

ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ОКИСЛЕНИЕ ДИФЕНИЛБИСАНТЕНА И ЕГО СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

С. М. Арабей*, Т. А. Павич

УДК 535.37

Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси,
220072, Минск, просп. Ф. Скорины, 70; e-mail: arabei@imaph.bas-net.by

(Поступила 27 августа 2003)

Исследованы спектры поглощения и флуоресценции дифенилбисантена (ДФБ) в *n*-октане и бензоле при 300 и 77 К. Заметный стоков сдвиг полосы флуоресценции (~ 180 см⁻¹ в *n*-октане и ~ 440 см⁻¹ в бензоле) свидетельствует о непланарности ароматического скелета ДФБ, что подтверждено результатами оптимизации геометрии молекулы квантово-химическим методом АМ1. Обнаружено, что продукты фотоиндуцированных превращений молекул ДФБ спектрально проявляются в УФ области (200–350 нм), и показано, что наблюдаемый фотохимический процесс на два порядка менее эффективен, чем для дифенилгелиантрена. На основании экспериментальных данных и результатов квантово-химических расчетов электронных спектров молекул ДФБ и его эндопероксидов (метод ZINDO/S) сделан вывод, что конечными продуктами фотопревращений ДФБ являются его эндобипероксиды, у которых группы —O—O— присоединены к фенилзамещенным бензольным кольцам ароматического скелета.

Ключевые слова: дифенилбисантен, дифенилгелиантрен, спектры поглощения и флуоресценции, фотопревращение, эндопероксид, квантово-химический расчет.

Absorption and fluorescence spectra of diphenylbisanthene (DPB) in *n*-octane and benzene at 300 and 77 K have been investigated. The marked Stokes shift of the fluorescence band of DPB (~ 180 cm⁻¹ for solution in *n*-octane and ~ 440 cm⁻¹ in benzene) points to the nonplanarity of its aromatic skeleton, which has been supported by the results of the optimization of the DPB molecule geometry by the AM1 quantum-chemical method. It has been established that the spectral manifestations of the products of the photoinduced transformations of the DPB molecules can be detected in the UV (200–350 nm) spectral region and that the photochemical process observed is less effective by two orders of magnitude than that of diphenylhelianthrene. On the basis of the experimental data and the results of the quantum-chemical calculations of the electronic spectra of the DPB molecules and the DPB endoperoxides (by the ZINDO/S method) it has been concluded that the final products of phototransformations of DPB are its endobiperoxides in which the —O—O— groups add to the phenyl-substituted benzene rings of the aromatic skeleton.

Keywords: diphenylbisanthene, diphenylhelianthrene, absorption spectra, fluorescence spectra, phototransformation, endoperoxide, quantum-chemical calculation.

Введение. Исследование простейших по химическому строению гиперациноподобных молекул важно, прежде всего, для понимания биологической активности многих соединений данного класса. Изучению спектральных и фотохимических свойств молекулы незамещенного бисантена как фундаментальной системы гиперацинового типа посвящен ряд работ [1–4]. Простейшие симметрично замещенные бисантены с этой точки зрения, несомненно, представляют интерес, поскольку молекула гиперацина обладает симметрией боковых заместителей (точечная группа симметрии C_{2v}) [5]. В настоящей работе исследован замещенный фенильными группами в мезо-положениях бисантен — дифенилбисантен (ДФБ) (структура приведена на рис. 1). Присоединение двух фенильных колец к молекуле должно привести к взаимодействию сопряженных систем ароматического скелета и заместителей и, как следствие, к изменению энергий электронных состояний бисантена, а значит, и спектрально-люминесцентных свойств. Интерес к исследованию фенилзамещенных гиперациноподобных соединений обусловлен и их возможным практическим использованием. Например, ДФБ нашел применение в качестве пигмента пассивного затвора для модуля-

PHOTOINDUCED OXIDATION OF DIPHENYLBISANTHENE AND ITS SPECTRAL MANIFESTATIONS

S. M. Arabei* and T. A. Pavich (Institute of Molecular and Atomic Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 70 F. Skorina Ave., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: arabei@imaph.bas-net.by)

ции добротности ОКГ на рубине [6], а его аналог — дифенилгелиантрен (ДФГ) (см. структуру на рис. 2) — в качестве пигмента актинометра, чувствительного к свету видимой области спектра [7]. В первом случае авторы [6] использовали высокую фотостабильность ДФБ, а во втором [7] — наоборот, высокую эффективность фотопревращений ДФГ [2, 7—13].

Впервые ДФБ синтезировал Г. Соваж (G. Sauvage) [8, 9], который определил лишь положения максимумов длинноволновых полос поглощения. Сведения о флуоресценции ДФБ, приведенные в [6, 10], ограничены и противоречивы. О фотоиндуцированных превращениях дифенилпроизводного бисантена лишь упоминалось в [6, 10].

Цель настоящей работы — исследование спектрально-люминесцентных свойств ДФБ, изучение его фотохимических превращений (в сравнении с аналогичным процессом для ДФГ), интерпретация экспериментальных данных на основе квантово-химических расчетов геометрии молекул ДФБ и его эндопероксидов, а также их электронных спектров.

Методика эксперимента. ДФБ получен по методике [10] путем облучения дифенилдиантранила в течение 5—6 ч светом ксеноновой лампы ДКСШ-500 ($\lambda > 390$ нм). Образованная смесь ДФГ и ДФБ разделена хроматографированием на окиси алюминия и силикагеле (элюент — бензол). Дифенилдиантранил синтезирован путем последовательного получения исходных продуктов (антрон—диантрон—дигидроксилидифенилдиантранен—дифенилдиантранил). Все стадии этого синтеза описаны в работах [3, 10]. Химический состав ДФБ подтвержден результатами элементного анализа и подобием полученных характерных спектров поглощения (рис. 1 и 2) литературным данным [6, 8—10].

Органические растворители были предварительно очищены путем неоднократной перегонки и осушены. Концентрацию исследуемых растворов подбирали такой, чтобы оптическая плотность для длинноволновой полосы поглощения пигмента не превышала 0.2.

Спектры поглощения получены на спектрофотометре Cary-500 Scan (Varian, США). Спектры возбуждения флуоресценции записаны на спектрофлуориметре SFL-1211A (Solar, Беларусь). Спектры флуоресценции при 300 и 77 К измерены на спектральной установке, собранной на базе двойного монохроматора и системы регистрации, работающей в режиме счета фотонов. Для возбуждения флуоресценции использовалось или фильтрованное излучение ксеноновой лампы, или излучение He—Ne-лазера ЛГ-78 ($\lambda_{\text{возб}} = 632.8$ нм). В обоих случаях плотность мощности возбуждения ≈ 1 мВт/см².

Оптимизация геометрии исследованных молекул выполнена с привлечением полуэмпирического метода AM1, а расчет их электронных спектров $S_1 \leftarrow S_0$ -поглощения — полуэмпирического метода ZINDO/S.

Результаты и их обсуждение. Присоединение двух фенильных групп в *мезо*-положениях плоской молекулы бисантена, на первый взгляд, не должно изменить симметрию ее равновесной конфигурации (D_{2h}). Однако, как показали результаты оптимизации геометрии молекулы ДФГ, плоскости фенильных колец составляют угол $\Theta \approx 66^\circ$ с плоскостью ароматического скелета. Сами же фенильные кольца повернуты друг относительно друга так, что их плоскости составляют угол $\approx 48^\circ$ (см. схему на рис. 1, б). Поворот фенильных колец вокруг одиночных C—C-связей приводит к незначительной непланарной “пропеллерообразной” деформации самого ароматического скелета (плоскости концевых бензольных колец двух антраценовых фрагментов остова составляют угол $\approx 3^\circ$). В итоге равновесная конфигурация молекулы ДФБ относится приближенно к точечной группе низшей симметрии D_2 . Она не обладает плоскостями симметрии, как молекула бисантена, но еще сохранила оси симметрии 2-го порядка. Такая особенность пространственного строения ДФБ является следствием стерических взаимодействий фенильных и скелетных бензольных колец. Отметим, что аналогичная ориентация боковых фенильных колец наблюдается и для *мезо*-тетрафенилпорфина и его металлокомплексов. Так, расчеты геометрической структуры и возбужденных состояний фенилпроизводных порфина различными квантово-химическими методами [14—16] дали значения $\Theta \approx 60—70^\circ$, что указывает на небольшое искажение плоскостного строения порфиринового макроцикла как результат стерического взаимодействия фенильных и пиррольных колец.

Тщательное хроматографическое выделение ДФБ и использование свежеприготовленных растворов позволили получить качественный спектр поглощения этого соединения в видимой и УФ областях. На рис. 1, а (кривая 1) приведен спектр поглощения ДФБ в *n*-октане при комнатной температуре. Длинноволновая область спектра (550—700 нм) имеет характерный для гиперациноподобных молекул вид, а положение и интенсивности полос соответствуют литературным данным [6, 8—10]. Спектр поглощения ДФБ в УФ области (200—350 нм) состоит из ряда интенсивных полос (в литературе эта область спектра не исследована). Принадлежность наблюдаемых полос фенилпроизводному бисантену подтверждена спектрами возбуждения флуоресценции (рис. 1, б), которые одновременно указывают на чистоту исследуемого соединения. Спектр флуоресценции ДФБ (рис. 1, а, кривая 5) получен при возбуждении излучением He—Ne-лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 632.8$ нм, $I_{\text{возб}} = 0.7$ мВт/см²).

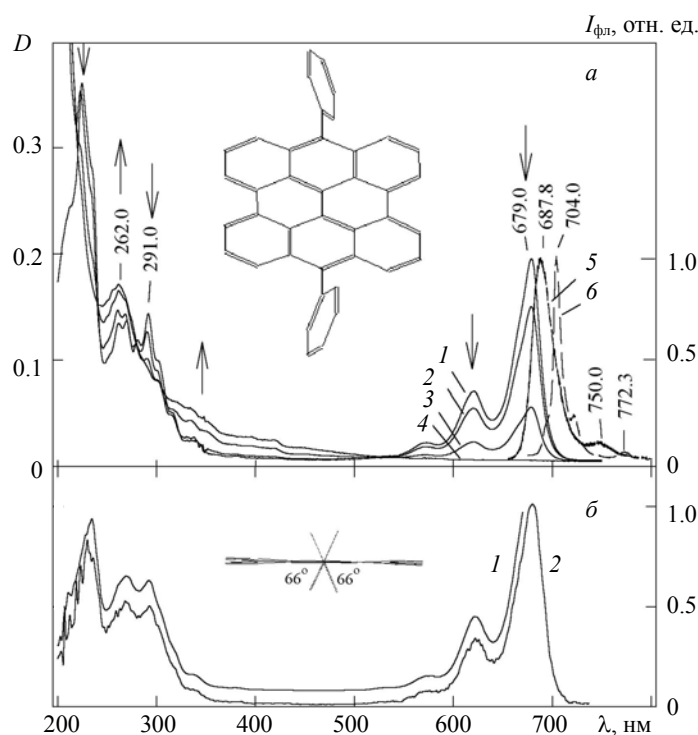


Рис. 1. Спектры поглощения: 1 — исходный, 2—4 — после фотооблучения в течение 1 (2), 4,5 (3), 10 ч (4) и спектры флуоресценции (5, 6) при $\lambda_{\text{возб}} = 632.8$ нм ДФБ в *n*-октано при 300 (1—5) и 77 К (6) (а). Спектры возбуждения флуоресценции ДФБ в *n*-октано при 300 К ($\lambda_{\text{пер}} = 688$ (1) и 750 нм (2)) (б), а также трехмерное изображение химической структуры ДФБ (а) и ее проекции в плоскости ароматического скелета (б)

Анализируя полученные спектры, важно отметить, что длинноволновая полоса поглощения ДФБ в *n*-октано при 679 нм смещена батохромно по отношению к родственной полосе незамещенного бисантена [3] на 21 нм (для бензольного раствора смещение составляет 23 нм). Кроме того, наблюдается заметный стоксов сдвиг полос флуоресценции ($\Delta\nu \approx 190 \text{ см}^{-1}$ для *n*-октана) по сравнению с соответствующим сдвигом для плоской молекулы бисантена ($\Delta\nu \approx 40 \text{ см}^{-1}$ [3]). В бензольном растворе (рис. 2) $\Delta\nu$ достигает 440 см^{-1} (для бисантена в бензоле $\Delta\nu \approx 340 \text{ см}^{-1}$ [3]). В [3] высказывалось мнение, что большой стоксов сдвиг в случае бензола обусловлен тем, что в S_1 -состоянии гиперцициноподобной молекулы возникает

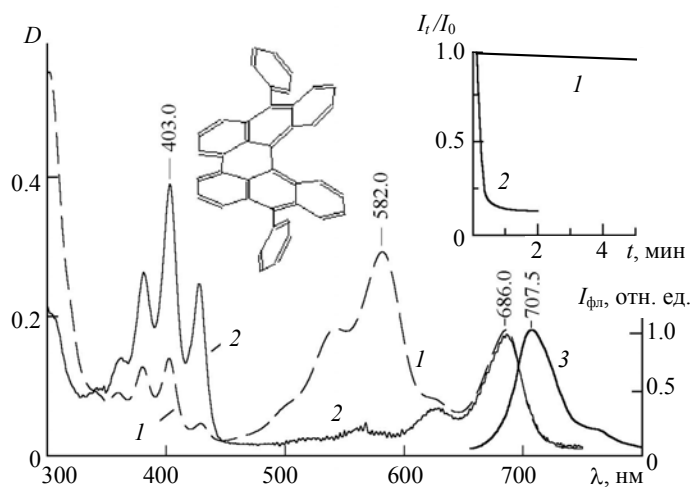


Рис. 2. Спектры поглощения: 1 — исходный, 2 — после фотооблучения в течение 5 мин бензольного раствора ДФБ с ДФГ; 3 — спектр флуоресценции ДФБ в бензоле ($\lambda_{\text{возб}} = 632.8$ нм) при 300 К. На вставках — изменение относительной интенсивности флуоресценции бензольного раствора ДФБ (1) при $\lambda_{\text{пер}} = 708$ нм и ДФГ (2) при $\lambda_{\text{пер}} = 600$ нм от времени фотооблучения в области 200—500 нм, а также трехмерное изображение химической структуры ДФГ

дипольный момент, который индуцирует диполи в молекуле растворителя, что, как следствие, приводит к проявлению универсальных межмолекулярных взаимодействий (ММВ) в такой системе. Наблюдаемый стоксов сдвиг полос флуоресценции и батохромный сдвиг полос поглощения ДФБ — дополнительное свидетельство деформации ароматического скелета. Заметное отступление от зеркальной симметрии полученных спектров поглощения (длинноволновая область) и флуоресценции, а также существенный стоксов сдвиг полос флуоресценции могут быть обусловлены структурной перестройкой молекулы ДФБ в возбужденном электронном S_1 -состоянии (возможно, усилением непланарности при фотовозбуждении за счет переориентации фенильных групп). Вместе с тем не исключено, что в области полосы поглощения при 620 нм локализована полоса $S_2 \leftarrow S_0$ -перехода, как это имеет место в случае бисантена [4, 17].

Замораживание *n*-октанового раствора ДФБ до 77 К не приводит к возникновению квазилинейчатой структуры спектра флуоресценции (рис. 1, *a*, кривая *b*), хотя полосы заметно сужаются. Отсутствие структурных спектров в отличие от незамещенного бисантена [3, 4, 17] связано с некомпланарностью плоскостей фенильных колец плоскости ароматического скелета, создающей препятствие изоморфному внедрению молекул ДФБ в кристаллографические ячейки *n*-октана. Последнее не приводит к снятию неоднородного уширения спектральных полос посредством ограничения числа типов примесных центров в матрице Шпольского.

В [9] утверждалось, что ДФБ не способен к фотопревращениям. Однако, как отмечалось выше, уже в [6, 10] было обнаружено, что ДФБ при длительном облучении медленно разлагается. При этом авторы [10] ошибочно утверждали, что возникающие полосы поглощения с центром при 400 нм соответствуют образованию фотоокиси ДФБ (вероятнее всего, в исследуемом растворе присутствовало некоторое количество ДФГ, фотоокиси которого и принадлежали новые полосы поглощения [2, 7, 10, 12, 13]). Как показали наши эксперименты (рис. 1, *a*, кривые 1—4), при длительном облучении *n*-октанового раствора ДФБ светом ртутной лампы СВДШ-500 ($\lambda_{\text{возб}} \approx 200\text{—}500$ нм, $W_{\text{возб}} = 1.6$ мВт/см²), наблюдаемые фотохимические превращения приводят к возникновению новых полос в УФ области: достаточно узкой полосы при 262 нм и слабоинтенсивного фона в области 300—400 нм. При этом полосы поглощения, принадлежащие ДФБ, полностью исчезают (см. кривую 4). Семейство кривых поглощения, соответствующих различным временам предварительного фотооблучения раствора ДФБ, имеет ряд изобестических точек (241, 279, 309 и 530 нм), что однозначно свидетельствует об образовании бинарной смеси ДФБ и его фотопродукта.

Для количественной оценки эффективности фотопревращений ДФБ в настоящей работе исследован бензольный раствор, содержащий ДФБ и ДФГ (нехроматографированная смесь), спектр поглощения которого приведен на рис. 2 (кривая 1). Помимо полос ДФБ (длинноволновая при 686 нм) в спектре необлученного раствора наблюдаются интенсивные полосы ДФГ (например, при 582 нм) и слабоинтенсивные полосы его эндопероксида с центром при 400 нм [7, 12, 13]. После облучения раствора светом ртутной лампы в течение 5 мин в спектре поглощения исчезли полосы поглощения ДФГ и резко усилились полосы его эндопероксида (рис. 2, кривая 2). Это подтверждает эффективный процесс фотопревращений ДФГ [2, 7—13]. В [12] исследована такая фотохимическая реакция ДФГ и измерена константа скорости фотопревращений $k = (7.0 \pm 0.3) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{л}$. На вставке рис. 2 изображена кинетика фотопревращений ДФГ, полученная в условиях эксперимента, как изменение относительной интенсивности флуоресценции при $\lambda_{\text{пер}} = 600$ нм (максимум полосы флуоресценции) от времени фотооблучения. Эксперимент показал, что уже за ~15 с концентрация молекул ДФГ в растворе уменьшилась вдвое. При таких же условиях фотовозбуждения относительная интенсивность флуоресценции ДФБ при $\lambda_{\text{пер}} = 708$ нм практически не изменяется (см. рис. 2, кривая 3, вставка). Анализ полученных кинетических кривых показал, что фотопревращения ДФБ на два порядка менее эффективны, чем фотопревращения ДФГ.

На основании проведенного квантово-химического расчета геометрии молекулы ДФГ установлено, что ароматический остов не имеет плоского строения (рис. 2). Причина этого — стерические препятствия двух “внутренних” атомов водорода, которые вынуждают концевые бензольные кольца антраценовых фрагментов выходить из плоскости ароматической системы в противоположные стороны. Такие структурные искажения нарушают сопряжение π -электронов в молекуле ДФГ, в результате полосы поглощения заметно сдвигаются в коротковолновую сторону относительно полос ДФБ.

В [2, 7, 10, 12, 13] установлено, что фотопревращения ДФГ являются самосенсибилизированным процессом его фотоокисления с образованием эндопероксидов, у которых кислородные мостики присоединены к фенилзамещенным бензольным кольцам. Кроме того, в [18] утверждается (на примере молекул незамещенного гелиантрена), что именно деформация скелета (выход концевых бензольных колец из плоскости) создает благоприятные условия для присоединения кислорода в *мезо*-положениях ароматического остова. Экспериментальным доказательством такой химической структуры эндопероксида ДФГ служат данные ЯМР- [2] и масс-спектров [2, 10].

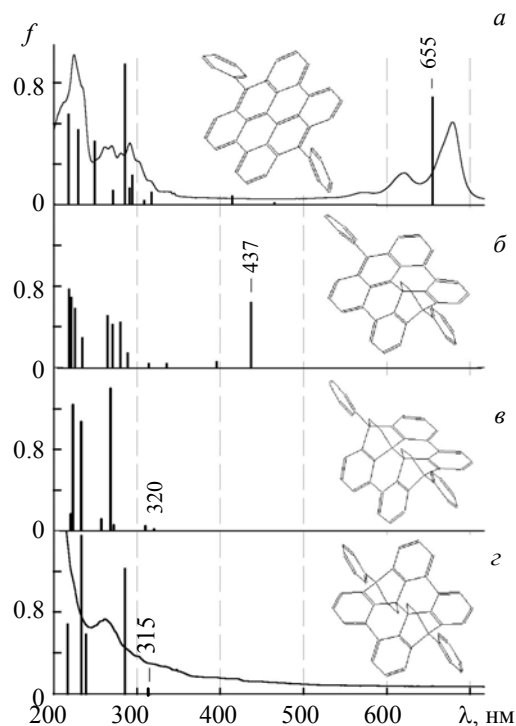
По аналогии с незамещенным бисантеном [1, 3], гелиантреном [2, 18] и ДФГ [2, 7, 10, 12, 13] мы полагаем, что процесс фотопревращений ДФБ также обусловлен образованием при фотовозбуждении его эндопероксидов. Свидетельством этого служит существенное замедление фотохимической реакции ДФБ в обезгаженных растворах. Для дополнительного подтверждения такого механизма выполнен квантово-химический расчет (полуэмпирический метод ZINDO/S) энергий синглетных состояний и сил осцилляторов переходов для молекул ДФБ и его эндопероксидов. На рис. 3 изображены оптимизированные геометрии молекул ДФБ и его наиболее вероятных по химическому строению (см. ниже) эндопероксидов, у которых —O—O— группа (группы) присоединена к бензольным кольцам, содержащим фенильные группы эндомонопероксида (рис. 3, б) и двух изомеров (*цис*- и *транс*-) эндобипероксида (рис. 3, в и г). Здесь же приведены результаты расчета их электронных $S_1 \leftarrow S_0$ -спектров (жирные вертикальные линии).

Согласно выполненным расчетам, присоединение двух фенильных фрагментов к молекуле бисантена повышает энергию верхней заполненной молекулярной орбитали (МО), в то время как энергия нижней незаполненной практически не изменяется. Это объясняет экспериментально наблюдаемый bathochromный сдвиг длинноволновой полосы поглощения ДФБ ($\Delta\lambda \approx 20$ нм) по отношению к соответствующей полосе бисантена. При этом сила осциллятора длинноволнового перехода ДФБ несколько больше, чем у незамещенного бисантена ($f \approx 1.03$ и ≈ 0.81 соответственно). Расчет также показывает, что сила осциллятора $S_2 \leftarrow S_0$ -перехода ДФБ незначительна ($f < 0.001$). Несмотря на то что расчетная величина энергетического интервала $S_2 \leftarrow S_1$ оказалась достаточно большой (~ 6000 см⁻¹), можно утверждать, что экспериментально наблюдаемое нарушение зеркальной симметрии интенсивностей длинноволновых полос поглощения и полос флуоресценции ДФБ (см. рис. 1, а и рис. 2) обусловлено локализацией S_2 -уровня ДФБ в области электронно-колебательных уровней S_1 -состояния, как это имеет место для незамещенного бисантена [4, 17]. Для коротковолновой области наблюдается неплохое соответствие экспериментальных данных результатам квантово-химического расчета электронных спектров ДФБ (рис. 3, а).

Образование эндомоно- и эндобипероксидов ДФБ (рис. 3, б—г) приводит, наоборот, к заметному понижению энергии двух верхних заполненных МО и повышению энергии двух нижних вакантных МО. Расчет показывает, что в случае эндомонопероксида длинноволновая полоса поглощения претерпевает гипсохромное смещение до 437 нм (см. рис. 3, б). При этом сила осциллятора этого перехода, так же, как и переходов, проявляющихся в УФ области, не превышает величины $f \approx 0.75$. Иной результат дает расчет электронных спектров эндобипероксидов (рис. 3, в и г): существенный гипсохромный сдвиг длинноволновых полос (до 320 нм для *цис*- и до 315 нм для *транс*-изомера) и незначительная сила осцилляторов соответствующих переходов (0.001 и 0.009), а также интенсивные полосы в УФ области ($f \approx 1\text{—}2$). В итоге, как видно из рис. 3, в и г, расчетные спектры двух изомеров эндобипероксидов ДФБ наиболее близко соответствуют экспериментально наблюдаемому спектру поглощения облученного раствора ДФБ (см. также рис. 1, а, кривая 4), что может служить подтверждением преимущественного образования эндобипероксидов при световом воздействии.

Параллельно с описанными были выполнены расчеты электронных спектров эндопероксидов ДФБ, в которых кислородные мостики присоединены к центральным бензольным кольцам ароматического скелета (такие структуры эндопероксидов предполагались в [2, 11] для гелиантрена и ДФГ). В этом случае наблюдается резкое отличие экспериментальных спектров от расчетных. Очевидно, что такая химическая структура эндопероксидов маловероятна, поскольку высокая реакционная способность к кислороду двух *мезо*-положений бисантена и его производных [1] способствует образованию структур, изображенных на рис. 3, б—г. Кроме того, как показали результаты квантово-химических расчетов геометрии, в данном случае имеет место чрезмерное искажение плоскости ароматического скелета.

Рис. 3. Спектры поглощения ДФБ (а) и его фотопродуктов (г) в *n*-октане при 300 К и расчетные электронные спектры ДФБ (а) и его эндопероксидов (б—г) (жирные линии — расчетные спектры), а также трехмерное изображение химической структуры ДФБ (а) и его эндопероксидов (б—г)



Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что эндопероксид не дает заметного вклада в формирование спектра поглощения облученного раствора ДФБ (рис. 1, кривая 4 и рис. 3, з). Его незначительная концентрация свидетельствует о быстром присоединении молекулой ДФБ второго кислородного мостика. Как видно из рис. 3, б, наличие одного мостика —О—О— приводит к увеличению излома не замещенного кислородом второго антраценового фрагмента, что повышает реакционную способность его *мезо*-положений [18] и способствует быстрому образованию эндобипероксида.

Вся совокупность полученных и литературных данных по фотоокислению гиперидиноподобных соединений свидетельствует о том, что в случае молекул ДФБ реализуется механизм самоиндуцированных фотопревращений, который сводится к образованию эндопероксидов посредством взаимодействия молекул ДФБ с высокорекреационноспособным синглетным кислородом. При этом $^1\text{O}_2$ образуется путем переноса энергии из T_1 -состояния ДФБ на невозбужденную молекулу кислорода. Следует отметить, что в [18] обнаружено образование эндопероксида незамещенного гелиантрена в темноте путем реализации уникальной (запрещенной спином) реакции между гелиантrenom в S_0 -состоянии и молекулярным кислородом в основном триплетном ($^3\text{O}_2$) состоянии. При этом авторы [18] постулируют, что в результате столкновения таких молекул образуется связанный комплекс, через который по спинзапрещенному пути посредством переноса заряда от гелиантрена к кислороду возникает цвиттерион (образование между ними одиночной связи). Последний же непосредственно превращается в конечный продукт — эндопероксид. В наших экспериментах темновая реакция образования эндопероксидов ДФБ не обнаружена.

Заключение. Для одного из простейших представителей гиперидиноподобных молекул — дифенилзамещенного бисантена — выполнен комплекс спектрально-люминесцентных исследований. Анализ полученных спектральных данных и результатов квантово-химического расчета геометрии молекулы ДФБ позволил сделать вывод о непланарном строении ее ароматического скелета. Обнаружена спектральная область проявления продуктов фотоиндуцированных превращений ДФБ в кислородосодержащих растворах. На основании квантово-химического расчета энергий и интенсивностей электронных $S_1 \leftarrow S_0$ -переходов ДФБ и его пероксидов сделано заключение, что в результате фотоокисления ароматической молекулы преимущественно образуются ее эндобипероксиды, у которых кислородные мостики присоединены к фенилзамещенным бензольным кольцам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф03-072).

- [1] Н.Кудора. J. Chem. Phys., **33** (1960) 1586—1587
- [2] Н.Брокманн, Ф.Дикке. Chem. Ber., **103** (1970) 7—16
- [3] С.М.Арабей, Т.А.Павич. Журн. прикл. спектр., **67** (2000) 176—181
- [4] Г.Г.Дьяченко, В.А.Петухов, С.М.Арабей, Т.А.Павич. Журн. прикл. спектр., **70** (2003) 189—195
- [5] G.A.Kraus, W.Zhang, M.J.Fehr, J.W.Petrich, Y.Wannemuehler, S.Carpenter. Chem. Rev., **96** (1996) 523—535
- [6] А.Я.Гореленко, В.А.Толкачев, Д.М.Халиманович. Журн. прикл. спектр., **26** (1977) 993—995
- [7] Н.-D.Brauer, R.Schmidt, G.Gauglitz, S.Hubig. Photochem. Photobiol., **37** (1983) 595—598
- [8] G.Sauvage. Ann. Chim., **2** (1947) 844—873
- [9] G.Sauvage. Compt. Rendus, **225** (1947) 247—249
- [10] D.R.Maulding. J. Org. Chem., **35** (1970) 1221—1223
- [11] C.Dufraisse, G.Sauvage. Compt. Rendus, **225** (1947) 126—127
- [12] P.Jardon, N.Lazortchak, R.Gautron. J. Chim. Phys., **84** (1987) 1141—1145
- [13] A.Acs, R.Schmidt, H.-D.Brauer. Photochem. Photobiol., **38** (1983) 527—531
- [14] H.N.Fonda, J.V.Gilbert, R.A.Cormier, I.R.Sprague, K.Kamioka, I.S.Connolly. J. Phys. Chem., **97** (1993) 7024—7033
- [15] В.И.Гаель, В.А.Кузьмицкий, К.Н.Соловьев. Журн. прикл. спектр., **63** (1996) 932 — 942
- [16] P.Bouř, K.Záruba, M.Urbanová, V.Setnička, P.Matějka, Z.Fiedler, V.Král, K.Volka. Chirality, **12** (2000) 191—198
- [17] С.М.Арабей, Т.А.Павич. Журн. прикл. спектр., **67** (2000) 488—491
- [18] M.Seip, H.-D.Brauer. J. Am. Chem. Soc., **114** (1992) 4486—4490