

УДК 535.37

## ПЕРЕКЛЮЧАЕМАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИМИДАЗОЛОВ И АЗОМЕТИНОВ

© 2020 г. И. Р. Мардалейшвили<sup>а</sup>, Г. В. Любимова<sup>а</sup>, А. В. Любимов<sup>а</sup>,  
Л. С. Кольцова<sup>а</sup>, А. И. Шиенок<sup>а</sup>, П. П. Левин<sup>а, б</sup>,  
А. С. Татиколов<sup>б</sup>, Н. Л. Зайченко<sup>а, \*</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Институт химической физики  
им. Н.Н. Семенова, Российской академии наук,  
ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики  
им Н.М. Эмануэля Российской академии наук,  
ул. Косыгина, 4, Москва, 119334 Россия

\*E-mail: marli2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.12.2018 г.

После доработки 19.12.2018 г.

Принята к публикации 20.08.2019 г.

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства соединений АЗ–СА, А4–о–СА и А4–о–К, структура которых включает в качестве фрагментов трифенилимидазол АЗ, тетрафенилимидазол А4 и гидрокиазометины – салицилиденанилин СА и кумаринзамещенный азометин К. В то время как в соединении АЗ–СА существует электронное сопряжение фрагментов и переключаемая люминесценция проявляется только в спиртовых растворах, при соединении этих люминофоров через кислородный мостик наблюдается независимое поведение фрагментов и существует возможность переключения люминесценции изменением длины волны возбуждения в растворах и в полимерных средах.

*Ключевые слова:* имидазолы, азометины, переключаемая люминесценция

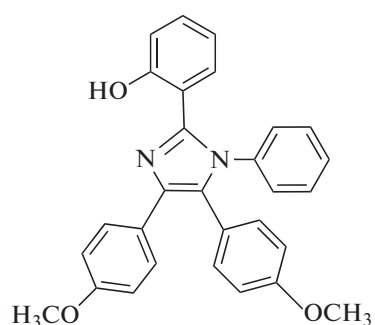
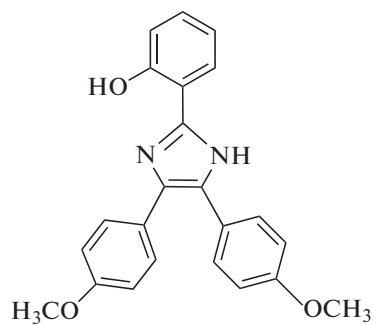
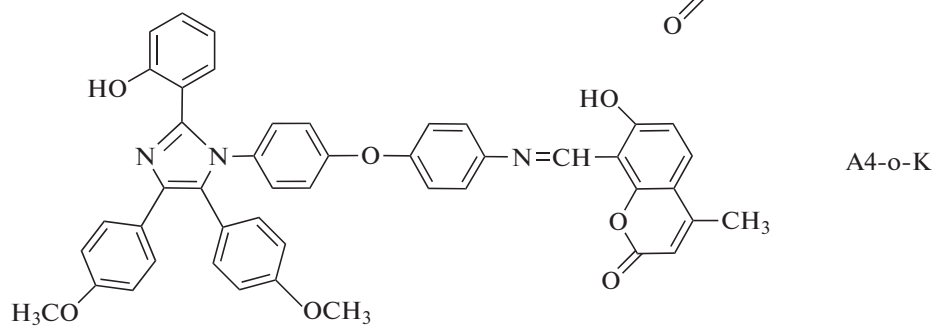
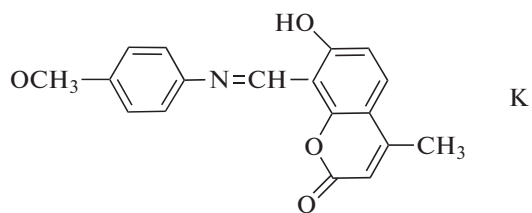
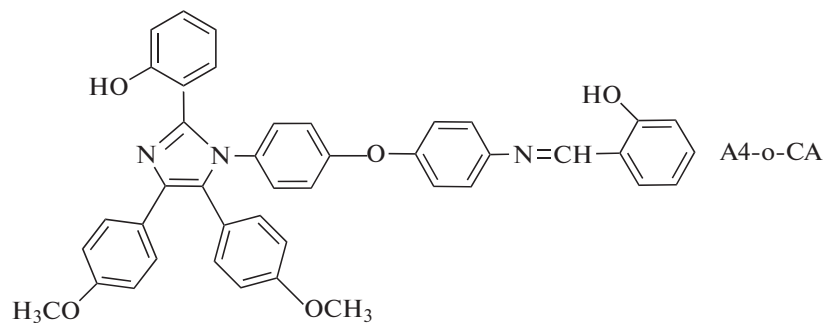
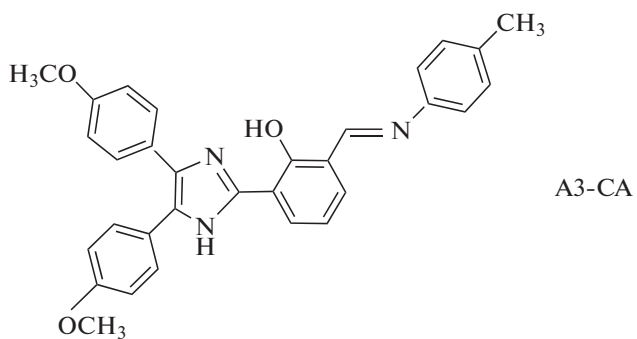
**DOI:** 10.31857/S002311932001009X

В продолжение наших работ по дизайну и синтезу соединений [1, 2], отличающихся множественной люминесценцией, синтезированы и исследованы спектрально-люминесцентные свойства соединений, состоящие из имидазола и азометина при разных способах соединения этих люминофорных фрагментов. В качестве люминесцирующих фрагментов выбраны гидрокситрифенил и гидрокситетрафенилимидазол АЗ и А4 и гидрокиазометины – СА (салицилиденанилин) и К. В каждом из фрагментов возможен внутримолекулярный перенос протона, приводящий к образованию люминесцирующей кето-формы.

В А4–о–СА и А4–о–К соединении двух фрагментов происходит через кислородный мостик, а в АЗ–СА азометин присутствует как заместитель в

фенольном кольце трифенилимидазола. В А4–о–К структура СА фрагмента усложнена введением кумариновой структуры.

Совмещая в одной молекуле фрагменты – люминофоры с люминесценцией в разных спектральных областях рассчитывали на получение в спектре люминесценции двух полос эмиссии с возможностью переключения между ними изменением длины волны возбуждения. В соединении АЗ–СА, структура которого допускает два пути внутримолекулярного переноса протона, можно ожидать образования смеси продуктов переноса протона в обоих фрагментах, характеризующихся различными спектрами люминесценции.



МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Соединение АЗ–СА получено в соответствии с методикой, описанной в [1], а А4–о–СА и А4–о–К – по методике, представленной в приложении к работе [3].

Для приготовления растворов исследуемых соединений ( $10^{-6}$ – $10^{-4}$  моль/л) использовали органические растворители фирмы Acros марки “для спектроскопии”. Полимерные пленки ПММА и ПВБ с добавкой исследуемых соединений приготовлены из совместных растворов полимеров и добавок в метиленхлориде и метаноле соответственно. Спектры поглощения растворов регистрировали на спектрофотометре MultiSpec-1501. Люминесцентные измерения выполнены на спектрофлуориметре Perkin Elmer–LS-55 или Флюорат 02–Панорама, спектры скорректированы на спектральные характеристики канала возбуждения. Оценка квантовых выходов люминесценции в растворах или полимерной матрице проводилась с использованием в качестве стандарта раствора родамина 6Ж в этаноле (0.95) [4, 5] или в пленке ПММА при концентрации  $5 \times 10^{-4}$  моль/л (квантовый выход люминесценции при этой концентрации 0.66) [6]. Исследование промежуточных продуктов проводили на установке наносекундного лазерного фотолиза ( $N_2$ -лазер, длительность импульса 1 нс, длина волны излучения 337 нм).

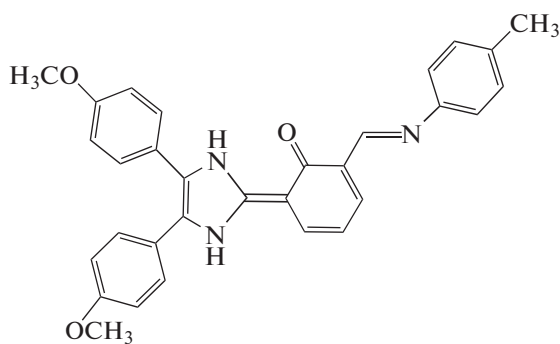
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работе [1] было показано, что в растворах соединения АЗ–СА при присоединении к АЗ фрагмента СА наблюдается более длинноволновое поглощение и более длинноволновая люминесценция 490–500 нм по сравнению с модельным

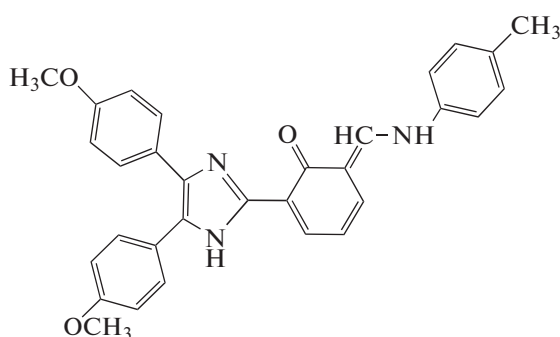
гидроксиимидазолом АЗ (428–461 нм, спирт – МЦГ). При этом в спектрах люминесценции в неполярных растворителях АЗ–СА присутствует дополнительно слабая более коротковолновая полоса 450 нм. В спиртовых средах присутствуют обе полосы, причем коротковолновая полоса эмиссии становится основной. На основании различий спектров возбуждения для наблюдаемых полос эмиссии предположили наличие двух изомеров в основном состоянии и изменение соотношения между ними в зависимости от растворителя, не детализируя структуру возможных изомеров [1].

Полосы эмиссии люминесценции в слабополярных растворах АЗ–СА, как и в модельном гидроксиимидазоле АЗ, характеризуются аномально большим стоксовым сдвигом относительно полос поглощения (для соединения АЗ–СА  $5100$ – $7200$   $cm^{-1}$  и  $7000$ – $8200$   $cm^{-1}$  для АЗ), что может свидетельствовать об образовании люминесцирующего продукта в результате внутримолекулярного переноса протона в возбужденном состоянии (ВППВС), что предполагалось ранее для гидрокситриарилмидазолов [7, 8].

Структура соединения АЗ–СА допускает при фотовозбуждении возможность переноса протона на атом азота имидазола или азот азометинового мостика азометина и, соответственно, наблюдаемую длинноволновую полосу эмиссии можно считать исходящей от возможных изомеров ( $K_{им}E_{ам}$ )\* или от ( $E_{им}K_{ам}$ )\*, образующихся в результате ВППВС или при прямом возбуждении кето-формы в имидазольной ( $K_{им}$ ) или азометиновой части ( $K_{ам}$ ) молекулы АЗ–СА



кето-изомер ( $K_{им}E_{ам}$ )



кето-изомер ( $E_{им}K_{ам}$ )

Квантовый выход люминесценции АЗ–СА в органических растворителях в длинноволновой

полосе люминесценции 490–500 нм при возбуждении  $\lambda = 365$  нм составляет 0.03–0.09, что ниже

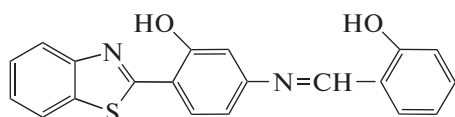
чем в модельном гидрокситрифенилимидазоле АЗ [8], и существенно выше значения, характерного для салицилиденанилина (СА) (менее 0.001) в растворах при 293 К [9, 10].

Положение полосы эмиссии люминесценции для растворов АЗ–СА приходится на более коротковолновую спектральную область, чем люминесценция, характерная для растворов салицилиденанилина. Так в растворах СА, например, в хлороформе [11, 12] максимум полосы Ем продукта ВППВС при возбуждении в полосе Е-формы – 532 нм и 525 нм при прямом возбуждении К-формы.

При лазерном фотолизе ( $\lambda = 337$  нм) растворов после 1 нсек импульса не наблюдается сигналов от промежуточных продуктов со временем жизни длиннее 10 нс, что может свидетельствовать об отсутствии продуктов фотопереноса протона в азометиновом фрагменте, наличие которых регистрируется в растворах салицилиденанилина и родственных соединений в исследуемом временном диапазоне.

Эти экспериментальные факты приводят к выводу о преобладании в слабополярных средах люминесценции от продукта переноса протона в имидазольной части молекулы ( $K_{им}E_{ам}$ )\*.

Люминесценция соединения АЗ–СА отличается от люминесценции похожего по структуре гибридного соединения на основе гидрокситиазола и гидроксиазометина, исследуемого в работе [13], для которого при понижении температуры растворов, а также в полимерной среде, в результате процессов ВППВС проявляются две полосы эмиссии около 500 нм и 538 нм, наличие которых, по-видимому, обусловлено возможностью установления двух типов внутримолекулярной водородной связи в силу присутствия двух ОН-групп – в тиазольной и в азометиновой частях молекулы.

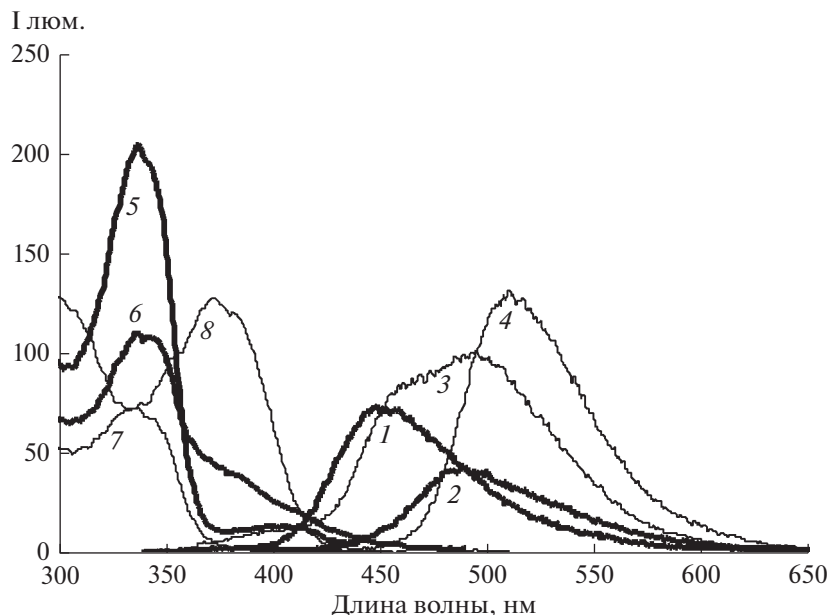


В случае АЗ–СА люминесценция в пленке ПММА аналогична наблюдаемой в неполярных растворителях – полоса эмиссии в области 490–500 нм с соответствующей ей длинноволновой полосой спектра возбуждения Ех с  $\lambda_{макс} = 380–390$  нм. Охлаждение пленки ПММА до 77 К приводит к увеличению интенсивности этой полосы и не выявляет новых полос, что означает преобладание как в неполярных растворителях, так и в полимерной среде изомера (КЕ)\*, образованного в результате внутримолекулярного переноса протона (ВППВС) на атом N имидазольного цикла.

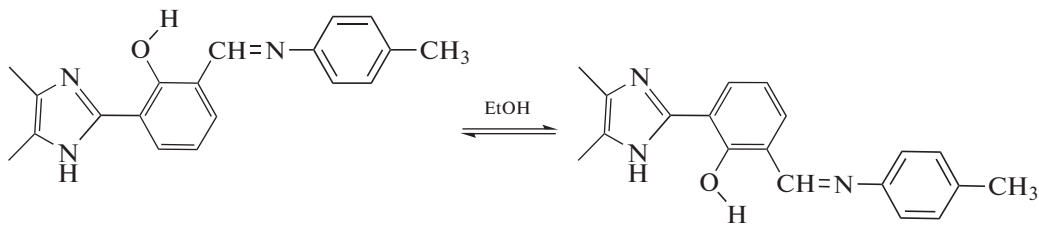
В спиртовых растворах АЗ–СА наблюдаются две полосы эмиссии – коротковолновая Ем с максимумом 450 нм, с соответствующим спектром Ех с максимумом 330 нм, и более слабая длинноволновая люминесценции 500 нм, с Ех с  $\lambda_{макс} = 380–400$  нм, которая как и длинноволновая волна в спектре поглощения, ослабевает при хранении спиртового раствора. В случае разбавления раствора АЗ–СА в диоксане спиртом или при добавлении капель воды наблюдается ослабление длинноволновой полосы эмиссии 500 нм и относительное усиление коротковолновой полосы с максимумом 450 нм. При обратном процессе-разбавлении спиртового раствора АЗ–СА диоксаном наблюдается усиление интенсивности длинноволновой полосы в спектре возбуждения и появление спектра Ем, характерного для раствора в диоксане (рис. 1).

Аналогично, при приготовлении пленки ПВБ с АЗ–СА при испарении растворителя (спирт) и при превращении вязкого полимерного раствора в твердую полимерную пленку происходит изменение голубой (450 нм) люминесценции на зеленую (500 нм) (рис. 2). Таким образом, полоса люминесценции с максимумом 490–500 нм, независимо от длины волны возбуждения, наблюдается не только в пленке ПММА, полученной из слабополярных растворителей, но и в пленке ПВБ, полученной с использованием полярного растворителя. В то же время при высыхании этилцеллюлозной пленки (с большим содержанием ОН-групп), способной долго удерживать следы растворителя после ее пропитки спиртовым раствором АЗ–СА, наблюдается перекрывание двух полос эмиссии с преобладанием голубой люминесценции, через год хранения цвет люминесценции пленки меняется на зеленый.

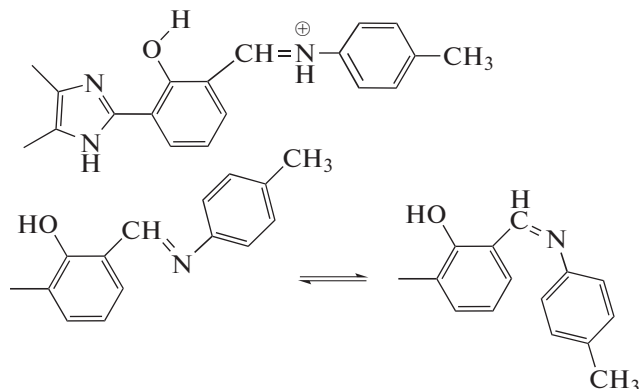
Возможно двойное объяснение причин возникновения коротковолновой полосы люминесценции в полярных средах. Можно предположить, что наблюдаемый при увеличении полярности растворителя переход от полосы Ем соединения АЗ–СА с максимумом 500 нм в неполярных растворителях к полосе с максимумом около 450 нм в метаноле связан с отсутствием ВППВС в связи с разрывом внутримолекулярной водородной связи в имидазольной части молекулы и образованием межмолекулярных связей с растворителем. В работе [14] предполагалось, что полярные растворители способствуют ослаблению внутримолекулярной водородной связи в гидроксимидзолах и стабилизации ротамера, образованного в результате прототропии или поворота на 180° вокруг связи, соединяющей имидазольный и фенольный циклы, и для которого перенос протона невозможен.



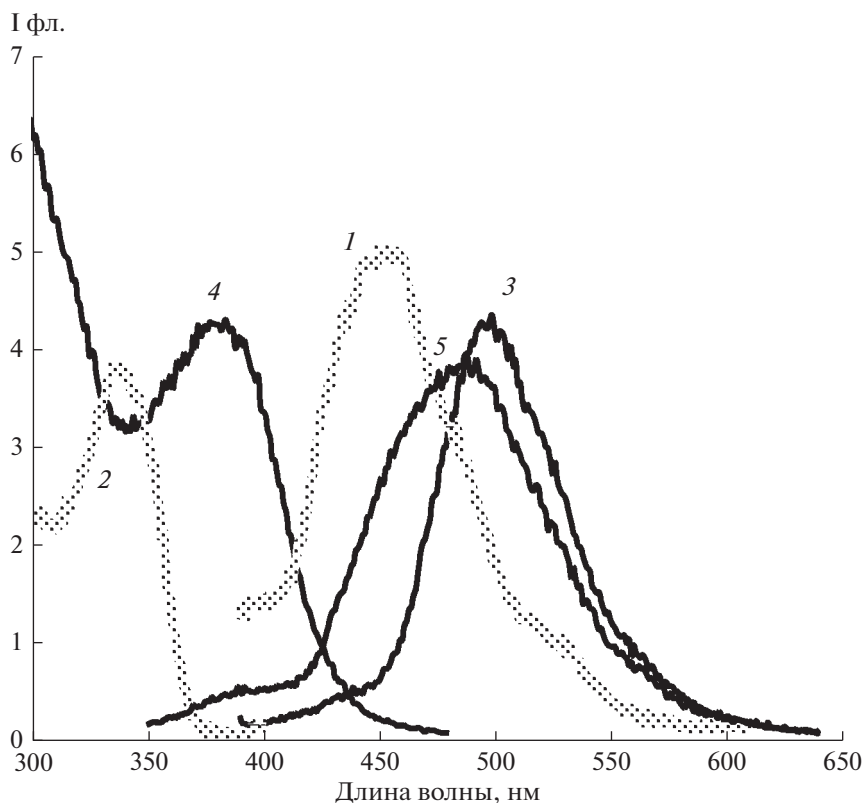
**Рис. 1.** Спектры люминесценции раствора АЗ–СА в метаноле до (1, 2, 5, 6) и после (3, 4, 7, 8) разбавления диоксаном 1 : 5. Ет:  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  (1, 3),  $\lambda_{\text{возб}} = 380$  нм (2, 4); Ех:  $\lambda_{\text{рег}} = 450$  (5, 7),  $\lambda = 500$  (6) и 520 нм (8).



С другой стороны влияние азометинового фрагмента на люминесценцию АЗ–СА может также меняться за счет различного состояния этого фрагмента в разных средах, (протонирования атома N азометинового мостика в спиртовой среде или изомеризации).



Таким образом, в растворах АЗ–СА в органических растворителях присутствуют по крайней мере два изомера соединения АЗ–СА с разными спектрами люминесценции, соотношение между которыми определяется свойствами среды. В АЗ–СА азометиновый фрагмент выступает в роли заместителя к имидазолу АЗ, что в сравнении с АЗ (полосы эмиссии 375 и 450 нм) приводит к смещению полос эмиссии в красную область до 450 и 500 нм. В слабополярных растворителях преобладает люминесценция, обусловленная продуктом ВППВС в имидазольной части молекулы. В полимерных пленках ПММА и ПВБ наблюдается только длинноволновая люминесценция с максимумом эмиссии около 500 нм. В спиртовых средах в зависимости от длины волны возбуждения можно регистрировать коротковолновую 440–450 нм и более длинноволновую люминесценцию 500–510 нм.



**Рис. 2.** Спектры люминесценции А3–СА в ПВБ до (1, 2) и после (3–5) высыхания полимерного слоя, Еп:  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  (1), 380 (3), Ех:  $\lambda_{\text{рег}} = 450$  (2), 500 нм (4).

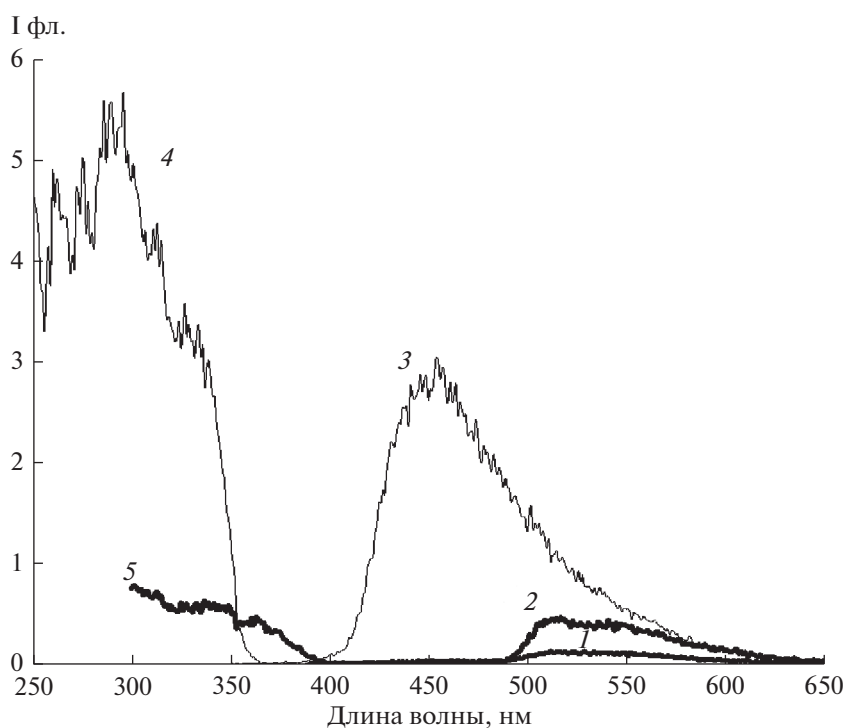
В соединениях А4–о–СА и А4–о–К в отличие от А3–СА можно ожидать слабое взаимовлияние фрагментов, соединенных через кислородный мостик. Так, в работах [3, 15] показано, что для бисимидазольной диады с аналогичным кислородным мостиком, реализуется почти полная перпендикулярность фенильных колец в дефинильном фрагменте, препятствующая электронному взаимодействию между фрагментами.

При независимом поглощении света фрагментами в соединениях А4–о–СА и А4–о–К соотношение двух полос эмиссии от двух фрагментов должно определяться как поглощением на длине волны возбуждения, так и величиной квантового выхода люминесценции фрагментов – люминофоров.

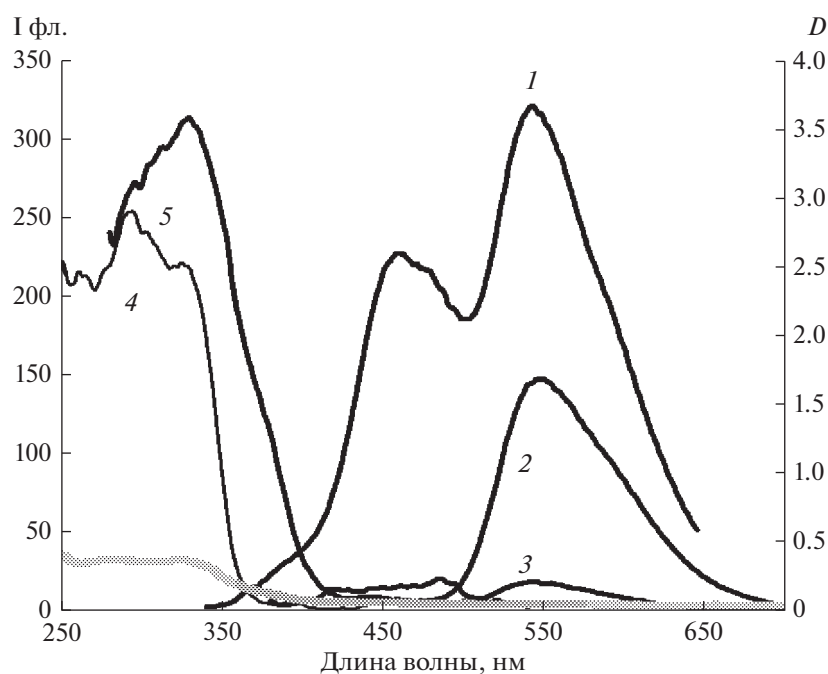
Спектры поглощения А4 в органических растворителях характеризуются максимумом на 318–325 нм и коэффициентом экстинкции в максимуме поглощения  $1.0 - 1.7 \times 10^4$  л моль<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>, в то время как для СА аналогичные параметры 337–347 нм и  $1.1 - 1.2 \times 10^4$  л моль<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup> [16]. Граница поглощения А в спектрах поглощения около 370 нм.

В растворах наблюдается одна полоса эмиссии люминесценции с максимумом – 472–454 нм (МХ, толуол, АСН, этанол), в пленках ПММА и ПВБ около 450 нм. Положение максимума флуоресценции А4 зависит от растворителя, смещаясь с ростом полярности растворителя в короткую область. Наблюдаемая люминесценция исходит от продукта внутримолекулярного фотопереноса протона [2]. В отличие от А3 в растворах А4 отсутствует люминесценция от изомера с разорванной внутримолекулярной связью, для которого исключен внутримолекулярный фотоперенос протона. Возможно, это обусловлено присутствием в структуре тетраимидазола дополнительного бензольного кольца, что способствует упрочнению внутримолекулярной водородной связи [3]. По данным лазерного фотолиза фотовозбуждение А4 не приводит к образованию каких-либо промежуточных продуктов, поглощающих во временном диапазоне  $\geq 20$  нс.

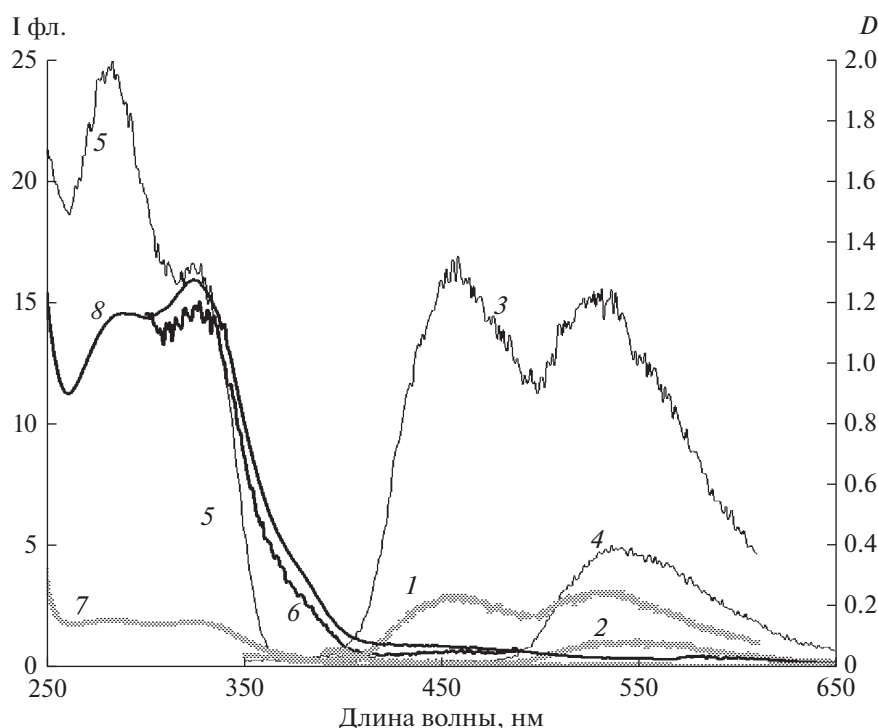
В спектрах люминесценции А4–о–СА в растворах наблюдается полоса эмиссии с максимумом на 450–470 нм от имидазольного фрагмента А и не регистрируется эмиссия от СА. Это связа-



**Рис. 3.** Спектры люминесценции А4–о–СА в пленке ПММА при 20 С (1) и 77 К (2–5), Em:  $\lambda_{\text{возб}} = 370$  нм при 20°C (1) и 77 К (2),  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  нм при 77 К (3), Ex:  $\lambda_{\text{рег}} = 460$  нм при 77 К (4) и  $\lambda_{\text{рег}} = 560$  нм при 77 К (5).



**Рис. 4.** Спектры люминесценции раствора А4–о–К в метиленхлориде Em:  $\lambda_{\text{возб}} = 305$  (1), 370 (2), 490 нм (3), Ex:  $\lambda_{\text{рег}} = 450$  (4), 550 нм (5).



**Рис. 5.** Спектры поглощения (7, 8) и люминесценции (1–6) А4–о–К в пленке ПММА, ЕМ:  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  (1, 3), 370 нм (2, 4),  $\lambda_{\text{рег}} = 450$  (5), 520 нм (6), концентрации  $c = 6.7 \times 10^{-4}$  моль/л (1, 2, 7) и  $c = 3.4 \times 10^{-3}$  моль/л (3–6, 8), толщина пленок 60 мкм.

но с низким квантовым выходом люминесценции СА в растворах [9, 10] и косвенно свидетельствует об отсутствии электронного взаимодействия между фрагментами. В полимерной матрице ПММА при 20°C флуоресценция А4–о–СА представляет собой суперпозицию полос эмиссии – основного сигнала на 450 нм от имидазола А4 и слабого на 510–530 нм от СА (рис. 3), проявляющихся при  $\lambda$  возбуждения длиннее 370 нм. Как видно из рис. 4 при  $\lambda_{\text{возб}} = 370$  нм при 20°C в ПММА в условиях преобладания поглощения от СА наблюдаются две сравнимые по интенсивности полосы на 450 нм и 510–530 нм, понижение температуры пленки до 77 К приводит к увеличению интенсивности полосы 510–530 нм в 4 раза.

Положение длинноволновой полосы эмиссии в спектральной области с максимумом 510–530 нм свидетельствует о наличии ряда изомеров, известных в литературе для СА в твердой фазе [17] и также указывает на независимое поведение фрагмента СА в молекуле А3–СА. На это указывают также данные лазерного фотолиза. При исследовании пленок ПММА с А–СА ( $c = 1.5 \times 10^{-3}$  моль/л) методом лазерного фотолиза (337 нм) фик-

сируется промежуточный продукт с максимумом  $\lambda = 470$  нм и временем жизни, соответствующим литературным данным об образовании долгоживущей  $K_{\text{транс}}$  формы СА и подтверждающей наличие фотопереноса протона в СА-фрагменте [12, 18, 19]. При повышении концентрации А4–о–СА в пленках ПММА до  $1.5 \times 10^{-2}$  моль/л обе полосы эмиссии в спектре люминесценции сохраняются. Увеличение интенсивности сигнала эмиссии от СА при возбуждении с  $\lambda = 370$  нм с ростом концентрации линейно.

Квантовый выход люминесценции А4–о–СА в длинноволновой полосе эмиссии в ПММА при возбуждении на  $\lambda = 365$  нм, оцененный с использованием в качестве стандарта пленки ПММА с родамином 6Ж, равен 0.007. Поскольку длинноволновая полоса эмиссии приходится на зеленую область спектра, отвечающую максимальной чувствительности человеческого глаза, несмотря на невысокую эффективность этой полосы, можно визуально наблюдать эффект переключения с синне-зеленой эмиссии от А4 при возбуждении светом с  $\lambda = 330$  нм на зеленую от СА при возбуждении  $\lambda = 370$  нм.



Так как люминесценция А4–о–СА даже при больших концентрациях остается достаточно слабой, фрагмент СА заменили на К. Присутствием кумарина в соединении А4–о–К достигается значительно более эффективная длинноволновая люминесценция, чем в А4–о–СА и небольшой сдвиг полосы эмиссии в красную область.

Поскольку квантовые выходы люминесценции фрагментов А4 (в растворах 0.15 [15]) и фрагмента К (оценка в толуоле 0.05,) в растворах сравнимы, а в области спектра поглощения длиннее  $\lambda = 370$  нм наблюдается слабое поглощения от А, в растворах А4–К (рис. 5) можно наблюдать переход от двух полос эмиссии с максимумами на 460 нм и 545 нм при коротковолновом возбуждении короче  $\lambda = 370$  нм к одной полосе на 545 нм при возбуждении длиннее  $\lambda = 370$  нм.

Сравнение А4–о–К с люминесценцией модельных соединений А4 и К, позволяет отнести наблюдаемые полосы эмиссии к структурам с переносом протона в обоих фрагментах. При лазерном фотолизе при возбуждении светом с  $\lambda = 337$  нм растворов А4–о–К и К в толуоле,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{EtOH}$  фиксируются относительно долгоживущий промежуточный продукт с максимумом около 500 нм, аналогичный спектру поглощения промежуточного продукта, характерному для соединения К. Спектр поглощения и кинетическое поведение соответствуют кето-таутомеру, образованному при переносе протона в К-части молекулы А4–о–К. Более короткоживущие продукты от переноса Н в имидазольной части А4 не фиксируются.

В полимерных пленках наличие двух полос эмиссии сохраняется (рис. 5), при этом эффективность люминесценции А4–К в полимерных пленках существенно выше, чем в растворах. Квантовый выход эмиссии при возбуждении 365 нм, оцененный при концентрации А4–К  $c = 6.7 \times 10^{-4}$  моль/л в пленке ПММА (60 мкм) равен 0.37.

При повышении концентрации в спектре поглощения растворов А4–о–К и в пленке ПММА становится заметным смещение границы поглощения до 500 нм, аналогично в спектре возбуждения люминесценции наблюдается полоса 400–500 нм. Это поглощение характерно и для растворов К и обусловлено присутствием кето-формы фрагмента К в основном состоянии. При возбуждении в этой спектральной области наблюдается та же эмиссия на 550 нм, как и при возбуждении Е-формы соединения К.

В спектрах люминесценции в растворах и пленках при переходе к большим концентрациям и оптическим плотностям наблюдается увеличение

относительного вклада длинноволновой полосы эмиссии на 540 нм. Это может быть вызвано эффектами экранирования и перепоглощения света.

## ВЫВОДЫ

1. В растворах соединения А3–СА только в полярных средах возможно переключение люминесценции изменением длины волны возбуждения.

2. В А4–о–СА переключение люминесценции от длины волны возможно, но вклад эмиссии от СА фрагмента даже в полимерной матрице слабый. Сопоставимые по интенсивности сигналы наблюдаются только при 77 К в полимерной матрице.

3. В спектрах люминесценции А4–о–К вклад от К-фрагмента более существенен чем в предыдущих соединениях, полосы эмиссии от структур с фотопереносом протона в А- и К-части сравнимы по интенсивности. Можно варьировать соотношение полос эмиссии на 450 и 550 нм изменением длины волны возбуждения. Возможность переключения люминесценции существует как в растворах, так и в полимерных средах.

## ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполняется по темам госзадания ФАНО России 0082-2018-0006, 0082-2014-0015 и № госрегистрации 01201253314.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мардалейшвили И.Р., Любимов А.В., Зайченко Н.Л., Кольцова Л.С., Шиенок А.И., Татиколов А.С. // Химия высоких энергий. 2016. Т. 5. № 4. С. 286.
2. Мардалейшвили И.Р., Любимова Г.В., Кольцова Л.С., Шиенок А.И., Левин П.П., Татиколов А.С., Зайченко Н.Л. // Химия высоких энергии 2018. Т. 52. № 3. С. 219.
3. Park S., Kwon J.E., Kim S.H., Seo J., Chung K., Park S.-Y., Jang D.-J., Medina B.M., Gierschner J., Park S.Y. // JACS. 2009. № 131. P. 14043.
4. Паркер С. Фотолюминесценция растворов / Под ред. Васильева Р.Ф. М.: Мир, 1972. С. 252.
5. Kubin R.F., Fletcher A.N. // J. Luminescence. 1982. V. 27. P. 455.
6. Kurian A., George N.A., Paul B., Nampoori V.P.N., Vallabhan C.P.G. // Lazer chemistry. 2002. V. 20. № 2–4. P. 99.
7. Шиенок А.И., Кольцова Л.С., Зайченко Н.Л., Маревцев В.С. // Изв. АН. сер. хим. 2002. № 11. С. 1894.
8. Fridman N., Kaftory M., Eichen Y., Speiser S. // J. Mol. Structure. 2009. V. 917. P. 101.
9. Красовицкий В.М., Болотин Б.М. Органические люминофоры. М.: Химия, 1984. С. 336.
10. Vargan V. // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108. P. 281.

11. *Alarcon S.H., Pagani D., Bacigalupo J., Olivieri A.C.* // J. Mol. Structure. 1999. V. 475. P. 233.
12. *Becker R.S., Lenoble C., Zein A.* // J. Phys. Chem. 1987. V. 91. P. 3509.
13. *Sun W., Li S., Hu R., Qian Y., Wang S., Yang G.* // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113. P. 5888.
14. *Rodembusch F.S., Buckup T., Segala M., Tavares L., Correia R.R.B., Stefani V.* // Chemical Physics 2004. V. 305. P. 115.
15. *Park S., Kwon J.E., Seo J., Park S.-Y.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2012. V. 14. P. 8878.
16. *Dudek G.O., Dudek E.P.* // J. Am. Chem. Soc. 1966. V. 88. P. 2407.
17. *Knyazhansky M.I., Metelitsa A.V., Kleiskii M.E., Millov A.A., Besugliy S.O.* // J. Mol. Structure. 2000. V. 526. P. 65.
18. *Мардалейшвили И.Р., Кольцова Л.С., Зайченко Н.Л., Шиенок А.И., Левин П.П., Татиколов А.С.* // Химия высоких энергии 2013. Т. 47. № 5. С. 331.
19. *Kownacki K., Mordzinski A., Wilbrandt R., Grabowska A.* // Chemical Physics Letters 1994. V. 227. P. 270.