

УДК 541.14

## Фотохромизм *o*-гидроксиазометинов и бисхелатных комплексов металлов на их основе

А. В. Метелица, В. И. Минкин, М. С. Коробов, С. О. Безуглый,  
А. Н. Петрухин, Ф. Е. Гостев, А. А. Титов, О. М. Саркисов

АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ МЕТЕЛИЦА — кандидат химических наук, заведующий лабораторией фотохимии НИИ физической и органической химии Ростовского государственного университета (НИИ ФОХ РГУ). Область научных интересов: органическая фотохимия, фотохромные соединения и материалы.

МИХАИЛ СТЕПАНОВИЧ КОРОБОВ — кандидат химических наук, старший научный сотрудник НИИ ФОХ РГУ. Область научных интересов: комплексные соединения, ЯМР-спектроскопия.

СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ БЕЗУГЛЫЙ — младший научный сотрудник отдела физической и органической химии Южного научного центра РАН. Область научных интересов: органическая фотохимия, фотохромные соединения и материалы.

344090 г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 194/2, НИИ ФОХ РГУ, тел. (8632)433-400, факс (8632)434-667, E-mail met@ipoc.rsu.ru

АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ПЕТРУХИН — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН). Область научных интересов: фемтосекундная спектроскопия, фемтохимия.

ФЕДОР ЕВГЕНЬЕВИЧ ГОСТЕВ — научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии ИХФ РАН. Область научных интересов: лазерная физика, фемтосекундная спектроскопия.

АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ТИТОВ — старший научный сотрудник лаборатории лазерной спектроскопии ИХФ РАН. Область научных интересов: лазерная физика, фемтосекундная спектроскопия.

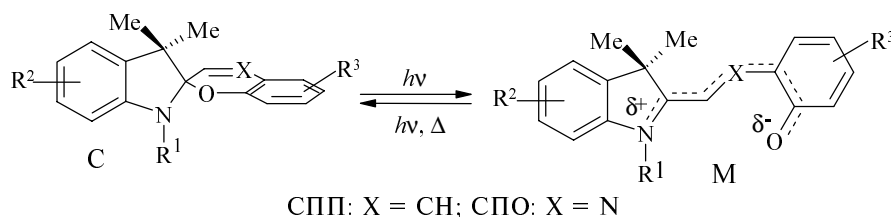
ОЛЕГ МИХАЙЛОВИЧ САРКИСОВ — доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора ИХФ РАН. Область научных интересов: лазерная спектроскопия, фемтохимия, фемтобиология.

117334 Москва, ул. Косыгина, д. 4, ИХФ РАН, тел. (095)939-74-97, факс (095)938-24-84, E-mail sarkisov@femto.chph.ras.ru

### Фотохромизм и объекты исследования

Фотохромные соединения привлекли к себе внимание в связи с возможностью их использования для защиты от светового излучения в фотохромных пластиковых очках, фильтрах переменной оптической плотности, а в последние годы в связи с перспективой применения бистабильных фотохромных систем как молекулярных переключателей, для записи и хранения оптической информации, в качестве функциональных элементов для нового поколения компьютеров [1–6]. Наибольшее распространение получили органические фотохромные соединения, отличающиеся разнообразием оптических характеристик и, как правило, высокой светочувствительностью [7].

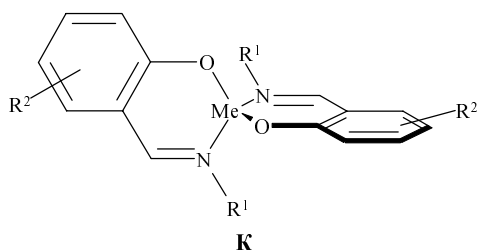
В этом отношении особенно перспективны спироциклические соединения, в частности спиропираны (СПП) [5] и спирооксазины (СПО) [8].



Механизм фотохромных превращений у этих веществ связан с термически и фотохимически обратимой фотореакцией разрыва связи C<sub>спиро</sub>—O в циклической форме (С) и последующей изомеризацией в метастабильные мероцианиновые формы (М). Эти превращения реализуются в растворах и полимерных матрицах, а также в тонких аморфных и кристаллических пленках, характеризуются высокими значениями квантовых выходов фотоокрашивания, отличаются значительной вариабельностью спектрально-абсорбционных характеристик и констант скоростей термических процессов в зависимости от структуры соединения.

Многообразные структурные модификации спиропиранов и спирооксазинов до последнего времени получали варьированием структуры фрагментов, присоединенных к спироуглероду, и не затрагивали сам спироузел. Лишь недавно были обнаружены фотохромные свойства у нового типа спироциклических соединений, где в качестве спироатома выступают ионы металлов — бис-(N-салицилальдиминаты) (К).

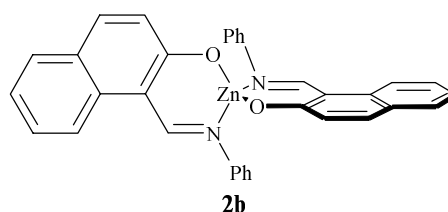
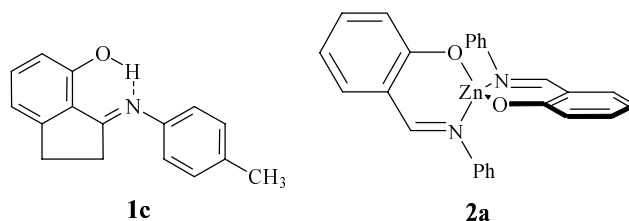
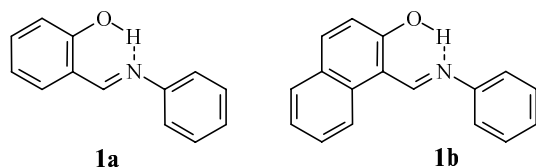
Важным шагом в изучении фотохромизма СПП явилось исследование фотоиницированных



M = Be, Zn, Co, Ni, Cu, Pd; R<sup>1</sup> = Ar, Alk;  
R<sup>2</sup> = Ar, Alk, benzo

процессов в молекулах 2Н-бензопиранов [9], в структуре которых есть основное функциональное ядро, ответственное за фотохромизм СПП. Среди бисхелатных комплексов в качестве аналогичной ядру модели можно рассматривать их лиганды — *o*-гидроксиазометины [10, 11].

Настоящая работа содержит краткий обзор результатов, полученных в НИИ физической и органической химии Ростовского государственного университета и Институте химической физики РАН при исследовании фотохромизма и реакционной динамики фотоиницированных процессов в *o*-гидроксиазометинах и бисхелатных комплексах на их основе. Закономерности протекания термических и фотохимических реакций в молекулах этих соединений можно проиллюстрировать на примере *o*-гидроксиазометинов **1a–c** и бисхелатных комплексов Zn **2a, b**.



### Фотохромные свойства *o*-гидроксиазометинов

Спектрально-адсорбционные и спектрально-флуоресцентные характеристики изомерных форм *o*-гидроксиазометинов **1a–c** представлены в табл. 1. В работах [12–19], посвященных исследованию N-арил- и N-алкилиминов *o*-гидроксиазометинов стационарными спектральными и фотохимическими методами на основе структурного моделирования и данных расчетов с использованием методов квантовой химии, нами предложена общая схема 1 фотоиницированных процессов.

Исходная форма *o*-гидроксиазометинов представляет собой *транс*-изомер ( $A_{OH}^{trans}$ ) относительно связи C=N, стабилизированный в плоской конформации внутримолекулярной водородной связью (ВВС).

Таблица 1

Спектрально-адсорбционные и спектрально-флуоресцентные характеристики изомерных форм *o*-гидроксиазометинов **1a–c**

Соединение, форма	$\lambda_{max}$ , нм ( $\epsilon_{max}$ , л/(моль · см))								
	Толуол (293 К)			Ацетонитрил (293 К)			Изопентан (77 К)		
	Поглощение	Флуоресценция		Поглощение	Флуоресценция		Поглощение	Флуоресценция	
	Возбуждение	Эмиссия	Возбуждение		Эмиссия	Возбуждение		Эмиссия	
<b>1a</b>									
$A_{OH}^{trans}$ *	342 (10490)	350	523	336 (10760)			342	340	512
$A_{NH,кетo}^{trans}$				394 плечо	394	483			
$A_{NH,Бп(\alpha)}^{trans}$							480, 520 плечо	520	560
<b>1b</b>									
$A_{OH}^{trans}$	376			376					
$A_{NH,кетo}^{trans}$	452	456	482	433, 452	430 плечо 455	486	455	455, 470 плечо	483, 502 плечо
<b>1c</b>									
$A_{OH}^{trans}$	316 (11340)	316	516	313 (12090)	312	515	314	314	518
$A_{NH,кетo}^{trans}$				421**					

\*  $A_{OH}^{trans}$  — *транс*-изомер относительно связи C=N, см. ниже по тексту. \*\* Слабоинтенсивная полоса фиксируется в спектре **1c** этаноле наряду с полосой  $\lambda_{max} = 315$  нм и свидетельствует о равновесии  $A_{OH}^{trans} \leftrightarrow A_{NH,кетo}^{trans}$ .

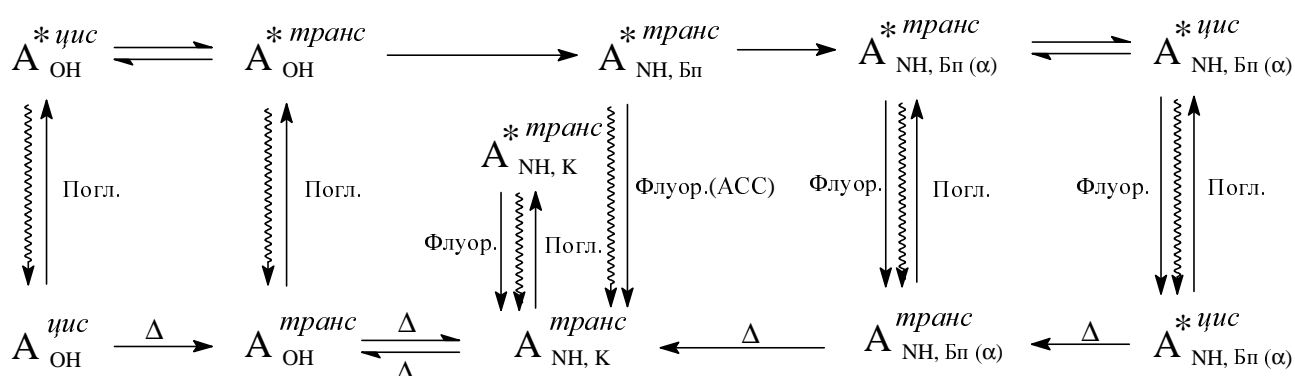
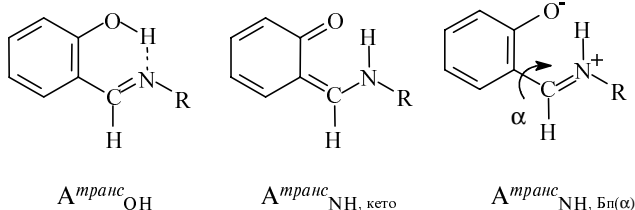


Схема 1

В электронных спектрах поглощения растворов соединений **1a–c**  $A^{транс}_{OH}$ -форма проявляется в виде структурированной полосы с максимумами при 316–376 нм (см. табл. 1). При облучении  $A^{транс}_{OH}$ -формы светом с длиной волны полосы поглощения в возбужденном состоянии осуществляются два конкурирующих процесса: разрыв водородной связи с последующей изомеризацией по связи C=N, приводящий к *цис*-изомеру ( $A^{цис}_{OH}$ ), и внутримолекулярный перенос протона (ESIPT — Excited State Intramolecular Proton Transfer).



*цис*-Изомер, спектрально незначительно отличающийся от *транс*-изомера (в основном более низкими значениями молярных коэффициентов экстинкции), термически неустойчив при комнатной температуре и претерпевает обратимую изомеризацию в основном состоянии. При низких температурах (77 К) в отсутствие термических реакций наблюдается фотоиницированная *цис-транс*-изомеризация и установление фотостационарного состояния, зависящего от длины волны возбуждающего света.

ESIPT приводит к образованию в возбужденном состоянии плоской биполярной формы ( $A^{*транс}_{NH, Бп}$ ). Излучательная дезактивация  $S_1$ -состояния этой формы проявляется в виде флуоресценции с аномальным стоксовым сдвигом (АСС) при возбуждении исходной  $A^{транс}_{OH}$ -структуры. Максимумы полос флуоресценции азобетенов **1a–c** лежат в области 516–523 нм (см. табл. 1). При этом, если эффективность АСС-флуоресценции соединения **1a** очень мала (квантовый выход в толуоле при 293 К менее  $10^{-4}$ ), то квантовый выход АСС-флуоресценции азобетина **1c** с исключительной вращением по связи  $C_{Ar}-C$ -структурой в толуоле при 293 К составляет  $5 \cdot 10^{-2}$ . Наряду с этим происходят адиабатические конформационные изме-

нения, ведущие к образованию скрученных биполярных структур ( $A^{*транс}_{NH, Бп(\alpha)}$ ). Далее в жестких матрицах при низкой температуре (77 К) в результате внутренней конверсии образуются стабилизированные вязкостными барьерами окрашенные  $A^{транс}_{NH, Бп(\alpha)}$ -структуры, что в электронных спектрах поглощения проявляется в виде длинноволновых полос при 480–540 нм (см. табл. 1). При возбуждении  $A^{транс}_{NH, Бп(\alpha)}$  наблюдается флуоресценция (для соединения **1a** максимум полосы флуоресценции локализован в области 560 нм) и, в зависимости от структуры азобетенов, в ряде случаев появление более длинноволновых полос поглощения, отнесенных на основании квантовохимических расчетов к *цис*-изомерным по C=N-связи  $A^{цис}_{NH, Бп(\alpha)}$ -структурам. О важности межфрагментарного поворота по связи  $C_{Ar}-C$  при формировании фотопродуктов  $A^{транс}_{NH, Бп(\alpha)}$  и  $A^{цис}_{NH, Бп(\alpha)}$  свидетельствует отсутствие фотоокрашивания у соединения **1c** с закрепленной структурой и, как следствие, исключение фотохимического канала дезактивации возбужденного состояния в этом соединении, повышение квантового выхода АСС-флуоресценции [12, 15].

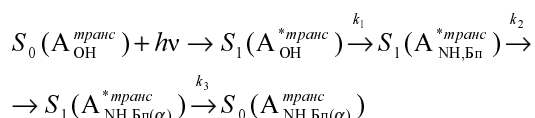
В отличие от N-арильных производных [16] в молекулах N-алкильных аналогов [19] существенную роль играет внутримолекулярный перенос протона в основном состоянии (GSIPT — Ground State Intramolecular Proton Transfer), приводящий к образованию кето-формы  $A^{транс}_{NH, кето}$  [18]. В результате GSIPT наблюдается равновесие  $A^{транс}_{OH}$  и  $A^{транс}_{NH, кето}$ , зависящее от растворителей и температуры. Кето-форма  $A^{транс}_{NH, кето}$  характеризуется поглощением с максимумом в области 394–455 нм и флуоресценцией при 480–486 нм (см. табл. 1). Кето-енольное равновесие в случае азобетина **1c** наблюдается уже в слабополярных растворителях, а при понижении температуры равновесие сдвигается в сторону кето-формы, вплоть до полной конверсии при 77 К (стекляющая смесь изопентана и изопропанола в соотношении 4:1). Кето-форма  $A^{транс}_{NH, кето}$  не фотоактивна и при возбуждении дезактивируется как безызлучательно, так и путем испускания флуоресценции небольшой интенсивности, спектрально отличающейся от АСС-флуоресценции, возникающей при возбуждении структуры  $A^{транс}_{OH}$ . Таким образом, возбуждение  $A^{транс}_{NH, кето}$  не приводит к образованию плоской биполярной струк-

туры  $A^{*trans}_{NH,Бп}$  и далее к акупланарным окрашенным  $A^{*trans}_{NH,Бп(\alpha)}$ -структурам.

В  $S_0$ -состоянии молекул азометинов при отсутствии вязкостного барьера быстрый распад фотохромных структур  $A^{*trans}_{NH,Бп(\alpha)}$  и  $A^{*cis}_{NH,Бп(\alpha)}$  происходит с образованием формы  $A^{*trans}_{NH,кето}$  и последующим GSIPT в исходную форму  $A^{*trans}_{ОН}$ .

### Молекулярная динамика фотоиницированных процессов в молекулах *o*-гидроксиазометинов

Спектрально-кинетические исследования в фемто- и пикосекундных областях позволили выделить следующие основные стадии фотоиницированных превращений в молекулах *o*-гидроксиазометинов:



Возбуждение излучением 308 нм молекулы *o*-гидроксиазометина **1a** в ацетонитриле в енольной форме  $A^{*trans}_{ОН}$  приводит к заселению колебательных уровней электронно-возбужденного состояния  $S_1(A^{*trans}_{ОН})$ . Затем с константой скорости  $k_1$  ( $1/k_1 \leq 80$  фс) происходит внутримолекулярный перенос протона (ESIPT) и образование  $A^{*trans}_{NH,Бп}$ -формы в  $S_1$ -состоянии. Адиабатическое развитие реакции на поверхности  $S_1$ -состояния связано с поворотом альдегидного фрагмента в биполярной  $A^{*trans}_{NH,Бп}$ -форме по связи  $C_{Ar}-C$  на угол  $\alpha$  и формированием в возбужденном состоянии акупланарной формы  $A^{*trans}_{NH,Бп(\alpha)}$ . Характеристическое время процесса составляет  $1/k_2 = 260$  фс. Далее следует безызлучательный переход в основное состояние окрашенного изомера  $A^{*trans}_{NH,Бп(\alpha)}$  с константой скорости  $k_3$  ( $1/k_3 = 3,8$  пс).

Для подтверждения решающей роли межфрагментарного поворота по связи  $C_{Ar}-C$  в процессе образования окрашенных структур в молекулах *o*-гидроксиазометинов было исследовано модельное соединение **1c**, в котором такие изменения структуры исключены.

Как и в случае азометина **1a**, в соединении **1c** наблюдается процесс, протекающий за время, меньшее 80 фс, относимый нами к внутримолекулярному переносу протона в возбужденном состоянии. Затем следует быстрое внутримолекулярное перераспределение энергии в возбужденном состоянии, протекающее за 220 фс. После этого происходит процесс, сопровождающийся незначительным изменением формы спектра, представляющий собой, по-видимому, межмолекулярную релаксацию. Это предположение подтверждается и характерным временем этого процесса, составляющим  $\sim 6$  пс. Время жизни формы с перенесенным протоном в возбужденном состоянии составляет более 500 пс. Вероятно, это время определяется временем перехода в основное электронное состояние структуры  $A^{*trans}_{NH,кето}$ , сопровождающегося испусканием АСС-флуоресценции.

Таким образом, в отличие от соединения **1a**, в молекулах **1c** в результате ESIPT не происходит образования окрашенного продукта. Время жизни формы с перенесенным протоном в возбужденном состоянии азометина **1c** превышает 500 пс, что более чем на два

порядка больше, чем в **1a**. Это позволяет предположить, что структуры форм с перенесенным протоном в возбужденном состоянии азометинов **1a** и **1c** существенно различаются. Поскольку основное различие **1a** и **1c** обусловлено запретом поворота вокруг связи  $C_{Ar}-C$  в молекуле **1c**, можно предположить, что у этого соединения форма с перенесенным протоном представляет собой плоскую биполярную структуру  $A^{*trans}_{NH,Бп}$ , конфигурация которой близка строению исходной молекулы азометина. У соединения **1a** форма с перенесенным протоном в возбужденном состоянии после завершения процесса релаксации, описываемого константой  $k_2$ , представляет собой биполярную структуру  $A^{*trans}_{NH,Бп(\alpha)}$ , в которой произошел поворот вокруг связи  $C_{Ar}-C$  на некоторый угол  $\alpha$ .

В работах [20, 21], посвященных исследованию соединения **1a** методом фемтосекундного фотолиза, также определено время образования фотопродукта в возбужденном состоянии, которое составило 400–600 фс в зависимости от растворителей. Однако отсутствие соответствующих модельных соединений не позволило авторам дать полную интерпретацию полученных результатов и включить в предложенный механизм фотоиницированных процессов стадию, связанную с конформационными перестройками при формировании окрашенных продуктов.

### Фотохромные свойства бисхелатных комплексов

Бисхелатные комплексы К непереходных металлов с салицилальдиминовыми лигандами изоэлектронны бисспириранам. Проведенные квантовохимические расчеты [22] свидетельствуют и об их изолобальности [23], т.е. об аналогии формы и относительного расположения граничных МО, а также сходной природе низших электронно-возбужденных состояний. Это позволило предположить, что при переходе в первое синглетное возбужденное состояние хелатные комплексы К непереходных металлов будут претерпевать фотоиницированную диссоциацию связей  $M_{спирос}-O$  с образованием продуктов  $X_1$ , подобно тому как их органические аналоги СПП и СПО претерпевают фотодиссоциацию связей  $C_{спирос}-O$  с образованием окрашенных изомеров М. Действительно, было обнаружено [24, 25], что при облучении растворов комплексов К светом импульсной фотолитической лампы происходит их окрашивание, сопровождающееся появлением в спектре новых длинноволновых полос поглощения с максимумами в области 440–660 нм. После прекращения облучения эти полосы полностью исчезали за время 80–250 мс.

В пользу того, что окрашивание вызывается фотодиссоциацией связей  $M_{спирос}-O$ , говорит сходство фотоиндуцированных спектров поглощения бисхелатов К со спектрами фотоизомеров СПП и 2Н-хроменов, а также со спектрами сольватно-разделенных ионных пар салицилальдиминатов щелочных металлов в полярных растворителях [26]. В то же время фотодиссоциация связей  $M_{спирос}-N$  как причина фотоокрашивания представляется маловероятной. Термическая диссоциация этих связей, являющаяся одним из наиболее важных механизмов термической рацемизации хиральных тетраэдрических комплексов непереходных и переходных металлов  $K_1$  и  $K_2$ , осуществ-

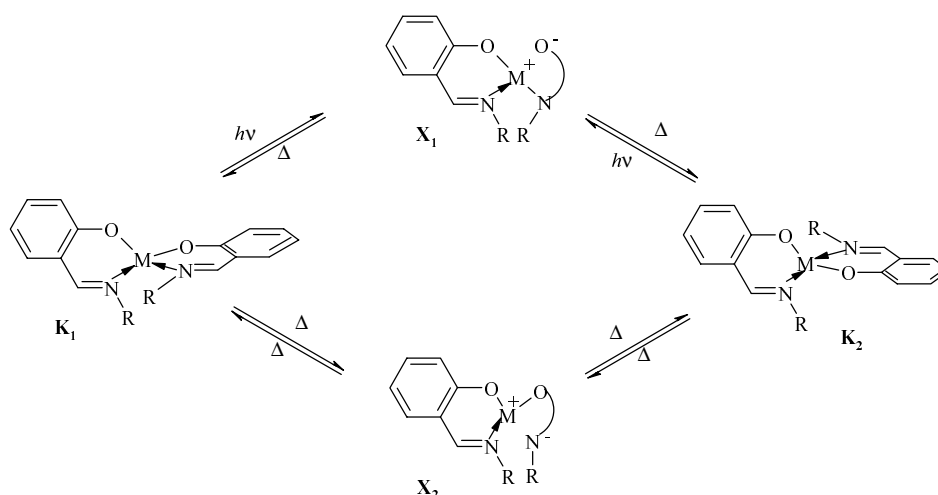


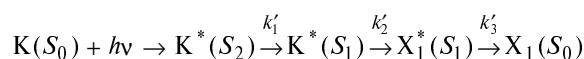
Схема 2

ляющей через интермедиат  $X_2$ , была подробно изучена (схема 2) [27]. В этих реакциях, однако, не наблюдалось образования окрашенной формы.

#### Молекулярная динамика фотоиницированных процессов в молекулах бисхелатных комплексов

Механизм фотоокрашивания бисхелатных комплексов  $K$ , по-видимому, определяется фотоиндуцированными превращениями в их лигандах — *o*-гидроксиазометинах и связан с образованием после разрыва одной из  $M_{\text{спиро}}-O$ -связей скрученной по связи  $C_{\text{Ar}}-C$  структуры, аналогичной окрашенным формам *o*-гидроксиазометиннов  $A^{\text{транс}}_{\text{NH,Бп}(\alpha)}$  и  $A^{\text{цис}}_{\text{NH,Бп}(\alpha)}$  (табл. 2).

Электронные спектры поглощения бисхелатных комплексов **2a, b** характеризуются длинноволновыми полосами поглощения с максимумами в области 395—422 нм. При переходе от слабополярного растворителя к полярному наблюдается гипсохромный сдвиг максимумов полос поглощения соединений **2a, b**. Комплексы **2a, b** обладают флуоресценцией с максимумами полос при 477—483 нм.



При облучении растворов соединений **2a, b** фемто-секундными импульсами на длине волны 308 нм происходит возбуждение молекул  $K$  в  $S_2$  состояние. С характеристическим временем  $1/k'_1 = 130 \pm 200$  фс осуществляется конверсия в  $S_1$ -состояние, где происходит разрыв связи  $M_{\text{спиро}}-O$ , сопровождающийся поворотом по связи  $C_{\text{Ar}}-C$  и образованием окрашенной формы  $X_1^*$  за время  $1/k'_2 = 2 \pm 4$  пс. Переход в основное состояние окрашенного изомера  $X_1$  происходит за время  $1/k'_3 = 20 \pm 100$  пс.

Таким образом, результаты исследований *o*-гидроксиазометиннов при помощи стационарных и импульсных спектрально-адсорбционных, спектрально-люминесцентных и фотохимических методов, а также структурного моделирования с привлечением результатов квантовохимических расчетов позволяют получить достаточно полное представление о структурном и фотофизическом механизмах фотоиницированных процессов в этих молекулах. Механизм обнаруженного фотохромизма бисхелатных комплексов на основе

Таблица 2

Спектрально-адсорбционные и спектрально-флуоресцентные характеристики бисхелатных комплексов **2a, b**

Соединение	$\lambda_{\text{max}}$ , нм ( $\epsilon_{\text{max}}$ , л/(моль · см))					
	Толуол (293 К)			Ацетонитрил (293 К)		
	Поглощение	Флуоресценция		Поглощение	Флуоресценция	
Возбуждение		Эмиссия	Возбуждение		Эмиссия	
<b>2a</b>	402 (17390)	391	480	395 (18660)	393	483
<b>2b</b>	422 (25410)	425	477	414 (25300)	418	478

*o*-гидроксиазометинов следует еще изучать. В частности, важно исследовать молекулярную динамику фотопроцессов в комплексах с привлечением модельных соединений, позволяющих исключить те или иные стадии фотореакций и тем самым уточнить структурно-энергетический механизм.

\* \* \*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-03-32154-а), МНТЦ (проект 2117) и НШ-945.2003.3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bertelson R.C. Photochromism. Ed. by G.H. Brown. New York: Wiley, 1971, p. 49–294.
2. Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977, 280 с.
3. Фотохромизм. Под ред. А.В. Ельцова. Л.: Химия, 1982, 286 с.
4. Guglielmetti R. In: Photochromism. Molecules and systems. Ed. by H. Durr, H. Bouas-Laurent. Amsterdam: Elsevier, 1990, p. 314–466.
5. Bertelson R.C. Spiropirans. In: Organic Photochromic and Thermochromic Compounds. Ed. by J.C. Crano, R.J. Guglielmetti, New York: Plenum Press, 1999, v. 1, p. 11–84.
6. Berkovic G., Krongauz V., Weiss V. Chem. Rev., 2000, v. 100, p. 1741–1753.
7. Kobatake S., Irie M. Annu. Rep. Prog. Chem. Sect. C, 2003, v. 99, p. 277–313.
8. Локин В., Сама А., Метелица А.В. Успехи химии, 2002, т. 71, № 11, с. 1015–1039.
9. Laarhoven W.H. In [4], p. 270–313.
10. Hadjoudis E. In [4], p. 685.
11. Yoon M. In: CRC Handbook of Organic Photochemistry and Photobiology. Second Ed. Ed. by William M. Horspool, F. Lenci. Boca Raton etc. CRC Press, 2004, p. 68.1–68.29.
12. Княжанский М.И., Алдошин С.М., Метелица А.В. и др. Хим. физика, 1991, т. 10, № 7, с. 964–970.
13. Knyazhansky M.I., Metelitsa A.V. Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. Sect. A, 1994, v. 246, p. 315–318.
14. Княжанский М.И., Метелица А.В. Фотоиницированные процессы в молекулах азометинов и их структурных аналогов. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1992, 208 с.
15. Knyazhansky M.I., Metelitsa A.V., Bushkov A.Ja., Aldoshin S.M. J. Photochem. Photobiol. A., 1996, v. 97, p. 121–126.
16. Kleetskii M.E., Milov A.A., Metelitsa A.V., Knyazhansky M.I. Ibid., 1997, v. 110, p. 267–270.
17. Метелица А.В., Коробов М.С., Ниворожкин Л.Е. и др. Ж. орган. химии, 1998, т. 34, вып. 8, с. 1203–1207.
18. Клецкий М.Е., Милов А.А., Княжанский М.И., Метелица А.В. Ж. общей химии, 1999, т. 69, вып. 8, с. 1335–1343.
19. Knyazhansky M.I., Metelitsa A.V., Kleetsky M.E. e. a. J. Mol. Structure, 2000, v. 526, p. 65–79.
20. Mitra S., Tamai N. Chem. Phys. Lett., 1998, v. 282, p. 391.
21. Mitra S., Tamai N. Phys. Chem. Chem., Phys., 2003, v. 5, p. 4647.
22. Minkin V.I., Pichko V.A., Abubikerova I.A., Simkin B.Ya. J. Mol. Struct. (Theochem), 1991, v. 227, p. 297–304.
23. Hoffmann R. Angew. Chem., 1982, v. 94, p. 725–739.
24. Minkin V. I., Volbushko N.V., Korobov M.S., Nivorozhkin L.E. Mendeleev Commun., 1993, № 3, p. 102–104.
25. Минкин В.И., Волбушко Н.В., Коробов М.С. Ж. общей химии, 1998, т. 68, с. 59–68.
26. Олехнович Л.П., Любарская А.Э., Княжанский М.И., Минкин В.И. Ж. орган. химии, 1973, т. 9, № 8, с. 1724–1731.
27. Минкин В.И., Ниворожкин Л.Е., Коробов М.С. Успехи химии, 1994, т. 63, № 4, с. 303–326.