

УДК 535.37

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА БИСГИДРОКСИАЗОМЕТИНОВ УГЛОВОЙ СТРУКТУРЫ

2024 г. И. Р. Мардалейшвили^{а, *}, А. С. Татиколов^б, Л. С. Кольцова^а,
О. Н. Крутиус^а, А. И. Шиенок^а, Н. Л. Зайченко^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской академии наук, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Россия

^бИнститут биохимической физики им Н.М. Эмануэля РАН, ул. Косыгина, 4, Москва, 119334 Россия

*E-mail: marli2007@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 22.11.2023 г.

Принята к публикации 22.11.2023 г.

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства растворов бисгидроксифенилазозометин (I и II) и бисгидроксинафтилазозометин (III и IV) бензольного и пиридинового ряда в толуоле и этаноле. Кето-енольное равновесие в пиридиновом азометине II в основном состоянии слабо зависит от наличия атома N пиридина, в то время как для пиридинового азометина IV влияние пиридина значительно. В растворах I и II в обоих растворителях наблюдаются две полосы люминесценции от енольной (E*) и кето-формы (K*), соотношение которых зависит от длины волны возбуждения. Люминесценция в растворах III и IV определяется образованием K*, только в растворе III в толуоле при коротковолновом возбуждении в спектре люминесценции добавляется преобладающая коротковолновая люминесценция от E*. Наблюдается влияние растворителя и атома пиридина на положение полос эмиссии, причем более выраженное для соединения II, чем для IV. Для всех соединений I-IV люминесценция в спирте на порядок эффективнее, чем в толуоле.

Ключевые слова: люминесценция, бис-азометины, лазерный фотолиз

DOI: 10.31857/S0023119324020016 **EDN:** VTCXLO

ВВЕДЕНИЕ

Фотохимические свойства гидроксизамещенных ароматических азометин с моно- и бисструктурой, допускающих кето-енольное равновесие как в основном так в возбужденном состоянии молекулы, что определяет их фотохромные, термохромные и люминесцентные свойства, исследовались в многочисленных работах [1–4]. Наиболее известное соединение — салицилиденанилин (CA) и его производные.

Фотохимия гидроксизамещенных биссоединений линейной структуры на основе CA подробно исследовалась в цикле работ [5–9]. В симметричном биссоединении BSP линейной структуры на основе CA существуют два центра для возможного процесса переноса протона в возбужденном состоянии (ESIPT) однако как показано в [8], возбуждение локализовано на одном салицилиденовом фрагменте, что приводит к образованию монокет-изомера. В спектре поглощения BSP наблюдается основная полоса поглощения, батохромно сдвинутая относительно спектра поглощения CA с 335–340

до 370–380 нм, при этом в полярных растворителях дополнительно присутствует слабое длинноволновое поглощение, обусловленное наличием небольшого количества кето-изомера. Эмиссия при возбуждении енольной формы приводит к люминесценции кето-изомера, образующегося в процессе ESIPT, и совпадает с эмиссией ($\lambda = 550–575$ нм) при прямом возбуждении кето-изомера.

В настоящей работе исследовали спектрально-люминесцентные свойства растворов биссоединений с “угловой структурой” на основе салицилового альдегида и анилина (I) или 2,3-диаминопиридина (II). Проведено сравнение этих соединений с исследованными ранее [10] биссоединениями бензольного (соединение III) и пиридинового ряда (соединение IV) “угловой структуры” на основе нафталяльдегида.

Способ организации угловых бисструктур, исследуемых в настоящей работе, аналогичен формированию BSP — азометиновые фрагменты имеют общую аминную часть, однако в отличие от линейной структуры BSP азометиновые группировки

находятся в соседних позициях бензо- или пиридинового кольца аминной части, образуя “угловую” структуру.

Основные результаты, полученные для биссоединения BSP, могут быть общими для многих соединений из класса СА. Однако в растворах бисазометинов угловой структуры можно ожидать ряд особенностей, обусловленных взаимовлиянием соседствующих фрагментов. В то время как в линейном биссоединении BSP азометиновые фрагменты равноценны, в соединениях с угловой структурой азометиновые фрагменты могут располагаться под разными углами к бензольному кольцу аминной части, находиться в разных изомерных формах, внутримолекулярные водородные связи могут образовываться не только внутри одного фрагмента, но и между фрагментами. Эти факторы, а также наличие атома N пиридина в соединениях II и IV может определять фотохимические свойства исследуемых соединений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

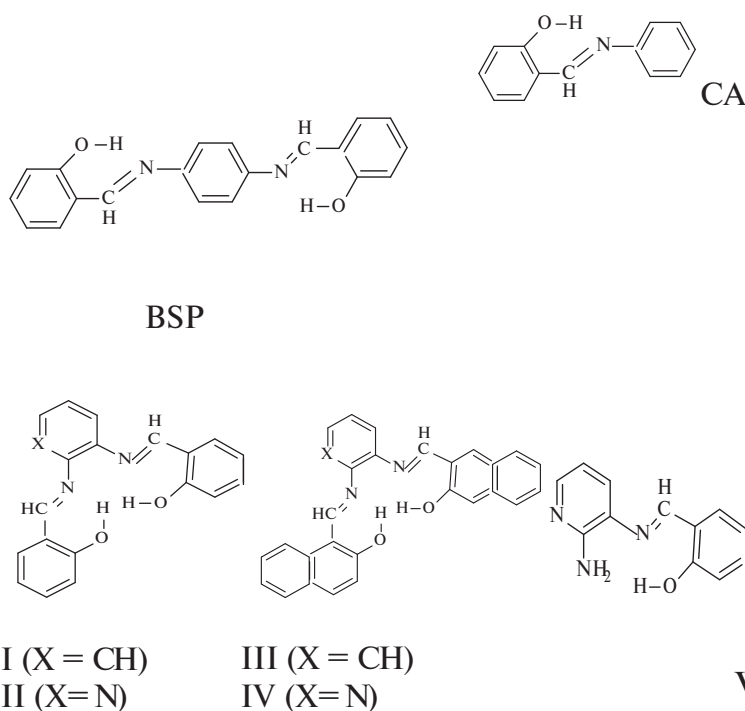
Исследуемые биссоединения I–IV получены по методикам, представленным в [11–13]. Для приготовления растворов использовали растворители фирмы Acros (Pan Reac, Appli Chem) без дополнительной очистки. Спектры поглощения растворов ($c = 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-6}$ М) регистрировали на спектрофотометре MultiSpec1501, спектры люминесценции

растворов ($c = 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-6}$ М) – на спектрофлуориметре Perkin Elmer LS 55. Спектры поглощения промежуточных продуктов лазерного фотолиза регистрировали на установке импульсного фотолиза (азотный лазер с $\lambda = 337$ нм) с регистрацией электронного поглощения [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спектры поглощения и люминесценции соединений I и II

Спектры поглощения I и II исследовали в растворах толуола и этанола, их нормированные спектры приведены на рис. 1 и 2. Положение максимума полосы поглощения соединения I слабо отличается от положения максимума поглощения СА [15–18]. Как и для СА [18] в растворах I проявляется зависимость положения максимума спектра поглощения от растворителя (343 и 334 нм в толуоле и этаноле, соответственно). В отличие от СА на длинноволновой ветви полосы поглощения I наблюдается перегиб, существенно более заметный в этаноле (рис. 1). Из спектров поглощения (рис. 1), следует, что в растворе толуола оба азометиновых фрагмента I находятся в енольной форме. Это согласуется со спектрами ЯМР ^1H , из которых следует, что в слабополярной среде (CDCl_3) I и II существуют исключительно в енольной форме. Об этом свидетельствует синглет от ОН-групп при $\delta = 13.0$ м.д., характерный для внутримолекулярной водородной связи, синглет от протонов группы –



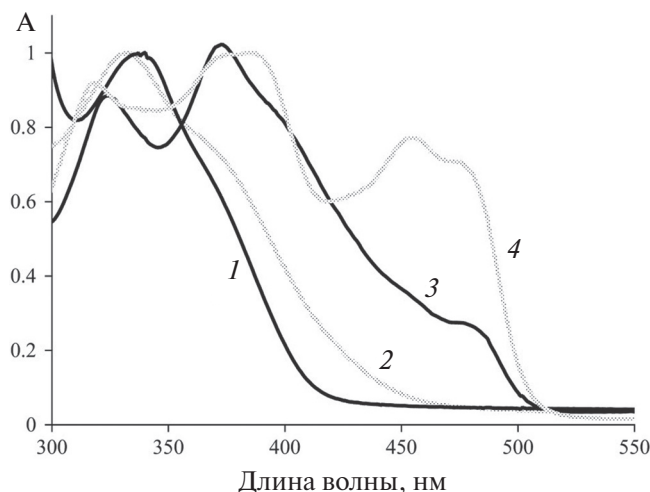


Рис. 1. Нормированные спектры поглощения I (1, 2) и III (3, 4) в толуоле (1, 3) и этаноле (2, 4).

CH=N — при 8.6 м.д. и от протонов бензольных колец в области 6.9–7.4 м.д. Никаких других форм в спектрах не наблюдается. В менее полярном толуоле нельзя ожидать появления других форм по сравнению с CDCl_3 .

В этаноле в спектрах поглощения наблюдается смещение длинноволновой границы поглощения до 500 нм, что может свидетельствовать о дополнительном присутствии кето-изомера.

Из литературы известно, что введение донорных или акцепторных заместителей приводит к батохромному сдвигу полосы поглощения СА. Существенный сдвиг (до 380 нм) наблюдали при введении NO_2 -группы в *о*- и *пара*-положение, NH_2 -группы или объемной донорной группы $\text{N}(\text{CH}_3)_2$ в *орто*-положение в бензольное кольцо аминной части СА [16–18]. Смещение полосы поглощения наблюдается также при введении заместителей в бензольное кольцо альдегидной части молекулы СА [19], замены его на нафтокольцо [10], при создании бисструктуры BSP [5–8] и введении в BSP заместителей [20].

Аналогичное изменение спектра поглощения мы наблюдали в синтезированном нами NH_2 — *орто* замещенном пиридиновом производном СА — соединении V (рис. 3). Наблюдается батохромное смещение максимума основной полосы поглощения до 380 нм, при этом на коротковолновой ветви широкой полосы поглощения этого соединения слабо заметен перегиб. Вид спектра возбуждения люминесценции и наличие различных полос люминесценции 490 и 540 нм в растворе толуола при возбуждении 330 и 375 нм, соответственно, подтверждают присутствие в спектре поглощения дополнительной коротковолновой полосы (рис. 3).

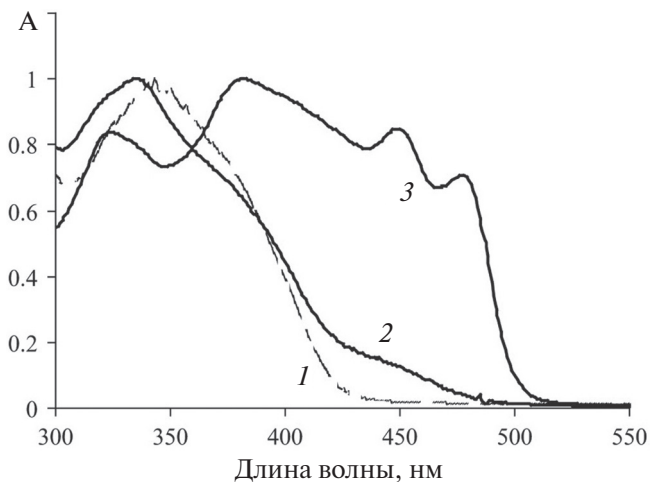


Рис. 2. Нормированные спектры поглощения II в толуоле (1), этаноле (2) и IV в толуоле (3).

В отличие от NH_2 -замещенных моноазометинов и бисазометина линейной структуры BSP существенного смещения максимума спектра I не наблюдается, однако добавляется перегиб в области 380–400 нм (рис. 1). Как будет показано далее в спектре возбуждения люминесценции в этой спектральной области отчетливо проявляется интенсивная полоса.

Спектры люминесценции I регистрировали при возбуждении на длине волны около максимума спектра поглощения, в спектральной области перегиба и на длинноволновом крае спектра поглощения. При возбуждении растворов I в зависимости от длины волны возбуждения регистрируются разные спектры люминесценции. В толуоле при возбуждении в области максимума поглощения (330–340 нм) наблюдается эмиссия с максимумом 470 нм, а при возбуждении $\lambda = 380$ нм широкая полоса с максимумом 542 нм (рис. 4). В спектре возбуждения люминесценции присутствуют полосы с близкими максимумами 320–330 нм и полоса с максимумом 380 нм.

В спектре возбуждения люминесценции в этаноле (рис. 5), как и в спектре поглощения (рис. 1), добавляется длинноволновая спектральная область, обусловленная присутствием кето-изомера. При возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм наблюдается полоса люминесценции $\lambda = 450$ нм, при возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 390$ нм и $\lambda_{\text{возб}} = 440$ нм — эмиссия на 503 нм. Совпадение полос люминесценции при возбуждении в области $\lambda_{\text{возб}} = 390$ нм и в области прямого возбуждения кето-изомера при $\lambda_{\text{возб}} = 440$ нм указывает на их обусловленность люминесценцией K^* . Положение полосы, присутствующей как перегиб

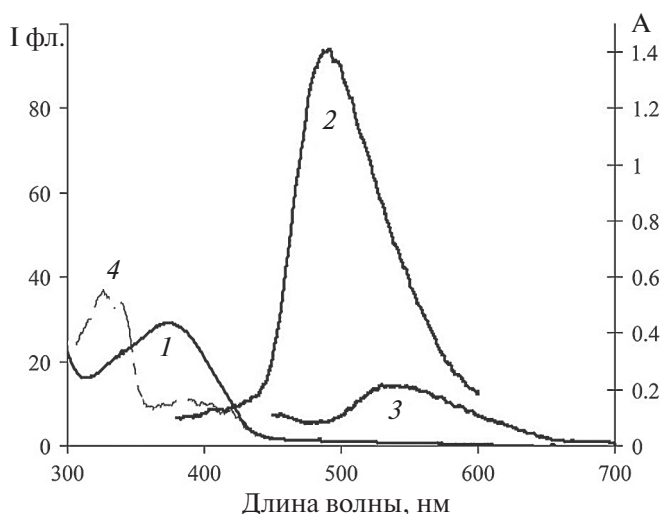


Рис. 3. Спектры поглощения (1) и люминесценции (2–4) соединения V в толуоле, E_m : $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм (2), 375 нм (3) и E_x : $\lambda_{\text{рег}} = 550$ нм (4).

в спектрах поглощения I и проявляющейся в явном виде в спектре возбуждения люминесценции, чувствительно к растворителю, максимум полосы возбуждения сдвигается от 365–370 нм в толуоле к 400 нм в этаноле.

При замене бензольного кольца аминной части на пиридин максимумы полос поглощения II незначительно bathochromно смещаются относительно I (положение максимума полос поглощения в толуоле — 343 и 348 нм, в этаноле — 334 и 339 нм для I и II соответственно). При этом в полярной среде максимум полосы поглощения II, как и в случае I незначительно сдвинут в коротковолновую область (рис. 2). Как и в случае I на длинноволновой ветви полосы поглощения II заметен перегиб в области 370–400 нм. В растворах толуола граница поглощения 425 нм, что указывает на отсутствие кето-изомера, в полярной среде наблюдаются обе таутомерные формы (рис. 2). Как и в I в пиридиновом биспроизводном II полоса, присутствующая в спектре поглощения в качестве перегиба, явно проявляется в спектре возбуждения люминесценции.

Замена бензольного кольца аминной части бисазометина на пиридин в большей мере сказывается на положении максимума коротковолновой полосы эмиссии. Так в спиртовом растворе полоса люминесценции с максимумом 450 нм, характерная для I, смещается до 493 нм в растворе II, при этом длинноволновый максимум эмиссии в смещается от 505 до 515 нм (рис. 4). Интенсивность люминесценции биссоединений I и II в этаноле, как и соединений III и IV [10] на порядок выше, чем в толуоле.

Представляет интерес природа полосы, присутствующей в спектре поглощения I и II как перегиб, и явно проявляющейся в спектре возбуждения люминесценции. При возбуждении в эту полосу наблюдается более длинноволновая люминесценция, чем при возбуждении в максимум спектра поглощения.

Поскольку в толуоле I присутствует только с енольной формой обоих фрагментов, наблюдаемую зависимость люминесценции от длины волны возбуждения можно связать с влиянием на кето-енольное равновесие $E^* \rightleftharpoons K^*$ в возбужденном состоянии, возникающем при возбуждении енольной формы, наблюдаемые полосы можно отнести к люминесценции E^* и K^* , полученного в результате переноса протона в возбужденном состоянии.

Следует отметить, что в растворах СА при возбуждении в максимум поглощения наблюдается только длинноволновая люминесценция с максимумом 535 нм от кето-изомера, полученного при переносе протона при возбуждении енола [1, 2]. Люминесценция от E^* отсутствует, т.е. равновесие $E^* \rightleftharpoons K^*$ сдвинуто в сторону K^* .

Ранее при исследовании раствора I в этаноле авторы [21] при возбуждении в максимум полосы поглощения (335 нм) наблюдали одну полосу люминесценции на 450 нм и отнесли к люминесценции енольной формы, что по мнению авторов указывало на смещение кето-енольного равновесия в возбужденном состоянии I в сторону E^* . В случае же замены бензольного кольца аминной части на пиридин эти же авторы регистрировали появление дополнительной полосы эмиссии (при возбуждении 375 нм), что привело их к выводу о смещении кето-енольного равновесия в сторону K^* .

В наших экспериментах при варьировании длины волны возбуждения наблюдали, что в спиртовом растворе I при возбуждении в максимум спектра поглощения в спектре люминесценции действительно, как и в работе [21], преобладает полоса эмиссии от E^* формы (450 нм), однако при более длинноволновом возбуждении наблюдается дополнительная полоса от K^* , полученного как в результате переноса протона в возбужденном состоянии при возбуждении енола в области перегиба в спектре поглощения, так и при прямом возбуждении кето-формы при более длинноволновом возбуждении. Две полосы эмиссии наблюдаются и в растворах соединения II, причем значительного изменения в соотношении полос при замене бен-

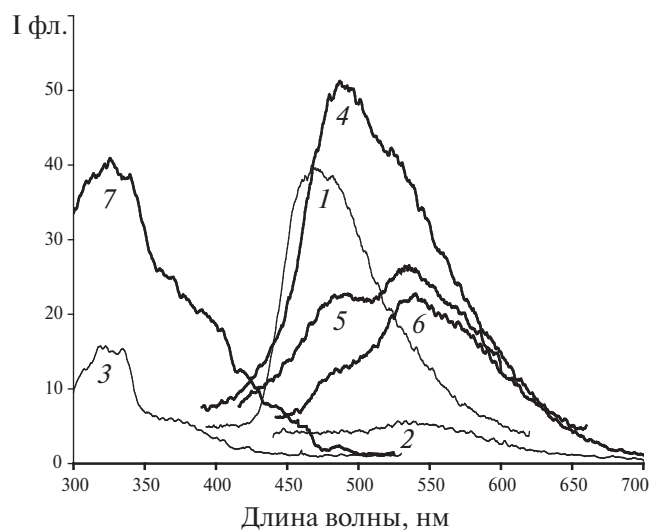


Рис. 4. Спектры люминесценции I (1–3) и II (4–7) в толуоле, Em: $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм (1), 380 нм (2), Ex: $\lambda_{\text{рег}} = 480, 540$ нм (3), Em: $\lambda_{\text{возб}} = 340$ нм (4), 360 нм (5), 380 нм (6) и Ex: $\lambda_{\text{рег}} = 535$ (7).

зольного кольца аминной части на пиридиновое не отмечается (рис. 4 и 5).

Возможно, присутствие второй азометиновой группировки в биссоединениях, аналогично влиянию заместителя NH_2 в *орто*-положении к азометиновому мостику в замещенных СА [16], а именно к π - π^* электронному переходу, характерному для полосы поглощения СА, добавляется перенос заряда, что следует из расчетных данных по распределению электронной плотности в R-замещенных СА [16]. Меняется взаимодействие азометинового мостика с π -системой аминной N-Ph и альдегидной части OH-Ph азометина. Возбуждение в полосе поглощения, в которой задействована электронная плотность атома N азометинового мостика, характеризуется большей склонностью к переносу протона в возбужденном состоянии.

Таким образом присутствие второй азометиновой группировки в биссоединениях I и II влияет на электронное состояние енольной формы в основном состоянии, что проявляется появлением новой полосы в спектре поглощения, при возбуждении в которую наблюдается люминесценция от K^* -изомера.

Спектры поглощения и люминесценции соединений III и IV

Спектры поглощения нафто бисазометинов бензольного и пиридинового ряда III и IV в сравнении с соединениями I и II приведены на рис. 1, 2. Максимумы поглощения нафтобиссоединений III и IV батохромно (до 370 нм) смещены относительно

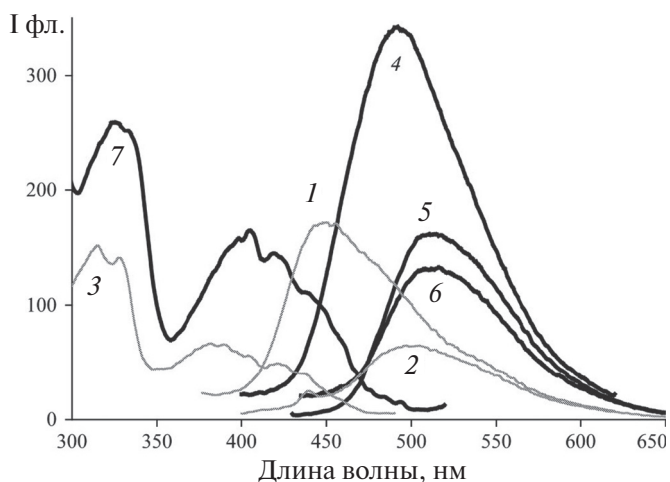


Рис. 5. Спектры люминесценции I (1–3) и II (4–7) в этаноле Em: $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм (1), 390 нм (2), Ex: $\lambda_{\text{рег}} = 500$ нм (3), Em: $\lambda_{\text{возб}} = 340$ нм (4), 380 нм (5), 420 нм (6) и Ex: $\lambda_{\text{рег}} = 530$ нм (7).

полос поглощения I и II. Основная полоса на 370 нм обусловлена поглощением енольной формы, длинноволновые полосы связаны с присутствием кето-изомеров. В отличие от I и II в случае нафтопроизводных, особенно в пиридиновом IV, даже в растворе слабополярного толуола присутствует много кето-изомера (рис. 2). В растворах толуола и этанола [10] возбуждение в полосе поглощения енольной формы (420 нм) и в полосе кето-формы (485 нм) приводило к люминесценции K^* . При переходе от III к IV заметной разницы в спектрах люминесценции при возбуждении в максимуме поглощения енольной и кето-формы 420 нм не наблюдали ([10] и рис. 6).

Следует отметить, что при возбуждении $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм раствора III в толуоле помимо длинноволновой люминесценции наблюдается интенсивная коротковолновая люминесценция от енольной формы (рис. 6). В случае соединения IV доля коротковолновой люминесценции очень незначительна. Одно из объяснений связано с тем, что в растворе IV в толуоле присутствует много кето-изомера с возможным поглощением в коротковолновой области спектра, т.е. при всех длинах волн возбуждаем преимущественно кето-изомер.

Импульсное фотовозбуждение III и IV в растворах толуола приводит к образованию промежуточных продуктов со спектрами поглощения с максимумами около 450 нм и относительными выходами 1 и 0.6 соответственно. Похожие спектры наблюдались ранее для транс-изомеров кето-формы (ТК), возникающих в результате цис-транс изомеризации в возбужденном состоянии кето-формы, образу-

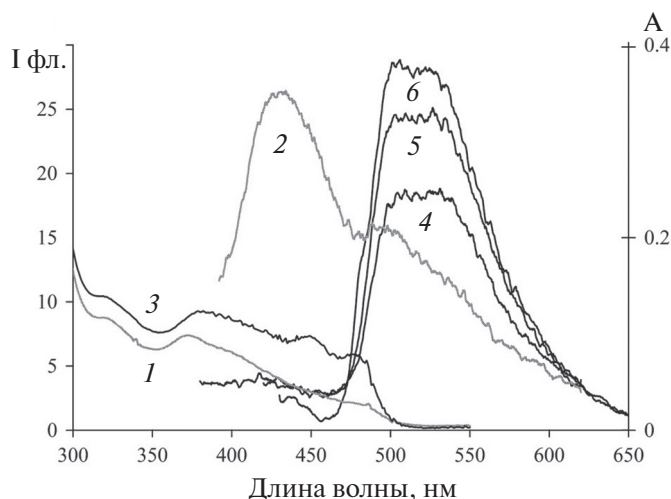


Рис. 6. Спектр поглощения (1) и люминесценции (2) III в толуоле E_m : $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм (2) и спектры поглощения (3) и люминесценции (4–6) IV в толуоле E_m : $\lambda_{\text{возб}} = 330$ нм (4), 365 нм (5), 420 нм (6).

ющей после внутримолекулярного переноса протона от ОН-группы к атому N азометинового мостика в электронно-возбужденном синглетном состоянии енольной формы или при прямом возбуждении *цис-кето*-изомера азометинов [2–3]. Полученные значения времени жизни ТК (> 1 с) существенно превышают аналогичные величины для других ТК, наблюдавшихся ранее при исследовании моно- и линейных бисазометинов. [5, 8, 19, 22]. По-видимому, угловая структура биссоединений приводит к существенной стабилизации транс-изомеров вследствие стерических затруднений.

Исследование раствора в толуоле и этаноле соединения II показало наличие фотопродукта, причем со стандартными значениями времен жизни, характерными для моно-азометинов. Зависимость времени жизни транс-формы от полярности растворителя также согласуется с известными закономерностями – ускорением гибели в полярном спиртовом растворе. Таким образом образование фотопродукта с высокими значениями времен жизни в соединениях III, IV в толуоле обусловлено наличием именно нафтоальдегидных азометиновых фрагментов в угловой структуре молекулы.

Следует отметить, что в спиртовом растворе IV образования фотопродукта не наблюдается. Исходя из спектра поглощения [10] можно полагать, что в спиртовом растворе оба азометиновых фрагмента находятся в кето-форме, возможно не в свободной форме, а связанной водородными связями с молекулами растворителя, и прямое возбуждение кето-изомера не приводит к изомеризации.

Однако и в растворах толуола, выход фотопродукта, по-видимому, определяется соотношением енольной и кето-форм. Так в толуоле для IV, в котором один азометиновый фрагмент находится полностью в кето-форме [10], выход фотопродукта ниже, чем в растворе III, в котором превалирует содержание енольной формы (рис. 1). Отсюда можно предположить, что регистрируемый продукт образуется только в ходе превращений при возбуждении енольной формы азометиновых фрагментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства растворов бисгидроксibenзаазометинов (I и II) и бисгидрокси нафтоазометинов (III, IV) бензольного и пиридинового ряда в толуоле и этаноле. В растворах бензоазометина бензольного I и пиридинового ряда II в толуоле оба азометиновых фрагмента находятся в енольной форме, в этаноле образуется дополнительно небольшое количество кето-изомера. В растворах III и IV в толуоле и этаноле присутствует кето-изомер, содержание которого выше в спиртовой среде и в случае пиридинового производного. В обоих растворителях в растворах I и II наблюдаются две полосы люминесценции от E^* и K^* , соотношение полос зависит от длины волны возбуждения. Люминесценция в растворах III и IV при возбуждении в максимумах полос поглощения енола и кетона определяется образованием K^* . При коротковолновом возбуждении с $\lambda = 330$ нм растворов III и IV в толуоле в спектре люминесценция добавляется коротковолновая люминесценция, которая является преобладающей в случае соединения III. Влияние пиридина на положение полос эмиссии более выражено для соединения II, чем для IV. Для всех соединений I–IV люминесценция в спирте на порядок эффективнее, чем в толуоле.

Длительные значения времени жизни транс-кето-изомеров (> 1 с), наблюдаемые в растворах нафтобисазометинов III и IV, по-видимому, обусловлены существенной стабилизацией вследствие стерических затруднений, связанных с угловой структурой и наличием нафтоколец.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны д.х.н. П.П. Левину за предоставление экспериментальных данных по лазерному фотолизу.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме Госзадания № FFZE –2022-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hadjoudis E.* // Mol. Eng. 1995. V. 5. P. 301.
2. *Красовицкий Б.М., Болотин Б.М.* // Органические люминофоры. М.: Химия, 1984. С. 336.
3. *Rawat M.S.M., Mal S., Singh P.* // Open Chemistry Journal. 2015. V. 2. P. 7.
4. *Mei J., Leung N.L.C., Kwok R.T.K., Lam J.W.Y., Tang B.Z.* // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 11718.
5. *Ziolek M., Kubicki J., Maciejewski A., Naskrecki R., Grabowska A.* // J. Phys. Chem. Chem. Phys. 2004. V. 6. P. 4683.
6. *Grabowska A., Kownacki K., Karpiuk J., Dobrin S., Kaczmarek L.* // Chem. Phys. Letters. 1997. V. 267. P. 132.
7. *Ziolek M., Kubicki J., Maciejewski A., Naskrecki R., Grabowska A.* // Chem. Phys. Letters. 2003. V. 69. P. 80.
8. *Ziolek M., Kubicki J., Maciejewski A., Naskrecki R., Luniewski W., Grabowska A.* // J. Photochem. Photobiol. A. Chemistry. 2006. V. 180. P. 101.
9. *Ziolek M., Kubicki J., Maciejewski A., Naskrecki R., Grabowska A.* // J. Chem. Phys. 2006. V. 124. P. 124518.
10. *Мардаleyшвили И.Р., Кольцова Л.С., Зайченко Н.Л., Крутиус О.Н., Шиенок А.И.* // Химия высоких энергий. 2021. Т. 55. № 5. С. 347.
11. *Asadi M., Asadi Z., Torabi S., Lotfi N.* // Spectrochimica Acta Part, A. 2012. V. 94. P. 72.
12. *Abdel-Rahman L.H., Ismail N.M., Ismael M., Abu-Dief A.V.E., Ahmed A.H.* // J. Mol. Struct. 2017. V. 1134. P. 851.
13. *Nazir H., Yildiz M., Yilmaz H., Tahir M.N., Ulku D.* // J. Mol. Struct. 2000. V. 534. Is. 1–3. P. 241.
14. *Левин П.П., Зайченко Н.Л., Шиенок А.И., Кольцова Л.С., Мардаleyшвили И.Р., Татиколов А.С.* // Известия Академии наук. Серия химическая. 2012. № 3. С. 531.
15. *Dudek G.O., Dudek E.P.* // J. Am. Chem. Soc. 1966. V. 88. P. 2407.
16. *Elroby S.A., Aboud S., Aziz S.G., Hilal R.* // J. Structural Chemistry. 2015. V. 56. № 3. P. 414.
17. *Vargas V.* // J. Phys. Chem. A. 2004. V. 108. P. 281.
18. *Morales R.G.E., Jara G.P., Vargas V.* // Spectroscopy Int. J. 2000. V. 14. P. 1.
19. *Sliwa M., Mouton N., Ruckebusch C., Aloise S., Poisat O., Buntinx G., Metivier R., Nakatani K., Masuhara H., Asahi T.* // J. Phys. Chem. C. 2009. V. 113. P. 11959.
20. *Britto N.J., Panneerselvam M., Kumar M.D., Kathiravan A., Jaccob M.* // 2021. V. 61. P. 1825.
21. *Barboza C.A., Germino J.C., Santana A.M., Quites F.J., Vazquez P.A.M., Atvars T.D.Z.* // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. P. 6152.
22. *Левин П.П., Зайченко Н.Л., Шиенок А.И., Кольцова Л.С., Мардаleyшвили И.Р., Татиколов А.С.* // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 2. С. 176.