

УДК 541.14+541.49

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА N,N'-БИС(САЛИЦИЛИДЕН)-1,4-БУТИЛЕНДИАМИНА, N,N'-БИС(5-БРОМСАЛИЦИЛИДЕН)-1,4-БУТИЛЕНДИАМИНА И КОМПЛЕКСОВ Zn(II) НА ИХ ОСНОВЕ

© 2020 г. А. Н. Борисов<sup>а, \*</sup>, М. В. Пузык<sup>а</sup>, Е. А. Посадская<sup>а</sup>, Л. П. Ардашева<sup>а</sup>, В. Н. Пак<sup>а</sup><sup>а</sup>Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186 Россия

\*E-mail: alexey-borisov@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2019 г.

После доработки 22.10.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Изучены спектрально-люминесцентные свойства ароматических азометинов N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-типа – N,N'-бис(салицилиден)-1,4-бутилендиамин, N,N'-бис(5-бромсалицилиден)-1,4-бутилендиамин и комплексов Zn(II) на их основе. Все вещества при 293 К флуоресцируют в растворах и поликристаллическом состоянии. К росту интенсивности флуоресценции азометинов в спиртовых растворах приводит их перевод в хиноидную форму. Определены основные фотолюминесцентные параметры растворов веществ в ДМФА и ДМСО. В зависимости от наличия бром-арильных заместителей в структуре лиганда и свойств растворителя комплексы цинка флуоресцируют с квантовыми выходами до 50%.

**Ключевые слова:** люминесценция, азометиновые основания, комплексы Zn(II)

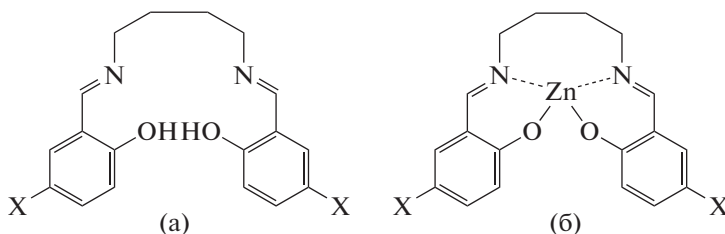
**DOI:** 10.31857/S0023119320020035

Комплексные соединения переходных металлов с азометиновыми основаниями (основаниями Шиффа) привлекают внимание исследователей и рассматриваются в качестве прекурсоров для создания новых функциональных материалов. В частности, комплексы некоторых *d*-элементов с ароматическими азометинами N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-, NO- и N<sub>4</sub>-типа ([M(Schiff)]) обладают люминесцентными [1, 2], каталитическими [3] и сенсорными свойствами [4], а также способностью к образованию устойчивых проводящих полимеров [5].

Известно, что некоторые комплексы Zn(II) с ароматическими азометинами (основаниями Шиффа), производными салицилового альдегида, интенсивно флуоресцируют в видимой области спектра и могут использоваться при создании эмиссионного слоя электролюминесцентных устройств [6]. Спектрально-люминесцентные свойства комплексов [Zn(Schiff)] определяются

главным образом природой координированного азометинового основания – электронным характером заместителей в арильных фрагментах, строением диаминового моста и протяженностью системы π-сопряжения [7, 8]. Таким образом, структурные особенности лигандного окружения, как и характер межмолекулярного взаимодействия, определяют энергию излучательного перехода и эффективность люминесценции комплексов цинка в поликристаллическом виде и растворах.

В работе рассмотрены электронные абсорбционные и эмиссионные свойства тетраденатных ароматических азометинов N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-типа – N,N'-бис(салицилиден)-1,4-бутилендиамин – H<sub>2</sub>(salbn-1,4), N,N'-бис(5-бромсалицилиден)-1,4-бутилендиамин – H<sub>2</sub>(5Br-salbn-1,4) и комплексов Zn(II) на их основе (схема 1).



**Схема 1.** Структурные формулы азометинов (а) и комплексов Zn(II) на их основе (б):  
X = H – H<sub>2</sub>(salbn-1,4) и [Zn(salbn-1,4)]; X = Br – H<sub>2</sub>(5Br-salbn-1,4) и [Zn(5Br-salbn-1,4)].

Выбор азометиновых оснований для синтеза комплексов Zn(II) обусловлен предельным характером диаминового фрагмента  $-(\text{CH}_2)_4-$ , ограничивающим длину внутренней системы сопряжения и благоприятствующим тетраэдрическому строению координационного узла  $[\text{ZnN}_2\text{O}_2]$ . Люминесцентные свойства азометина  $\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$ ,  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$  и соответствующих комплексов цинка ранее не изучались.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез азометинов  $\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$  и  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$  проводили в условиях общего кислотного катализа ледяной уксусной кислотой.

**Синтез  $\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$ .** N-N'-бис(салицилиден)-1,4-бутилендиамин получали реакцией конденсации бутилендиамина-1,4 (Merck, 99%, 0.149 г, 1.69 ммоль) и салицилового альдегида (0.412 г, 3.38 ммоль, 10 мл этанола). После нагревания и перемешивания полученного раствора в течение 15 мин образовался осадок лимонно-желтого цвета. Вещество отфильтровали, промыли холодным этиловым спиртом, эфиром и высушили. Результаты элементного анализа (брутто-формула  $\text{C}_{18}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_2$ ) – вычислено/найденно, %: C 72.97/72.84; H 6.76/6.85; N 9.46/9.54. ИК-спектр,  $\nu/\text{см}^{-1}$ :  $\nu(\text{C}=\text{N}) - 1632$ ;  $\nu(\text{Ar}-\text{O}) - 1285$ ;  $\nu(\text{O}-\text{H}) - 2864$ . Выход – 86%.

**Синтез  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$ .** N,N'-бис(5-бромсалицилиден)-1,4-бутилендиамин получали реакцией конденсации бутилендиамина-1,4 (Merck, 99%; 0.039 г, 0.44 ммоль) и 5-бромсалицилового альдегида (Aldrich, 98%, 0.18 г, 0.88 ммоль; 15 мл этанола). При смешивании реагентов образуется раствор желтого цвета, который затем нагревали в течение 10 мин. Выделившийся осадок желтого цвета отфильтровали, промыли этанолом, эфиром и высушили. Брутто-формула –  $\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2\text{Br}_2$ . Результаты элементного анализа – вычислено/найденно, %: C 47.58/47.46; H 3.96/4.02; N 6.17/6.15. ИК-спектр,  $\nu/\text{см}^{-1}$ :  $\nu(\text{C}=\text{N}) - 1633$ ;  $\nu(\text{Ar}-\text{O}) - 1281$ ;  $\nu(\text{O}-\text{H}) - 2864$ . Выход – 80%.

**Синтез  $[\text{Zn}(\text{salbn-1,4})]\cdot\text{H}_2\text{O}$ .** Для получения комплекса к раствору  $\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$  в этаноле (0.23 г, 0.77 ммоль; 10 мл спирта) добавляли насыщенный водный раствор  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.17 г, 0.77 ммоль). Полученную смесь перемешивали и нагревали. Выделившийся осадок бледно-желтого цвета отфильтровали, промыли горячим этанолом и высушили. Брутто-формула –  $\text{C}_{18}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_3\text{Zn}$ . Результаты элементного анализа – вычислено/найденно, %: C 57.19/57.06; H 5.30/5.42; N 7.41/7.50. ИК-спектр,  $\nu/\text{см}^{-1}$ :  $\nu(\text{C}=\text{N}) - 1628$ ;  $\nu(\text{Ar}-\text{O}) - 1278$ ;  $\nu(\text{H}_2\text{O}) - 3550-3350$ . Выход – 73%.

**Синтез  $[\text{Zn}(5\text{Br-salbn-1,4})]\cdot\text{H}_2\text{O}$ .** К раствору  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$  (0.27 г, 0.59 ммоль; 15 мл этанола)

при перемешивании и нагревании добавляли насыщенный водный раствор  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.13 г, 0.59 ммоль). Образовался осадок бледно-желтого цвета, который отфильтровали, промыли горячим этиловым спиртом и высушили. Брутто-формула –  $\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_3\text{Br}_2\text{Zn}$ . Результаты элементного анализа – вычислено/найденно, %: C 40.34/40.26; H 3.36/3.49; N 5.23/5.32. ИК-спектр,  $\nu/\text{см}^{-1}$ :  $\nu(\text{C}=\text{N}) - 1623$ ;  $\nu(\text{Ar}-\text{O}) - 1280$ ;  $\nu(\text{H}_2\text{O}) - 3650-3350$ . Выход – 68%.

ИК спектры пропускания азометинов и комплексов Zn(II) регистрировали в интервале  $4000-400 \text{ см}^{-1}$  (таблетки с KBr) на ИК-Фурье спектрометре “Shimadzu IR-Prestige 21”.

Электронные спектры поглощения (ЭСП) растворов азометина и комплексов Zn(II) записывали при 293 К в диапазоне  $200-700 \text{ нм}$  на спектрофотометре “Shimadzu UV 2550 PC”.

Спектры люминесценции поликристаллических образцов, а также растворов комплекса Zn(II) в этаноле, ДМФА и ДМСО при 293 К получали с помощью спектрофлуориметр “Флюорат-02-Панорама”. Относительные квантовые выходы люминесценции ( $\Phi_{\text{отн}}$ ) рассчитывали по формуле Паркера [9]:

$$\Phi_{\text{отн}} = \Phi_{\text{ст}} \frac{(1 - 10^{-A_{\text{ст}}})S_x n_x^2}{(1 - 10^{-A_x})S_{\text{ст}} n_{\text{ст}}^2},$$

где  $\Phi_{\text{ст}}$  – квантовый выход люминесценции стандарта,  $S_x$  и  $S_{\text{ст}}$  – площади под кривыми истинных спектров люминесценции образца и стандарта;  $A_x$  и  $A_{\text{ст}}$  – оптические плотности растворов при длине волны возбуждения;  $n_x$  и  $n_{\text{ст}}$  – показатели преломления растворов. В качестве стандарта использовали водный раствор флуоресцеина в 0.1 М NaOH ( $\lambda_{\text{max}} = 520 \text{ нм}$ ,  $\Phi_{\text{ст}} = 0.85$  при 293 К [10]). Точность определения  $\Phi_{\text{отн}}$  – 10%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ЭСП растворов  $\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$  и  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$  в этаноле, дихлорметане, ДМФА и ДМСО обусловлены спин-разрешенными переходами различной орбитальной природы. Основные параметры спектров приведены в табл. 1.

Высокоинтенсивные полосы поглощения с максимумами в области  $215-220$  и  $250-250 \text{ нм}$  соответствуют  $\pi\pi^*$ -переходам в арильных фрагментах азометинов [11]; на их положение практически не влияет изменение спектроскопического параметра полярности растворителя  $Z$  (табл. 1, рис. 2). Полоса с максимумом в области  $315 \text{ нм}$  ( $326 \text{ нм}$  – для  $\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$ ) обусловлена  $\pi\pi^*$ -переходами в азометиновых группах [12].

В растворителях с высоким значением  $Z$  (спирты) и высокой нуклеофильностью (ДМФА, ДМСО) в ЭСП азометинов появляется дополни-

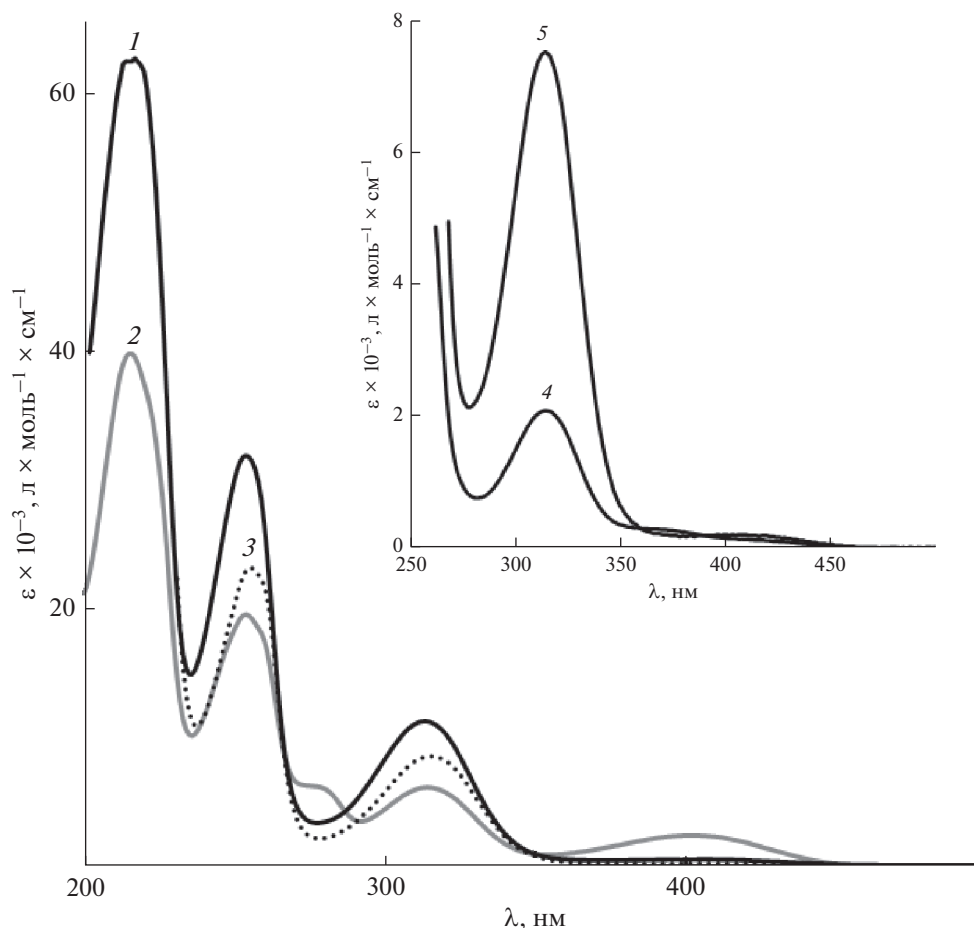


Рис. 1. ЭСП  $H_2(\text{salbn-1,4})$  в  $\text{CH}_3\text{CN}$  – (1);  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  – (2);  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  – (3); ДМФА – (4); ДМСО – (5).  $C = 0.1$  мг/мл, 293 К.

тельная широкая полоса средней интенсивности с максимумом в области 400 нм, соответствующая  $\pi\pi^*$ -переходам в биполярных *кет*-иминных структурах – хиноидных формах [13, 14]. В ацетонитриле и дихлорметане данная полоса отсутствует.

В отличие от азометинов комплексы цинка растворяются только в ДМФА и ДМСО и имеют очень ограниченную ( $<0.1$  мг/мл) растворимость в этаноле. Низкая растворимость подобных комплексов объясняется образованием кластерных структур за счет межмолекулярных донорно-акцепторных связей  $\text{Zn-O-Zn}$  [15]. Растворяющее действие ДМФА и ДМСО, очевидно, обусловлено координацией молекул растворителя, сопряженной с разрушением межмолекулярных связей.

При комплексообразовании практически не изменяются положение полос, соответствующих  $\pi\pi^*$ -переходам в арильных фрагментах. Вместе с тем, образование координационного узла приводит к разрушению *кет*-иминных структур и закономерному исчезновению “хиноидной”, а также незначительному батохромному смещению “азометиновой” полосы.

В ЭСП комплексов по сравнению с азометинами появляется дополнительная полоса средней интенсивности с максимумом при 367 нм. В литературе [16] имеются сведения об отнесении ее к переходу с переносом заряда от лиганда к металлу (ПЗЛМ), что согласуется с тетраэдрическим строением координационного узла. Полосы ПЗЛМ, как правило, батохромно смещаются с ростом параметра  $Z$  растворителя [17], однако, из-за малой растворимости комплексов данную закономерность проверить не удалось.

При 293 К исследуемые вещества люминесцируют в поликристаллическом виде и растворах. Согласно литературным данным [18], фотолюминесценция ароматических азометинов (оснований Шиффа) и соответствующих комплексов  $[\text{Zn}(\text{Schiff})]$  обусловлена излучательной деградацией короткоживущих ( $\tau < 1$  мкс) синглетных электронно-возбужденных состояний (ЭВС)  $^1(\pi^*-\pi)$ -типа.

По всей видимости, необходимым условием флуоресценции азометиновых оснований является наличие в их структуре гидроксигрупп ариль-

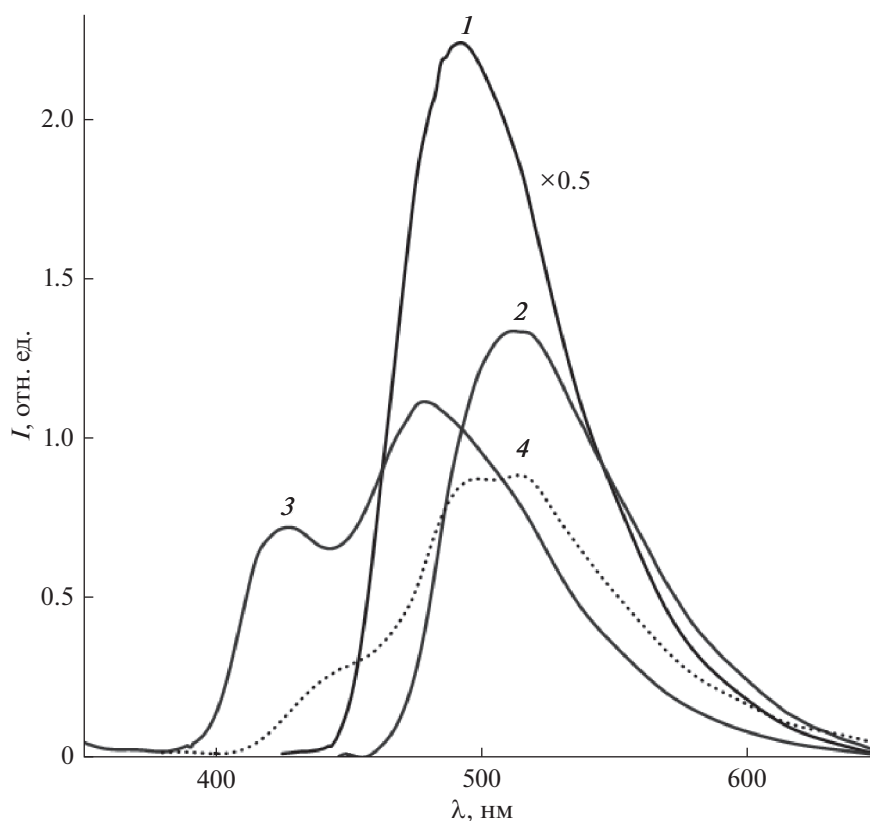
**Таблица 1.** Характеристики ЭСП азометинов и комплексов Zn(II) в различных растворителях

Соединение	$C_2H_5OH$ , $Z = 79.6 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$	ДМСО, $Z = 71.1 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$	ДМФА, $Z = 68.5 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$	$CH_2Cl_2$ , $Z = 64.2 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$
	$\lambda_{\text{max}}$ , нм (lgε)	$\lambda_{\text{max}}$ , нм (lgε)	$\lambda_{\text{max}}$ , нм (lgε)	$\lambda_{\text{max}}$ , нм (lgε)
$H_2(\text{salbn-1,4})$	215 (4.60); 255 (4.28); [278] (3.79); 313 (3.79); 402 (3.40)	315 (3.78); [375] (2.90); [403] (3.42)	315 (3.87); [375] (3.63); 415 (3.33)	255 (4.36); 315 (3.90)
$H_2(5Br\text{-salbn-1,4})$	220 (4.74); 250 (4.26); [277] (3.5); 326 (3.79); 409 (3.34)	326 (3.89); 415 (3.04)	326 (3.58); 415 (2.36)	224 (4.83); 253 (4.31); 326 (3.92)
$[Zn(\text{salbn-1,4})]$	—	[259] (4.38); [325] (3.25); 366 (3.72)	[272] (4.00); [321] (3.45); 367 (3.80)	—
$[Zn(5Br\text{-salbn-1,4})]$	—	[269] (4.10); 374 (3.90)	[268] (4.10); 373 (3.91)	—

[ ] – плечо; “—” – растворимость менее 0.05 мг/мл.

ного типа. В наших экспериментах показано, что азометины – производные бензальдегида, 3-метоксибензальдегида и 2-аминобензальдегида, не содержащие арильных гидроксигрупп, в твердом виде и растворах не люминесцируют.

Флуоресценция характерна для ароматических азометинов  $N_2O_2$ -типа в хиноидной форме, которая образуется при возбуждении в результате фотопереноса протона на атом азота иминогруппы [19]. Однако при рассмотрении фотохимического



**Рис. 2.** Спектры люминесценции поликристаллических образцов при 293 К:  $H_2(\text{salbn-1,4})$  – (1);  $H_2(5Br\text{-salbn-1,4})$  – (2);  $[Zn(\text{salbn-1,4})]$  – (3); и  $[Zn(5Br\text{-salbn-1,4})]$  – (4).  $\lambda_{\text{возб}}$ : 420 нм – (1) и (2); 337 нм – (3) и (4).

механизма образования люминесцирующего таутомера следует учитывать, что кристаллические азометины изначально содержат незначительное количество хиноидной формы, не связанной с фотопереносом протона. В частности, в рентгеновских фотоэлектронных спектрах азометинов  $N_2O_2$ -типа всегда присутствуют малоинтенсивные компоненты, отвечающие хиноидному кислороду и азоту с локализованным и делокализованным положительным зарядом [20], исчезающие при комплексообразовании.

При 293 К спектры люминесценции поликристаллических образцов  $H_2(salbn-1,4)$  и  $H_2(5Br-salbn-1,4)$  представляют собой широкие неструктурированные полосы с максимумами при 493 и 510 нм соответственно (рис. 2, кривые 1 и 2). Наблюдаемое батохромное смещение максимума флуоресценции  $H_2(5Br-salbn-1,4)$  обусловлено участием в сопряжении *p*-орбиталей бром-арильных заместителей, понижающим энергию излучательного перехода. В отличие от азометинов полосы флуоресценции твердых образцов комплексов имеют многокомпонентный характер: 422, 475 и 518 нм для  $[Zn(salbn-1,4)]$  и 443, 495 и 515 нм – для  $[Zn(5Br-salbn-1,4)]$  (рис. 2, кривые 3 и 4). Предположительно, первые две компоненты эмиссионных полос комплексов имеют колебательную природу и соответствуют валентным колебаниям C=C-связей в арильных фрагментах, а дополнительное расщепление излучательного уровня обусловлено спецификой межмолекулярного взаимодействия в кристаллическом состоянии.

Поскольку люминесценция азометинов обусловлена наличием хиноидной формы, следует ожидать, что рост ее содержания повысит интенсивность эмиссионных полос. Для перевода азометинов в хиноидную (солевую) форму использовали депротонирование арильных гидроксигрупп щелочью в спиртовом растворе. Очевидно, это исключает возможность образования люминесцирующего таутомера в результате фотопереноса протона.

В качестве примера на рис. 3 представлена динамика изменения ЭСП этанольного раствора азометина  $H_2(salbn-1,4)$  при постепенном добавлении щелочи. Концентрация NaOH в спирте была подобрана таким образом, чтобы свести к минимуму эффект разбавления, а общее количество добавленного NaOH эквивалентно депротонированию обеих гидроксигрупп. Постепенный рост поглощения в области 400 нм, соответствующей  $\pi\pi^*$ -переходу в хиноидной форме, однозначно свидетельствует о росте ее концентрации. Падение интенсивности полос с максимумами при 215 и 255 нм указывает на снижение ароматичности системы, а интенсивности полосы  $\pi\pi^*$ -перехода в иминогруппе ( $\lambda_{max} = 313$  нм) – на участие последней в стабилизации образующегося аниона. Изменения в ЭСП азометина, происходящие при его депротонировании, хорошо согласуются со схемой 2 делокализации отрицательного заряда в образующихся анионах:

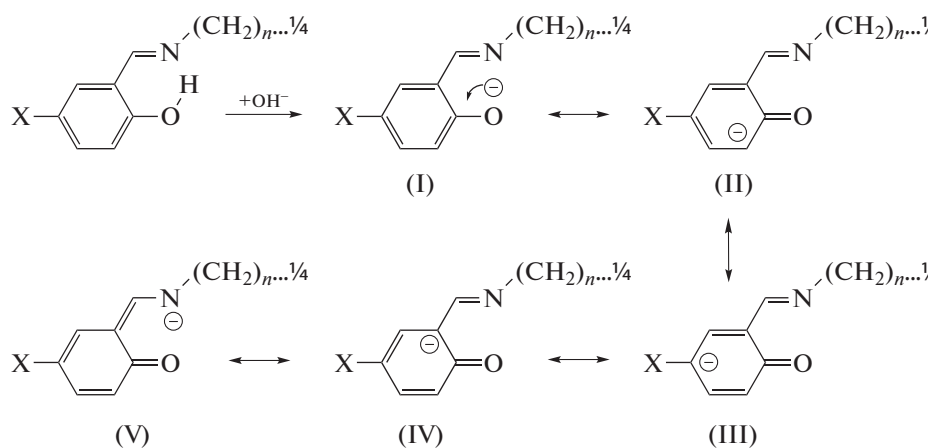


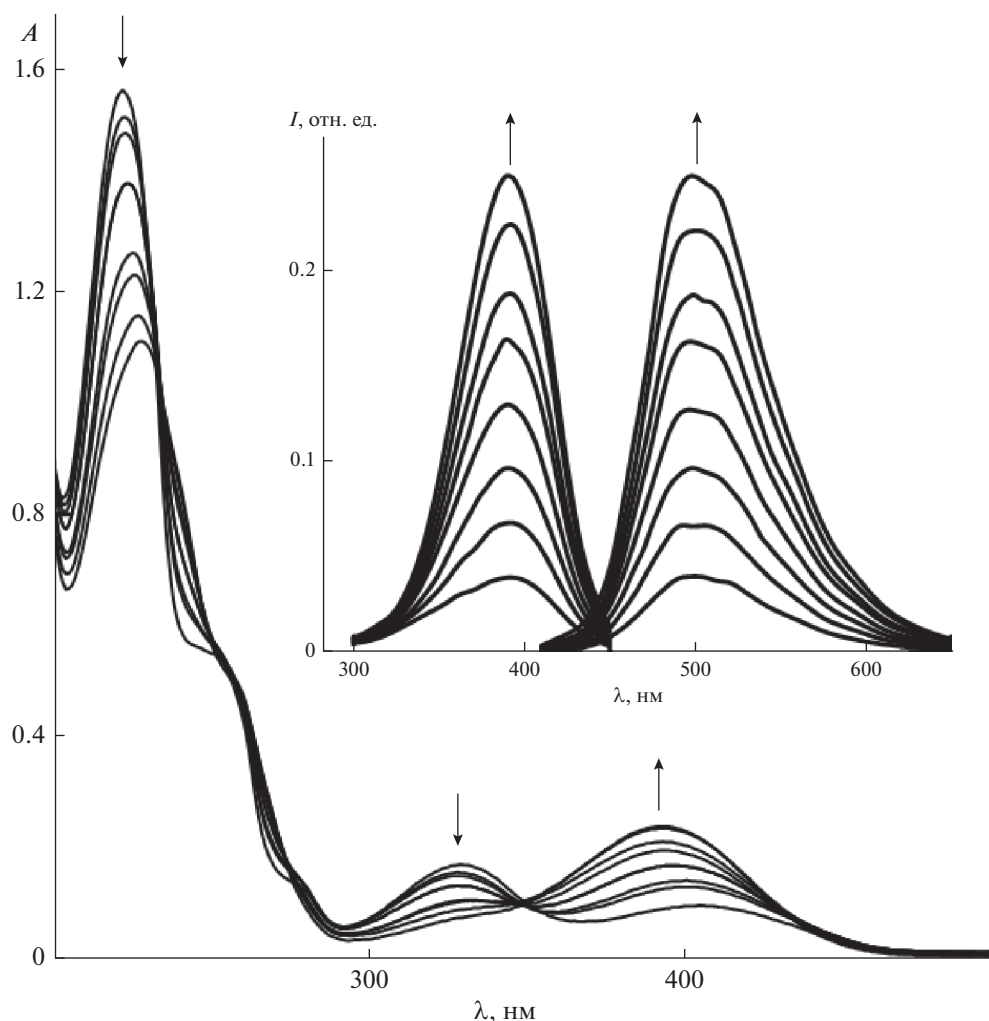
Схема 2. Стабилизация аниона азометинового основания в спиртовом растворе при добавлении щелочи; X = H или Br.

Добавление щелочи вызывает не только изменение в ЭСП спиртовых растворов азометинов, но и предсказуемый рост интенсивности спектров возбуждения и люминесценции (рис. 3, вставка).

Исследуемые комплексы цинка интенсивно люминесцируют в разбавленных растворах в ДМФА и ДМСО. По сравнению с твердыми об-

разцами спектры флуоресценции растворов теряют многокомпонентный характер, что, вероятно, обусловлено разрушением кластерных структур, снижением степени  $\pi\pi$ -стекинг-взаимодействия и координацией молекул растворителя.

Для растворов комплексов положение максимумов и формы излучательных полос не зависят



**Рис. 3.** Динамика изменения ЭСП, спектров возбуждения и люминесценции (на вставке)  $H_2(\text{salbn-1,4})$  в этанольном растворе ( $C = 0.05$  мг/мл) при добавлении  $1.0 \times 10^{-3}$  М раствора NaOH в  $C_2H_5OH$  порциями по 0.2 мл.

от энергии возбуждающего света, а спектры возбуждения флуоресценции комплексов хорошо согласуются со спин-разрешенными оптически переходами в ЭСП (рис. 4, кривые 1 и 2). Это подтверждает отнесение люминесценции исследуемых комплексов к излучательным переходам из низшего по энергии ЭВС  $^1(\pi^*-\pi)$ -типа. Вероятность внутренней конверсии из высших ЭВС в низшее близка к единице.

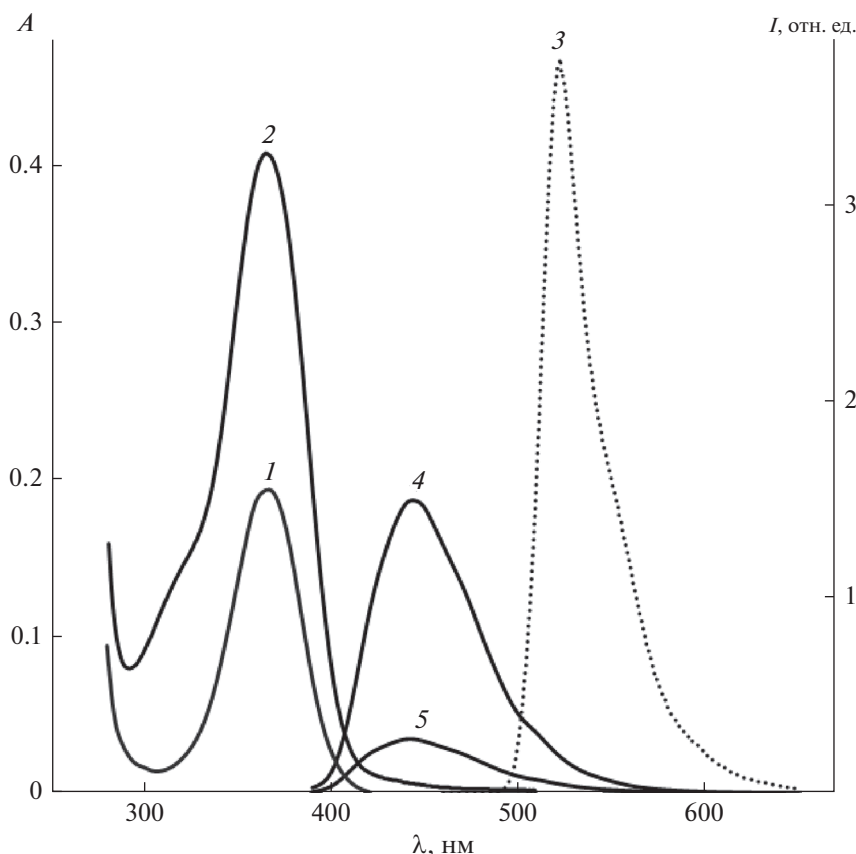
Значения квантовых выходов люминесценции  $\Phi_{\text{отн}}$  разбавленных растворов азометинов и комплексов приведены в табл. 2. Из данных следует, что переход к комплексам Zn(II) приводит к значительному росту средней величины  $\Phi_{\text{отн}}$  флуоресценции: в случае раствора  $[Zn(\text{salbn-1,4})]$  в ДМСО — до 52%. Уменьшение эффективности безызлучательных процессов при переходе к комплексам  $[Zn(\text{Schiff})]$  обусловлено более “жесткой”

структурой азометинов в координированном состоянии.

С другой стороны, конформационная “гибкость” алифатического диаминового моста способствует тетраэдрическому строению координационного узла  $[ZnN_2O_2]$ . Это, в свою очередь, затрудняет стеккинг-взаимодействие молекул комплекса и появление дополнительных  $\pi\pi$ -состояний, ответственных за безызлучательную дезактивацию ЭВС. Уменьшение значений  $\Phi_{\text{отн}}$  в случае бромзамещенных азометина и комплекса связано с тем, что присутствие тяжелых атомов брома повышает скорость процессов безызлучательной деградации энергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы спектральные и люминесцентные свойства азометиновых оснований  $H_2(\text{salbn-1,4})$ ,  $H_2(5\text{Br-salbn-1,4})$  и их комплексов с



**Рис. 4.** Спектры возбуждения люминесценции (*I*) и поглощения (*2*) раствора  $[\text{Zn}(\text{salbn-1,4})]$  (293 К, ДМСО). Спектры люминесценции ( $\lambda_{\text{возб}} = 370$  нм, 293 К):  $[\text{Zn}(\text{salbn-1,4})]$  в ДМСО ( $C = 2.5 \times 10^{-5}$  М) (*4*) и этаноле (насыщенный раствор) (*5*); флуоресцеина в 0.1 М NaOH/ $\text{H}_2\text{O}$  (*3*).

**Таблица 2.** Некоторые параметры фотолюминесценции азометинов и комплексов Zn(II)

Растворитель/соединение	$\lambda_{\text{max}}$ , нм ( $\Phi_{\text{отн}}$ )			
	$\text{H}_2(\text{salbn-1,4})$	$\text{H}_2(5\text{Br-salbn-1,4})$	$[\text{Zn}(\text{salbn-1,4})]$	$[\text{Zn}(5\text{Br-salbn-1,4})]$
Поликристаллический образец	493 (–)	515 (–)	422, 475, 518 (–)	443, 495, 515 (–)
ДМФА	452 (0.05)	453 (0.03)	450 (0.01)	0.32
ДМСО	453 (0.05)	455 (0.02)	445 (0.52)	0.18
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	452 (<0.01)	455 (<0.01)	445 (0.21)	–

цинком. Установлено, что перевод азометинов в солевую (хиноидную) форму приводит к существенному росту квантового выхода флуоресценции. Высокие квантовые выходы люминесценции в сине-фиолетовой области спектра растворов комплексов Zn(II) (~50%) обусловлены природой лигандного окружения и растворителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang S. // *Coord. Chem. Rev.* 2001. V. 251. № 1. P. 79–98. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(00\)00403-3](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(00)00403-3)
2. Ардашева Л.П., Шагисултанова Г.А. // *ЖНХ.* 1998. Т. 43. № 1. С. 92–99.
3. Canali L., Sherrington D.C., Deleuze H. // *React. Funct. Polym.* 1999. V. 40. № 2. P. 155–168. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(98\)00045-5](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(98)00045-5)
4. Shahrokhian S., Fotouhi L. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2007. V. 123. № 2. P. 942–949. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.10.053>
5. Шагисултанова Г.А. // *Теор. и эксп. химия.* 1991. Т. 3. С. 330–337.
6. Evans R.C., Douglas P., Winscom C.J. // *Coord. Chem. Rev.* 2006. V. 250. № 15–16. P. 2093–2126. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2006.02.007>

7. *Wong W.-Y., Lu G.-L., Liu L., Shi J.-X., Lin J.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2004. № 10. P. 2066–2077. <https://doi.org/10.1002/ejic.200300677>
8. *Zheng S.-L., Zhang J.-P., Chen X.-M., Huang Z.-L., Lin Z.-Y., Wong W.-T.* // Chem. Eur. J. 2003. V. 9. № 16. P. 3888–3896. <https://doi.org/10.1002/chem.200304855>
9. *Калверт Дж., Питтс Дж.* Фотохимия. М.: Мир, 1968. 672 с.
10. *Беккер Г.О.* Введение в фотохимию органических соединений. Л.: Химия, 1976. 384 с.
11. *Estiu G.L., Jubert A.H., Costamagna J., Vargas J.* // J. Molec. Struct.: Theochem. 1996. V. 367. P. 97–110. [https://doi.org/10.1016/S0166-1280\(96\)04575-7](https://doi.org/10.1016/S0166-1280(96)04575-7)
12. *Alexander P.V., Sleet R.J.* // Australian J. Chem. 1970. V. 23. № 6. P. 1183–1190. <https://doi.org/10.1071/CH9701183>
13. *Alexander P.V., Sleet R.J.* // Australian J. Chem. 1970. V. 23. № 6. P. 1183–1190. <https://doi.org/10.1071/CH9701183>
14. *Estiu G.L., Jubert A.H., Costamagna J., Vargas J.* // J. Molec. Struct.: Theochem. 1996. V. 367. P. 97–110. [https://doi.org/10.1016/S0166-1280\(96\)04575-7](https://doi.org/10.1016/S0166-1280(96)04575-7)
15. *Ma C.T.Z., Lo A., Abdolmaleki A., MacLachlan M.J.* // Organic Lett. 2004. V. 6. № 21. P. 3841–3844. <https://doi.org/10.1021/ol0483549>
16. *Temel H., Çakir Ü., Otludil B., Uğraş I.* // Synth. React. Inorg. Met.-Org. Chem. 2001. 31(8). P. 1323–1337. <https://doi.org/10.1081/SIM-100107201>
17. *Ливер Э.* Электронная спектроскопия неорганических соединений. В 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1987. 491 с.
18. *Гарновский Д.А., Бурлов А.С., Васильченко И.С., Ураев А.И., Коршунова Е.В.* // Вестник ЮНЦ РАН. 2014. Т. 10. № 3. С. 35–53.
19. *Tong Y.-P., Zheng S.-L., Chen X.-M.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2005. Iss. 18. P. 3734–3741. <https://doi.org/10.1002/ejic.200500174>
20. *Шагисултанова Г.А., Шукарев А.В., Семенистая Т.В.* // Коорд. химия. 2005. Т. 50. № 6. С. 991–1004.