

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 338–345
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 338–345
https://fizika.sgu.ru https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-338-345, EDN: NKRGJD

Научная статья
УДК 535.372

Исследование влияния кристаллической матрицы на спектр флуоресценции соединения $C_{60/70}$

Т. А. Меределина✉, А. К. Стародубцева

Благовещенский государственный педагогический университет, Россия, 675000, г. Благовещенск, ул. Ленина, д. 104

Меределина Татьяна Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физического и математического образования, biofirm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-2852-8355, AuthorID: 739688
Стародубцева Анастасия Константиновна, аспирант, starodubtseva_an@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9801-8971, AuthorID:1288620

Аннотация. В работе представлены результаты исследования спектров флуоресценции фуллеренного соединения $C_{60/70}$, стабилизированного в двух кристаллических матрицах – гептане и толуоле. Показано, что в обеих матрицах в диапазоне 650–682 нм наблюдается структурный спектр с несколькими характерными линиями. Установлено, что наиболее информативными являются концентрации 10^{-5}–10^{-6} моль/л. В спектрах обеих матриц стабильно проявляются три линии (около 678, 676 и 674 нм), тогда как в толуоле дополнительно регистрируются линии 680.50 и 680.14 нм, природа которых связывается с наличием π-электронной подсистемы и неэквивалентными положениями молекул в решетке. Число разрешимых линий спектра напрямую обусловлено свойствами матричных сред, что открывает перспективы для управляемого изменения электронной структуры многоатомных молекул.

Ключевые слова: соединение $C_{60/70}$, спектр флуоресценции, матрица, спектроскопия, π-электронная подсистема, свойства растворителей

Для цитирования: *Меределина Т. А., Стародубцева А. К.* Исследование влияния кристаллической матрицы на спектр флуоресценции соединения $C_{60/70}$ // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 338–345. https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-338-345, EDN: NKRGJD

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Study of the influence of crystalline matrix on the fluorescence spectrum of compound $C_{60/70}$

T. A. Meredelina✉, A. K. Starodubtseva

Blagoveshchensk State Pedagogical University, 104 Lenin St., Blagoveshchensk 675000, Russia

Tatyana A. Meredelina, biofirm@mail.ru, https://orcid.org/0009-0001-2852-8355, AuthorID: 739688
Anastasia K. Starodubtseva, starodubtseva_an@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9801-8971, AuthorID:1288620

© *Меределина Т. А., Стародубцева А. К., 2026*



Abstract. ***Background and Objectives*:** The object of this study is the fullerene compound $C_{60/70}$, which is a mixture of 86% C_{60} and 14% C_{70} fullerenes – the most common product of graphite arc-discharge evaporation. The compound was stabilized in two different crystalline matrices: heptane (a linear alkane without π-electrons) and toluene (an aromatic solvent with a π-electron subsystem). The study focuses on the fluorescence spectra of this compound in the long-wavelength visible range (650–682 nm), where the edge of optical absorption is located and low-intensity features are observed. The aim of this work is to investigate the influence of the crystalline matrix on the fluorescence spectrum of the $C_{60/70}$ compound, to compare the spectral features observed in heptane and toluene matrices, and to explain the observed differences from the perspective of intermolecular interactions between the matrix and the embedded fullerene molecules. A further goal is to identify stable spectral lines that can be attributed to singlet-singlet electronic transitions and to assess the possibility of controlled modification of the electronic structure of polyatomic molecules by varying the matrix environment. ***Materials and Methods*:** Solutions of the $C_{60/70}$ compound in heptane and toluene were prepared at concentrations ranging from 10^{-4} to 10^{-8} mol/L. The samples were rapidly frozen at liquid nitrogen temperature (77.3 K) to obtain quasi-linear Shpol'skii-type spectra. Excitation was performed using a semiconductor laser with a wavelength of 365 nm, which provides sufficient energy for re-emission in the visible range. Fluorescence spectra were recorded using an ISP-51 spectrograph equipped with a high-sensitivity TCD1304DG CCD linear array, offering a pixel resolution of 0.08 nm/pixel. The obtained data were processed using specialized software (Registration No. 2017616306) designed for automation of spectral analysis. The studied spectral range was divided into two subranges: 650–661 and 673–682 nm. ***Results*:** It has been found that both matrices produce a structured fluorescence spectrum with several characteristic lines in the 650–682 nm range. The most informative spectra have been obtained at concentrations of 10^{-5}–10^{-6} mol/L. Three stable lines near 678.09, 676.65 and 674.25 nm are present in both matrices at all concentrations and are attributed to singlet-singlet electronic transitions in fullerene molecules. The energy differences between these lines are 0.003 eV and 0.01 eV, suggesting two spectral multiplets. In the toluene matrix, additional lines at 680.50 nm and 680.14 nm appear at concentrations of 10^{-5} and 10^{-6} mol/L. These lines are reproducible, do not belong to pure toluene, and are not thermal noise. Their origin is discussed in terms of: (*i*) a larger number of nonequivalent positions for fullerene molecules in the less symmetric toluene crystal lattice; (*ii*) the presence of π-electron subsystems in both toluene and fullerenes, which enhances intermolecular interactions and may give rise to exciton or excimer effects; (*iii*) the structural diversity of C_{60} and C_{70} molecules, which exhibit different polarizability and ability to integrate into the matrix lattice. The intensity of the lines increases with concentration, following the laws of spectral analysis. In the heptane matrix, redistribution of excited electrons is concentrated mainly between the 678.5 nm and 676.5 nm lines, whereas in toluene a broader distribution is observed. The Stokes shift for analogous lines is slightly larger in toluene, indicating stronger interaction with the matrix. The results have demonstrated that the number of resolvable spectral lines is directly determined by the properties of the matrix media, opening prospects for controlled modification of the electronic structure of polyatomic molecules.

Keywords: compound $C_{60/70}$, fluorescence spectrum, matrix, spectroscopy, π-electron subsystem, solvent properties

For citation: Meredelina T. A., Starodubtseva A. K. Study of the influence of crystalline matrix on the fluorescence spectrum of compound $C_{60/70}$. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 338–345 (in Russian). https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-3-338-345, EDN: NKRGJD

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Широкое применение в органической электронике, фотонике, солнечных элементах, сенсорах получили смеси фуллеренов, определенный состав которых помогает синтезировать материалы с конкретными заданными свойствами. Структурные отличия молекул фуллеренов C_{60} и C_{70} обусловливают вариации физических, химических и электронных характеристик их соединений. Смеси фуллеренов, объединяя свойства каждого из компонентов, приобретают новые оптические и электрические свойства, что открывает широкие перспективы для их применения в различных областях нанотехнологий и материаловедения [1]. В данной работе исследован наиболее распространенный продукт электродугового испарения графита – фуллеренное соединение $C_{60/70}$ [2]. Исследования электронной структуры фуллеренов C_{60} и C_{70} в видимой и УФ-области проводились многими авторами [3–5]. Хорошо изучен ИК-спектр, встречаются теоретические расчеты электронных спектров, которые неплохо согласуются с экспериментом [6]. Несмотря на это, сведения о крае оптического поглощения остаются противоречивыми; для фуллеренов C_{60} и C_{70} – это длинноволновая область видимого спектра. Замечено, что в данном диапазоне проявляются пики небольшой интенсивности, которые объясняются либо разрешенными оптическими переходами, либо образующимися экситонами [7]. Поэтому в рамках проведенного эксперимента изучено влияние матрицы на спектр флуоресценции смеси $C_{60/70}$ в диапазоне 650–682 нм.

Изменения в электронных состояниях молекул фуллеренов исследованы с помощью низкотемпературной флуоресцентной спектроскопии, основанной на методике, разработанной Э. В. Шпольским. Этот подход предполагает жесткую фиксацию исследуемой молекулы в подобранной матрице. Для получения структурных спектров соединения $C_{60/70}$ в данной работе использовались его замороженные растворы в органических растворителях – гептане и толуоле. На основе данных о структурных характеристиках молекул растворителей предполагается, что они должны обеспечивать оптимальные условия

для получения линейных спектров флуоресценции.

Целью исследования является получение и сравнение спектров флуоресценции $C_{60/70}$ в длинноволновой области видимого диапазона, объяснение результатов с позиции механизмов взаимодействия между структурной основой матрицы и внедренным соединением.

Образцы и методика эксперимента

Исследуемое соединение $C_{60/70}$ состоит на 86% из фуллерена C_{60} и на 14% – из фуллерена C_{70}. В твердом состоянии смесь имеет слабо кристаллизованную структуру, в которой молекулы обоих типов расположены без строгой периодичности и сохраняют свои свойства и форму. В химически нейтральных растворителях также преобладают слабые ван-дер-ваальсовы взаимодействия без образования химических связей и кристаллических структур [2].

Молекула C_{60}, состоящая из 60 атомов углерода, образует сферическую каркасную структуру, каждый атом которой образует три ковалентных σ-связи с тремя соседними атомами, что обеспечивает устойчивую геометрическую конфигурацию. Структура включает 12 пятиугольных и 20 шестиугольных граней длина σ-связи приблизительно составляет 0.154 нм, в то время как длина π-связи оценивается примерно в 0.14 нм, межатомные расстояния в молекуле варьируются в диапазоне 0.14–0.145 нм [8].

Структура фуллерена C_{70} включает 70 атомов углерода и характеризуется наличием 12 пятиугольных и 58 шестиугольных циклов. В отличие от молекулы C_{60} молекула C_{70} в экваториальной зоне имеет 10 добавочных атомов углерода, в результате чего молекула вытянута, длина одинарных углеродных связей приближается к 0.14 нм, длина двойных связей составляет примерно 0.134 нм. Общий размер молекулы варьируется в пределах 0.71–0.74 нм [9]. По сравнению с молекулой C_{60}, для молекулы C_{70} характрна более низкая симметрия, что влияет на распределение π-электронов. π-орбитали расположены по периметру молекулы, образуя делокализованную электронную систему, вследствие чего молекула C_{70} подвержена большей деформации электронной оболочки при внешних воздействиях [10].

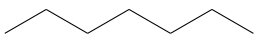
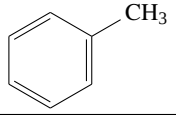
Для сравнения матриц взяты два растворителя с различными структурными формулами молекул. Толуол – ароматический растворитель с π-электронной подсистемой, гептан – типичный представитель класса алканов с линейной формой молекулы и отсутствием π-связей.

Толуол представляет собой ароматическую молекулу бензола с одним заместителем – группой CH_3, и общей формулой $C_6H_5CH_3$. Благодаря метильной группе молекула толуола обладает умеренной гибкостью; в зависимости от конфигурации длина молекулы порядка 0.7–1.0 нм. Межуглеродные связи в бензольном кольце имеют длину около 0.139 нм, а диаметр самого кольца составляет приблизительно 0.28 нм (табл. 1). Молекула толуола является слабо полярной за счет небольшой полярности метильной группы, так как бензольное кольцо имеет равномерное распределение π-электронов и считается неполярным [11].

В трехмерном пространстве молекула гептана представляет собой гибкую цепь с несколь-

Таблица 1 / Table 1

Характеристики растворителей
Solvent characteristics

Свойство / Property	Гептан / Heptane C_7H_{16}	Толуол / Toluene C_7H_8
Полярность (индекс полярности) / Polarity (polarity index)	0.0	2.4
Способность к образованию водородных связей / Ability to form hydrogen bonds	Нет / No	Нет / No
Наличие π-электронов / Presence of π-electrons	Нет / No	Есть / Yes
Длина молекулы, нм / Length of molecule, nm	0.9	0.6
Длина связа, нм / Bond length, nm	0.154	0.139
Структурная формула молекулы / Structural formula of the molecule		

кими степенями свободы, свободно вращающимися вокруг σ-связей. В масштабах межатомных расстояний, характерных для ковалентных связей типа C–C, которые равны примерно 0.154 нм, средняя длина молекулы по линейной цепи составляет примерно 0.9–1.2 нм (в зависимости от конфигурации). Химическая формула данного соединения – C_7H_{16} отражает полную насыщенность углерод-углеродного каркаса и отсутствие двойных или тройных связей в структуре молекулы, что влечет за собой отсутствие в гептане π-подсистемы (см. табл. 1) [11].

В гептане и толуоле были приготовлены растворы соединения $C_{60/70}$ с концентрациями от 10^{-4} до 10^{-8} моль/л. Образцы подвергались быстрому замораживанию при температуре жидкого азота (77.3 K) и внешнему облучению полупроводниковым лазером с длиной волны 365 нм, выбранной с расчетом, чтобы энергии возбуждения было достаточно для переизлучения в видимом диапазоне. Спектры флуоресценции исследуемых образцов регистрировались с использованием спектрографа ИСП-51 (АО «ЛОМО», Россия), оснащенного высокочувствительным прибором с зарядовой связью (ПЗС-линейкой) TCD1304DG (Toshiba Semiconductor, Япония); в оптическом диапазоне пиксельное разрешение линейки составляет 0.08 нм/пиксель. Полученные данные обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения, предназначенного для автоматизации анализа спектральных характеристик [12].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ранее влияние матрицы на спектр флуоресценции фуллеренной смеси $C_{60/70}$ исследовалось в четырех растворителях: гексане, гептане, толуоле и орто-ксилоле. Спектры в гептановой и гексановой матрицах в зависимости от концентрации проявили до трех аналогичных полос, в матрицах толуола и орто-ксилола были получены спектральные проявления до шести полос. Замечено, что во всех матрицах при любых концентрациях стабильно проявлялись три линии: в районе 678.00, 676.50 и 674.50 нм. В работе представлены результаты исследования спектров флуоресценции фуллеренного соединения $C_{60/70}$, стабилизированного в двух кристаллических матрицах – в гептане и толуоле как в типичных представителях своего класса растворителей.

Для повышения точности определения линий исследуемая область была разбита на два диапазона: 650–661 и 673–682 нм. Информация о зарегистрированных спектрах в диапазоне 673–682 нм представлена в табл. 2.

Интенсивность разрешимых линий увеличивается с ростом концентрации раствора, что согласуется с законом спектрального анализа. Обе матрицы стабильно дают две основные линии с длинами волн около 678.09 нм (14749 $см^{-1}$) и 676.65 нм (14779 $см^{-1}$). При изменении концентрации раствора число линий меняется. Так, при концентрации 10^{-5} моль/л в толуоловой матрице проявляются еще две линии 680.51 нм (14695 $см^{-1}$) и 680.13 нм (14703 $см^{-1}$), а при концентрации 10^{-6} моль/л в обоих растворителях регистрируется появление дополнительной линии с длиной волны 674.25 нм (14831 $см^{-1}$).

По интенсивности линии в гептане превосходят соответствующие линии в толуоле под внешним воздействием кристаллической матрицы гептана практически все электроны перераспределяются между 678.5 и 676.5 нм. При стабилизации в матрице толуола большее число электронов проявляют линию 676.5 нм, немного меньше – линию 678.5 нм и еще меньше – линию 674.5 нм. Следовательно, при равных условиях перераспределение возбужденных электронов в различных матрицах разное [13]. Из табл. 2 видно, что стоксов сдвиг аналогичных линий в матрице толуола немного больше, чем в матрице гептана; следовательно, взаимодействие с матрицей толуола более значительное.

На рис. 1 представлены спектры флуоресценции $C_{60/70}$ в толуоловой и гептановой матрицах при концентрации 10^{-6} моль/л. При данной концентрации в толуоловой матрице проявляются пять спектральных линий. Линии с длинами 678.12, 676.66 и 674.25 нм присутствуют в спектрах обеих матриц и при различных концентрациях; следовательно, они принадлежат молекулам фуллеренов, а не молекулам растворителя.

Исследуемая область включает линии, совпадающие по энергии с линиями спектра поглощения, что позволяет говорить об электронных синглет-синглетных переходах [14]. Природа нестабильных линии 680.50 и 680.14 нм остается неясной. Установлено, что эти линии не принадлежат спектру чистого толуола и не являются тепловыми шумами ПЗС-матрицы, они появляются при взаимодействии $C_{60/70}$ в твердом

Таблица 2 / Table 2

Характеристики полос спектра флуоресценции фуллерена $C_{60/70}$ в матрицах гептана и толуола в диапазоне 673–682 нм

Characteristics of the fluorescence spectrum bands of fullerene $C_{60/70}$ in heptane and toluene matrices in the range of 673–682 nm

Концентрация / Concentration	Гептан / Heptane			Толуол / Toluene		
	Длина волны, нм / Wavelength, nm	Интенсивность / Intensity	Ширина линии, нм / Stokes shift, nm	Длина волны, нм / Wavelength, nm	Интенсивность / Intensity	Ширина линии, нм / Stokes shift, nm
10^{-4}	678.09 676.65	1159 1179	313.09 311.65	678.39 676.86	1115 1095	313.39 311.86
10^{-5}	– – 678.11 676.66	– – 1155 1175	– – 313.11 311.66	680.51 680.13 678.40 676.85	1039 1048 1075 1090	315.51 315.13 313.40 311.85
10^{-6}	– – 678.12 676.66 674.25	– – 1152 1173 848	– – 313.12 311.66 309.25	680.50 680.14 678.42 676.87 674.31	902 906 1055 1086 866	315.50 315.14 313,42 311.87 309.31
10^{-7}	678.12 676,65 674.24	1047 1092 834	313.12 311,65 309.26	678.38 676.77 674.32	1037 1037 912	313.38 311.77 309.32
10^{-8}	678.11 676.66 674.26	1019 1040 829	313,11 311.66 309.24	678.42 676.77 674.33	992 957 907	313.42 311.77 309.33

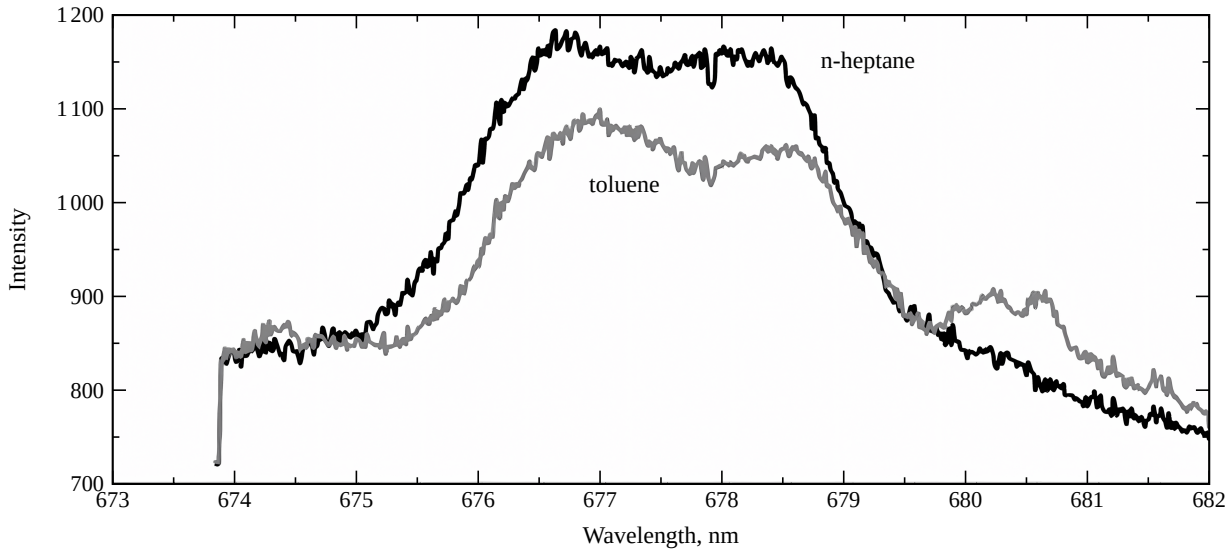


Рис. 1. Спектр флуоресценции $C_{60/70}$ в матрицах толуола и гептана в дипазоне 673–682 нм (интенсивность обозначена в условных единицах)

Fig. 1. Fluorescence spectra of $C_{60/70}$ in toluene and heptane matrices in the range of 673–682 nm (intensity is indicated in arbitrary units)

растворе с толуолом. Данные линии встречаются в спектре флуоресценции чистого фуллерена C_{70}, но только в толуоловой матрице и только при двух концентрациях, поэтому идентифицировать их как моды C_{70} неубедительно. Эти линии не принадлежат случайным агрегатам, так как воспроизводимы при различных концентрациях. Появлению линий 680.50 и 680.14 нм в спектре может способствовать несколько причин. Молекулы фуллеренов в отличие от молекул матриц являются объемными образованиями, что обусловливает окружение активационной молекулы

несколькими молекулами матрицы. В случае толуола, который проявляет меньшую симметрию молекул по сравнению с гептаном, увеличивается число неэквивалентных положений и возможных деформаций внедренной молекулы внутри матричного окружения.

Исследуемое соединение $C_{60/70}$ состоит из молекул двух сортов: C_{60} и C_{70}, которые, обладая различными поляризационными и структурными свойствами, также проявляют неодинаковую способность к интеграции в кристаллическую решетку растворителя [15]. Такое структурное разнообразие способствует возникновению новых спектральных линий или полос. Еще одним существенным отличием рассматриваемых матриц является отсутствие π-электронной подсистемы в гептановой матрице при ее наличии в толуоловой. Благодаря π-электронам в молекулах фуллеренов молекулы могут приобретать небольшие дипольные моменты, что способствует усилению межмолекулярных взаимодействий активатора и кристаллической матрицы и, как следствие, появлению экситонных линий [16]. Авторы [7] считают, что наблюдаемые особенности в длинноволновой области видимого диапазона для C_{60} и C_{70} связаны с экситонными эффектами, которые проявляются быстрее в поляризованных молекулах. Нельзя пренебречь возможностью возникновения эксимеров и экзиплексов, которые тоже могут давать кратковременную люминесценцию.

Спектры флуоресценции соединения $C_{60/70}$, стабилизированного в толуоловой и гептановой матрицах при концентрации 10^{-6} моль/л в диапазоне 650–661 нм, представлены на рис. 2. Можно заметить, что для полос 651.51 нм (15349 $см^{-1}$) и 654.48 нм (15279 $см^{-1}$), наблюдаются сравнительно схожие значения интенсивности в обеих матрицах, составляющие 955 и 873 усл. ед. соответственно. В то же время интенсивности линий при длинах волн 656.55 нм (15231 $см^{-1}$) и 658.24 нм (15192 $см^{-1}$) составляют 1338 и 1426 усл. ед. в матрице толуола, что значительно превосходит аналогичные показатели в гептане – 1076 и 1116 усл. ед. Это указывает на более выраженную флуоресцентную активность молекул фуллеренов в толуоловой матрице. Полученные данные позволяют судить о различиях в межмолекулярных взаимодействиях внедренных молекул с окружающей их кристаллической средой.

При сравнении спектров флуоресценции соединения $C_{60/70}$ в двух матрицах при различных концентрациях выделяются по три стабильные линии в каждом исследуемом диапазоне, которые можно считать проявлениями синглет-синглетных переходов, так как фосфоресценция в данном диапазоне не обнаружена. Поглощая квант внешнего излучения с энергией 3.392 эВ, молекулы фуллеренов C_{60} и C_{70} в данном со-

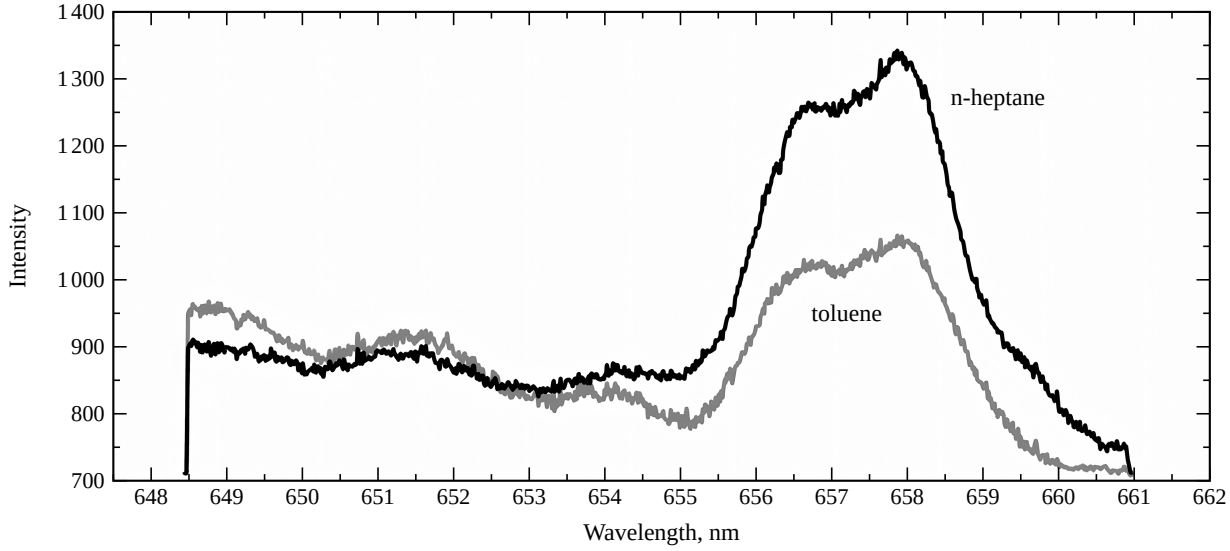


Рис. 2. Спектр флуоресценции $C_{60/70}$ в матрицах толуола и гептана в дипазоне 650–661 нм (интенсивность обозначена в условных единицах)

Fig. 2. Fluorescence spectra of $C_{60/70}$ in toluene and heptane matrices in the range of 650–661 nm (intensity is indicated in arbitrary units)

единении переизлучают кванты с энергиями: $E_1 = 1.826$, $E_2 = 1.829$ и $E_3 = 1.836$ эВ – в диапазоне 673–682 нм; $E_1 = 1.881$, $E_2 = 1.884$, $E_3 = 1.891$ эВ – в диапазоне 650–661 нм. Разность энергий между возбужденными состояниями E_1, E_2, E_3 в обоих диапазонах одинакова:

$$E_2 - E_1 = 0.003,\ E_3 - E_1 = 0.01,\ E_3 - E_2 = 0.007 \text{ эВ}.$$

Можно предположить, что получены два спектральных мультиплета [17].

Заключение

В рамках выполненного исследования удалось получить спектры флуоресценции фуллеренного соединения $C_{60/70}$ в двух кристаллических матрицах – в гептане и толуоле – при температуре жидкого азота. Применение высокочувствительной ПЗС-линейки TCD1304DG позволило определить спектральные полосы шириной 4–13 $см^{-1}$ на участке в 35 нм длинноволнового видимого диапазона. Самыми информативными оказались спектры флуоресценции растворов с концентрациями 10^{-5} – 10^{-6} моль/л. Установлено, что при соблюдении равных условий в обеих матрицах проявляются три стабильные линии. В спектре флуоресценции толуоловой матрицы периодически возникают линии 680.50 и 680.14 нм, происхождение которых остается неясным. Возможно, появление этих линий связано с множеством неэквивалентных положений молекул фуллеренов в кристаллической решетке толуола. Возможно, наличие π-электронной подсистемы как у молекул смеси, так и молекул толуола, способствует появлению дополнительных экситонных и эксимерных эффектов. Результаты эксперимента подчеркивают важность учета структурных особенностей и межмолекулярных взаимодействий матрицы и встроенной молекулы для формирования квазилинейчатого спектра флуоресценции.

Список литературы

1. *Шпилевский М. Е., Шпилевский Е. М., Стельмах В. Ф.* Фуллерены и фуллереноподобные структуры – основа перспективных материалов // Инженерно-физический журнал. 2001. Т. 74, № 6. С. 106–112.
2. *Елецкий А. В., Смирнов Б. М.* Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 9. С. 977–1009. https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199509a.0977
3. *Тен Г. Н.* Об усилении интенсивности спектров поглощения фуллерена С60 в длинноволновой области // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, вып. 3. С. 400–404. https://doi.org/10.61011/JTF.2024.03.57377.313-23, EDN: RPCTNF
4. *Павлович В. С., Шпилевский Е. М.* Спектры поглощения и флуоресценции концентрированных растворов фуллерена С60 в гексане и полистироле при 77–300 K // Журнал прикладной спектроскопии. 2010. Т. 77, № 3. С. 362–369. EDN: LPADCX
5. *Mikheev I. V., Verkhovskii V. A., Byvsheva S. M., Volkov D. S., Proskurnin M. A., Ivanov V. K.* Simultaneous quantification of fullerenes C60 and C70 in organic solvents by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy // Inorganics. 2023. Vol. 11, no. 4. Art. 136. https://doi.org/10.3390/inorganics11040136
6. *Saito S., Oshiyama A.* Cohesive Mechanism and Energy Bands of Solid C60 // Physical Review Letters. 1991. Vol. 66, no. 20. P. 2637–2640. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.2637
7. *Макарова Т. Л., Захарова И. Б.* Электронная структура фуллеренов и фуллеритов : учебное пособие. СПб. : Наука, 2001. 68 с.
8. *Никитина Ю. Н., Зотова А. В., Ягафарова З. А.* Структура и физические свойства фуллерена С60 // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 2. С. 37–39. URL: https://e-koncept.ru/2017/570009.htm (дата обращения: 03.07.2026).
9. *Глухова О. Е., Жбанов А. И.* Равновесное состояние нанокластеров С60, С70, С72 и локальные дефекты молекулярного остова // Физика твердого тела. 2003. Т. 45, вып. 1. С. 180–186.
10. *Лобанов Б. В., Мурзашев А. И.* Электронные и оптические свойства фуллерена С70 в рамках концепции сильно коррелированного состояния // Физика твердого тела. 2017. Т. 59, № 2. С. 409–413. https://doi.org/10.21883/FTT.2017.02.44071.474, EDN: YKTGUF
11. *Вайсбергер А., Проскауэр Э., Риддик Дж., Тупс Э.* Органические растворители. Физические свойства и методы очистки : справочник. М. : Изд-во иностранной литературы, 1958. 519 с.
12. Модуль автоматизации спектрального анализа для спектрографа ИСП-51. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2017616306. Российская Федерация. Заявлено 07.05.2019: опубликовано 19.05.2019, Бюл. № 6 / Автор: *Антонов Антон Анатольевич* (RU); правообладатель: ФГБОУ ВО Благовещенский государственный педагогический университет (RU).
13. *Нурмухаметов Р. Н.* Электронные спектры поглощения и люминесценции ароматических полициклических углеводородов // Успехи химии. 1966. Т. 35, № 6. С. 1129–1159. https://doi.org/10.1070/RC1966v035n06ABEH001489
14. *Разбирин Б. С., Старухин А. Н., Чугреев А. В., Нельсон Д. К., Грушко Ю. С., Колесник С. Н., Згонник В. Н., Виноградова Л. В., Федорова Л. А.* Тонкая структура электронно-колебательного спектра молекул фуллерена С60 и его производных // Физика твердого тела. 1996. Т. 38, № 3. С. 943–947.
15. *Кирчанов В. С.* Наноматериалы и нанотехнологии : учебное пособие. Пермь : Изд-во Пермского на-



ционального исследовательского политехнического университета, 2016. 193 с.

16. *Макарова Т. Л.* Электрические и оптические свойства мономерных и полимеризованных фуллеренов // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, № 3. С. 257–293. EDN: RYPBHP
17. *Толкачев В. А.* Определение частоты чисто электронного перехода из спектров оптической активности // Журнал прикладной спектроскопии. 2020. Т. 87, № 3. С. 499–504. EDN: YYQXVT

References

1. Shpilevsky M. E., Shpilevsky E. M., Stelmakh V. F. Fullerenes and fullerene-like structures: The Basis for promising materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, pp. 1499–1508. https://doi.org/10.1023/A:1013916904045
2. Eletskii A. V., Smirnov B. M. Fullerenes and carbon structures. *Physics-Uspekhi*, 1995, vol. 38, no. 9, pp. 935–964. https://doi.org/10.1070/PU1995v038n09ABEH000103
3. Ten G. N. On amplification of intensity of absorption spectra of fullerene C60 in long-wave region. *Technical Physics*, 2024, vol. 94, iss. 3, pp. 400–404 (in Russian). https://doi.org/10.61011/JTF.2024.03.57377.313-23, EDN: RPCTNF
4. Pavlovich V. S., Shpilevsky E. M. Absorption and fluorescence spectra of C60 fullerene concentrated solutions in hexane and polystyrene at 77–300 K. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 77, pp. 335–342. https://doi.org/10.1007/s10812-010-9336-2
5. Mikheev I. V., Verkhovskii V. A., Byvsheva S. M., Volkov D. S., Proskurnin M. A., Ivanov V. K. Simultaneous quantification of fullerenes C60 and C70 in organic solvents by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. *Inorganics*, 2023, vol. 11, no. 4, art.136. https://doi.org/10.3390/inorganics11040136
6. Saito S., Oshiyama A. Cohesive mechanism and energy bands of solid C60. *Physical Review Letters*, 1991, vol. 66, no. 20, pp. 2637–2640. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.66.2637
7. Makarova T. L., Zakharova I. B. *Elektronnaya struktura fullerenov i fulleritov* [Electronic structure of fullerenes and fullerites]. St. Petersburg, Nauka, 2001. 68 p. (in Russian).
8. Nikitina Yu. N., Zotova A. V., Yagafarova Z. A. Structure and physical properties of fullerene C60. *Nauchno-metodicheskii elektronnj zhurnal "Kontsept"* [Scientific and Methodological Electronic Journal "Concept"], 2017, vol. 2, pp. 37–39 (in Russian). Available at: https://e-koncept.ru/2017/570009.htm (accessed July 3, 2026).
9. Glukhova O. E., Zhbanov A. I. Equilibrium state of C_{60}, C_{70}, and C_{72} nanoclusters and local defects of the molecular skeleton. *Solid State Phys.*, 2003, vol. 45, pp. 189–196. https://doi.org/10.1134/1.1537434
10. Lobanov B. V., Murzashev A. I. Electron and optical properties of fullerene C70 within the conception of a strongly correlated state. *Solid State Physic*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 423–427. https://doi.org/10.1134/S1063783417020159
11. *Organic solvents. Physical properties and methods of purification*. On the basis of the lst ed. by A. Weissberger and E. S. Proskauer. Compl. revised 2nd ed. by J. A. Riddick and E. E. Toops. New York, London, Interscience, 1955. 1041 p.
12. *Automation module for spectral analysis for the ISP-51 spectrograph. Certificate of state registration of the computer program RU 2017616306*. Russian Federation. Declared 07.05.2019: published 19.05.2019, Bulletin No. 6/Author: Anton A. Antonov (RU); copyright holder: Blagoveshchensk State Pedagogical University (RU) (in Russian).
13. Nurmukhametov R. N. Electronic absorption and luminescence spectra of aromatic polycyclic hydrocarbons. *Russian Chemical Reviews*, 1966, vol. 35, no. 6, pp. 469–486. https://doi.org/10.1070/RC1966v035n06ABEH001489
14. Razbirin B. S., Starukhin A. N., Chugreev A. V., Nelson D. K., Grushko Yu. S., Kolesnik S. N., Zgonnik V. N., Vinogradova L. V., Fedorova L. A. Fine structure of the electron-vibrational spectrum of C60 fullerene molecules and its derivatives. *Solid State Physics*, 1996, vol. 38, no. 3, pp. 943–947 (in Russian).
15. Kirchanov V. S. *Nanomaterialy i nanotekhnologii: uchebnoe posobie* [Nanomaterials and Nanotechnologies: A Textbook]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2016. 193 p. (in Russian).
16. Makarova T. L. Electrical and optical properties of pristine and polymerized fullerenes. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 243–278. https://doi.org/10.1134/1.1356145
17. Tolkachev V. A. Determining the frequency of a purely electronic transition from optical activity spectra. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, vol. 87, no. 3, pp. 525–530. https://doi.org/10.1007/s10812-020-01034-x

Поступила в редакцию 06.04.2026; одобрена после рецензирования 13.06.2026;
принята к публикации 17.06.2026; опубликована 30.09.2026

The article was submitted 06.04.2026; approved after reviewing 13.06.2026;
accepted for publication 17.06.2026; published 30.09.2026