

УДК 535.372

## ВЛИЯНИЕ ОДИНАКОВЫХ НАБОРОВ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ $\pi$ -СОПРЯЖЕННЫХ МОЛЕКУЛ НА ПАРАМЕТРЫ ВНУТРИ- И МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© 2020 г. В. В. Компанеев<sup>1</sup>, К. Р. Каримуллин<sup>1,2</sup>, И. А. Васильева<sup>1,\*</sup>, А. В. Наумов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский педагогический государственный университет”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: irina.vasilieva@gmail.com

Поступила в редакцию 20.09.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Проведен сравнительный анализ параметров Франк–Кондоновского и Герцберг–Теллеровского взаимодействий, определяющих форму тонкоструктурных спектров поглощения и люминесценции  $\pi$ -сопряженных молекул, имеющих одинаковые наборы структурных элементов (молекулярных фрагментов). В работе показана возможность применения фрагментарного подхода к анализу спектров этих молекул.

DOI: 10.31857/S0367676520030163

### ВВЕДЕНИЕ

Методы селективной оптической спектроскопии, такие как люминесцентная спектроскопия [1–3], фотонное эхо [4–7] и спектроскопия одиночных молекул [8–11] широко используются для исследования спектральных и фотофизических свойств различных соединений [12]. Актуальной задачей в данной области является поиск и характеристика новых люминесцирующих материалов для различных приложений [13–15]. Современные спектральные методы исследования свойств молекул в основном состоянии являются предметом постоянного интереса ученых и практиков, хорошо разработаны и успешно применяются сегодня для определения геометрических параметров молекул. Но задача определения геометрических, энергетических и динамических параметров многоатомных молекул, находящихся в возбужденном состоянии, по-прежнему не имеет простого однозначного решения. Наиболее распространены методы, в основе которых экспериментальным источником информации о структуре многоатомных молекул в возбужденных состояниях является электронно-колебательный спектр вещества. Определение геометрии многоатомных молекул в возбужденных электронных состояниях на основе экспериментальных данных, получаемых из электронных спектров с разрешенной вибронной (электронно-колебательной) структурой, осуществляется либо путем вычислений изменения моментов инерции

молекул по известной вращательной структуре спектров, либо решением обратной вибронной задачи с использованием данных о колебательной структуре спектров. Известно, что спектры многоатомных органических молекул долгое время были непригодны для подобных вычислений, так как характеризуются слабо выраженной колебательной структурой вибронной полосы. В ряде случаев, например, при исследованиях биологических объектов, продуктивным оказывается специфический математический (дифференциальный) анализ широкополосных спектров поглощения [16]. В то же время, с открытием в 1952 г. эффекта Шпольского [17] ситуация с проблемой размытости спектров существенно изменилась. К настоящему времени оптическая спектроскопия различных соединений и структур в матрицах Шпольского, в т.ч. с лазерным возбуждением тонкоструктурных спектров (т. н. эффект Персона [18]), получила широкое распространение как для исследования органических люминофоров [19–21], так и перспективных наноматериалов [22].

Одним из наиболее исследуемых классов органических красителей являются соединения класса полиенов, уникальные фотофизические характеристики которых представляют значительный интерес. В течение последних нескольких лет, выяснилось, например, что стильбено-подобные молекулы могут служить удобными моделями для экспериментальных и теоретических исследова-

ний механизмов фотофизических процессов, в частности многофононного поглощения. Биохимические свойства стильбеноидов изменяются в широких пределах в зависимости от изомерии, положения заместителей, симметричности молекулы. Синтетические стильбеноиды и стильбеноподобные полимеры используются в производстве композиционных материалов, как сцинтилляционные детекторы, в качестве красителей в лазерах, как оптические отбеливатели в дефектоскопии, фоточувствительные маркеры в 3D моделировании и ряде других широко востребованных областях науки и техники.

Исходя из выше написанного, изучение оптических свойств стильбено-подобных соединений, выявление закономерностей спектральных проявлений замещенных молекул и их структурных аналогов является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение. Исследование дифенилполиенов, как модельных соединений с простым химическим строением, дает возможность получить более полную информацию о классе флуоресцирующих линейных полиенов, что в свою очередь открывает новые возможности в синтезе натуральных стильбеноидов и разработке новых свойств для уже изученных соединений. Актуальность настоящего исследования определяется, с одной стороны, существенно возросшей в последнее время, в связи с развитием квантовой теории и методов моделирования различных состояний сложных молекул, необходимости исследования электронно-колебательных состояний многоатомных органических молекул; а, с другой стороны, необходимостью в исследовании условий проявления в вибронных спектрах многоатомных соединений одинаковых структурных элементов (групп атомов).

В существующих на сегодняшний день методах расчета вибронных параметров колебательной структуры спектров многоатомных молекул используется либо НТ-, либо ФС-приближение. Несмотря на множество теоретических и экспериментальных исследований дифенилполиенов, получение численного значения не только внутримолекулярного взаимодействия ФС, но одновременно значения НТ-параметра не было выполнено. Особое практическое значение имеет вопрос о переносимости этих параметров в гомологическом ряду молекул, содержащих одинаковые наборы структурных элементов, что позволило бы расширить возможности по применению фрагментарного подхода для описания фундаментальных полос органических молекул разных гомологических рядов и решить проблему изучения структуры спектров больших молекул [23–25].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

До некоторого времени основной проблемой в анализе электронно-колебательных спектров яв-

лялось упрощение неэмпирических методов расчета. Поэтому нами был проведен анализ экспериментальных и теоретических работ, посвященных изучению распределения вибронных параметров характеристических спектральных полос сложных молекул ряда дифенилполиенов [26–29]. Была поставлена задача провести вибрационный анализ сопряженных спектров флуоресценции и поглощения дифенилполиенов и получить численное значение константы не только внутримолекулярного взаимодействия ФС, но одновременно определить значение НТ-параметра, как количественного значения проекции вектора дипольного момента электронного перехода на нормальные колебательные координаты. Также представлял интерес вопрос о переносимости этих параметров в гомологическом ряду молекул, содержащих одинаковые наборы структурных элементов, что позволило бы расширить возможности по применению фрагментарного подхода для описания фундаментальных полос органических молекул разных гомологических рядов и решить проблему изучения структуры спектров больших молекул [30–34].

Для выявления и анализа закономерностей спектральных свойств исследуемых молекул проводились измерения спектров флуоресценции и возбуждения флуоресценции при температуре 4.2 К. Исследовались зависимости регистрируемых спектров от длины волны возбуждающего света и длины волны регистрации. Для получения тонкоструктурных сопряженных спектров был применен метод Шпольского [12, 17, 19, 20]. Измерение квазилинейчатых спектров Шпольского позволяет при прочих равных условиях увеличить чувствительность люминесцентных измерений примерно в 100 раз.

Объектами исследования были выбраны соединения класса полиенов: дифенилполиены с числом двойных связей от 1 до 4, замещенные дифенилполиены и кросс-сопряженные кетоны. Соединения были синтезированы впервые в ИОХ им. Н.Д. Зелинского РАН (Красной Ж.А. с сотрудниками). Все соединения были хроматографически очищены. В качестве растворителей использовались химически чистые *n*-парафины: *n*-октан и *n*-гексан. Для всех исследуемых соединений методом Шпольского были получены сопряженные спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции при 4.2 К. Спектры флуоресценции были исправлены на спектральную чувствительность установки, а спектры возбуждения флуоресценции – на распределение интенсивности по спектру источника возбуждения.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ сопряженных спектров люминесценции и поглощения (возбуждения флуоресценции) является весьма продуктивным инструмен-

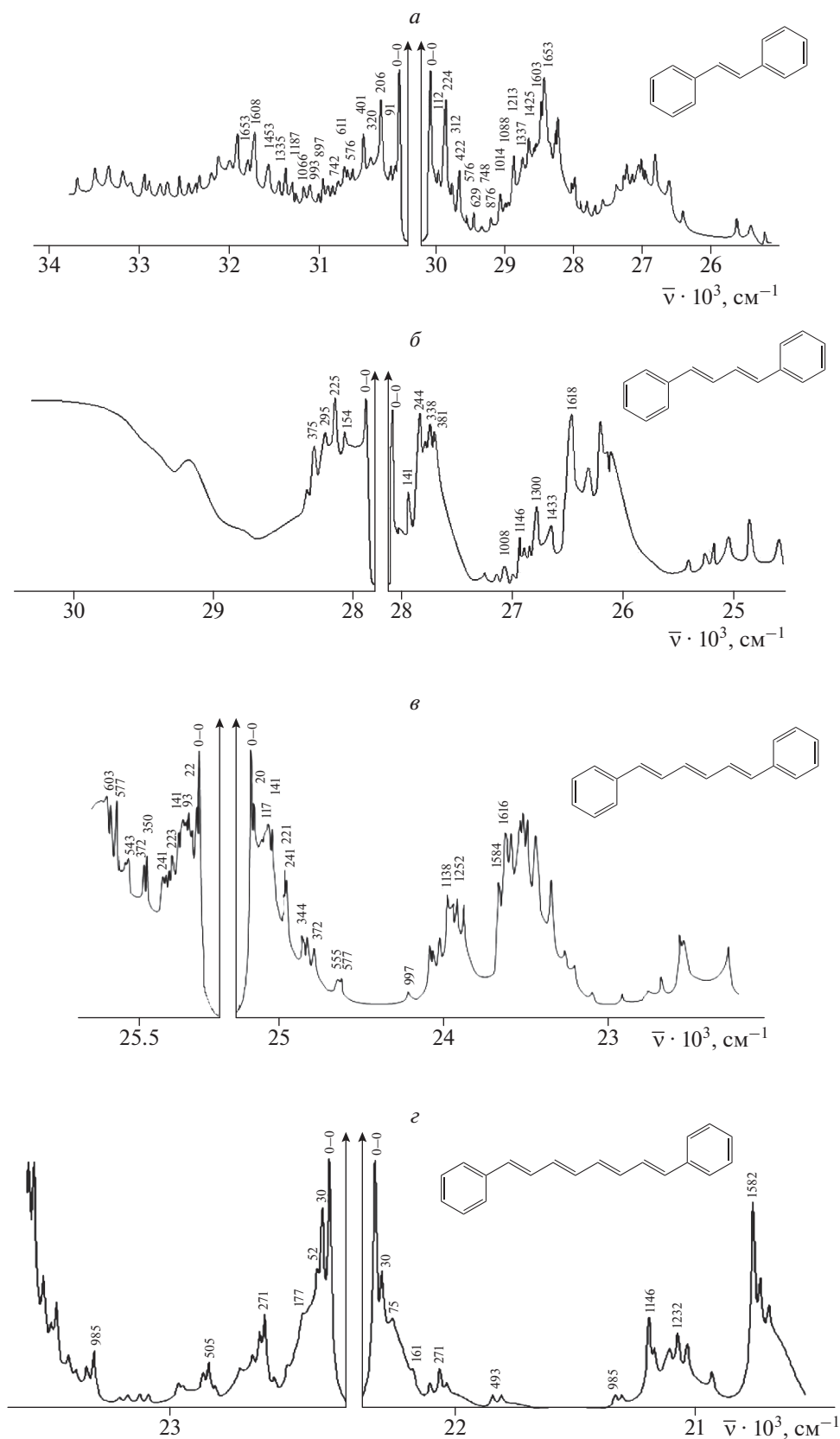
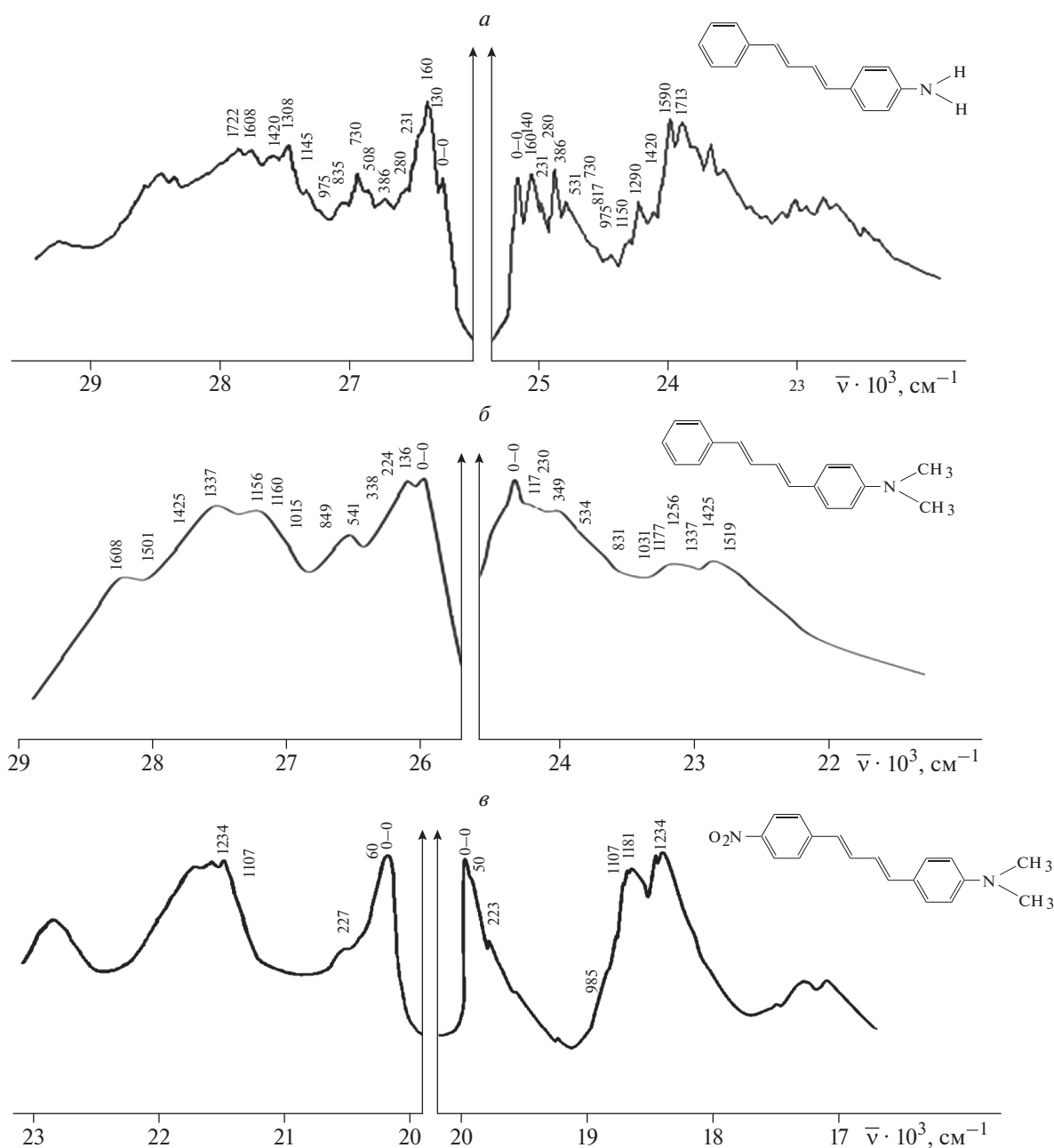


Рис. 1. Спектры флуоресценции (правая часть спектра) и возбуждения флуоресценции (левая часть спектра) и структурные формулы исследованных арилполиенов.



**Рис. 2.** Спектры флуоресценции (правая часть спектра) и возбуждения флуоресценции (левая часть спектра) и структурные формулы исследованных замещенных арилполиенов.

том для анализа внутри и межмолекулярных взаимодействий люминесцирующих сред [35–37].

Вибронные взаимодействия определяют распределение интенсивности в обоих спектрах, при этом, линейное франк-кондоновское (FC) взаимодействие связано с изменением только равновесных положений ядер при электронном возбуждении; квадратичное по колебательным координатам FC взаимодействие связано с изменением крутизны FC потенциальных кривых при электронном возбуждении; взаимодействие Гецберга–Теллера

(НТ) учитывает модуляцию электронного дипольного момента перехода колебаниями ядер. Интерференция FC- и НТ-амплитуд приводит к разной интенсивности сопряженных вибронных пиков. Таким образом, вибранный анализ незеркальных сопряженных тонкоструктурных спектров люминесценции и поглощения дает информацию о параметрах FC- и НТ-взаимодействий [35, 36]. Важным условием для реализации этого подхода является наличие возможности точного определения положения и интенсивности от-

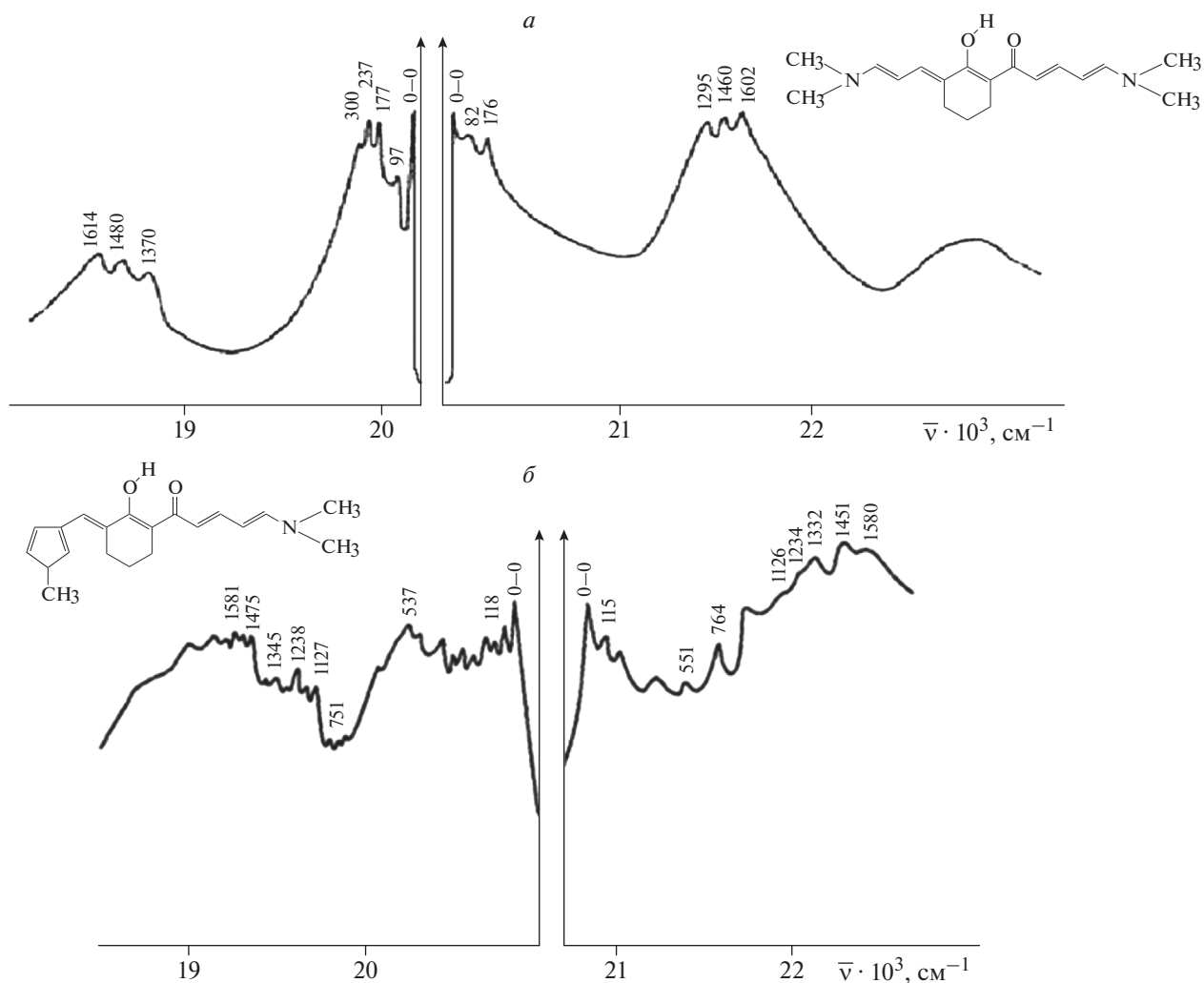


Рис. 3. Спектры флуоресценции (правая часть спектра) и возбуждения флуоресценции (левая часть спектра) и структурные формулы исследованных кросс-сопряженных кетонов.

дельных электронно-колебательных пиков в тонкоструктурных спектрах.

В нашем случае, во всех изученных сопряженных спектрах наблюдается нарушение зеркальной симметрии, однако, тонкая вибронная структура оказалась слабо разрешена, т.е. определить интенсивность полос непосредственно из сопряженных спектров для большинства исследуемых соединений невозможно.

Техника вибрационного анализа сопряженных спектров со слабо разрешенной структурой была развита в [35, 36]. Методика основывается на моделировании спектров в виде серии вибронных полос, каждая из которых состоит из узкой бесфонной линии, и широкого фонного крыла, отношение интенсивностей которых определяется значением фактора Дебая–Валлера. После этого сопряженные спектры моделируются с учетом подгоночных параметров FC- и НТ-взаимодействий. Специальная программа для такого моделирования спек-

тров и сравнения их с экспериментальными данными была разработана для программной среды MathCad [35, 36].

Таким образом, были получены численные значения константы FC- и НТ-взаимодействий. Структурные формулы исследованных арилполиенов с числом двойных связей от 1 до 4 и их экспериментальные спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции показаны на рис. 1. Были исследованы: (а) стильбен (СБ) в октано ( $C_6H_5-(CH=CH)-C_6H_5$ , концентрация  $C = 3 \cdot 10^{-8}$  моль/л); (б) дифенилбутадие (ДФБ) в н-гексане ( $C_6H_5-(CH=CH)_2-C_6H_5$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-8}$  моль/л); (в) дифенилгексатриен (ДФГ) в н-гексане ( $C_6H_5-(CH=CH)_3-C_6H_5$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л); (г) дифенилоктатетраен (ДФО) в октано, ( $C_6H_5-(CH=CH)_4-C_6H_5$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-4}$  моль/л). Далее были измерены сопряженные спектры замещенных арилполиенов (рис. 2): (а) замещенный дифенил-

Таблица 1. Диаграмма колебаний параметра Франка–Кондона и Герцберг–Теллера для дифенилполиенов  $n = 1-4$ 

Интерпретация колебаний	Колебания параметра Франка–Кондона для характеристических полос при увеличении звеньев в полиеновом мостике	Колебания параметра Герцберг–Теллера для характеристических полос при увеличении звеньев в полиеновом мостике
Плоскостные и внеплоскостные деформационные колебания связей С–Н в 1,4-замещенных и монозамещенных бензольных элементах [8–11]		
Деформационные и валентные колебания связей С–Н в алкеноподобных элементах. Неплоское колебание, тризамещение при двойной связи, слабая полоса. Пульсационные колебания углеродного скелета [8–11]		
Валентные колебания связей С=C в полиеновых элементах. Растяжение олефиновых связей. Три замещение при двойной связи [11]		
Внеплоскостные и плоскостные деформационные колебания связей С–Н в 1,4-замещенных и монозамещенных бензольных элементах. Растяжение олефиновых связей [9–11]		

бутадиен (ДФБ1) в *n*-октане ( $C_6H_5-(CH=CH)_2-C_6H_4-NH_2$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л); (б) замещенный дифенилбутадиен (ДФБ2) в *n*-октане ( $C_6H_5-$

$(CH=CH)_2-C_6H_4-N(CH_3)_2$ ,  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л); (в) замещенный дифенилбутадиен (ДФБ3) в *n*-октане ( $O_2N-C_6H_4-(CH=CH)_2-C_6H_4-N(CH_3)_2$ ,

**Таблица 2.** Диаграмма колебаний параметра Франка–Кондона и Герцберг–Теллера для ДФБ (обозначен как 0) и его замещенных (1 – ДФБ1, 2 – ДФБ2 и 3 – ДФБ3 соответственно)

Интерпретация колебаний	Колебания параметра Франка–Кондона	Колебания параметра Герцберг–Теллера
Плоскостные и внеплоскостные валентные деформационные колебания связей С–Н в моно- и 1,4-замещенных бензольных и алкеноподобных элементах. Колебания связей N–H в элементах типа ароматических третичных аминов [8–12]		
Деформационные колебания связей С–Н в алкеноподобных и монозамещенных бензольных элементах. Неплоское колебание, тризамещение при двойной связи. Колебания связей N–H в элементах типа ароматических третичных аминов [11–15]		
Неплоские деформационные колебания связей С–Н в алкеноподобных элементах. Плоскостные деформационные колебания связей С–Н в 1,4-замещенных бензольных элементах. Колебания связей N–H в элементах типа ароматических третичных аминов [9, 11–14]		

$C = 5 \cdot 10^{-4}$  моль/л). Также были исследованы кросс-сопряженные кетоны. Их спектры показаны на рис. 3: (а) кетон (К1) в октане (( $\text{CH}_3$ )<sub>2</sub>N–(CH=CH)=(НОС<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)–CO–(CH=CH)<sub>2</sub>–N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,  $C = 5 \cdot 10^{-6}$  моль/л); (б) кетон (К2) в октане (CH<sub>3</sub>–NC<sub>4</sub>H<sub>3</sub>–CH=(НОС<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)–CO–(CH=CH)<sub>2</sub>–N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,  $C = 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л).

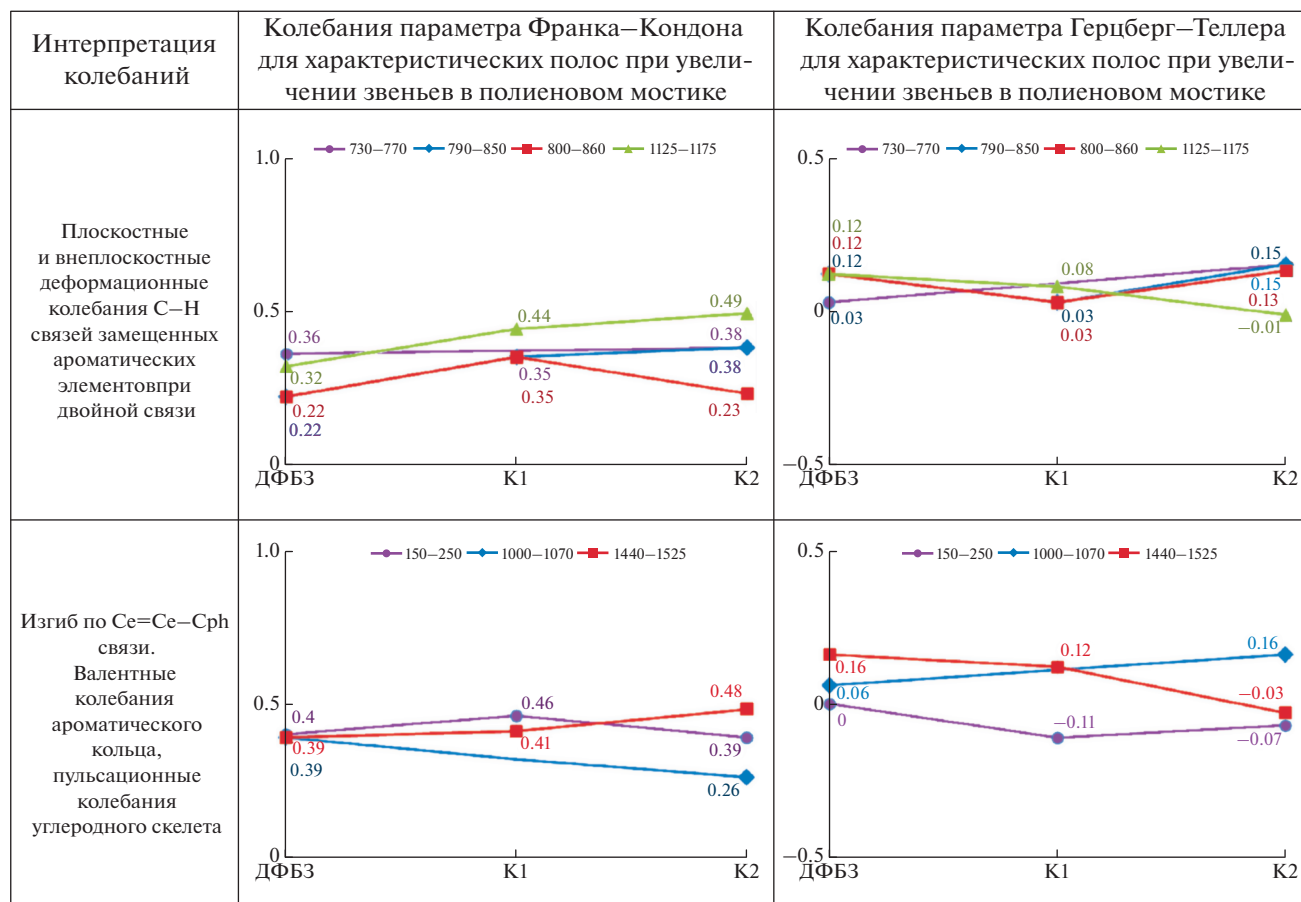
Частотный анализ тонкоструктурных сопряженных спектров флуоресценции и возбуждения флуоресценции первой группы исследуемых соединений и расчет параметров франк-кондонов-

ского FC- и HT-взаимодействий для основных нормальных колебаний позволяет объяснить количественно и графически отклонения от зеркальной симметрии в сопряженных спектрах исследуемых молекул совместным проявлением FC- и HT-взаимодействий.

На примере молекул ДФБ, ДФГ и ДФО продемонстрирована достаточная степень надежности, предсказательности, быстроты проведения расчетов выбранного метода. Интерпретации колебаний СБ в основном и возбужденном электронном состоянии позволяет соотнести их по форме и



Таблица 3. Диаграмма колебаний параметра Франка–Кондона и Герцберг–Теллера



симметрии колебаний, проявляющихся в сопряженных спектрах исследуемых соединений. Выявлены высокоинтенсивные полностью симметричные и низкоинтенсивные неполносимметричные колебания. Обнаружено, что требуемое количество вибронных параметров, необходимых для количественного воспроизведения спектральных особенностей, составляет не более 20% от числа воспроизводимых спектральных характеристик. Кроме того, выявлено, что после нахождения системы вибронных параметров для конкретного соединения ряда, возможно предсказать (на количественном и качественном уровнях) определенные спектральные характеристики молекул исследуемого ряда. Влияние длины полиеновой цепи соединений ряда Ph–(CH=CH)<sub>n</sub>–Ph на параметры FC- и HT-взаимодействий формирующих тонкоструктурные спектры этих соединений подчиняется определенным закономерностям, что демонстрирует высокую степень переносимости параметров в гомологическом ряду молекул, а также возможности применения к ним фрагментарного подхода. В отличие от других полуэмпирических методов, примененный нами метод дает возможность описать зависимости изменения параметров FC- и HT-

взаимодействий при различных типах деформационных колебаний. Полученные параметры хорошо отражают фрагментарную структуру молекул, что позволяет использовать рассмотренный метод для моделирования и расчетов возбужденных состояний сложных π-сопряженных молекул (табл. 1).

Показано, что введение в дифенилполиеновое кольцо электронно-донорного или электронно-акцепторного заместителя приводит к уширению линий и повышению фона спектров. Внедрение заместителей помогает уменьшить дипольный момент молекулы, что уменьшает также значения параметров межмолекулярного взаимодействия. Введение заместителей практически не влияет на размещение в спектре характеристических полос и может быть использовано для усиления слабо проявленных полос в спектрах некоторых люминофоров. Было обнаружено, что одновременное наличие донора и акцептора в разных фенольных кольцах позволяет улучшить симметрию сопряженных спектров и значительно повысить внутреннюю энергию молекулы (табл. 2).

Полученные параметры хорошо отражают фрагментарную структуру молекул, что позволяет использовать рассмотренный метод для моделирова-



ния и расчетов возбужденных состояний сложных  $\pi$ -сопряженных молекул с произвольной длиной полиенового мостика, а также заместителей в кольцах.

Нами осуществлен анализ влияния геометрии кросс-сопряженных кетонов на вибронные параметры (табл. 3). Результаты качественно согласуются с результатами расчетов, выполненных чисто теоретическими и полуэмпирическими методами. Полученные параметры хорошо отражают фрагментарную структуру молекул, что позволяет использовать рассмотренный метод для моделирования и расчетов возбужденных состояний сложных  $\pi$ -сопряженных молекул разных гомологических рядов, но с одинаковым набором структурных элементов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемый в работе метод позволяет проводить вибронный анализ сопряженных спектров флуоресценции поглощения органических примесных молекул в парафиновых матрицах в рамках теории электронно-колебательного взаимодействия. Проведенное исследование показывает, что есть закономерности изменения спектральных свойств сопряженных соединений цепочечной структуры при замещении атома водорода на функциональные группы, содержащие гетероатомы с разнотипными донорно-акцепторными свойствами. Показана высокая степень переносимости в ряду молекул, имеющих одинаковые наборы структурных элементов, параметров внутри- и межмолекулярного взаимодействия, формирующих тонкоструктурные спектры молекул сложных органических соединений. Теоретическое моделирование подтверждает возможность переносимости параметров в гомологическом ряду органических молекул, содержащих фрагменты разного типа.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Москвы (проект № 19-32-70005-мол\_а\_мос). Развитие экспериментальной техники люминесцентной спектроскопии выполняется в Лаборатории физики перспективных материалов и наноструктур, созданной в МПГУ по итогам конкурса Министерства науки и высшего образования на финансирование работ в рамках госзадания на создание новых лабораторий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магарян К.А., Михайлов М.А., Каримуллин К.Р. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 12. С. 1629; *Magaryan K.A., Mikhailov M.A., Vasilieva I.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 12. P. 1336.
2. *Karimullin K.R., Mikhailov M.A., Georgieva M.G. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 951. Art. № 012011.
3. Магарян К.А., Каримуллин К.Р., Васильева И.А., Наумов А.В. // Опт. и спектроск. 2019. Т. 126. № 1. С. 50; *Magaryan K.A., Karimullin K.R., Vasil'eva I.A., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2019. V. 126. № 1. P. 41.
4. *Knyazev M.V., Karimullin K.R., Naumov A.V.* // Phys. Stat. Sol. (RRL). 2017. V. 11. № 3. Art. № 1600414.
5. Каримуллин К.Р., Князев М.В., Наумов А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 12. С. 1539; *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 12. P. 1254.
6. Каримуллин К.Р., Князев М.В., Вайнер Ю.Г., Наумов А.В. // Опт. и спектроск. 2013. Т. 114. № 6. С. 943; *Karimullin K.R., Knyazev M.V., Vainer Y.G., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2013. V. 114. № 6. P. 859.
7. *Karimullin K., Knyazev M., Eremchev I. et al.* // Meas. Sci. Technol. 2013. V. 24. № 2. Art. № 027002.
8. Савостьянов А.О., Еремчев И.Ю., Горшелев А.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 7. С. 426; *Savostyanov A.O., Eremchev I.Yu., Gorshlev A.A. et al.* // JETP Lett. 2018. V. 107. № 7. P. 406.
9. *Naumov A.V., Gorshlev A.A., Gladush M.G. et al.* // Nano Lett. 2018. V. 18. № 10. P. 6129.
10. Еремчев И.Ю., Еремчев М.Ю., Наумов А.В. // УФН. 2019. Т. 189. № 3. С. 312; *Eremchev I.Yu., Eremchev M.Yu., Naumov A.V.* // Phys. Usp. 2019. V. 62. № 3. P. 294.
11. Кожина Е.П. // Фотоника. 2019. Т. 13. № 1. С. 40.
12. Наумов А.В. // УФН. 2013. Т. 183. № 6. С. 633; *Naumov A.V.* // Phys. Usp. 2013. V. 56. № 6. P. 605.
13. *Slyusareva E., Sizykh A., Tyagi A., Penzkofer A.* // J. Photochem. Photobiol. 2009. V. 208. № 2–3. P. 131.
14. Слюсарева Е.А., Томилин Ф.Н., Сизых А.Г. и др. // Опт. и спектроск. 2012. Т. 112. № 5. С. 729; *Slyusareva E.A., Tomilin F.N., Sizykh A.G. et al.* // Opt. Spectrosc. 2012. V. 112. № 5. P. 671.
15. *Karimullin K.R., Naumov A.V.* // J. Lumin. 2014. V. 152. P. 15.
16. *Lavrinenko I.A., Holyavka M.G., Chernov V.E., Artyukhov V.G.* // Spectrochim. Acta A. 2020. V. 227. Art. № 117722.
17. Шпольский Э.В. // УФН. 1962. Т. 77. № 2. С. 321.
18. Персонов Р.И., Альшиц Б.И., Быковская Л.А., Харламов Б.М. // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. № 5. С. 182.
19. *Al-Tameemi M., Arif S., Campiglia A.D. et al.* // Talanta. 2019. V. 194. P. 930.
20. *Starukhin A., Gorski A., Kijak M.* // EPJ Web Conf. 2017. V. 161. Art. № 01011.
21. *Gil M., Gorski A., Starukhin A., Waluk J.* // Low Temp. Phys. 2019. V. 45. P. 656.
22. *Sharma A., Yi A.K., Robert Z. et al.* // Nano Lett. 2019. V. 19. № 11. P. 7877.
23. Грибов Л.А., Баранов В.И., Новосадов Б.К. Методы расчета электронно-колебательных спектров многоатомных молекул. М.: Наука, 1984.
24. Баранов В.И., Соловьев А.Н. // Опт. и спектроск. 2006. Т. 101. № 6. С. 898; *Baranov V.I., Solov'ev A.N.* // Opt. Spectrosc. 2006. V. 101. № 6. P. 843.
25. *Choe J.-I., Park S.J., Cho Ch.-H. et al.* // Bull. Korean Chem. Soc. 2010. V. 31. № 8. P. 2175.

26. *Yamamoto S., Okuyama K., Mikami N., Ito M.* // Chem. Phys. Lett. 1986. V. 125. P. 1.
27. *Nikitina A.N., Osad'ko I.S., Vasilieva I.A., Yanovskaya L.A.* // Phys. Stat. Sol. B. 1983. V. 115. P. 493.
28. *Баранов В.И., Соловьев А.Н.* // ЖПС. 1987. Т. 46. № 1. С. 69; *Baranov V.I., Solov'ev A.N.* // J. Appl. Spectrosc. 1987. V. 46. № 1. P. 55.
29. *Баранов В.И., Соловьев А.Н.* // Опт. и спектроск. 1987. Т. 62. № 2. С. 346.
30. *Morris Jr. D.L., Gustafson T.L.* // J. Phys. Chem. 1994. V. 98. P. 6725.
31. *Kohler B.E., Hudson B.S.* // J. Chem. Phys. 1973. V. 59. № 9. P. 4984.
32. *Furuya K., Kawato K., Yokoyama H. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2003. V. 107. P. 8251.
33. *Geskin V.M., Lambert Ch., Bredas J.-L.* // J. Am. Chem. Soc. 2003. V. 125. Art. № 15651.
34. *Kubicki A.A.* // Chem. Phys. Lett. 2009. V. 483. № 4. P. 268.
35. *Наумова Н.Л., Васильева И.А., Осадько И.С., Наумов А.В.* // Опт. и спектроск. 2005. Т. 98. № 4. С. 586; *Naumova N.L., Vasil'eva I.A., Osad'ko I.S., Naumov A.V.* // Opt. Spectrosc. 2015. V. 98. № 4. P. 535.
36. *Naumova N.L., Vasil'eva I.A., Naumov A.V., Osad'ko I.S.* // J. Lumin. 2005. V. 111. № 1–2. P. 37.
37. *Войтович А.П., Калинов В.С., Мартынович Е.Ф. и др.* // ЖПС. 2011. Т. 78. № 5. С. 779.