

УДК 541.64:535.37

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ИОНОВ ТЕРБИЯ В СОПОЛИМЕРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ЗВЕНЬЯ N-ВИНИЛКАРБАЗОЛА И ВИНЛАМИДОВ РАЗЛИЧНОГО СТРОЕНИЯ, В ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТНЫХ ПЛЕНКАХ<sup>1</sup>

© 2011 г. **Е. В. Ануфриева**, Т. Д. Ананьева, Т. Н. Некрасова,  
Р. Ю. Смыслов, А. В. Якиманский

*Учреждение Российской академии наук  
Институт высокомолекулярных соединений РАН  
199004 Санкт-Петербург, Большой пр., 31*

Поступила в редакцию 04.06.2010 г.  
Принята в печать 29.11.2010 г.

Методом свободнорадикальной сополимеризации синтезированы сополимеры N-винилкарбазола с N-виниламидами. Обнаружено, что сополимеры N-винилпирролидона и N-винилкапролактама с 12–21 мол. % звеньев N-винилкарбазола, диспергированные в матрице полиметилметакрилата, усиливают интенсивность люминесценции ионов тербия почти на два порядка по сравнению с его интенсивностью люминесценции в присутствии сополимеров с более высоким содержанием звеньев N-винилкарбазола. Предполагается, что этот эффект обусловлен конкуренцией двух фотофизических процессов – образования эксимеров и переноса энергии электронного возбуждения, протекающих в противоположных направлениях.

### ВВЕДЕНИЕ

Люминесцирующие комплексы ионов редкоземельных элементов с полимерными лигандами представляют большой интерес для материаловедения, биотехнологии и медицины (светоизлучающие диоды, флуоресцентные маркеры, зонды) [1, 2]. Этот интерес обусловлен высокой интенсивностью люминесценции, монохроматичностью и стабильностью излучения комплексов, большим стоксовым сдвигом и большой длительностью свечения (~1000 мкс) [3]. Перспективы использования полимерных комплексов редкоземельных элементов требуют изучения механизмов переноса энергии электронного возбуждения (ЭЭВ) от хромофора, присоединенного к полимерной цепи, к иону редкоземельных элементов, приводящих к повышению интенсивности люминесценции; расширения круга полимерных лигандов, способствующих улучшению фотофизических, механических, термостойких свойств полимерных пленок [4]; установления особенностей взаимодействия ионов с полимерной матри-

цей в композитных материалах [5]. Одним из наиболее актуальных направлений использования светоизлучающих полимерных материалов является создание на их основе электролюминесцентных устройств, в которых возбуждение полимерного люминофора достигается за счет рекомбинации инжектируемых в полимерный слой электронов и дырок. Для этого необходимо сочетание в полимере люминесцентных и электропроводящих свойств. Такое сочетание может быть реализовано в сополимерах N-винилкарбазола (ВК), звенья которого обеспечивают дырочную проводимость [5–9], с мономерами, содержащими лигандные группы, образующими светоизлучающие комплексы с редкоземельными элементами.

В данной работе синтезированы полимерные лиганды на основе сополимеров ВК с N-виниламидами (ВА) [10], N-феноксифенилметакриламидом (ФОФМА) и метилметакрилатом (ММА), а также их комплексы с ионами Tb<sup>3+</sup>. Установление факторов, способствующих повышению интенсивности люминесценции этих комплексов, диспергированных в полимерных пленках, изучение влияния природы полимерной матрицы на фотофизические свойства комплексов – задача настоящей работы.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения химии и наук о материалах РАН (проект “Создание и изучение макромолекул и макромолекулярных структур новых поколений” по направлению “Электропроводящие и электроактивные полимеры” (координатор – академик А.Р. Хохлов)).

E-mail: urs@mail.macro.ru (Смыслов Руслан Юрьевич).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Сополимеры ВК и N-винилкапролактама (ВКЛ), N-винилпирролидона (ВП), N-метил-N-винилацетамида (МВАА), ФОФМА или ММА синтезировали методом свободнорадикальной сополимеризации в ДМАА при использовании ДАК в качестве инициатора при 60°C,  $c_{\text{мон}} = 2.5\text{--}4.0$  моль/л,  $c_{\text{ДАК}} = (0.6\text{--}3.0) \times 10^{-2}$  моль/л. ММ для сополимеров ВК–ВКЛ и ВК–ВП с содержанием сомономерных звеньев ВК < 20 мол. % оценивали из значений характеристической вязкости раствора  $[\eta]$  по формулам

$$[\eta] = 3.98 \times 10^{-4} \times M^{0.56}$$

для ПВКЛ (ДМФА, 25°C) [11],

$$[\eta] = 1.38 \times 10^{-4} \times M^{0.7}$$

для ПВП (ДМФА, 25°C) [11],

а ММ сополимеров с содержанием сомономерных звеньев ВКЛ или ВП < 20 мол. % – по выражению

$$[\eta] = 3.35 \times 10^{-4} \times M^{0.58}$$

для ПВК (бензол, 25°C) [12].

Для сополимеров с содержанием звеньев ВК 20–80 мол. % в таблице указаны значения  $[\eta]$ . В остальных случаях для сополимеров ВК–ФОФМА, ВК–ММА и ВК–МВАА определяли только состав сополимеров с помощью УФ-спектров при  $\lambda = 346$  нм (полоса поглощения ВК). Значения коэффициента экстинкции мономерных звеньев ВК принимали равным значению коэффициента экстинкции их низкомолекулярной модели  $\epsilon = 3300$  л/моль см.

Гомополимеры ПВК с  $M = 35 \times 10^3$  и  $15 \times 10^3$ , а также ПВКЛ с  $M = 70 \times 10^3$  синтезированы в тех же условиях, что и сополимеры.

Комплексы сополимеров с ионами Tb<sup>3+</sup> исследовали в пленках, полученных из растворов в ДМФА, содержащих сополимер, ионы металла и матричный полимер (ПММА, ПС или поли-N-винилпирролидон – ПВП). Концентрация звеньев ВК  $c_{\text{ВК}}$  в растворах для приготовления пленок была одинаковой и равной 0.02 мас. %,  $c_{\text{Tb}^{3+}} = 0.035$  мас. %,  $c_{\text{пол}} = 2.5$  мас. %. Раствор выливали на стеклянную подложку и сушили при 60°C в течение 18 ч. Полученные таким образом пленки содержали одинаковое количество люминесцирующих звеньев ВК в единице объема.

Спектры люминесценции пленок поли-N-винилкарбазола (ПВК), сополимеров и их комплексов с ионами Tb<sup>3+</sup> измеряли на люминесцентном спектрофотометре LS-100 (фирма РТИ, Канада), используя приставку для твердотельных образцов, позволяющую снимать сигнал с поверхности, на которую падает возбуждающий свет, под углом 90°. Спектральная ширина щелей монохроматоров на входе и выходе 4 нм. Спектры люминесценции комплексов получали в режиме

Вязкость и ММ сополимеров N-винилкарбазола различного химического строения

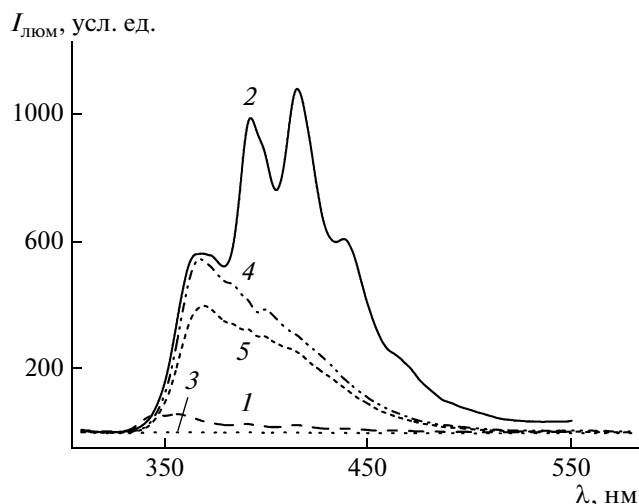
Сополимер	Состав сополимера, мол. %	$[\eta]$ (ДМФА, 25°C), дл/г	$M \times 10^{-3}$
ВКЛ–ВК	93 : 7		
	83 : 17	0.13	31
	79 : 21	0.16	45
	69 : 31	0.14	
	55 : 45	0.13	
	44 : 56		
	22 : 78		
ВП–ВК	9 : 91	0.18	51
	97 : 3	0.23*	40*
	89 : 11	0.42	96
	68 : 32	0.27	
	48 : 52	0.26	

\* Метанол, 25°C.

фосфоресценции (интервал интегрирования сигнала 200–1000 мкс). Полученные значения интенсивности люминесценции пленок приведены к одному значению усиления фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Коэффициент усиления ФЭУ контролировали по интенсивности свечения эталона. Такое приведение позволяет сравнивать эти величины для различных образцов в условных единицах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

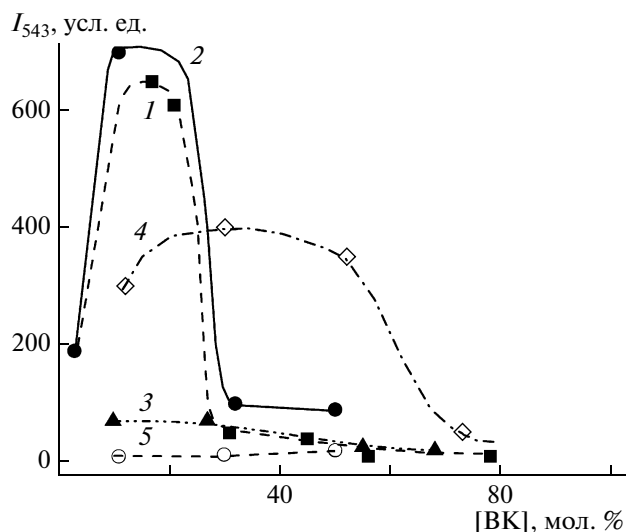
Обнаружено, что в пленках ПММА, включающих ПВК и Tb<sup>3+</sup>, интенсивность люминесценции ионов Tb<sup>3+</sup> ( $I_{543}$ ) выше, чем в пленках ПММА, содержащих либо только Tb<sup>3+</sup>, либо ионы вместе с моделью ВК. Значения  $I_{543}$  при  $\lambda_{\text{возб}} = 300$  нм для пленок, содержащих модель ВК, ПВК и ПВК–ПВКЛ, соответственно равны 0, 5 и 58 усл. ед. Можно предположить, что такое усиление люминесценции связано с образованием полимерного комплекса ПВК–Tb<sup>3+</sup> и возможным переносом ЭЭВ от звеньев ПВК к иону Tb<sup>3+</sup>. Однако эффективность процесса переноса мала, что обусловлено особенностями как фотофизических свойств ПВК, так и структурой комплекса ПВК–Tb<sup>3+</sup>. Известно [13, 14], что спектр люминесценции ПВК представлен в основном эксимерным свечением, коротковолновая полоса (365–370 нм) которого принадлежит эксимерам, образованным за счет взаимодействия частично перекрывающихся групп ВК, а длинноволновая (400–420 нм) – эксимерам, образованным за счет взаимодействия полностью перекрывающихся групп ВК.



**Рис. 1.** Спектры люминесценции ПВКЛ-ЛМ (1), смеси ПВК и ПВКЛ-ЛМ (2), 9-антриметилметакриламида (3), ПВК (4) и смеси ПВК и 9-антриметилметакриламида (5) в пленках ПММА. Длина волны возбуждения люминесценции 300 нм. Усиление ФЭУ 500. Молекулярная масса ПВК =  $15 \times 10^3$ .

Экцимеры являются “ловушками” [15] для возбуждающего света, и перенос ЭЭВ в таких системах малоэффективен: поэтому в пленках ПММА, содержащих ПВК и  $Tb^{3+}$ , интенсивность люминесценции  $Tb^{3+}$  составляет  $\sim 5$  усл. ед.

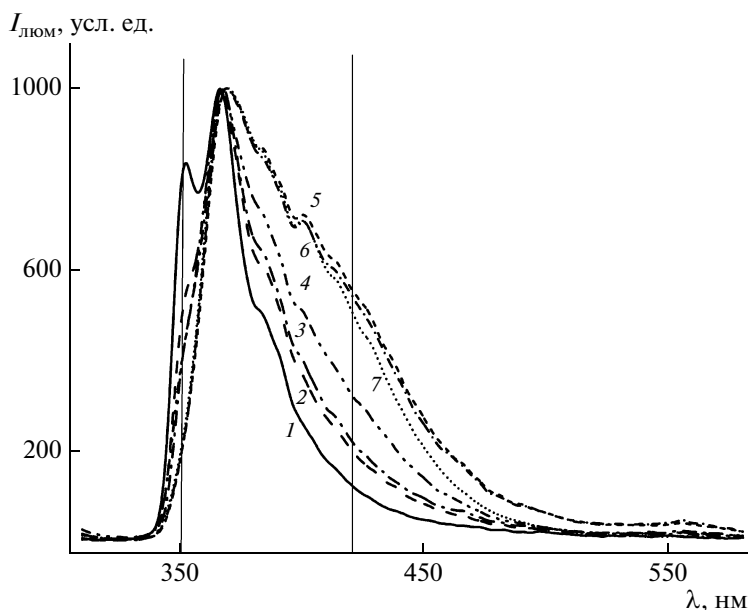
Можно принять, что введение в данную систему добавок, взаимодействующих со звеньями ВК и препятствующих экцимерообразованию, будет способствовать более эффективному переносу ЭЭВ и, следовательно, более интенсивной люминесценции  $Tb^{3+}$ . Для проверки данного предположения в систему ПВК- $Tb^{3+}$  добавили макромолекулы ПВКЛ, способные образовывать комплексы с низко- и высокомолекулярными соединениями различной природы, в том числе с ионами металлов [10], что привело к возрастанию интенсивности люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  в пленке ПММА на порядок. Для объяснения полученного результата предположили, что на эффективность переноса ЭЭВ существенное влияние оказывает изменение внутри- и межмолекулярных взаимодействий в системе, содержащей макромолекулы ПВК, ПВКЛ и  $Tb^{3+}$ . Доказательство взаимодействия между этими полимерами было получено при исследовании люминесценции смеси ПВК и ПВКЛ с ковалентно присоединенной люминесцирующей меткой (ЛМ) антраценовой структуры (ПВКЛ-ЛМ) в пленке ПММА. Обнаружено, что при возбуждении пленки, содержащей ПВК и ПВКЛ-ЛМ, светом с длиной волны 300 нм, при которой антрацен в обычных условиях практически не люминесцирует (рис. 1,



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  от содержания звеньев ВК в сополимерах ВК-ВКЛ (1), ВК-ВП (2), ВК-МВАА (3), ВК-ФОФМА (4), ВК-ММА (5) в пленках ПММА. Длина волны возбуждения люминесценции 300 нм. Усиление ФЭУ 400.

кривые 1 и 3), наблюдается интенсивная люминесценция с характерными для антрацена максимумами при 390 и 417 нм, а люминесценция ПВК проявляется в виде плеча при 365 нм (кривая 2). В пленке ПММА, содержащей ПВК и модель ЛМ – низкомолекулярное производное антрацена 9-антриметилметакриламид (кривая 4), видна только полоса люминесценции ПВК (кривая 5), т.е. в системе ПВК-модель ЛМ перенос ЭЭВ не происходит. Можно предположить, что переносу ЭЭВ от звеньев ВК к антраценосодержащим звеньям ПВКЛ-ЛМ способствует взаимодействие звеньев ПВКЛ с ПВК за счет слабых ван-дер-ваальсовых сил.

В пленке, содержащей ПВК, ПВКЛ и  $Tb^{3+}$ , взаимодействие звеньев ПВК со звеньями ПВКЛ и ионами  $Tb^{3+}$ , по-видимому, усиливает люминесценцию за счет уменьшения эффективности экцимерообразования и возможного образования комплекса ВК-ВКЛ в возбужденном состоянии (в виде эксиплекса). Следующим этапом в получении и исследовании люминесцирующих комплексов  $Tb^{3+}$  с участием звеньев ВК и ВКЛ был переход к их сополимерам, в которых взаимодействие звеньев ВК и ВКЛ будет более вероятным, чем в смеси гомополимеров. Для этой цели были синтезированы сополимеры ВК и ВКЛ широко варьируемого состава (таблица). На рис. 2 приведена зависимость интенсивности люминесценции  $I_{543}$  ионов  $Tb^{3+}$  от состава сополимеров ВК-ВКЛ в пленках ПММА (кривая 1). Видно, что при содержании звеньев ВК 17–21 мол. % интенсив-



**Рис. 3.** Нормированные спектры люминесценции сополимеров ВК–ВКЛ разного состава в пленках ПММА. Содержание звеньев ВК 7 (1), 17 (2), 21 (3), 45 (4), 56 (5), 78 (6) и 100 мол. % (7). Длина волны возбуждения люминесценции 300 нм. Нормировка при 366 нм к 1000 усл. ед.

ность люминесценции ионов  $Tb^{3+}$   $I_{543}$  достигает максимальных значений, затем при содержании звеньев ВК 21–30 мол. % величина  $I_{543}$  уменьшается до 50 усл. ед. и приближается к значениям, характерным для комплексов на основе ПВК. Причиной такого влияния состава сополимера (при одинаковой концентрации звеньев ВК в пленке) на интенсивность люминесценции  $Tb^{3+}$  могут быть конкурентные взаимодействия между звеньями ВК, ВКЛ и ионами  $Tb^{3+}$ . При малом содержании звеньев ВК (до 21 мол. %) взаимодействие ВК–ВКЛ преобладает по сравнению с ВК–ВК и возрастает вероятность формирования комплекса ВК–ВКЛ.

Сополимеры ВК–ВП с ионами  $Tb^{3+}$  (рис. 2, кривая 2) ведут себя аналогично сополимерам, содержащим звенья ВКЛ. Сополимеры ВК–МВАА, в которых отсутствуют лактамные кольца, также образуют комплексы с ионами  $Tb^{3+}$  (рис. 2, кривая 3), но их значения  $I_{543}$  на порядок ниже, чем значения  $I_{543}$  для комплексов  $Tb^{3+}$  с сополимерами, содержащими звенья ВКЛ или ВП, и слабо зависят от состава. При замене лактамных колец ВА на ароматические кольца, как, например, в сополимере ВК–ФОФМА, образование люминесцирующих комплексов с ионами  $Tb^{3+}$  наблюдается в широком интервале содержания звеньев ВК в сополимере (от 12 до 50 мол. %). В этом случае значения  $I_{543}$  ионов  $Tb^{3+}$  в 2 раза ниже по сравнению со значениями для систем, содержащих сополимеры ВК–ВКЛ или ВК–ВП.

На рис. 3 приведены спектры собственной люминесценции пленок, содержащих сополимеры ВК–ВКЛ с различным содержанием звеньев ВК. Их форма зависит от состава сополимера: с повышением содержания ВК звеньев возрастает относительный вклад в интегральную интенсивность длинноволновой полосы (420 нм), соответствующей люминесценции низкоэнергетических эксимеров с полным перекрытием групп ВК [13]. Увеличение эффективности эксимерообразования с ростом содержания ВК звеньев препятствует переносу ЭЭВ и поэтому может приводить к уменьшению люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  [14, 16].

Для характеристики эффективности эксимерообразования в макромолекулах со звеньями ВК был использован параметр  $\chi_{\text{экс}} = I_{420}/I_{350}$ , где  $I_{420}$  и  $I_{350}$  – интенсивность люминесценции эксимерной ( $\lambda_{\text{набл}} = 420$  нм) и мономерной ( $\lambda_{\text{набл}} = 350$  нм) полос ВК [13] в спектре люминесценции сополимеров. Влияние строения сомономерного звена в исследованных сополимерах на значения параметра  $\chi_{\text{экс}}$  показано на рис. 4.

Для оценки эффективности переноса ЭЭВ использовали отношение интенсивностей люминесценции ПВКЛ–ЛМ ( $\lambda_{\text{набл}} = 417$  нм) в присутствии сополимеров с различным содержанием звеньев ВК при возбуждении светом с длиной волны 300 и 365 нм:

$$\chi_{\text{пер.эн}} = I_{300}^{417}/I_{365}^{417}$$

В отсутствие переноса энергии при возбуждении светом с длиной волны 300 нм наблюдается спектр люминесценции, характерный для звеньев

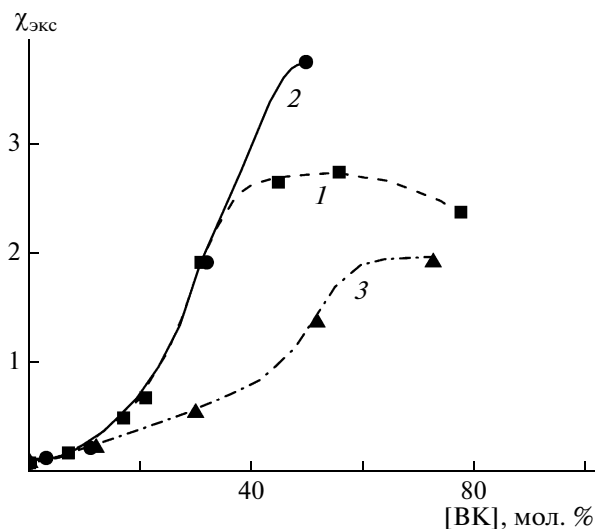


Рис. 4. Влияние строения сомономерных звеньев в сополимерах ВК–ВКЛ (1), ВК–ВП (2), ВК–ФОФМА (3) на эксимерообразование  $\chi_{\text{экс}}$ .

ВК, спектр люминесценции антрацена проявляется в виде слабых полос на соответствующей длине волн, а при возбуждении светом с длиной волны 365 нм – спектр люминесценции антрацена. На рис. 5 приведены зависимости  $\chi_{\text{экс}}$  и  $\chi_{\text{пер.эн}}$  от содержания звеньев ВК в сополимерах различного состава. Видно, что с уменьшением содержания звеньев ВК эффективность эксимерообразования падает, а переноса ЭЭВ растет и коррелирует с повышением интенсивности люминесценции ионов  $\text{Tb}^{3+}$ . Таким образом, полученные данные показывают, что только звенья

ВК, взаимодействующие со звеньями другого сомономера (ВКЛ, ВП, ФОФМА), эффективно передают иону  $\text{Tb}^{3+}$  энергию возбуждающего света (“активация” звеньев ВК). С увеличением содержания в макромолекуле звеньев ВК происходит кооперативное образование эксимеров, что связано с взаимодействием как соседних, так и удаленных по цепи звеньев ВК, в результате чего эффективность переноса энергии возбуждающего света к ионам  $\text{Tb}^{3+}$  падает до значений, характерных для комплекса ПВК– $\text{Tb}^{3+}$ .

В сополимерах ВК–ММА значения  $I_{543}$  остаются очень низкими (8–14 усл. ед.) и практически не зависят от содержания звеньев ВК (рис. 2, кривая 5). Включение звеньев ММА препятствует формированию низкоэнергетических эксимеров между звеньями ВК (рис. 6, кривая 4). Следует отметить, что спектры собственного свечения сополимера ВК–ММА (50 : 50) подобны спектрам сополимера ВК–ВКЛ (17 : 83), но различие в значениях  $I_{543}$  указывает на неэффективность внутримолекулярного переноса ЭЭВ в случае сополимеров ВК–ММА, т.е. звенья ММА, как и звенья МВАА, не способны обеспечить эффективный перенос ЭЭВ к ионам  $\text{Tb}^{3+}$ .

Экстремальная зависимость  $I_{543}$  от состава сополимера, обнаруженная только для сополимеров ВК со звеньями, содержащими циклические структуры (ВК, ВП, ФОФМА), позволяет предположить, что эффективному внутримолекулярному переносу ЭЭВ к иону  $\text{Tb}^{3+}$  способствует образование эксиплекса между циклами – карбазольным и лактамным (ВКЛ, ВП) или бензольным (ФОФМА). Известно, что в образовании эксиплексов могут принимать участие

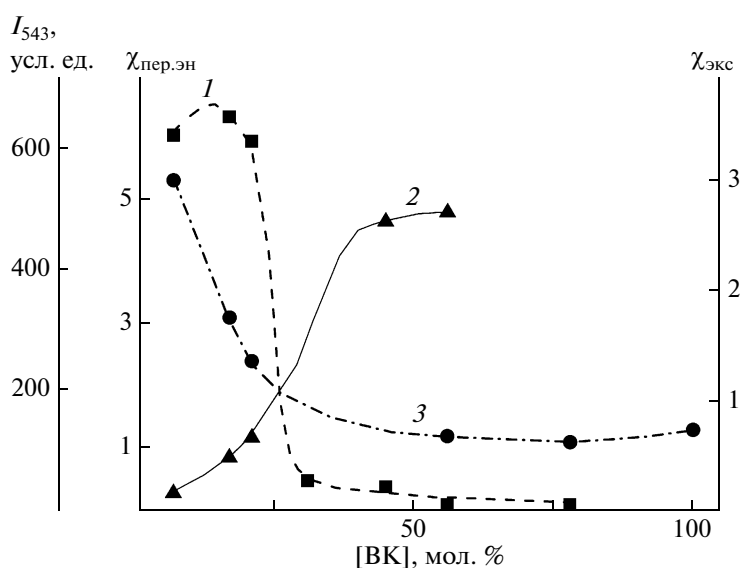
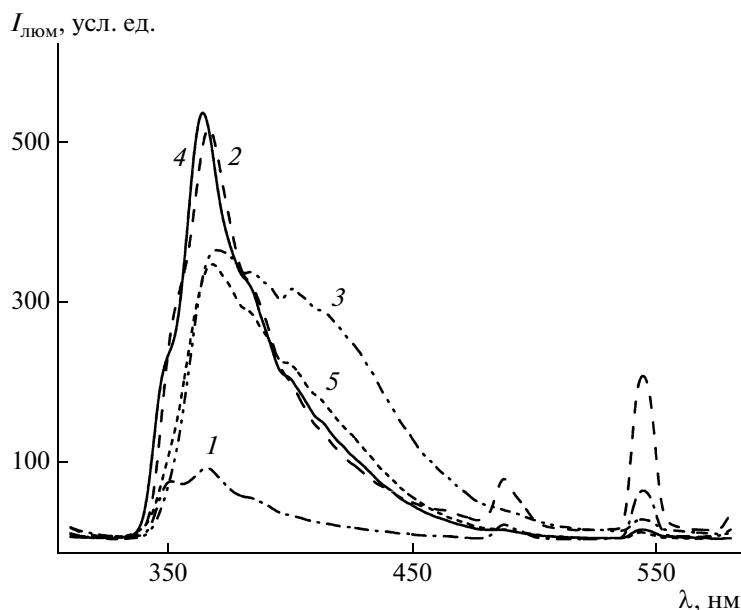


Рис. 5. Влияние содержания звеньев ВК в сополимере ВК–ВКЛ на  $I_{543}$  ионов  $\text{Tb}^{3+}$  (1),  $\chi_{\text{экс}}$  (2) и  $\chi_{\text{пер.эн}}$  (3).



**Рис. 6.** Спектры люминесценции пленок ПММА, содержащих комплексы ионов  $Tb^{3+}$  с сополимерами ВК–ВКЛ (1–3), ВК–ММА (4) и гомополимером ПВК (5). Содержание звеньев ВК в сополимерах 17 (1, 2), 91 (3) и 50 мол. % (4). Концентрация звеньев ВК в пленке 0.04 (1) и 0.4 мас. % (2–5). Длина волны возбуждения люминесценции 300 нм. Усиление ФЭУ 400.

не только ароматические системы [17]. Надо отметить, что эксиплексы и эксимеры не существуют в основном состоянии, прямым доказательством их образования может служить лишь наличие их люминесценции. Однако, если сумма констант скорости безызлучательных процессов, в которых участвуют эксиплексы, достаточно велика, то время жизни эксиплекса будет настолько мало, что его люминесценцию нельзя будет наблюдать. Если энергия образования эксиплекса меньше  $k_B T$ , то в данном случае также могут образовываться короткоживущие нелюминесцирующие эксиплексы [17]. Возможно, поэтому в спектрах люминесценции сополимеров не наблюдается полосы испускания эксиплекса.

Важную роль в получении люминесцирующих комплексов ионов  $Tb^{3+}$ , как оказалось, играет полимерная матрица. Было обнаружено, что в пленках ПС или ПВП значение  $I_{543}$  для комплекса  $Tb^{3+}$  с сополимером ВК–ВКЛ состава 17 : 83 равно 139 и 127 усл. ед., что заметно ниже, чем в пленках ПММА (620 усл. ед.). Этот результат указывает на существенную роль межмолекулярных взаимодействий матрица–сополимер в переносе ЭЭВ и формировании надмолекулярных структур. В матрице ПС, по-видимому, предпочтительнее взаимодействия между звеньями ВК и стирола ( $\pi$ – $\pi$ -взаимодействия), а в матрице ПВП более выгодными являются взаимодействия между звеньями ВКЛ и ВП (между лактамными кольцами) по сравнению с взаимодействием звеньев ВК и ВКЛ сополимера. В обоих случаях взаимодей-

ствие сополимера с матрицей приводит к ослаблению внутримолекулярных взаимодействий между звеньями ВК и ВКЛ и соответственно к уменьшению эффективности передачи ЭЭВ. Возможно, слабая люминесценция  $Tb^{3+}$  в присутствии сополимера ВК–ММА в матрице ПММА также отчасти обусловлена взаимодействием звеньев ММА с матрицей. Этот результат необходимо принимать во внимание при формировании светоизлучающих и проводящих слоев в полимерных светодиодах [5].

Полученные в настоящей работе данные показывают, что сополимеры ВК–ВКЛ и ВК–ВП, содержащие 12–21 мол. % звеньев ВК, повышают величину  $I_{543}$  ионов тербия в матрице ПММА почти на два порядка по сравнению с  $I_{543}$  для сополимеров с более высоким содержанием звеньев ВК. Сополимеры ВК–ФОФМА с содержанием звеньев ВК до 50 мол. % усиливают  $I_{543}$  почти на порядок. Два фактора приводят к возрастанию интенсивности люминесценции ионов  $Tb^{3+}$ : во-первых, уменьшение эффективности эксимерообразования между звеньями ВК за счет образования их эксиплексов с ВКЛ, ВП или ФОФМА; во-вторых, природа матрицы, взаимодействие с которой звеньев сополимеров уменьшает вероятность образования комплекса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lanthanide Probes in Life, Chemical and Earth Sciences. Theory and Practice / Ed. by J.C.G. Bunzli, G.R. Choppin. Amsterdam: Elsevier, 1989.

2. Карасев В.Е., Петроченкова Н.В. Лантанидсодержащие полимеры. Владивосток: Дальнаука, 2005.
3. Ермолаев В.Л., Свешникова Е.Б. // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 11. С. 962.
4. Якиманский А.В., Краковяк М.Г., Гойхман М.Я., Смыслов Р.Ю., Подешво И.В., Лорецян Н.Л., Некрасова Т.Н., Ананьева Т.Д., Ануфриева Е.В. // Высокомолек. соед. А. 2010. Т. 52. № 1. С. 32.
5. Каткова М.А., Витухновский А.Г., Бочкарев М.Н. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 12. С. 1193.
6. Chiellini E., Solaro R., Galli G., Ledwith A. // Adv. Polym. Sci. 1984. V. 62. P. 144.
7. Ling Q.D., Cai Q.J., Kang E.T., Neoh K.G., Zhu F.R., Wei Huang // J. Mater. Chem. 2004. V. 14. № 18. P. 2741.
8. Grazulevicius J.V., Stroehriegl P., Pielichowski J., Pielichowski K. // Prog. Polym. Sci. 2003. V. 28. P. 1297.
9. Itoh Y., Satoh H., Yasue T., Hachimori A. // Macromolecules. 1994. V. 27. № 6. P. 1434.
10. Кириш Ю.Э. Поли-N-винилпирролидон и другие поли-N-виниламиды. М.: Наука, 1998.
11. Уринов Э.Н., Киргизбаева М.Ю., Косимов А.С., Рашидова С.Ш. // Высокомолек. соед. А. 1989. Т. 31. № 3. С. 607.
12. Encyclopedia of Polymer Science and Technology / Ed. by H.F. Mark, N.G. Gaylord. New York; London; Sydney; Toronto: Wiley, 1971.
13. Polymer Photophysics. Luminescence, Energy Migration and Molecular Motion in Synthetic Polymers / Ed. by D. Phillips. London; New York: Chapman and Hall, 1985.
14. Roberts A.J., Phillips D. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1. 1981. V. 77. P. 2724.
15. Evers F., Kobs K., Memming R., Terrell D.R. // J. Am. Chem. Soc. 1983. V. 105. № 19. P. 5988.
16. Ito S., Takami K., Tsuji Y., Yamamoto M. // Macromolecules. 1990. V. 23. № 10. P. 2666.
17. Баратрон Д., Коил Д. Возбужденные состояния в органической химии. М.: Мир, 1978.