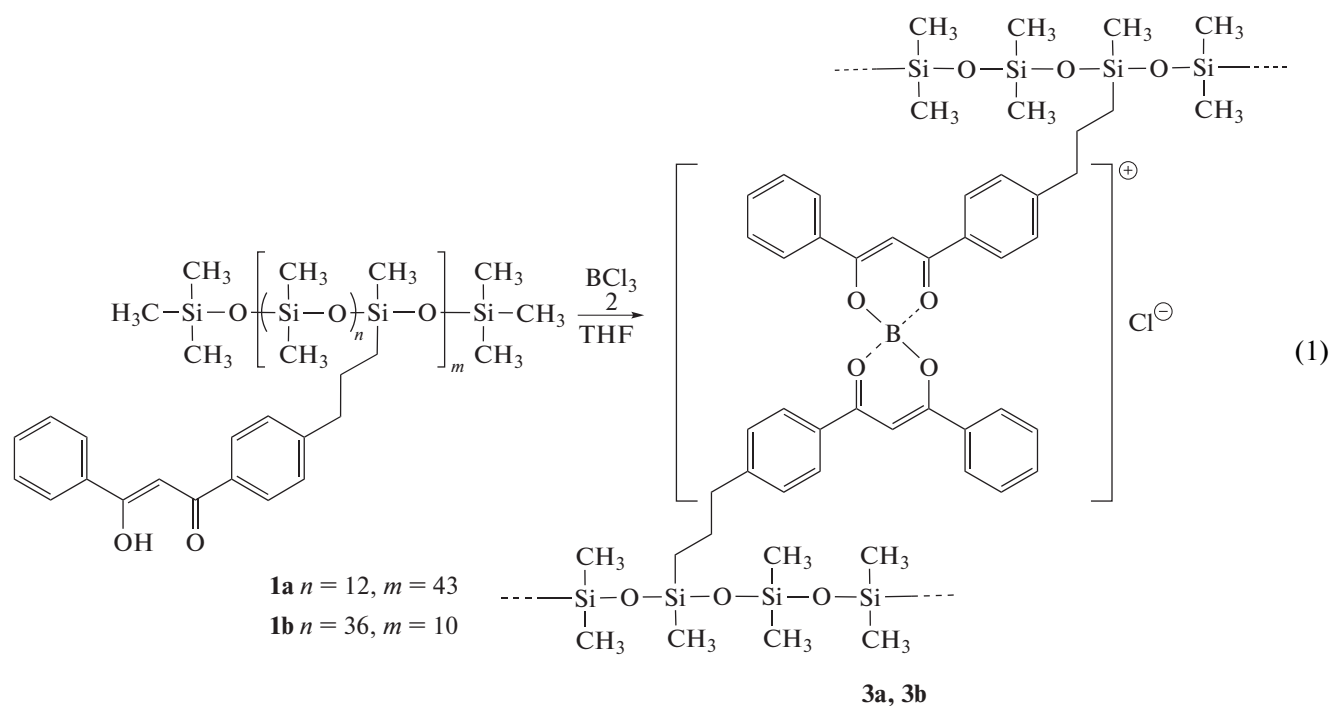
кунд, затем образовавшийся гель выливали на тефлоновую подложку в инертной атмосфере. После полного удаления растворителя и образования пленки образцы выдерживали в вакуумной печи (1 мбар, $T = 80^\circ\text{C}$) в течение 8 ч. Сшитые полимеры имели вид светло-коричневой (3a) и свет-

ло-зеленой (3b) пленок: 3a – ИК-спектр (KBr, cm^{-1}): 2963, 2921, 2852, 1609, 1538, 1413, 1262, 1097, 1019, 864, 801, 688, 661; 3b – ИК-спектр (KBr, cm^{-1}): 2963, 2905, 1609, 1541, 1490, 1413, 1262, 1098, 1018, 862, 801, 689, 662.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез

Полидиметилсилоксаны, сшитые за счет образования боратных комплексов, были получены из полидиметилсилоксанов 1a и 1b, содержащих распределенные по цепи β -дикетонатные фрагменты:



Полимеры 1a, 1b синтезированы согласно методике, описанной ранее [48]. Для изучения влияния степени сшивки на свойства материалов были получены соединения с различным содержанием дибензоилметановых фрагментов в полимерной цепи. Молекулярно-массовые характеристики соединений 1a, 1b приведены в табл. 1, а кривые ГПХ – на рис. 1.

Сшитые полидиметилсилоксаны 3a, 3b были синтезированы реакцией трихлорида бора с β -дикетон-содержащими полимерами 1a, 1b в инертной атмосфере следующим образом. К растворам полимеров 1a и 1b в ТГФ добавляли раствор трихлорида бора в гексане в инертной атмосфере. Образовавшийся после кратковременного перемешивания гель выливали на тефлоновую подложку и оставляли до полного испарения растворителей в инертной атмосфере, после чего образ-

цы сушили до постоянной массы. Таким образом, было получено две пленки 3a, 3b с различной степенью сшивки. Узлами сшивки в данных материалах являются комплексы $[(\text{DBM})_2\text{B}]^+$ с анионом Cl^- в качестве противоиона. Фотографии пленок приведены на рис. 2.

В ИК-спектрах, приведенных на рис. 3, наблюдаются характеристические полосы, соответствующие колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ у координированных β -дикетонных групп в области 1609–1414 cm^{-1} . При значениях 1262 и 864 cm^{-1} видны полосы, свойственные для колебаний связи $\text{Si}-\text{C}$. Интенсивные полосы в области 1098–1018 и 801 cm^{-1} относятся к асимметричным и симметричным колебаниям связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ соответственно. Полосы в области 2963–2095 cm^{-1} отвечают колебаниям связи $\text{C}-\text{H}$.

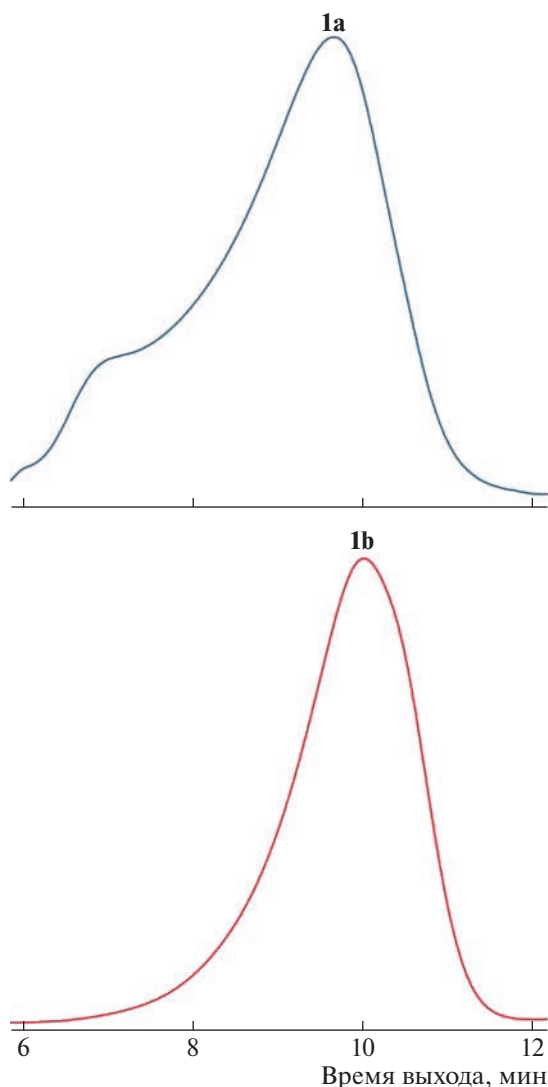


Рис. 1. Кривые ГПХ соединений 1a, 1b (“Phenogel 105 Å”).

Для определения эффективности образования сшитых структур выполнен анализ гель-фракции образцов. Анализ проводился в аппарате Сокслета путем экстракции образцов тетрагидрофураном. Гель-фракция полимеров 3a и 3b составила 59 и 8% соответственно, что свидетельствует о высокой степени сшивки в случае полидиметилсилоксана, содержащего большее количество привитых фрагментов β-дикетона.

Механические свойства

На рис. 4 показаны кривые напряжение–деформация, представленные в ходе одноосного растяжения образцов. Данные, полученные в результате анализа гель-фракции образцов, согласуются с механическими испытаниями: поли-

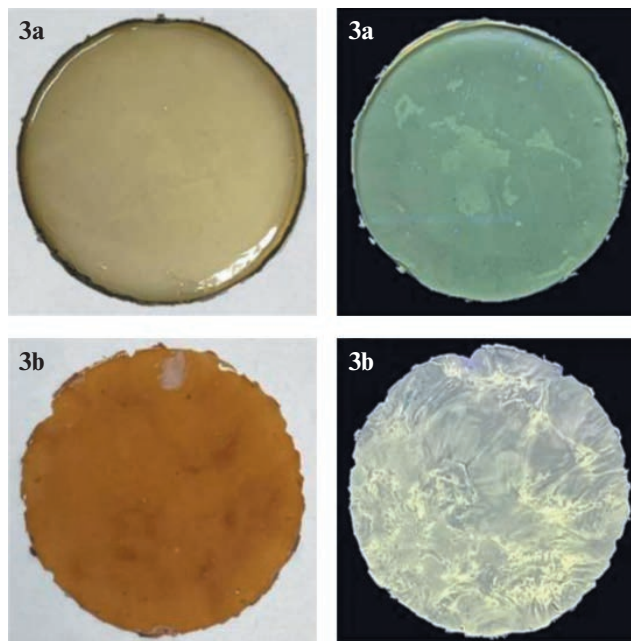


Рис. 2. Фотографии пленок 3a, 3b при видимом свете (слева) и при облучении ультрафиолетовым светом с длиной волны 365 нм (справа).

мер 3a, обладающий более густой пространственной сеткой, имеет лучшие механико-прочностные характеристики по сравнению с полимером 3b.

Предел прочности полимера 3a составил 0.33 МПа, а модуль Юнга – 0.44 МПа, это свидетельствует о большей прочности данного материала. Вместе с тем полимер 3b является более эластичным, поскольку обладает меньшим модулем и немного большей деформацией при разрыве – 140%. Данные по механическим свойствам соединений представлены в табл. 2.

Термические свойства

Термическая стабильность образцов была изучена методом ТГА в диапазоне температуры от 50 до 800°C на воздухе и в аргоне. Данные, приведенные на рис. 5a, 5b и в табл. 3, показывают, что полученные материалы обладают высокой термической и термоокислительной стабильностью, поскольку температура начала деструкции образцов лежит в диапазоне 300–400°C. Полимер 3b

Таблица 2. Механические свойства соединений 3a, 3b

| Соединение | σ, МПа | ε, % | E, МПа |
|------------|--------|------|--------|
| 3a | 0.33 | 120 | 0.44 |
| 3b | 0.19 | 140 | 0.26 |

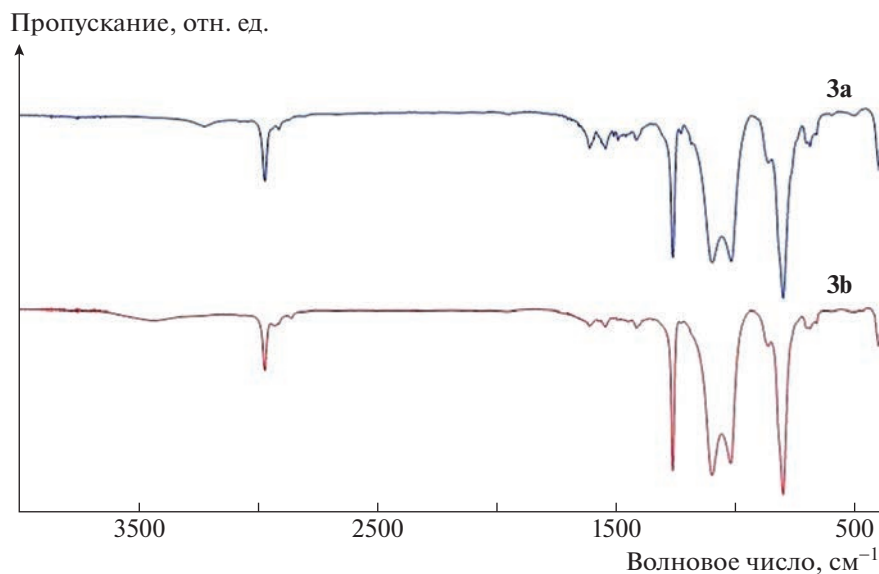


Рис. 3. ИК-спектры соединений 3а, 3б.

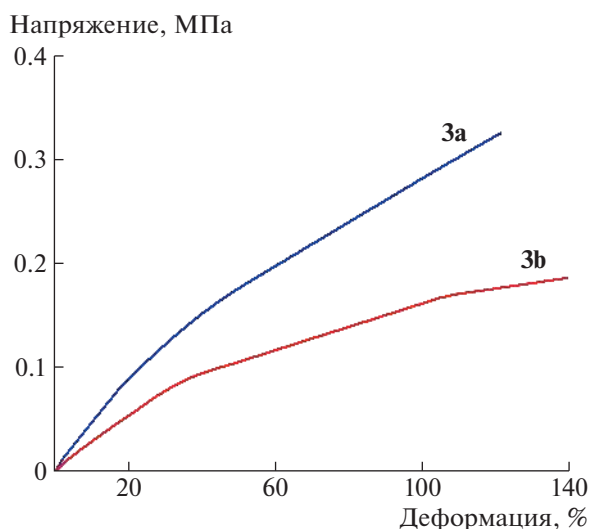


Рис. 4. Кривые напряжение–деформация для полимеров 3а, 3б.

является более стабильным по сравнению с полимером 3а, что, скорее всего, обусловлено меньшим содержанием боратных комплексов. Обращает на себя внимание низкий процент твердого остатка после термоокислительной деструкции образцов. Вероятно, содержащиеся в структуре комплексы бора могут катализировать разрыв силоксановых связей, приводя к большему количеству летучих компонентов во время анализа.

На кривых ДСК соединений 3а, 3б, приведенных на рис. 5в, в диапазоне температуры от -145 до 200°C прослеживается только стеклование образцов при -112 и -127°C соответственно. Пони-

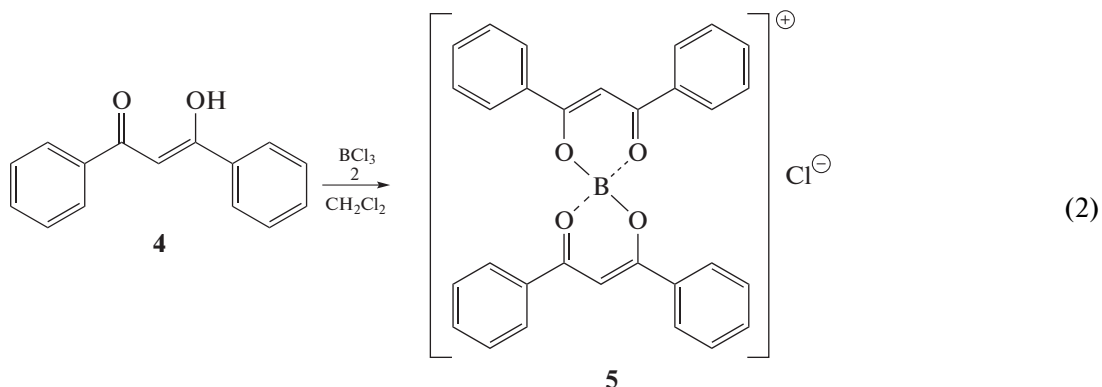
женная температура стеклования у соединения 3а может быть следствием структурирования образца, или высокого содержания комплексов. Введение комплекса $(\text{DBM})_2\text{B}^+\text{Cl}^-$ в структуру полимера способствует подавлению способности к кристаллизации, характерной для полидиметилсилоксановых полимеров.

Оптические свойства

Оптические свойства полимеров 3а, 3б исследованы методами стационарной и времяразрешенной флуоресцентной спектроскопии. Для де-

тального изучения оптических свойств было получено модельное соединение **5** по описанной

ранее методике из дибензоилметана и трихлорида бора [31]:



Спектры поглощения и испускания соединения **5** представлены на рис. 6. Спектр поглощения соединения **5** в дихлорметане содержит три выраженные полосы с максимумом при 400 нм, молярный коэффициент экстинкции составляет

$62500 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Спектр испускания соединения **5** в дихлорметане содержит две полосы: при 412 нм (максимум) и 433 нм, а также плечо при 463 нм. Квантовый выход флуоресценции комплекса составляет 80%, время жизни – 1.27 нс.

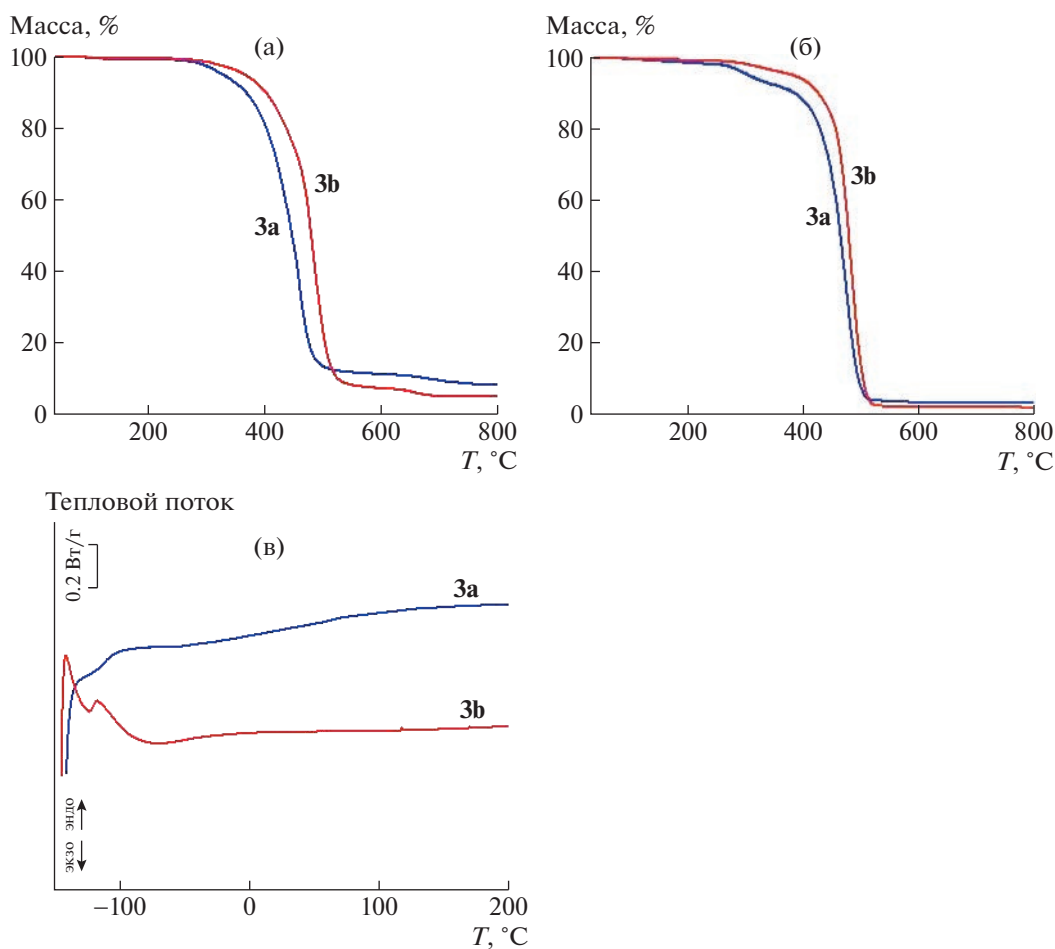


Рис. 5. Кривые ТГА полимеров **3a**, **3b** на воздухе (а) и в аргоне (б) и их кривые ДСК (в).

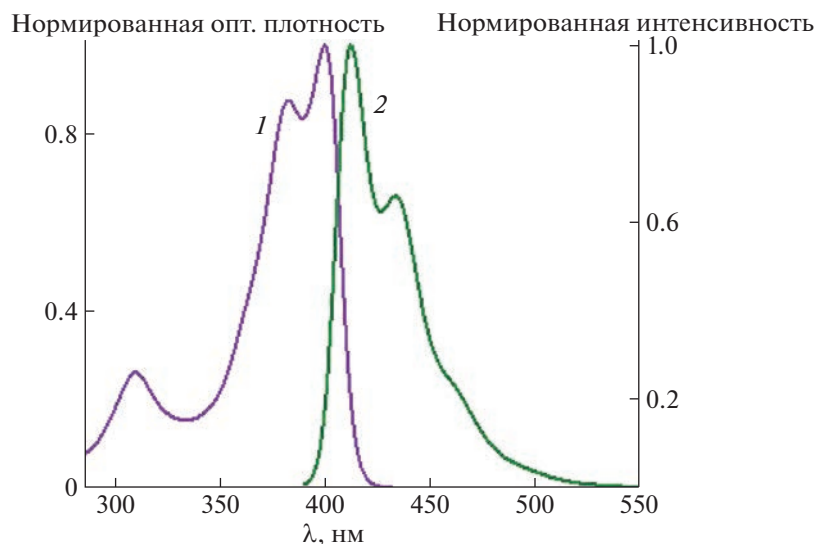


Рис. 6. Нормированные спектры поглощения (1) и испускания (2) соединения 5 в дихлорметане.

При рассмотрении на рис. 7а спектров флуоресценции полимеров 3а и 3б видно, что форма спектров меняется в зависимости от длины волны возбуждения флуоресценции. Так, в случае полимера 3а при возбуждении на 400 нм наблюдается широкая бесструктурная полоса флуоресценции в диапазоне 400–700 нм с максимумом при 530 нм, характерная для эмиссии эксимеров данных комплексов, образующихся из агрегатов в возбужденном состоянии. При возбуждении же полимера 3а на 370 нм в спектре флуоресценции дополнительно прослеживается плечо в области 430 нм, характерное для эмиссии мономерного комплекса. Более выраженную картину можно наблюдать в случае полимера 3б, содержащего меньшее количество боратных комплексов в своей структуре. В спектрах флуоресценции данного полимера при возбуждении на длине волн 370 и 400 нм видна значительная доля эмиссии мономера с максимумом ~420 нм. Спектры возбуждения флуоресценции полимеров 3а, 3б в конденсированном состоянии представлены на рис. 7б.

Таблица 3. Термические свойства соединений 3а, 3б

| Соединение | $T_d^{5\%}$, °C | Масса остатка, % | T_g , °C |
|------------|---------------------|---------------------|------------|
| | на воздухе/в аргоне | на воздухе/в аргоне | |
| 3а | 328/365 | 8/5 | -112 |
| 3б | 304/381 | 4/2 | -127 |

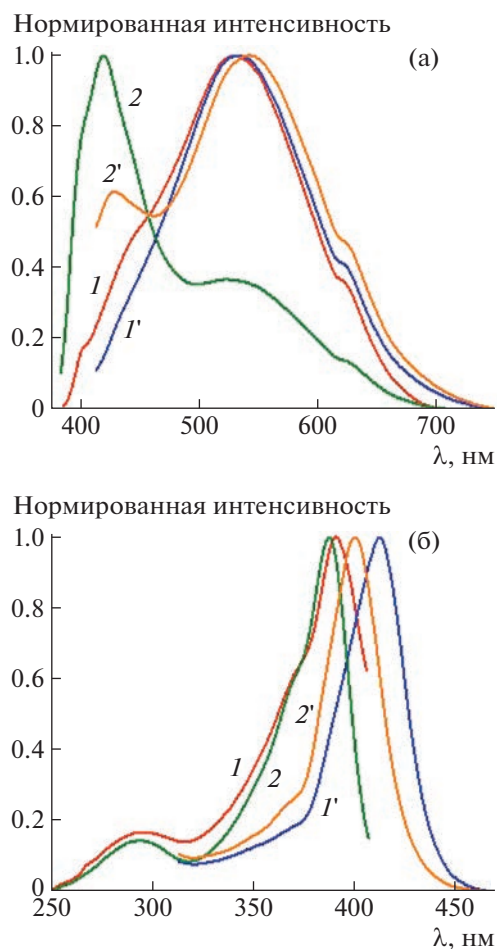


Рис. 7. Спектры флуоресценции (а) и возбуждения флуоресценции (б) полимеров 3а (1, 1') и 3б (2, 2') в конденсированном состоянии: а – при возбуждении светом с длиной волны 370 (1, 2) и 400 нм (1', 2'); б – при возбуждении на 420 (1, 2) и 600 нм (1', 2').

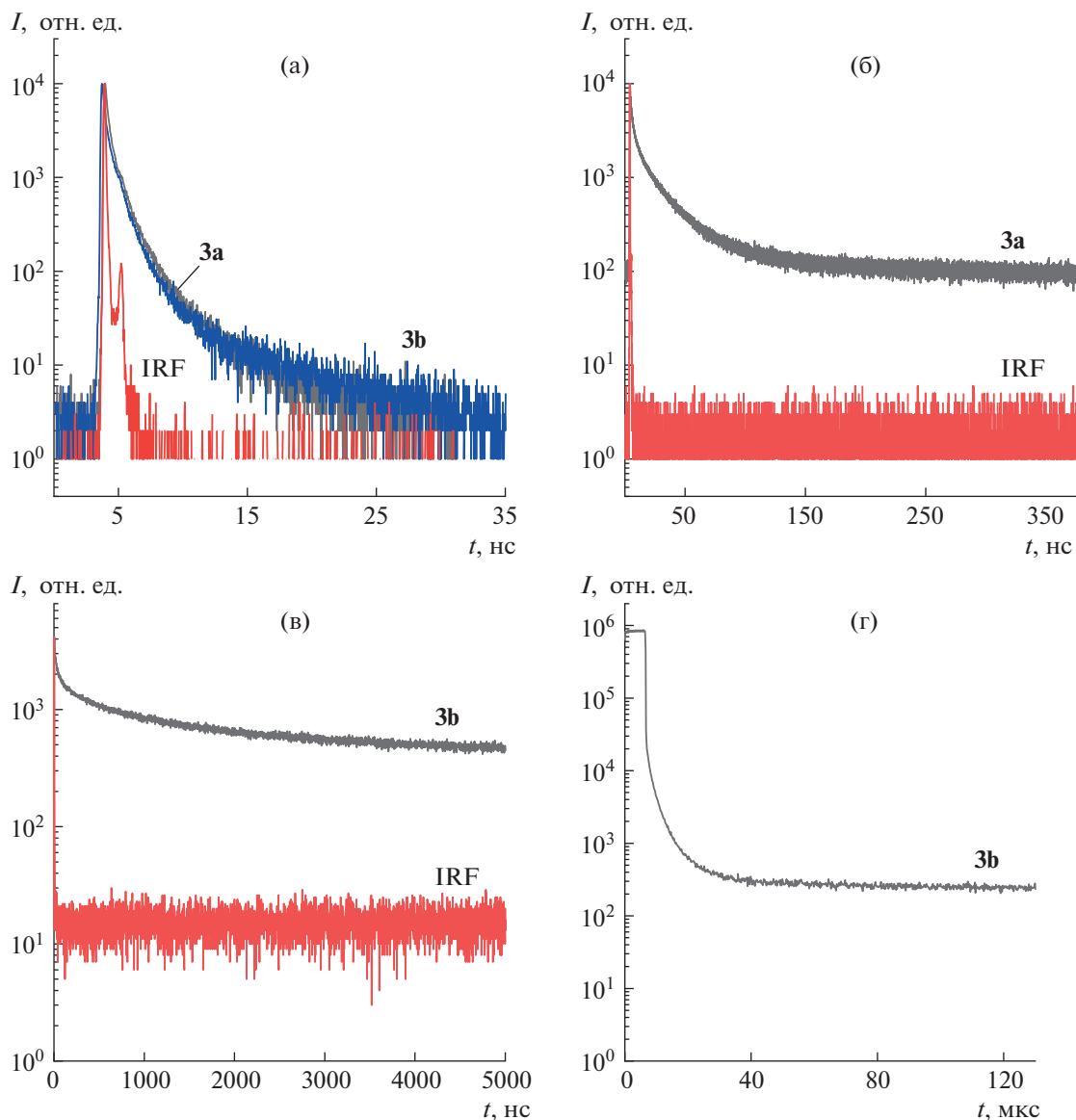


Рис. 8. Кинетические кривые затухания люминесценции (обозначены черным и красным цветом) для 3а и 3б на 433 нм (а), для 3а на 540 нм (б), для 3б на 540 нм (в), измеренные в режиме TCSPC, для 3б на 540 нм, снятые в режиме MCS при длительности вспышки 6 мкс (г). Длина волны возбуждения 375 нм. Аппаратные функции прибора, измеренные на 375 нм (IRF) в режиме TCSPC, обозначены красным цветом. (Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.)

Кинетика затухания люминесценции полимеров 3а, 3б в конденсированном состоянии, измеренная на длине волн 433 и 540 нм, представлена на рис. 8. Кинетика затухания люминесценции твердых образцов не моноэкспоненциальна. Результаты аппроксимации моделями, содержащими минимальное число экспоненциальных членов, для которых χ^2 лежит в диапазоне 0.8–1.3 [49] и видно равномерное распределение невязок и автокорреляционной функции, представлены в табл. 4. При уменьшении числа экспоненциальных членов в модели на единицу для кинетиче-

ских кривых, измеренных на 433 нм для 3а, 3б и на 540 нм для 3б, прослеживается увеличение χ^2 до 1.6. Для кинетической кривой, измеренной при 540 нм для 3а, χ^2 возрастает до 1.32, при этом характерны значительная неоднородность невязок и колебания автокорреляционной функции. На длине волны 433 нм кинетика находится в наносекундном диапазоне со средним временем жизни ~ 1 нс для обоих образцов (рис. 8а). Показатели кинетики затухания люминесценции, измеренные на длине волны 540 нм, значительно удлиняются, среднее время жизни составляет

Таблица 4. Результаты аппроксимации кинетики затухания люминесценции полимеров 3а, 3б в конденсированном состоянии. Длина волны возбуждения 375 нм

| Образец | Длина волны регистрации | | | | | |
|---------|-------------------------|---------|----------|-------------|---------|----------|
| | 433 нм | | | 540 нм | | |
| | τ , нс | A , % | χ^2 | τ , нс | A , % | χ^2 |
| 3а | 0.06 | 73.1 | 1.30 | 0.65 | 59 | 1.0 |
| | 0.33 | 20.0 | | 3.60 | 25 | |
| | 1.15 | 6.5 | | 20.30 | 15 | |
| | 4.27 | 0.4 | | 84.0 | 1 | |
| 3б | 0.92 | 71.8 | 1.34 | 21.0 | 57 | 1.1 |
| | 0.48 | 22.7 | | 247.0 | 21 | |
| | 1.35 | 5.3 | | 1546.0 | 22 | |
| | 7.63 | 0.2 | | | | |

28 нс для образца 3а (рис. 8б) и 1370 нс для образца 3б (рис. 8в). Уменьшение среднего времени жизни при увеличении количества флуорофоров свидетельствует, по-видимому, о возрастании роли процессов гибели возбужденных состояний по мере увеличения степени агрегации. Можно предположить, что по мере увеличения размера агрегата, возрастает и расстояние, на которое возможна миграция энергии возбуждения, что приводит к возрастанию вероятности потери возбуждения на различных примесных ловушках. Альтернативным объяснением будет увеличение в агрегатах скорости интеркомбинационной конверсии [50]. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

При облучении полимера 3б интенсивность люминесценции выходит на стационарное значение за ~6 мкс, что связано с накоплением в образце долгоживущих, предположительно, триплетных состояний. При длительности вспышки возбуждающего света 6 мкс в образце 3б наблюдается люминесценция со средним временем жизни 4.6 мкс (рис. 8г). По аналогии с полидиметилсилоксанами, содержащими фрагменты дикетонатов дифторида бора, можно предположить, что наличие полосы флуоресценции с максимумом при 540 нм и временем жизни десятков наносекунд связано с агрегацией флуорофорных фрагментов и характерной для агрегатов эксимерной

флуоресценцией [46]. Появление длительной люминесценции с временами затухания в микросекундном диапазоне связано, скорее всего, с механизмом термически активируемой замедленной флуоресценции агрегатов, также характерной для агрегатов комплексов дикетонатов с бором [50–52].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучено образование сшитых полисилоксанов за счет реакции привитых β -дикетонных лигандов с трихлоридом бора с образованием флуоресцентного боратного комплекса $[(DBM)_2B]^+Cl^-$. Исследованы механические свойства полученных полимеров, которые продемонстрировали, что материалы проявляют эластичность ($\epsilon = 120–140\%$), с невысоким напряжением разрыва: 0.33 МПа для полимера 3а и 0.19 МПа для 3б. Модули упругости соединений составили 0.44 МПа для 3а и 0.26 МПа для 3б. Установлено, что такие соединения обладают высокой термической и термоокислительной стабильностью, температурой стеклования $-112^\circ C$ для полимера 3а и $-127^\circ C$ для 3б и не способны к кристаллизации, характерной для полисилоксанов. Изучение оптических свойств показало, что полимеры 3а и 3б в конденсированном состоянии обладают интенсивной флуоресценцией в широком диапазоне длины волн (400–700 нм) с максимумом при 530 нм, это типично для эмиссии эксимеров борных комплексов, образующихся из агрегатов в возбужденном состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-73-10152). Характеристика соединений с помощью методов ЯМР- и ИК-спектроскопии, ТГА и ДСК осуществлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на оборудовании Центра изучения молекулярного состава Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (контракт № 075-03-2023-642). Измерение времени жизни люминесценции проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Структурная диагностика материалов” в рамках госзадания Федерального научно-исследовательского центра “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wei S., Li Z., Lu W., Liu H., Zhang J., Chen T., Tang B.Z. // *Angew. Chemie Int. Ed.* 2021. V. 60. № 16. P. 8608.
2. Ahumada G., Borkowska M. // *Polymers (Basel)*. 2022. V. 14. № 6. P. 1118.

3. *Cichosz S., Masek A., Zaborski M.* // Polym. Test. 2018. V. 67. P. 342.
4. *Calvino C., Guha A., Weder C., Schrettl S.* // Adv. Mater. 2018. V. 30. № 19. P. 1704603.
5. *Du X., Wang C., Wu G., Chen S.* // Angew. Chemie Int. Ed. 2021. V. 60. № 16. P. 8585.
6. *Birchall L., Foerster A., Rance G.A., Terry A., Wildman R.D., Tuck C.J.* // Sensors Actuators. A. 2022. V. 347. P. 113977.
7. *Alday J., Mazzeo A., Suarez S.* // Inorg. Chim. Acta. 2020. V. 510. P. 119696.
8. *Chen P.-Z., Niu L.-Y., Chen Y.-Z., Yang Q.-Z.* // Coord. Chem. Rev. 2017. V. 350. P. 196.
9. *Tanaka K., Chujo Y.* // NPG Asia Mater. 2015. V. 7. № 11. P. e2223.
10. *Loudet A., Burgess K.* // Chem. Rev. 2007. V. 107. № 11. P. 4891.
11. *Frath D., Massue J., Ulrich G., Ziessel R.* // Angew. Chemie Int. Ed. 2014. V. 53. № 9. P. 2290.
12. *Li D., Zhang H., Wang Y.* // Chem. Soc. Rev. 2013. V. 42. № 21. P. 8416.
13. *Yoshii R., Suenaga K., Tanaka K., Chujo Y.* // Chem. Eur. J. 2015. V. 21. № 19. P. 7231.
14. *Sagawa T., Ito F., Sakai A., Ogata Y., Tanaka K., Ikeida H.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2016. V. 15. № 3. P. 420.
15. *Kononevich Y.N., Temnikov M.N., Korlyukov A.A., Volodin A.D., Dorovatovskii P.V., Sazhnikov V.A., Safonov A.A., Ionov D.S., Ivanov A.A., Surin N.M., Svidchenko E.A., Muzafarov A.M.* // Chempluschem. 2020. V. 85. № 6. P. 1111.
16. *Morris W.A., Kolpaczynska M., Fraser C.L.* // J. Phys. Chem. C. 2016. V. 120. № 39. P. 22539.
17. *Louis M., Piñero García C., Brosseau A., Allain C., Métivier R.* // J. Phys. Chem. Lett. 2019. V. 10. № 16. P. 4758.
18. *Zhang L., Ma L.-L., Wang X., Zhao X.-Y.* // J. Lumin. 2019. V. 214. № 2. P. 116560.
19. *Louis M., Sethy R., Kumar J., Katao S., Guillot R., Nakashima T., Allain C., Kawai T., Metivier R.* // Chem. Sci. Royal Soc. Chem. 2019. V. 10. № 3. P. 843.
20. *Poon C.-T., Lam W.H., Wong H.-L., Yam V.W.-W.* // J. Am. Chem. Soc. 2010. V. 132. № 40. P. 13992.
21. *Li Z., Wang D., Ramella D., Gao H., Cao H., Zhao Y., Miao Z., Yang Z., He W.* // Polym. Chem. Royal Soc. Chem. 2020. V. 11. № 17. P. 3046.
22. *Zhuang M., Joshi S., Sun H., Batabyal T., Fraser C.L., Kapur J.* // Sci. Rep. Nature Publ. Group UK. 2021. V. 11. № 1. P. 1076.
23. *Li Z., Pei Y., Hou S., Dai Y., Liu D., Zhu J., Zhu Y.-P., Liu X.* // Dye. Pigment. Elsevier Ltd. 2020. V. 179. № 4. P. 108419.
24. *Kononevich Y.N., Sazhnikov V.A., Belova A.S., Korlyukov A.A., Volodin A.D., Safonov A.A., Yurasik G.A., Ionov D.S., Muzafarov A.M.* // New J. Chem. 2019. V. 43. № 35. P. 13725.
25. *Ionov D., Yurasik G., Kononevich Y., Sazhnikov V., Muzafarov A., Alfimov M.* // Procedia Eng. 2016. V. 168. P. 341.
26. *Ionov D.S., Sazhnikov V.A., Yurasik G.A., Antonov A.V., Kononevich Y.N., Alfimov M.V.* // High Energy Chem. 2015. V. 49. № 3. P. 183.
27. *Brown N.M.D., Bladon P.* // J. Chem. Soc. A. 1969. № 526. P. 526.
28. *Reynolds G.A., Chen C.H.* // J. Heterocycl. Chem. 1985. V. 22. № 3. P. 657.
29. *Martin D.* // Chem. Rev. 1944. V. 34. № 3. P. 461.
30. *Gerrard W., Lappert M.F.* // Chem. Rev. 1958. V. 58. № 6. P. 1081.
31. *Barabás A., Isfan E., Roman M., Paraschiv M., Romaş E., Balaban A.T.* // Tetrahedron. 1968. V. 24. № 3. P. 1133.
32. *Sui Z., Salto R., Li J., Craik C., Ortiz de Montellano P.R.* // Bioorganic Med. Chem. 1993. V. 1. № 6. P. 415.
33. *Shao W.-Y., Cao Y.-N., Yu Z.-W., Pan W.-J., Qiu X., Bu X.-Z., An L.-K., Huang Z.-S., Gu L.-Q., Chan A.S.C.* // Tetrahedron Lett. 2006. V. 47. № 24. P. 4085.
34. *Shi L., Gao L., Cai S., Xiong Q., Ma Z.* // Eur. J. Med. Chem. 2021. V. 221. P. 113528.
35. *Banet P., Legagneux L., Hesemann P., Moreau J., Nicole L., Quach A., Sanchez C., Tranthi T.* // Sensors Actuators. B. 2008. V. 130. № 1. P. 1.
36. *Chen X., Zhang X., Zhang G.* // Chem. Commun. Royal Soc. Chem. 2015. V. 51. № 1. P. 161.
37. *Zhang X., Zhang G.* // Anal. Methods. 2012. V. 4. № 9. P. 2641.
38. *Liang Y., Xu L., Qu F., Tang K., Wang H., Yu W.W.* // Polym. Chem. 2019. V. 10. № 35. P. 4818.
39. *Touloukhonova I., Bjerke-Kroll B., West R.* // J. Organometal. Chem. 2003. V. 686. № 1–2. P. 101.
40. *Benniston A.C., Copley G., Harriman A., Ryan R.* // J. Mater. Chem. 2011. V. 21. № 8. P. 2601.
41. *Kasprzyk W., Krzywda P., Bednarz S., Bogdał D.* // RSC Adv. 2015. V. 5. № 110. P. 90473.
42. *Chen J., Song L., Wu Y., Zhao B., Deng J.* // ACS Appl. Polym. Mater. 2022. V. 4. № 6. P. 4264.
43. *Pakhomov A.A., Kononevich Y.N., Stukalova M.V., Svidchenko E.A., Surin N.M., Cherkaev G.V., Shchegolikhina O.I., Martynov V.I., Muzafarov A.M.* // Tetrahedron Lett. 2016. V. 57. № 9. P. 979.
44. *Pakhomov A.A., Mironiuk V.B., Kononevich Y.N., Korlyukov A.A., Volodin A.D., Pryakhina T.A., Martynov V.I., Muzafarov A.M.* // Mendeleev Commun. 2017. V. 27. № 4. P. 363.
45. *Pakhomov A.A., Kim E.E., Kononevich Y.N., Ionov D.S., Maksimova M.A., Khalchenia V.B., Maksimov E.G., Anisimov A.A., Shchegolikhina O.I., Martynov V.I., Muzafarov A.M.* // Dye. Pigment. 2022. V. 203. P. 110371.

46. *Belova A.S., Khechyan A.G., Il'ina T.M., Kononevich Y.N., Ionov D.S., Sazhnikov V.A., Khanin D.A., Nikiforova G.G., Vasil'ev V.G., Muzafarov A.M.* // *Polymers (Basel)*. 2022. V. 14. № 23. P. 5075.
47. *Kim E.E., Kononevich Y.N., Dyuzhikova Y.S., Ionov D.S., Khanin D.A., Nikiforova G.G., Shchegolikhina O.I., Vasil'ev V.G., Muzafarov A.M.* // *Polymers (Basel)*. 2022. V. 14. № 13. P. 2554.
48. *Kim E.E., Kononevich Yu.N., Anisimov A.A., Buzin M.I., Vasil'ev V.G., Korlyukov A.A., Ionov D.S., Khanin D.A., Shtykova E.V., Volkov V.V., Muzafarov A.M.* // *React. Funct. Polym.* 2021. V. 164. P. 104896.
49. *Eaton D.F.* // *Pure Appl. Chem.* 1990. V. 62. № 8. P. 1631.
50. *Sun X., Wang X., Li X., Ge J., Zhang Q., Jiang J., Zhang G.* // *Macromol. Rapid Commun.* 2015. V. 36. № 3. P. 298.
51. *Fedorenko E.V., Behra M.K., Kanwishera N.* // *J. Fluoresc.* 2016. V. 26. № 5. P. 1839.
52. *Khrebtov A.A., Fedorenko E.V., Mirochnik A.G.* // *Polymer (Guildf)*. 2022. V. 256. P. 125255.