

02

## Спектральное исследование строения и свойств комплексов незамещенного индолинового спиропирана с ионами алюминия

© Н.Е. Беликов<sup>1</sup>, А.Ю. Лукин<sup>2</sup>, С.Д. Варфоломеев<sup>1</sup>, И.И. Левина<sup>1</sup>, Л.Е. Петровская<sup>3</sup>, О.В. Демина<sup>1</sup>, В.А. Барачевский<sup>4</sup>, А.А. Ходонов<sup>1¶</sup>

<sup>1</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, 119334 Москва, Россия

<sup>2</sup> МИРЕА - Российский технологический университет, 119571 Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, 117997 Москва, Россия

<sup>4</sup> Центр фотохимии, ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, 119421 Москва, Россия

¶ e-mail: khodonov@gmail.com

Поступила в редакцию 23.11.2021 г.

В окончательной редакции 26.01.2022 г.

Принята к публикации 08.02.2022 г.

Методами абсорбционной электронной и ЯМР-спектроскопии исследованы процессы комплексообразования при взаимодействии молекул незамещенного индолинового спиропирана с солями алюминия. Установлен механизм образования и структура комплексов двух типов. Обнаружен отрицательный фотохромизм комплекса мероцианиновой формы спиропирана с ионами алюминия. Исследована устойчивость металлокомплексов к действию различных агентов.

**Ключевые слова:** фотохромизм, спиропираны, металлокомплексы, соли алюминия, электронная спектроскопия, ЯМР-спектроскопия.

DOI: 10.21883/OS.2022.05.52421.10-22

### Введение

Фотоуправляемые фотохромные ионофоры и искусственные рецепторы, позволяющие контролировать процесс комплексообразования с различными лигандами и свойства возникающих продуктов, привлекают интерес исследователей в различных областях [1–8]. Ранее было показано, что замещенные производные спиропирана — 1', 3', 3'-триметилспиро[2*H*-1-бензопиран-2, 2'-индолина] (BIPS, SP1), испытывающие фотохромные превращения (схема 1), достаточно легко образуют комплексы при взаимодействии с солями некоторых *d*- и *f*-элементов [3–12], а также соли с неорганическими кислотами [13, 14].

В процессе фотохромных превращений бесцветная циклическая (спиро) форма спиропиранов под действием УФ света испытывает диссоциацию связи С–О в пирановом фрагменте и последующую темновую *цис*→*транс*-изомеризацию с образованием окрашенной мероцианиновой формы (МС). Возвращение ее в исходное состояние осуществляется либо спонтанно, либо при облучении видимым светом, поглощаемым МС-формой. Скорость реакции темнового обесцвечивания возрастает при нагревании фотохромной системы. В качестве промежуточных продуктов предполагается существование набора изомерных МС-форм с фенолятным анионом (ТТТ, ТТС, СТТ, СТС и др.), а также возможно образование изомерных хиноидных структур.

Состав и стабильность образующихся комплексов молекул спиропиранов с ионами металлов зависит как от структуры фотохромного лиганда и свойств растворителя, так и от природы и валентности катионов металлов. Чаще всего наблюдают образование комплексов SP–M<sup>n+</sup> состава 2 : 1 или 1 : 1. Известен ряд таких фотоуправляемых ион-комплексообразующих систем на основе спиропиранов, содержащих нитрогруппу в положении 6 пиранового фрагмента, а также карбокси-, метокси- или меркаптогруппы, или остатки краун-эфиров, подандов, иминодиацетата, N-гетероциклов, би-пиридилов и дендримеров, используемых в качестве ионофорных или хелатофорных звеньев в различных положениях молекулы фотохрома [3–8].

При исследовании свойств спиропиранов и их фотоинтермедиатов кроме спектрально-кинетических методов (стационарной и импульсной абсорбционной спектроскопии и лазерного флеш-фотолиза в УФ и видимой спектральных областях) [15–18] в последнее время успешно применяется также метод ЯМР-спектроскопии [9–11, 19–23]. Однако широкое внедрение последнего метода в исследование свойств фотохромных соединений ограничено из-за короткого времени жизни фотоинтермедиатов МС-формы спиропиранов. Решение этой проблемы возможно с помощью новой аппаратуры ЯМР-спектрометрии, в которой спектры ЯМР регистрируются в процессе облучения образца светом заданной длины волны [10]. Альтернативным решением пробле-

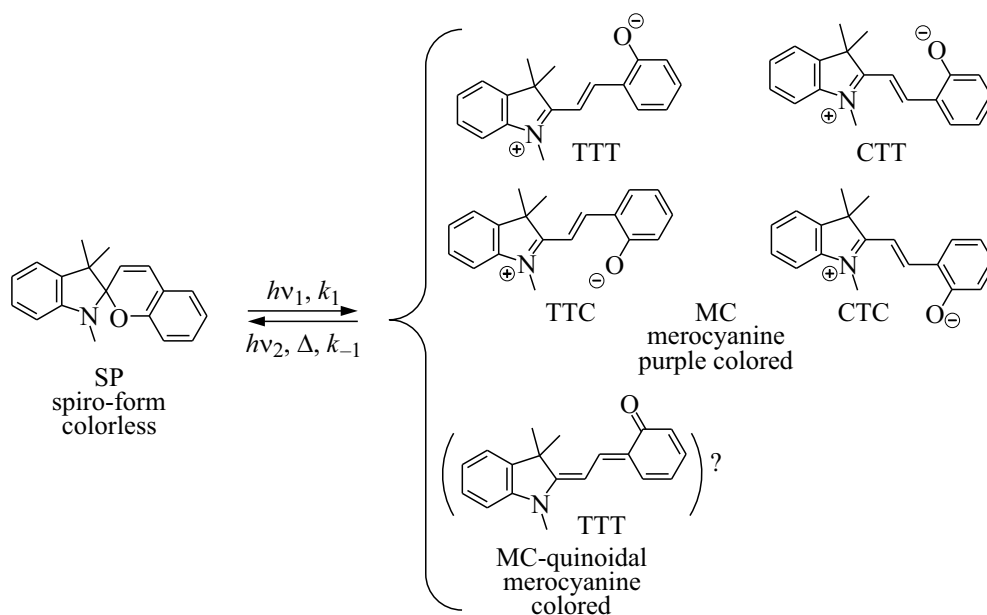
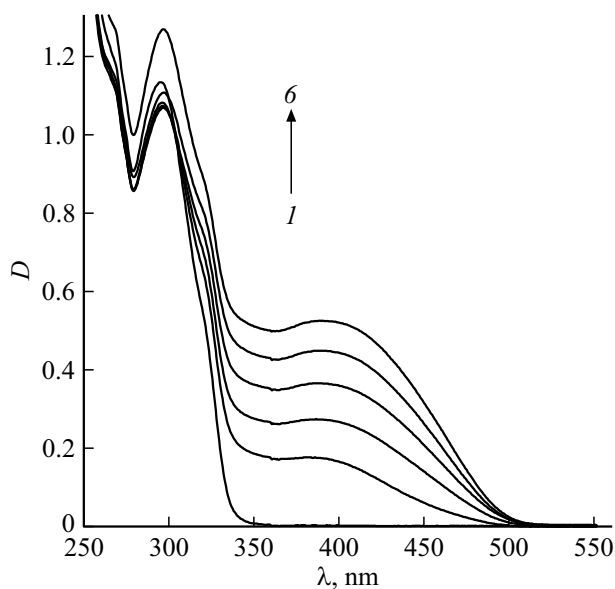


Схема 1. Фотохромные превращения спиропирана.

мы является разработка новых методов стабилизации фотоиндуцированной MC-формы путем использования более вязких или полярных растворителей [9,11,19–23], а также введением дополнительных функциональных заместителей [11,12,19,21,23] или фрагментов гетероциклов в пирановую часть молекулы фотохрома [9,10].

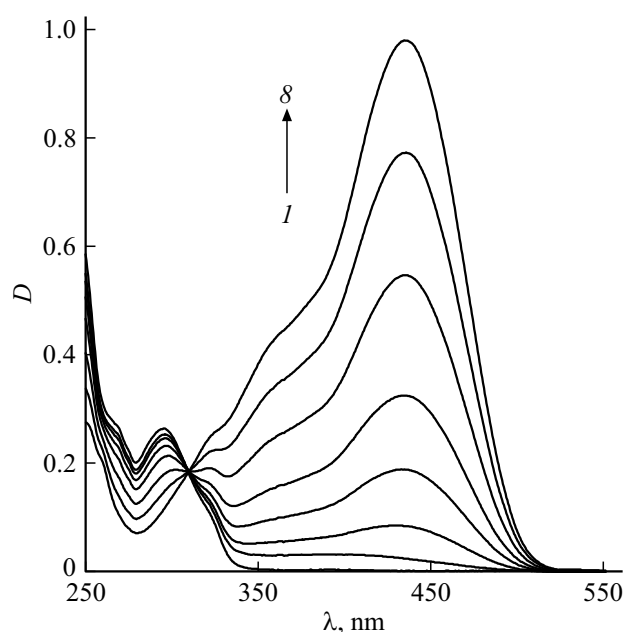
В ходе изучения механизмов комплексообразования производных спиропирана с солями различных металлов и определения наличия, местоположения и природы заместителей в молекуле фотохрома в настоящей работе нами был впервые изучен процесс взаимодействия простейшего предшественника — незамещенного индолинового спиропирана (SP1) — с солями алюминия. В настоящей работе был использован незамещенный индолиновый спиропиран SP1, фотохромные превращения которого были изучены ранее методами импульсной спектроскопии и лазерного фотолиза [15–18], поскольку диапазон времени жизни фотоинтермедиатов составляет от доли секунды до нескольких секунд, что делает технически невозможным изучение состава и строения его фотостационарной смеси методами ЯМР-спектроскопии.

Вследствие этого состав и детальное строение фотоинтермедиатов спиропирана SP1 при облучении светом 320–350 nm до сих пор не были полностью определены, поскольку точные конфигурации возможных интермедиатов MC-формы спиропирана SP1 и наличие хиноидных структур не установлены. В связи с этим в настоящей работе был использован метод стабилизации короткоживущей MC-формы незамещенного индолинового спиропирана путем образования стабильных комплексов между молекулами этого соединения и солями алюминия.



**Рис. 1.** Изменение спектров поглощения спиропирана SP1 в этаноле в присутствии  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  после добавления нонагидрата нитрата алюминия в темноте при разных соотношениях реагентов:  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 (1);  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 +  $5 \cdot 10^{-4}$  М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  (2);  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 +  $1 \cdot 10^{-3}$  М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  (3);  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 +  $2 \cdot 10^{-3}$  М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  (4);  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 +  $4 \cdot 10^{-3}$  М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  (5);  $2 \cdot 10^{-4}$  М SP1 +  $8 \cdot 10^{-3}$  М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  (6).

В развитие ранее выполненных исследований [13,24] целью настоящей работы являлось изучение строения комплексов фотохромного спиропирана SP1 при взаимодействии его молекул с солью алюминия методами электронной,  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  и 2D МР-спектроскопии.



**Рис. 2.** Изменение спектров поглощения спиропирана SP1 в этаноле ( $C = 3.2 \cdot 10^{-5}$  M) в присутствии 10 экв. избытка  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ : до (1), сразу после введения в раствор  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ( $3.5 \cdot 10^{-4}$  M) (2), после хранения раствора в темноте в течение 10 (3), 30 (4), 60 (5), 120 (6), 21 (7), 360 min (8).

## Экспериментальная часть

Спиропиран SP1 получали с выходом 96% нагреванием при кипении раствора свежеперегнанного основания Фишера с салициловым альдегидом в безводном этаноле в атмосфере аргона по известной методике [12,13]. Структура целевого соединения SP1 была доказана набором современных физико-химических методов анализа (УФ,  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектроскопия и масс-спектры). LC-MS спектр ( $m/z$ ): 278  $[\text{M} + \text{H}]^+$ ,  $\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{NO}$ .

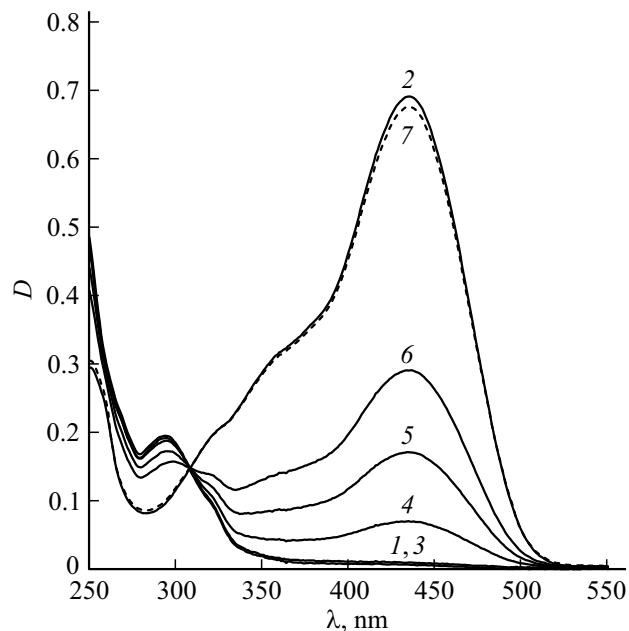
Измерения спектральных и фотохимических характеристик растворов соединений проводили в кварцевых кюветках толщиной 10 mm на спектрофотометре Shimadzu UV-2140PC (Япония) и на специальном стенде, созданном на основе комплекта модульного оптоволоконного спектрофотометрического оборудования фирмы Ocean Optics (США). Растворы фотохромного спиропирана готовили с использованием растворителей марки „осч“, перемешивая их в термостатированных условиях при температуре 25°C.

Фотоиндуцированную MC-форму спиропирана SP1 получали при УФ облучении растворов светом лампового источника LightningCure LC8 (Hamamatsu, Япония, интенсивность 180  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) через светофильтр УФС-2 ( $270 \leq \lambda \leq 370$  nm) при постоянном перемешивании. Для облучения растворов видимым светом ( $\lambda \geq 400$  nm) использовали галогеновую лампу ThorLabs OSL1-EC (США, 25 W) в комбинации со светофильтром ЖС-10.

Спектры ЯМР спиропирана SP1 и его комплексов с ионами алюминия измеряли в дейтерохлороформе и в дейтерометаноле на спектрометре Bruker Avance III-500 (Германия) с рабочей частотой 500 MHz для протонов и 126 MHz для ядер углерода. Полное отнесение сигналов ядер протонов и углерода было сделано комбинацией 1D и 2D ЯМР-импульсных последовательностей  $^1\text{H}-^1\text{H}$  COSY,  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HSQC и  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMBC. В качестве стандартов были использованы сигналы ядер тетраметилсилана для дейтерохлороформа или сигналы метильных групп  $\delta$  3.35 и 49.3 ppm для дейтерометанола.

## Результаты и их обсуждение

Согласно ранее выполненным исследованиям [14–17,24], основная полоса поглощения исходной циклической формы спиропирана SP1 в этаноле имеет максимум поглощения при 295 nm ( $\epsilon_{295} = 6.0 \cdot 10^3 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ). При УФ облучении было зафиксировано образование фотоиндуцированной MC-формы, проявляющейся в появлении полосы поглощения в видимой области спектра ( $\lambda_{\text{max}} = 550$  nm,  $\epsilon_{550} = 35.0 \cdot 10^3 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ), которая быстро самопроизвольно исчезает после выключения света ( $k_{-1} = 0.48 \text{ s}^{-1}$ ) с регенерацией исходной циклической формы SP1. Однако в темноте наступает равнове-



**Рис. 3.** Фотоиндуцированные спектральные изменения комплекса 2, возникающего при взаимодействии спиропирана SP1 и соли  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  при 10 экв. избытке последнего: 1 — сразу после смешивания растворов SP1 ( $C = 3 \cdot 10^{-5}$  M) и соли  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ( $C = 3 \cdot 10^{-4}$  M); 2 — после хранения в течение 48 h в темноте; 3 — после 20 s облучения светом галогеновой лампы ThorLabs OSL1-EC через светофильтр ЖС-10; 4, 5, 6 — после выдерживания образца 10, 30, 60 min в темноте соответственно; 7 — после хранения образца 29 дней в темноте при 25°C.

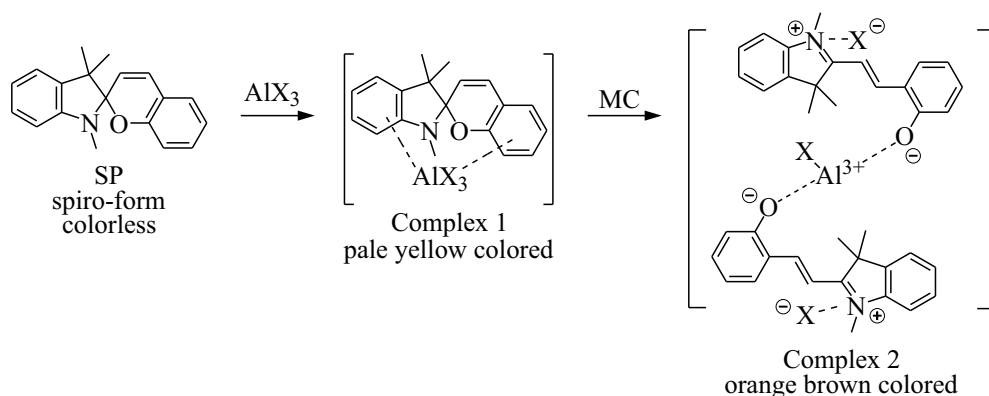


Схема 2. Образование металлокомплексов спиропирана SP1 с ионами алюминия.

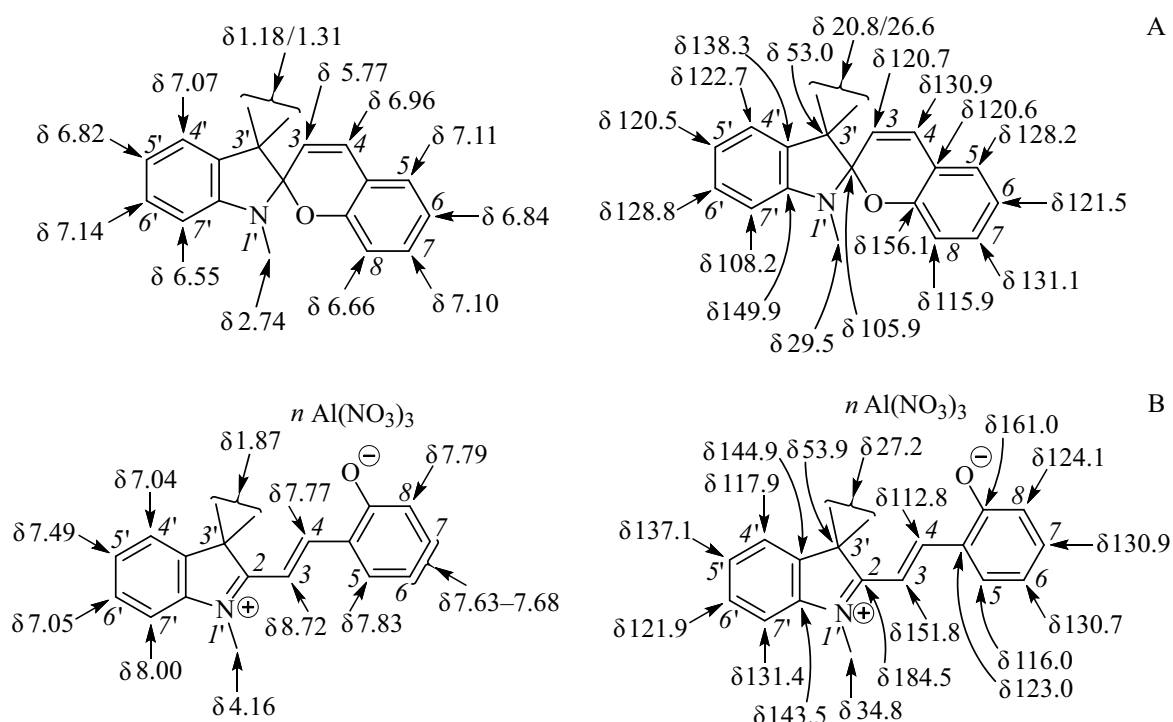


Схема 3. Химические сдвиги ЯМР-спектров циклической формы (А) и комплекса 2 (В) (SP1) в  $\text{CD}_3\text{OD}$ :  $^1\text{H}$ -ЯМР (2 левые фигуры) и  $^{13}\text{C}$ -ЯМР (2 правые фигуры),  $n = 1/2$ .

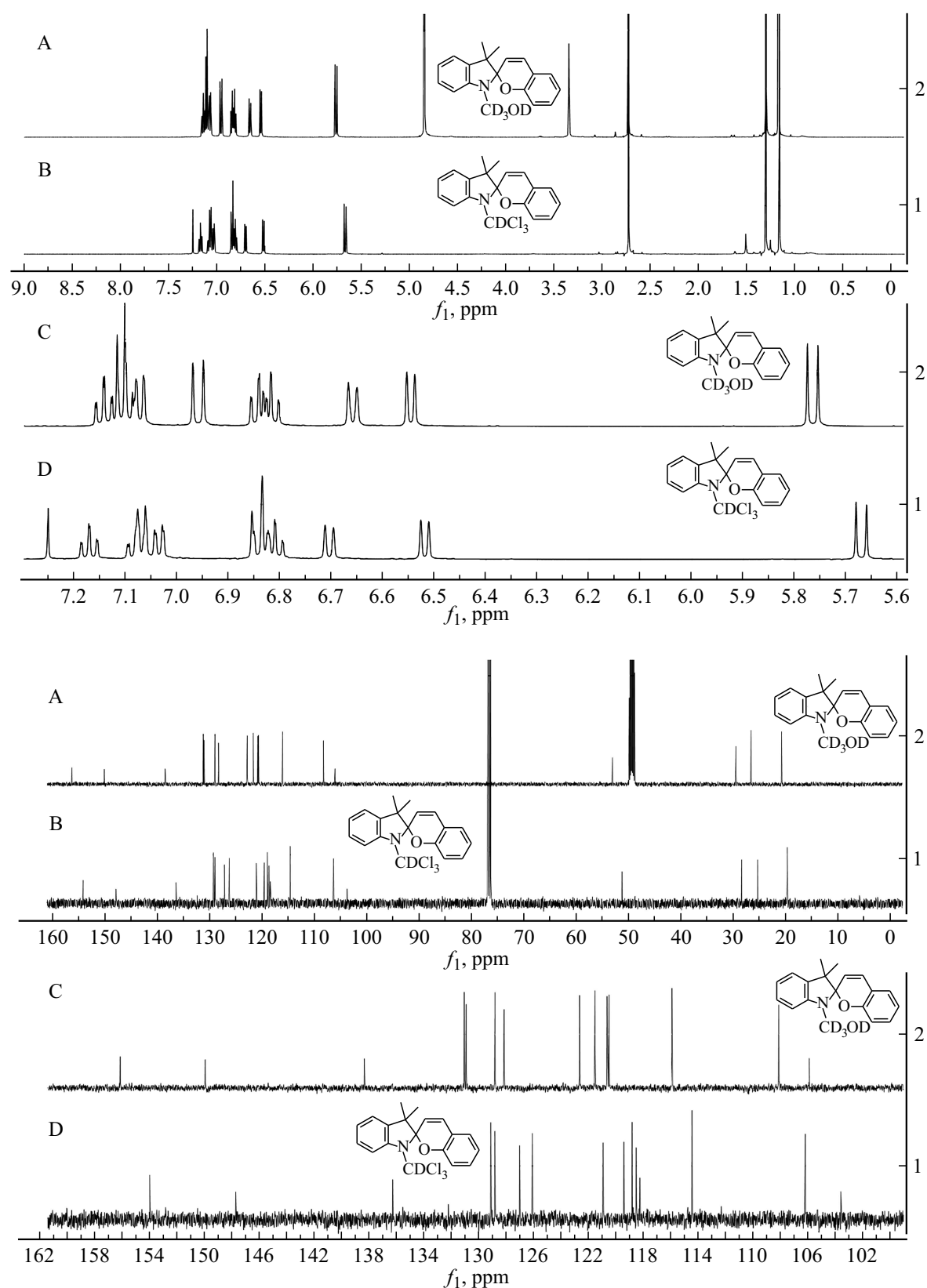
сие между двумя формами, и раствор приобретает слабую фиолетовую окраску, поскольку в нем присутствует некоторое количество МС-формы.

Непосредственно после введения достаточно больших количеств ионов  $\text{Al}^{3+}$  в  $\text{EtOH}$  или в  $\text{MeOH}$  в электронном спектре поглощения наблюдается новая широкая полоса поглощения с максимумом при 380 nm (рис. 1).

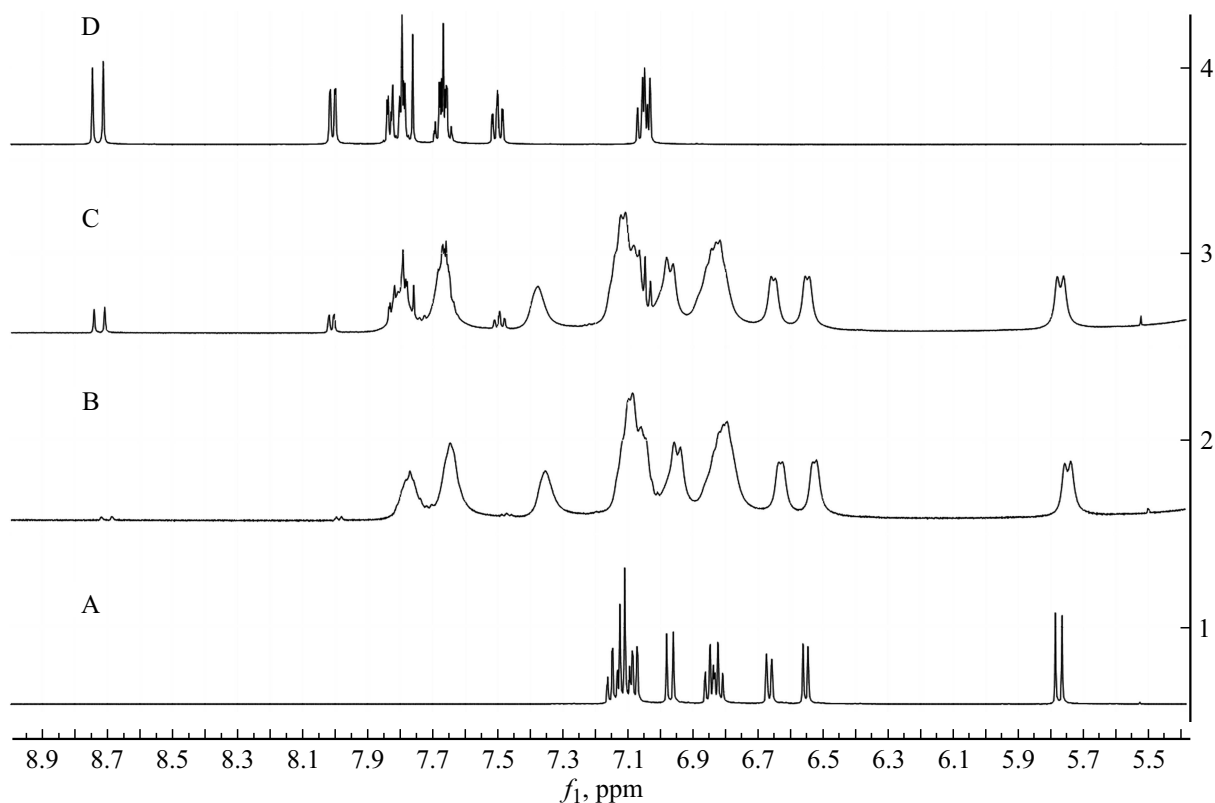
При длительном хранении раствора SP1 в этаноле в присутствии  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  в темноте в спектре поглощения появляется новая полоса поглощения с максимумом в спектральной области  $\lambda_{\text{max}} = 430\text{--}434$  nm (рис. 2).

Эти спектральные изменения можно объяснить образованием металлокомплексов двух типов (схема 2).

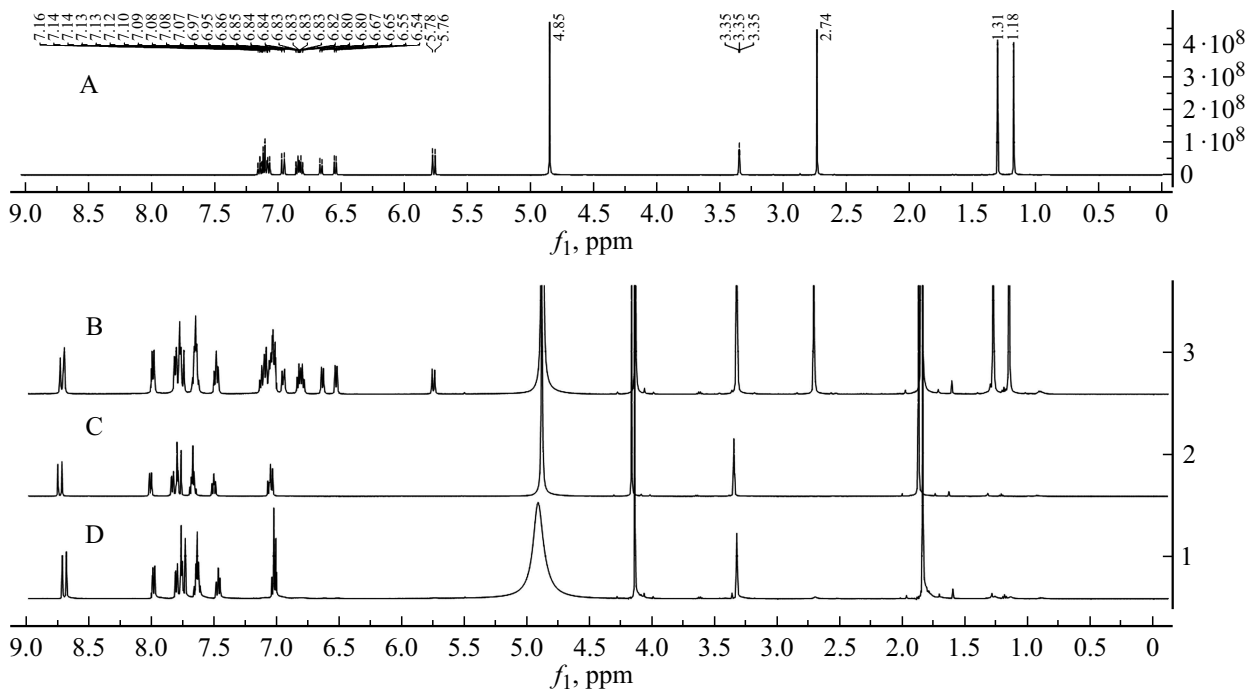
Процесс комплексообразования SP1 был исследован в  $\text{EtOH}$ ,  $\text{MeOH}$  и в смеси  $\text{MeOH} + \text{H}_2\text{O}$  (до 20% по объему). Образование стабильного в темноте комплекса 2 происходит в две стадии. Сначала образуется лабильный короткоживущий  $\pi$ -комплекс 1 ароматических фрагментов циклической формы SP1 с ионами алюминия с временем жизни менее минуты, который затем медленно превращается в темноте в комплекс 2, состоящий из двух молекул спиропирана SP1 и одного катиона алюминия. Константа скорости реакции образования комплекса в этаноле в темноте при десятикратном избытке нитрата алюминия составляет  $k = 8.56 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Предварительные результаты, касающиеся кинетики образования комплекса 2 и его стехиометрии, были опубликованы нами



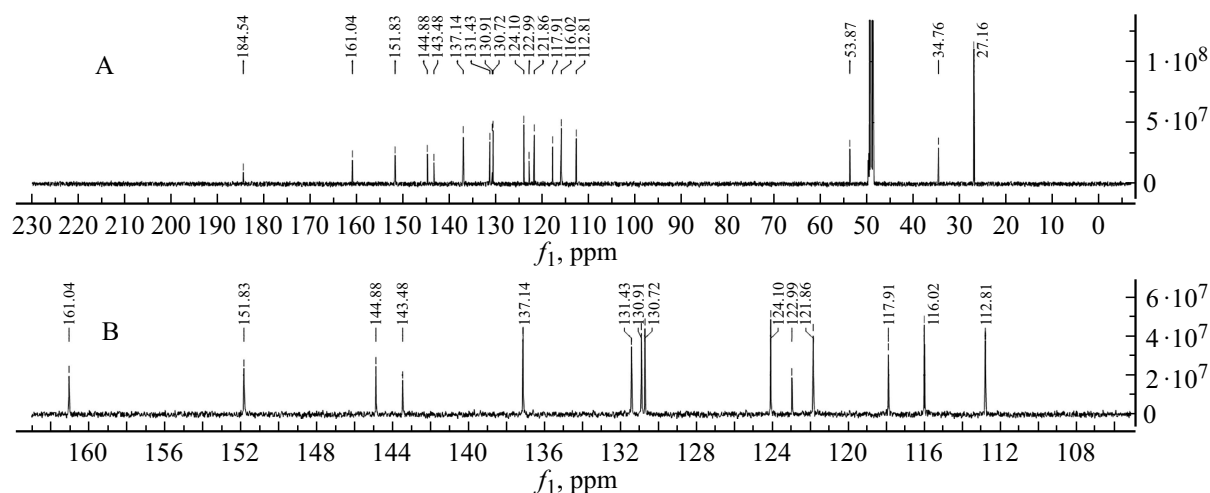
**Рис. 4.**  $^1\text{H}$  (верхняя панель) и  $^{13}\text{C}$  (нижняя панель) ЯМР-спектры спироформы в  $\text{CDCl}_3$  (верхние спектры) и в  $\text{CD}_3\text{OD}$  (нижние спектры), где А, В — спектры полного диапазона химических сдвигов сигналов, С, D — фрагменты спектров сигналов ядер ароматических циклов (индолина и бензопирана).



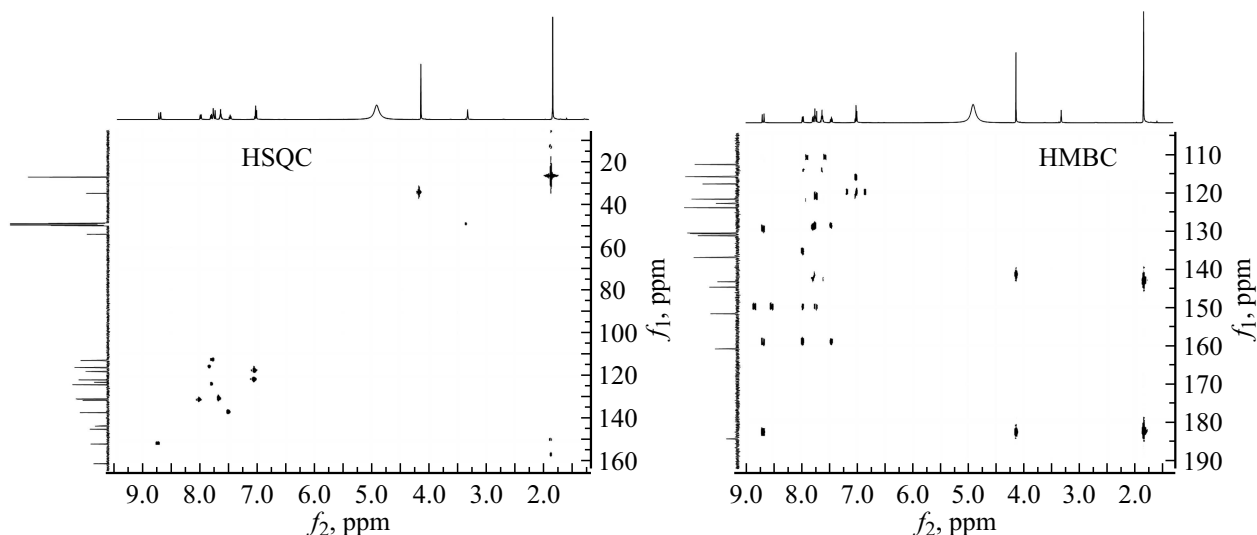
**Рис. 5.** Фрагменты  $^1\text{H}$  ЯМР-спектров сигналов протонов ароматических циклов (SP1) SP — ( $6.0 \cdot 10^{-2}$  M) в  $\text{CD}_3\text{OD}$ : А — без добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0.2 M); В — для комплекса 1 сразу после добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0.2); С — для смеси комплекса 1 (80%) и комплекса 2 (20%) после добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0.2 M) и выдержки 0.5 h; D — для комплекса 2 после добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0.2 M) и выдержки 24 h.



**Рис. 6.**  $^1\text{H}$ -ЯМР титрование:  $^1\text{H}$  ЯМР-спектры (SP1) ( $6.0 \cdot 10^{-2}$  M) в  $\text{CD}_3\text{OD}$  без добавления (A) и после добавления раствора  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  в концентрациях (M): (B)  $1.5 \cdot 10^{-2}$ ; (C)  $3.0 \cdot 10^{-2}$ ; (D)  $6.0 \cdot 10^{-2}$  и выдерживания образцов в темноте 24 h.



**Рис. 7.**  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектр комплекса 2 (SP1), SP ( $C = 6.0 \cdot 10^{-2}$  M) в  $\text{CD}_3\text{OD}$ : А —  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектр всего диапазона комплекса 2 после добавления  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (0.2 M) и хранения раствора образца в темноте 24 h, В — фрагмент  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектра, область сигналов ядер углерода ароматических циклов (индолина и бензопирана).



**Рис. 8.** Фрагменты 2D ЯМР-спектров комплекса 2 (SP1) в  $\text{CD}_3\text{OD}$ : (левая панель)  $^1\text{H}$ – $^{13}\text{C}$ -HSQC и (правая панель)  $^1\text{H}$ – $^{13}\text{C}$ -HMBC.

в работе [13]. Комплекс 2 проявляет отрицательный фотохромизм (рис. 3).

Он превращается в исходную циклическую форму при облучении видимым светом ( $\lambda > 400$  nm) (рис. 3, кривая 3). При хранении раствора в темноте происходит регенерация исходного комплекса 2 (рис. 3, кривые 4–6). Комплекс 2 термодинамически стабилен более 4 недель (рис. 3, кривая 7), но быстро разрушается при добавлении в раствор кислоты  $\text{HCl}$  или комплексона EDTA. Образование комплексов двух типов подтверждается данными ЯМР-спектроскопии.

Сначала был проведен детальный анализ и отнесение сигналов ядер протонов и углерода молекулы циклической формы SP1 (рис. 4, схема 3A). Наличие в циклической форме молекулы SP1 2 фрагментов 1,2-

замещенного бензола с близкими магнитными свойствами атомов сильно затрудняло измерения даже при наличии современного прибора с рабочей частотой 500 МГц для протонов, поэтому вначале были измерены спектры в двух разных растворителях ( $\text{CDCl}_3$  и  $\text{CD}_3\text{OD}$ ) и дополнительно использована 2D-ЯМР-спектроскопия с импульсными последовательностями:  $^1\text{H}$ – $^1\text{H}$ -Correlation Spectroscopy (COSY) и  $^1\text{H}$ – $^{13}\text{C}$ -HSQC. Значения химических сдвигов сигналов ядер  $^1\text{H}$  для циклической формы SP1 были близки с данными, полученными в дейтероацетоне [23] и в дейтерохлороформе [12].

В результате было сделано полное отнесение сигналов как для протонов, так и для ядер углерода молекулы циклической формы SP1 и комплекса 2 (SP1 с  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ) при помощи совокупности комбинаций 1D и 2D ЯМР-

импульсных последовательностей DEPT,  $^1\text{H}-^1\text{H}$  COSY,  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HSQC и  $^1\text{H}-^{13}\text{C}$  HMBC (рис. 4–8).

ЯМР-спектры SP1 значительно изменяются при добавлении (0.25–10 эк.)  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ . В случае циклической формы SP1 и комплекса 1 сильнополюсные исходные сигналы протонов и углеродов двух неэквивалентных 3,3-метильных групп в виде 2 синглетов при  $\delta$  1.18 ppm/1.31 ppm (20.8/26.6 ppm) становятся эквивалентными из-за квазипланарной структуры мероцианиновой формы комплекса 2 и превращаются со слабополюсным сдвигом в единственный синглет (6H) при  $\delta$  1.87 ppm/(27.2 ppm). Аналогично сигнал N–CH<sub>3</sub> в циклической форме SP1, в комплексе 1 при  $\delta$  2.74 ppm/(29.5 ppm) и в MC-форме комплекса 2 имеет слабополюсный сдвиг при  $\delta$  4.16 ppm/(34.8 ppm) вследствие наличия положительно заряженного N-атома.

В циклической форме SP1 и в комплексе 1 сигналы ядер АВ в C3–C4-положении пиранового цикла в виде 2 дублетов при  $\delta$  5.77 ppm/6.96 ppm с  $J$  10.2 Hz также сдвинуты в слабое поле в спектре комплекса 2 ( $\delta$  8.72 ppm/7.77 ppm,  $J$  16.4 Hz), что позволяет однозначно отнести конфигурацию C=C-связи в мероцианиновой форме комплекса 2 как *транс*-изомер (ТТТ) (схемы 1, 2, 3 В, рис. 5–8).

Величина  $\delta$  сигнала при 184.5 ppm комплекса 2 (сигнал четвертичного протонированного  $\text{C}_{(2)}=\text{N}^{+}$ ) в  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектре четко говорит об отсутствии хиноидных структур в составе комплекса 2. Сравнение особенностей спектров циклической формы SP1 и комплекса 1 показывает появление двух новых сигналов — уширенных синглетов с интегральной интенсивностью по 1H при  $\delta$  7.38 ppm и 6.83 ppm при значительном уширении формы всех сигналов диапазона ароматики (5.7–7.2 ppm и 7.3–7.9 ppm), уменьшение величины  $J$  с 10.2 до 9.5 Hz, что свидетельствует о наличии координационных взаимодействий между  $\text{AlX}_3$  и ароматическими фрагментами циклической формы SP1 с образованием лабильного  $\pi$ -комплекса.  $^1\text{H}$ -ЯМР титрованием (рис. 5, 6) был протестирован процесс образования комплекса 2 в темноте в течение 24 h и подтвержден его конечный состав из двух молекул MC-формы и одной молекулы соли алюминия. Аналогичные данные были получены методом Жоба с помощью спектрофотометрического титрования [13].

## Заключение

В результате систематического исследования процессов комплексообразования молекул 1', 3', 3'-триметилспиро [2*H*-1-бензопиран-2,2'-индолина] с катионами алюминия методами абсорбционной, электронной и ЯМР-спектроскопии выявлено возникновение комплексов двух типов. Один из них является нестабильным промежуточным  $\pi$ -комплексом ионов алюминия с молекулами циклической формы спиропирана, а второй — термодинамически стабильный — является результатом

взаимодействия двух молекул мероцианиновой формы спиропирана с одним катионом алюминия. В результате исследований впервые установлено точное строение термодинамически стабильного комплекса фотохромного спиропирана и обнаружен отрицательный фотохромизм этого комплекса.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-03-00139а в части спектральных исследований и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН в части анализа полученных результатов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds* ed. by J.C. Crano, R.J. Gugliemetti, (Plenum Press, N.Y., London, 1999), vol. 1–2.
- [2] *Photochromic Materials*, ed. by H. Tian, J. Zhang (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2016).
- [3] A.A. Ali, R. Kharbash, Y. Kim. *Analytica Chimica Acta*, **1110**, 199 (2020). DOI: 10.1016/j.aca.2020.01.057
- [4] L. Kortekaas, W.R. Browne. *Chem. Soc. Rev.*, **48** (12), 3406 (2019). DOI: 10.1039/c9cs00203k
- [5] P.R. Sahoo, K. Prakash, S. Kumar. *Coordination Chemistry Rev.*, **357** (1), 18 (2018). DOI: 10.1016/j.ccr.2017.11.010
- [6] C. Coudret, A.V. Chernyshev, A.V. Metelitsa, J.C. Micheau. In: *Photon-Working Switches*, ed. by Y. Yokoyama, K. Nakatani (Springer, Japan, 2017), ch. 1, p. 3–36. DOI: 10.1007/978-4-431-56544-4
- [7] К.В. Звездин, Н.Е. Беликов, А.В. Лаптев, А.Ю. Лукин, О.В. Демина, П.П. Левин, С.Б. Бричкин, М.Г. Спиринов, В.Ф. Разумов, В.И. Швец, А.А. Ходонов. *Российские нанотехнологии*, **7** (5–6), 112 (2012). DOI: 10.1134/S1995078012030172
- [8] V.A. Barachevsky. *Review J. Chem.*, **3** (1), 52 (2013). DOI: 10.1134/S2079978012040012
- [9] J. Ren, H. Tian. *Sensors*, **7** (12), 3166 (2007). DOI: 10.3390/s7123166
- [10] T.J. Feuerstein, R. Muller, C. Barner-Kowollik, P.W. Roesky. *Inorg. Chem.*, **58** (22), 15479 (2019). DOI: 10.1021/acs.inorgchem.9b02547
- [11] V.K. Seiler, K. Robeyns, N. Tumanov, D. Cincic, J. Wouters, B. Champagne, T. Leysens. *CrystEngComm*, **21**, 4925 (2019). DOI: 10.1039/c9ce00805e
- [12] E.I. Balmond, B.K. Tautges, A.L. Faulkner, V.W. Or, B.M. Hodur, J.T. Shaw, A.Y. Louie. *J. Org. Chem.*, **81** (19), 8744 (2016). DOI: 10.1021/acs.joc.6b01193
- [13] P.P. Levin, N.E. Belikov, I.I. Levina, A.S. Tatikolov, A.A. Khodonov, I.V. Khudyakov. *J. Phys. Org. Chem.*, **32**, e4012 (2019). DOI: 10.1002/poc.4012



- [14] L. Kortekaas, J. Chen, D. Jacquemin, W.R. Browne. *J. Phys. Chem. B*, **122** (24), 6423 (2018). DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b03528
- [15] В.А. Мурин, В.Ф. Манджиков, В.А. Барачевский. *Опт. и спектр.*, **40**, 1084 (1976).
- [16] В.А. Мурин, В.Ф. Манджиков, В.А. Барачевский. *Опт. и спектр.*, **42** (1), 89 (1977).
- [17] A.K. Chibisov, H. Gorner. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **3** (3), 424 (2001). DOI: 10.1039/b007713p
- [18] H. Gorner. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **3** (3), 416 (2001). DOI: 10.1039/b007708i
- [19] S. Toppet, W. Quintens, G. Smets. *Tetrahedron*, **31** (16), 1957 (1975). DOI: 10.1016/0040-4020(75)87058-X
- [20] J. Hobley, V. Malatesta, R. Millini, L. Montanari, W.O. Parker. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **1** (14) 3259 (1999). DOI: 10.1039/A902379H
- [21] J. Hobley, V. Malatesta. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2** (1), 57 (2000). DOI: 10.1039/A908360J
- [22] C.L. Fleming, S. Li, M. Grotli, J. Andréasson. *J. Am. Chem. Soc.*, **140** (43), 14069 (2018). DOI: 10.1021/jacs.8b09523
- [23] S.-R. Keum, K.-B. Lee, P.M. Kazmaier, R.A. Manderville, E. Buncl. *Magnetic Resonance in Chemistry*, **30** (11), 1128 (1992). DOI: 10.1002/mrc.1260301119
- [24] P.P. Levin, A.S. Tatikolov, A.V. Laptev, A.Y. Lukin, N.E. Belikov, O.V. Demina, A.A. Khodonov, V.I. Shvets, S.D. Varfolomeev. *J. Photochem Photobiol. A*, **231**, 41 (2012). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2011.12.024