

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1047-1057

УДК 538.958

Фотофизические, оптические и люминесцентные характеристики гетероциклически замещенных кумаринов и их применение в OLED-устройствах

Анна Владимировна Осадченко^{1✉}, Сергей Александрович Амброзевич²,
Иван Александрович Захарчук³, Андрей Александрович Ващенко⁴,
Даниил Саюзович Дайбаге⁵, Леонид Игоревич Кармазин⁶,
Дмитрий Андреевич Чепцов⁷, Валерий Федорович Травень⁸,
Алина Романовна Слюсаренко⁹, Александр Сергеевич Селюков¹⁰

^{1,2,3,4,5,6,10} Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация

^{7,8,9} Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация

¹⁰ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

^{1,10} Российский технологический университет МИРЭА, Москва, 119454, Российская Федерация

¹⁰ Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва, 125190, Российская Федерация

¹ anna.vl.osadchenko@gmail.com[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ zakharchukwork@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁴ vashchenkoaaa@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2084-590>

⁵ daibagya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

⁶ leokarm64@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3066-3474>

⁷ dchepcov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>

⁸ valerii.traven@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>

⁹ alilisha.2006@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6868-2503>

¹⁰ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Аннотация

Введение. Развитие органической электроники стимулирует поиск новых материалов. Приоритетной задачей является нахождение соединений, обладающих высокой яркостью, эффективностью и стабильностью свечения. Кумариновые производные рассматриваются как перспективные кандидаты для решения этой задачи. Представлены результаты исследования органических светоизлучающих диодов (Organic Light-Emitting Diode, OLED), в эмиссионном слое которых использован ряд кумариновых красителей с выраженными донорно-акцепторными свойствами. Исследовано влияние структуры синтезированных молекул на фотофизические характеристики, а также на эффективность излучения светодиодов на их основе. **Метод.** Синтезирована серия органических соединений кумаринового ряда: (Е)-3-(3-(антрацен-9-ил)акрилоил)кумарин (соединение 1), 4-гидрокси-3-(5-(4-метоксифенил)-1-(п-толил)-4,5-дигидро-1Н-пиразол-3-ил)кумарин (соединение 2), 3-(1-ацетил-5-(4-метоксифенил)-4,5-дигидро-1Н-пиразол-3-ил)-4-гидроксикумарин (соединение 3), этил 7-(диэтиламино)кумарин-3-карбоксилат (соединение 4), а также известный лазерный краситель Кумарин 6 (3-(бензо[d]тиазол-2-ил)-7-(диэтиламино)кумарин) (соединение Соu), используемый в качестве эталонного соединения. Светодиоды были изготовлены методом термического напыления в вакууме и методом центрифугирования. Исследование спектров флуоресценции и электролюминесценции проводилось при помощи спектрометра Ocean Optics Maya 200 PRO. Для получения кривых затухания люминесценции применен фотоэлектронный умножитель PicoQuant PMA-C 192-N-M. **Основные результаты.** Показано, что спектральные данные (поглощение, фотолюминесценция), а также время-разрешенные измерения (время затухания флуоресценции) указывают на ключевую роль донорно-акцепторных взаимодействий, а также пространственных

© Осадченко А.В., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Ващенко А.А., Дайбаге Д.С., Кармазин Л.И., Чепцов Д.А., Травень В.Ф., Слюсаренко А.Р., Селюков А.С., 2025

эффектов в формировании электронных переходов. Вольт-амперные характеристики подтвердили наличие режимов проводимости, ограниченной пространственным зарядом, и проводимости, ограниченной процессами захвата носителей. Изучение вольт-яркостных характеристик показало, что соединение 2 демонстрирует яркость, сопоставимую с соединением Со₂, что делает его наиболее перспективным для дальнейшей оптимизации органических светоизлучающих диодов. Обнаружено, что соединение 4 в составе светодиода обеспечивает белое излучение с координатами цветности, близкими к дневному свету, что делает потенциально возможным его практическое применение в осветительных системах. **Обсуждение.** Полученные данные подтверждают влияние донорно-акцепторных взаимодействий на свойства кумаринов. Степень сопряжения донорных и акцепторных фрагментов напрямую определяют спектральные сдвиги в спектрах поглощения и флуоресценции. Высокая яркость светодиодов на основе соединения 2, сопоставимая с соединением Со₂, обусловлена его эффективной донорно-акцепторной системой, оптимизирующей внутримолекулярный перенос заряда и понижающей вероятность безызлучательных переходов. Напротив, ацетильная группа в соединении 3 нарушает конъюгацию, приводя к низкой яркости и малому времени жизни флуоресценции (1,7 нс) из-за безызлучательной релаксации. Способность соединения 4 обеспечивать в диодах белое излучение (цветовая температура около 6410 К, близка к дневному свету) связана с вкладом электронного транспортного слоя в спектр излучения.

Ключевые слова

фотолюминесценция, электролюминесценция, органические светоизлучающие диоды, кумариновые красители, взаимосвязь структура-свойства

Ссылка для цитирования: Осадченко А.В., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Вашенко А.А., Дайбаге Д.С., Кармазин Л.И., Чепцов Д.А., Травень В.Ф., Слюсаренко А.Р., Селюков А.С. Фотофизические, оптические и люминесцентные характеристики гетероциклически замещенных кумаринов и их применение в OLED-устройствах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1047–1057. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1047-1057

Photophysical, optical and luminescent characteristics of heterocyclic-substituted coumarins and their application in OLED-devices

Anna V. Osadchenko^{1✉}, Sergey A. Ambrozevich², Ivan A. Zakharchuk³, Andrey A. Vashchenko⁴, Daniil S. Daibagya⁵, Leonid I. Karmazin⁶, Dmitry A. Cheptsov⁷, Valery F. Traven⁸, Alina R. Slyusarenko⁹, Alexandr S. Selyukov¹⁰

^{1,2,3,4,5,6,10} Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

^{7,8,9} Mendeleeev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation

¹⁰ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

^{1,10} Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation

¹⁰ All Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation

¹ anna.vl.osadchenko@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>

² s.ambrozevich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>

³ zakharchukwork@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>

⁴ vashchenkoaa@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2084-590>

⁵ daibagya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>

⁶ leokarm64@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-3066-3474>

⁷ dcheptsov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>

⁸ valerii.traven@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>

⁹ alilisha.2006@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6868-2503>

¹⁰ selyukov@lebedev.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>

Abstract

The development of organic electronics stimulates the search for new materials. The priority task is to find compounds with high brightness, efficiency and stability of luminescence. Coumarin derivatives are considered as promising candidates for solving this problem. This paper presents the results of a study of organic light-emitting diodes in the emission layer of which a number of coumarin dyes with pronounced donor-acceptor properties are used. The aim of the study was to identify the influence of the structure of synthesized molecules on the photophysical characteristics as well as on the emission efficiency of LEDs based on them. A series of organic compounds of the coumarin series has been synthesized: (E)-3-(3-(anthracene-9-yl)acryloyl)coumarin (compound 1), 4-hydroxy-3-(5-(4-methoxyphenyl)-1-(p-tolyl)-4,5-dihydro-1H-pyrazol-3-yl)coumarin (compound 2), 3-(1-acetyl-5-(4-methoxyphenyl)-4,5-dihydro-1H-pyrazol-3-yl)-4-hydroxycoumarin (compound 3), ethyl 7-(diethylamino)Coumarin-3-carboxylate (compound 4) as well as the well-known laser dye Coumarin 6 (3-(benzo[d]thiazole-2-yl)-7-(diethylamino)coumarin) used as a reference compound. The LEDs were produced by vacuum thermal spraying and spin-coating. The fluorescence and electroluminescence spectra were studied using an Ocean Optics Maya 200 PRO spectrometer. A photomultiplier was used to obtain the luminescence decay curves, PicoQuant PMA-C 192-N-M. Spectral data (absorption, photoluminescence) as well as time-resolved measurements (fluorescence attenuation time) indicate the key role of donor-acceptor interactions as well as spatial effects in the formation of electronic transitions. The current-voltage characteristics confirmed the presence of conduction modes limited by spatial charge and conduction limited by carrier capture processes. The study of the voltage-brightness characteristics showed that compound 2 demonstrates brightness comparable to the reference compound Coumarin 6, which makes it the most promising for further optimization of organic light-emitting diodes.

In addition, it is shown that compound 4 in the device provides white emission with chromaticity coordinates close to daylight, which makes it potentially possible for practical use in lighting systems. The data obtained confirm the influence of donor-acceptor interactions on the properties of coumarins. The degree of conjugation of donor and acceptor fragments is directly determined by spectral shifts in the absorption and fluorescence spectra. The high brightness of compound 2-based diodes, comparable to the Cou standard, is due to its efficient donor-acceptor system which optimizes intramolecular charge transfer and increases the likelihood of radiative transitions (long lifetime of the excited state 3.5 ns). On the contrary, the acetyl group in compound 3 disrupts conjugation, leading to low brightness and short fluorescence lifetime (1.7 ns) due to nonradiative relaxation. The ability of compound 4 to provide white radiation in diodes (correlated color temperature 6410 K, close to daylight) is related to the contribution of the electron transport layer to the emission spectrum.

Keywords

photoluminescence, electroluminescence, organic light emitting diodes, coumarin dyes, structure-properties relationship

For citation: Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibagya D.S., Karmazin L.I., Cheptsov D.A., Traven V.F., Slyusarenko A.R., Selyukov A.S. Photophysical, optical and luminescent characteristics of heterocyclic-substituted coumarins and their application in OLED-devices. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1047–1057 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1047-1057

Введение

Современные технологии предъявляют высокие требования к энергоэффективности и экологической безопасности источников освещения и средств отображения информации. В этом контексте органические светоизлучающие диоды (Organic Light-Emitting Diode, OLED) [1–6] представляют собой одно из наиболее перспективных направлений, предлагая существенные преимущества по сравнению с традиционными источниками света, такими как лампы накаливания и люминесцентные лампы. OLED отличаются высокой энергоэффективностью, компактностью, гибкостью и большим углом обзора экранов на их основе, что не только снижает энергопотребление, но и позволяет создавать дисплеи для различных электронных устройств. Кроме того, в отличие от жидкокристаллических экранов, OLED-дисплеи обеспечивают глубокий черный цвет благодаря возможности полного отключения отдельных пикселей, что существенно повышает контрастность изображения. Дополнительными преимуществами являются отсутствие токсичных компонентов, характерных для люминесцентных ламп, а также возможность изготовления гибких и изогнутых панелей, что расширяет как дизайнерские, так и технологические возможности их применения.

Несмотря на достигнутый прогресс, исследования в области OLED продолжают как с целью создания более эффективных эмиттеров, так и с целью повышения энергоэффективности устройств на их основе, увеличения срока службы таких устройств и улучшения качества цветопередачи. Одним из направлений является применение металлогалогеновых перовскитов (PeLED) в качестве излучающего слоя. В составе светодиодов эти материалы демонстрируют выдающуюся внешнюю квантовую эффективность, достигающую более 20 % для красного [7–9] и около 10 % для синего и зеленого излучений [10–12], а также обеспечивают высокую насыщенность создаваемых цветов за счет узких линий излучения и возможности точной регулировки спектральных характеристик. Помимо этого, значение для внутреннего квантового выхода люминесценции приближается к теоретическому максимуму [7, 9]. Однако широкое применение PeLED ограниче-

но такими факторами, как токсичность, низкая стабильность при воздействии влаги и кислорода, а также сложности в обеспечении длительного срока службы устройств [13–15].

Для преодоления указанных ограничений и повышения эффективности OLED активно исследуются новые классы органических материалов, способных эффективно преобразовывать электрическую энергию в световое излучение. Особое внимание уделяется соединениям кумарина — ряду ароматических соединений, характеризующихся высоким квантовым выходом флуоресценции, значительным стоксовым сдвигом и стабильностью излучения [16–19]. Фотофизические свойства производных кумарина тесно связаны с их молекулярной структурой и степенью сопряжения с донором или акцептором электронов, присоединенным к кумариновому ядру [20]. Гибкость в модификации молекулярной структуры кумаринов позволяет тонко настраивать их оптические и электронные свойства, что делает их перспективными для использования в излучающих слоях OLED. Оптимизация фотофизических характеристик кумаринов также способствует повышению эффективности и долговечности светодиодных устройств.

В настоящей работе представлены исследования OLED, основанных на эмиттерах кумаринового ряда. Проведен анализ влияния молекулярной структуры соединений на фотофизические характеристики люминофоров, а также электролюминесцентные и электрофизические характеристики светодиодов на их основе.

Методика проведения эксперимента

В качестве объектов исследования были рассмотрены следующие материалы: (Е)-3-(3-(антрацен-9-ил)акрилоил)кумарин (соединение 1, рис. 1, а); 4-гидрокси-3-(5-(4-метоксифенил)-1-(п-толил)-4,5-дигидро-1Н-пиразол-3-ил)кумарин (соединение 2, рис. 1, б), 3-(1-ацетил-5-(4-метоксифенил)-4,5-дигидро-1Н-пиразол-3-ил)-4-гидроксикумарин (соединение 3, рис. 1, с), этил 7-(диэтиламино)кумарин-3-карбоксилат (соединение 4, рис. 1, d), 3-(бензо[d]тиазол-2-ил)-7-(диэтиламино)кумарин (соединение Cou, рис. 1, e) — лазерный краситель Кумарин 6.

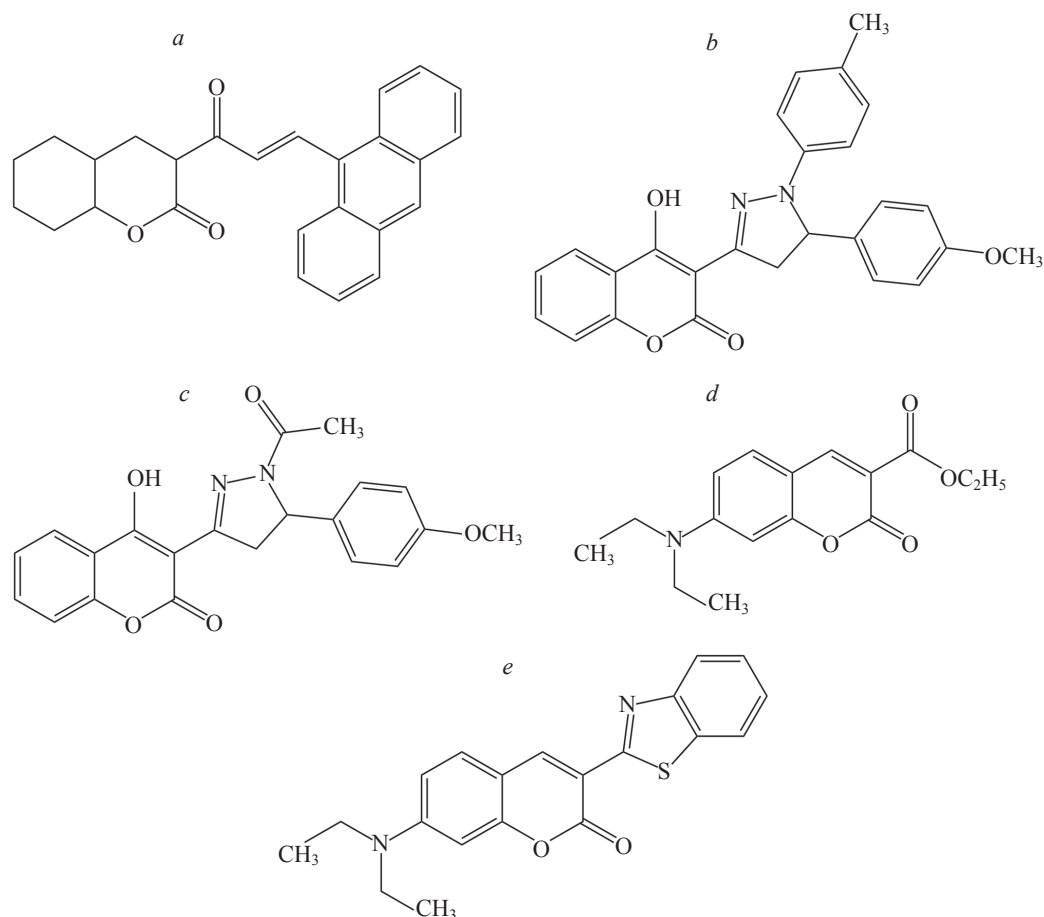


Рис. 1. Структуры исследуемых химических соединений: соединение 1 (a); соединение 2 (b); соединение 3 (c); соединение 4 (d); соединение Cou (e)

Fig. 1. The structures of the studied chemical compounds: compound 1 (a); compound 2 (b); compound 3 (c); compound 4 (d); compound Cou (e)

Синтез соединений 1–4 и Cou осуществлялся по методикам, описанным в работах [21–25].

Спектры поглощения были получены с помощью спектрофотометра PerkinElmer LAMBDA 45 с рабочим диапазоном длин волн 190–1100 нм для растворов исследуемых соединений в толуоле с концентрацией порядка 2,5 мг/л. Спектры флуоресценции были получены для растворов соединений в толуоле с концентрацией около 1 мг/л. Измерения спектров фото- и электролюминесценции проводились при помощи спектрометра OceanOptics Maya 2000 Pro, чувствительного в диапазоне 200–1100 нм. Кривые затухания люминесценции были получены при помощи фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) PicoQuant PMA-C 192-N-M, чувствительного от 250 до 850 нм, работающего в режиме счета одиночных фотонов. ФЭУ был подключен к плате счета одиночных фотонов PicoQuant TimeHarp 100. В качестве источника возбуждения использовался импульсный лазер PicoQuant LDH-C 400, излучающий на $\lambda = 405$ нм с длительностью импульсов 75 пс. При измерении спектров флуоресценции частота повторения импульсов составляла 40 МГц, а средняя мощность излучения — 5 мВт, при исследовании кривых затухания при помощи внешнего генератора задавалась частота повторения импульсов лазера 1 МГц. Измерение ха-

рактеристик OLED проводилось в перчаточном боксе, заполненном аргоном. Вольт-амперные характеристики регистрировались при помощи двух цифровых мультиметров DT 838. Вольт-яркостные характеристики были получены при помощи яркомера ТКА-ПКМ.

Создание OLED проводилось аналогично методике, описанной в работе [6]. Архитектура полученных светодиодов имела следующий вид: оксид индия-олова (ITO)/поли(3,4-этилендиокситиофен) полистирол сульфат (PEDOT:PSS)/поли[N,N'-бис(4-бутилфенил)-N,N'-бис(фенил)-бензидин] (poly-TPD)/краситель/2,2',2''-(1,3,5-бензинитрил)-трис(1-фенил-1-H-бензимидазол) (TPBi)/LiF/Al.

Результаты и их обсуждение

Для соединения 1 (рис. 2) в спектрах поглощения наблюдаются максимумы на $\lambda_{11} = 350,1$ нм, $\lambda_{12} = 367,1$ нм, $\lambda_{13} = 389,6$ нм, для соединения 2 — $\lambda_{21} = 440,1$ нм и $\lambda_{22} = 460,4$ нм, для соединения 3 — $\lambda_{31} = 358,2$ нм, $\lambda_{32} = 373,1$ нм и $\lambda_{33} = 393,0$ нм, у соединения 4 наблюдается максимум на $\lambda_4 = 412,5$ нм, а для соединения Cou — на $\lambda_{cou1} = 439,4$ нм и $\lambda_{cou2} = 459,6$ нм. Ширина полосы поглощения на полувысоте для соединения 2 составила 63 нм, для соединения 3 — 68 нм, для соединения 4 —

47 нм и для соединения Cou — 63 нм. Для соединения 1 максимумы на λ_{11} и λ_{12} обусловлены π - π^* -переходами в сопряженных бензопириновых системах. Однако максимум на λ_{13} , вероятно, возникает за счет вклада массивного антраценового фрагмента или локальных электронных переходов в кумариновом ядре [21]. Для соединения 3 основной вклад в спектр поглощения связан с кумариновым фрагментом (максимумы с λ_{31} , λ_{32}) с характерными π - π^* -переходами в сопряженных системах, причем максимум с λ_{33} , вероятно, связан с вкладом ацетильной группы, прикрепленной к пиразольному фрагменту. У спектров поглощения соединений 2, 4 и Cou наблюдается bathochromic сдвиг. Причем, у спектров поглощения соединений 4 и Cou отмечены существенные различия, несмотря на наличие у них диэтиламинной группы. Они обусловлены, в первую очередь, наличием эфирной группы у соединения 4, которая хоть и является акцептором, но гораздо более слабым, чем бензотиазол у соединения Cou [18]. Следовательно, получена большая разница в коэффициентах экстинкции исследуемых соединений. В то же время, у соединений 2 и Cou более схожий вид кривой, что обусловлено превалированием общего хромофорного фрагмента в их структурах. Однако донорно-акцепторные взаимодействия у соединения 2 в этом случае выражены гораздо слабее, по сравнению с соединением Cou, что обусловлено пиразольным фрагментом, обладающим слабыми акцепторными свойствами. Такое различие в электронном взаимодействии напрямую влияет на спектральные характеристики, включая значения молярного коэффициента экстинкции.

Спектры фотолюминесценции исследуемых соединений представлены на рис. 3. Для соединения 1 присутствует пик с максимумом на $\lambda_1 = 570$ нм, для

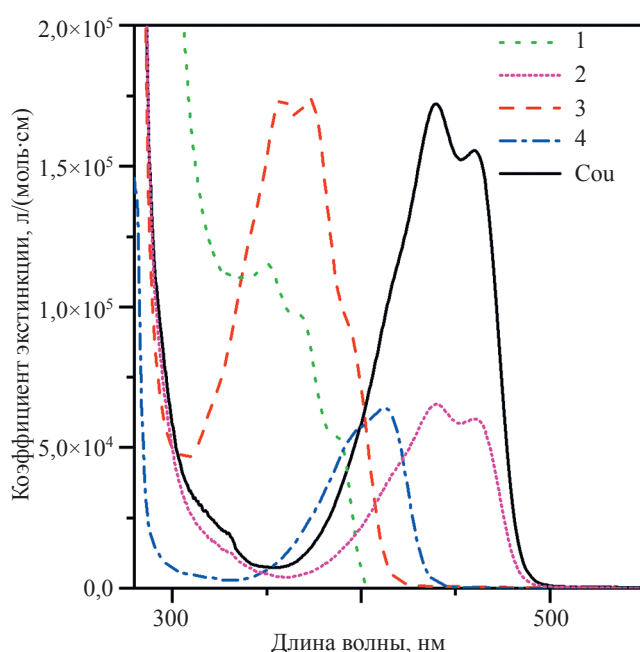


Рис. 2. Спектры поглощения исследуемых соединений 1–4 и Cou

Fig. 2. Absorption spectra of the studied compounds 1–4 and Cou

соединения 2 — на $\lambda_2 = 544$ нм, для соединения 3 — на $\lambda_{31} = 441$ нм и $\lambda_{32} = 468$ нм, для соединения 4 — на $\lambda_4 = 441$ нм, для соединения Cou — на $\lambda_{cou1} = 482$ нм и $\lambda_{cou2} = 511$ нм. Для соединения 2 Stokes сдвиг был незначительным, около 1 нм, что обусловлено жесткой структурой молекулы, у которой дипольный момент практически не меняется. Для соединения 3 сдвиг составил около 101 нм, что обусловлено наличием ацетильной группы, являющейся слабым акцептором, и пиразольного цикла, являющегося слабым донором, что приводит к реорганизации электронной плотности в возбужденном состоянии [26]. Для соединений 4 и Cou Stokes сдвиг составил — 22 нм и 28 нм, что может быть объяснено взаимодействием растворителя и красителя [27]. Для соединения 1 Stokes сдвиг оказался гораздо большим — 186 нм, что объясняется тем, что электронная плотность преимущественно локализована на антраценовом фрагменте. Наличие двух максимумов в спектре излучения соединений Cou и 3 обусловлено образованием димеров [28]. Было обнаружено, что у соединения 2, по сравнению с соединением 3, несмотря на схожую структуру молекулы, наблюдается значительный bathochromic сдвиг (около 100 нм), обусловленный вкладом ацетильной группы, которая в данном случае не усиливает, а скорее частично ограничивает эффективную конъюгацию, повышая энергию перехода [28]. Помимо этого, в спектре флуоресценции для соединения 4, по сравнению с соединением Cou, наблюдается значительный hypsochromic сдвиг (около 40 нм), что обусловлено заменой карбоксильного фрагмента на более сильный акцептор (бензотиазол), что расширяет π -систему и уменьшает энергетический зазор.

Кривые затухания флуоресценции (рис. 4) демонстрируют достаточно простое поведение. Их аппроксимация проводилась моноэкспоненциальной функцией $A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$. Природа процесса для всех трех соединений

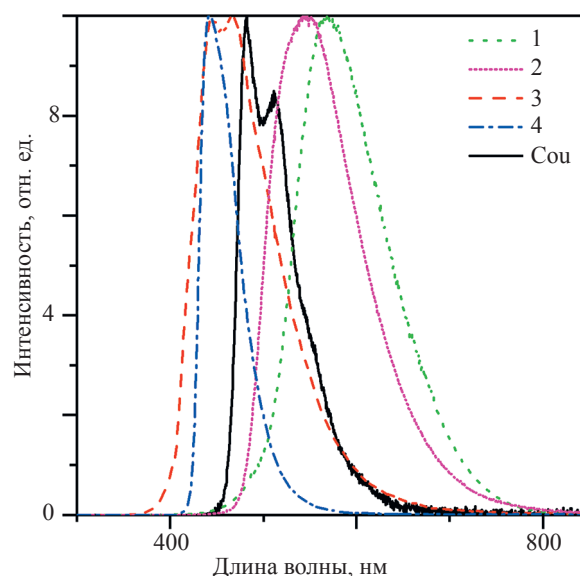


Рис. 3. Спектры флуоресценции исследуемых соединений 1–4 и Cou

Fig. 3. Fluorescence spectra of the studied compounds 1–4 and Cou

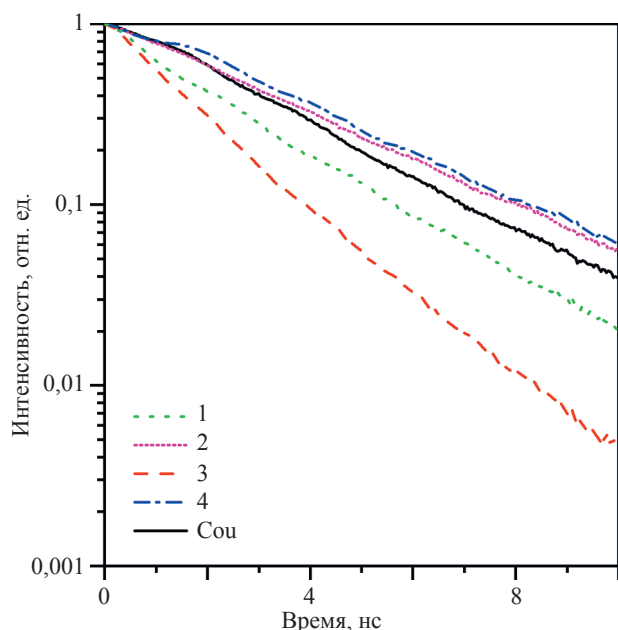


Рис. 4. Кривые затухания люминесценции исследуемых соединений 1–4 и Cou

Fig. 4. Fluorescence spectra of the studied compounds 1–4 and Cou

одна: переход $S_1 \rightarrow S_0$. Были получены характерные времена затухания люминесценции исследуемых соединений кумаринового ряда. Различия во временах затухания флуоресценции для исследуемых соединений 1–4 ($\tau_1 = 2,5$ нс, $\tau_2 = 3,5$ нс, $\tau_3 = 1,7$ нс, $\tau_4 = 3,8$ нс) и Cou ($\tau_{\text{cou}} = 3,1$ нс) объясняются балансом между излучательной (k_r) и безызлучательной (k_{nr}) релаксациями возбужденного состояния. Для соединений 1 и Cou наблюдаются характерные времена жизни флуоресценции, типичные для соединений на основе кумарина [29]. Наиболее короткое время жизни флуоресценции было выявлено для соединения 3, что обусловлено влиянием ацетильной группы. Эта группа способствует усилению процессов безызлучательной релаксации за счет делокализации π -электронной системы и повышения конформационной подвижности карбонильного фрагмента [30]. В свою очередь, самое продолжительное время жизни флуоресценции было обнаружено у соединений 4 и 2. Вероятно, это связано с жесткостью их молекулярной структуры, которая ограничивает безызлучательные процессы и способствует преобладанию излучательных переходов.

Были исследованы перспективы создания OLED-устройств на основе изученных органических соединений 1–4 и соединения Cou. Изучены спектры электролюминесценции устройств, изготовленных на основе соединений 1–4 и Cou (рис. 5, а), а также получены их вольт-амперные (рис. 5, б) и вольт-яркостные характеристики (рис. 5, в). В спектре электролюминесценции для соединения 1 наблюдается максимум с $\lambda_1 = 582$ нм, для соединения 4 — $\lambda_{41} = 464$ нм, $\lambda_{42} = 560$ нм, причем, первый из максимумов обусловлен излучением материала красителя, второй — вкладом транспортного слоя TPBi [31]. Для данных красителей наблю-

дался батохромный сдвиг максимума длины волны электролюминесценции по сравнению с их фотолюминесценцией, который составил 12–20 нм, что может быть обусловлено образованием эксиплексов [32]. Для соединения 2 максимум электролюминесценции расположен на $\lambda_2 = 544$ нм, что соответствует спектру фотолюминесценции. Для соединения 3 длина волны максимума электролюминесценции составила $\lambda_3 = 546$ нм, по сравнению со спектром фотолюминесценции наблюдается батохромный сдвиг (около 78 нм), который может быть связан с наличием гидроксигруппы [30] (для аминогрупп подобная ситуация также характерна) в составе красителя, при этом при электрическом возбуждении возникает более стабильная таутомерная форма [27], вызывающая сдвиг длины волны максимума излучения. Аналогичная ситуация наблюдается и для соединения Cou: батохромный сдвиг по отношению к фотолюминесценции составил около 100 нм, что обусловлено наличием аминогруппы в составе данного красителя [19].

Вольт-амперные характеристики исследованных OLED-устройств (рис. 5, б) описываются зависимостью вида $J \propto V^n$ [33]. Анализ кривых показал, что при напряжениях до 3 В наблюдается режим проводимости, ограниченной пространственным зарядом ($n \approx 2$, Space Charge Limited Conduction, SCLC). Подобное поведение структуры указывает на ситуацию, когда движение носителей заряда в слое ограничивается их накоплением внутри полупроводника. При более высоких напряжениях проводимость становится ограниченной процессами захвата носителей на ловушках ($n > 2$, Trap-Limited Conduction). В этом режиме рост тока с увеличением напряжения происходит быстрее, чем при SCLC, что соответствует большему показателю степени n . Были исследованы вольт-яркостные характеристики (рис. 5, в). Оказалось, что у устройств на основе соединений 1, 3 и 4 с увеличением приложенного напряжения яркость возрастает медленнее и достигает меньших значений, чем у соединения Cou. В то же время новое соединение 2 демонстрирует яркость, сопоставимую с соединением Cou, т. е. при прочих равных условиях светоотдача устройства на его основе близка к показателям эталонного материала. Соединение 2, содержащее 4-гидроксифеновый акцепторный фрагмент, сопряженный с 4-метоксифенилпиразолиновым донорным блоком, формирует эффективную систему внутримолекулярного переноса заряда, вероятно, вследствие чего происходит увеличение вероятности излучательного перехода и улучшение баланса инжекции электронов и дырок, что в совокупности приводит к высокой эффективности электролюминесценции. Напротив, OLED с соединением 3, содержащим ацетильную группу, демонстрирует существенно более низкие показатели яркости из-за нарушения π -сопряжения, что вызывает локализацию π -электронной плотности и увеличение вероятности безызлучательных переходов. В результате, сопряженные системы, такие как соединения Cou и 2, показывают максимальную эффективность электролюминесценции благодаря делокализации возбужденного состояния. С другой стороны, соединение 4 с гибким диэтиламино-фрагментом обладает повышен-

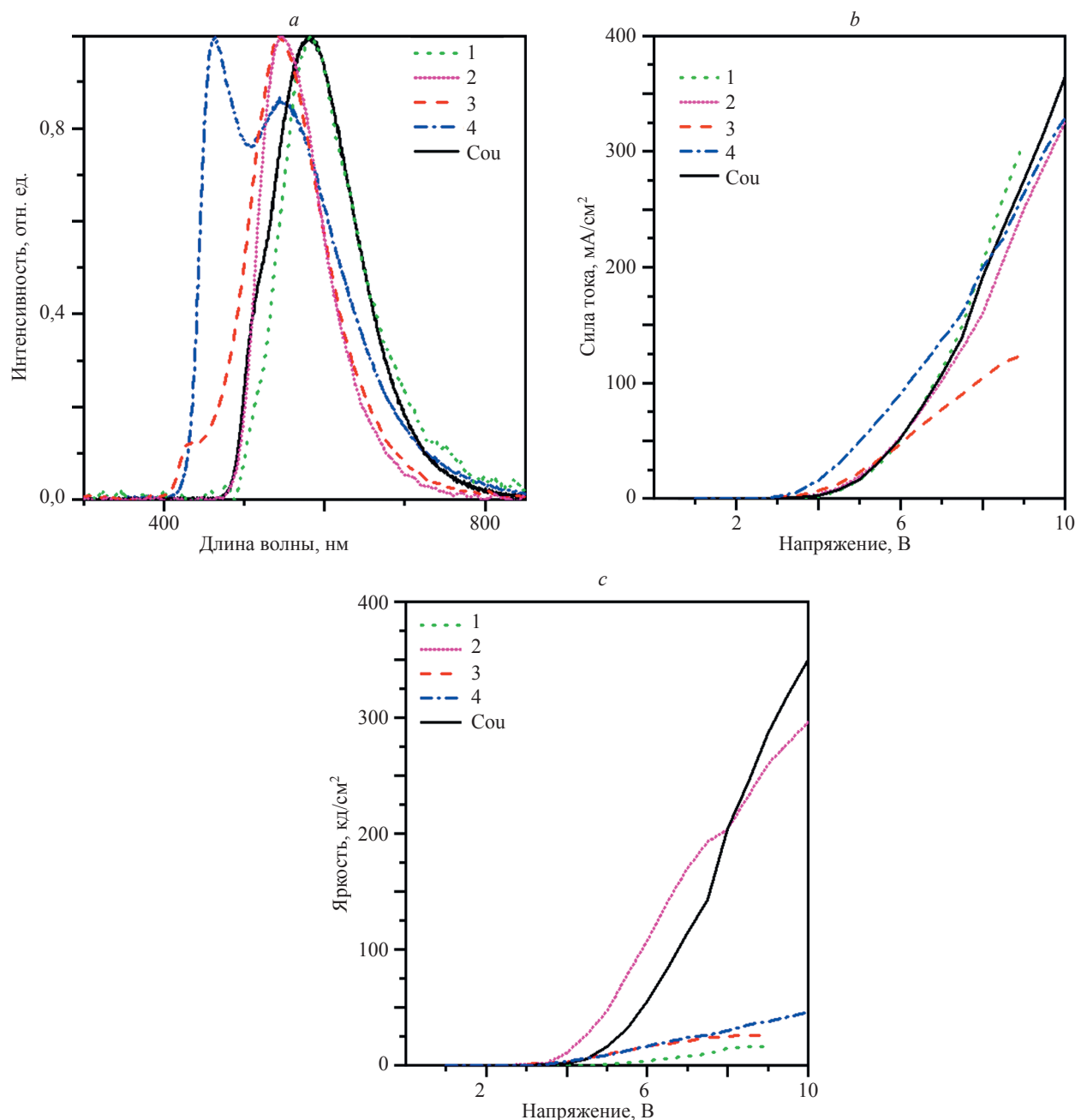


Рис. 5. Оптические и электрофизические характеристики исследуемых соединений: спектры электролюминесценции (а); вольт-амперные характеристики (b); вольт-яркостные характеристики (с)

Fig. 5. Optical and electrophysical characteristics of the studied compounds: electroluminescence spectra (a); current-voltage characteristics (b); brightness-voltage characteristics (c)

ной конформационной подвижностью, что увеличивает вероятность интеркомбинационной и внутренней конверсий, снижая тем самым квантовый выход фотолюминесценции и яркость соответствующего устройства. Стерические факторы также оказывают существенное влияние на оптоэлектронные характеристики. Кроме того, жесткая плоская структура соединения 2 минимизирует колебательные потери энергии, тогда как наличие объемных или гибких заместителей в других соединениях увеличивает конформационную энтропию молекулы. Особенно показателен в этом отношении пример соединения 1, где антраценовый фрагмент,

несмотря на свою жесткость, создает дисбаланс в транспорте зарядов, вызывая преобладание дырочной проводимости и, как следствие, сужение рекомбинационной зоны и нелинейную зависимость яркости от напряжения.

Для созданных OLED были получены координаты цветности в рамках модели CIE 1931 [34]. Устройство на основе соединения 1 излучает в оранжево-красной области спектра с высокой чистотой цвета, причем обнаружен небольшой сдвиг в сторону более теплого оттенка, в зависимости от приложенного напряжения. Для электролюминесценции соединения 2 характе-

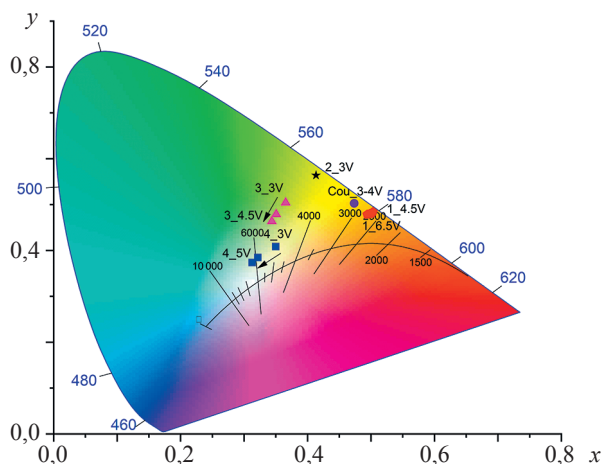


Рис. 6. Хроматическая диаграмма для исследованных соединений в зависимости от приложенных напряжений.

Для соединений: 1_4.5V–1_6.5V напряжения 4,5–6,5 В;
2_3V — 3 В; 3_3V–3_4.5V — 3–4,5 В; 4_3V–4_5V — 3–5 В;
Coe_3–4V — 3–4 В

Fig. 6. Chromatic diagram for the studied compounds depending on the applied voltages.

For compounds: 1_4.5V–1_6.5V voltages are 4.5–6.5 V;
2_3V — 3 V; 3_3V–3_4.5V — 3–4.5 V; 4_3V–4_5V — 3–5 V;
Coe_3–4V — 3–4 V

рен зелено-желтый оттенок, а излучение устройства на основе соединения 3 смещается к зелено-желтой зоне с меньшей чистотой цвета. Для OLED на основе соединения 4, в результате увеличения приложенного напряжения координаты цветности сдвигаются в область белого света на хроматической диаграмме (рис. 6). Коррелированная цветовая температура для данного устройства составила 6410 К при напряжении 4 В, что указывает на холодный оттенок белого цвета,

близкий к естественному дневному свету. Полученные результаты свидетельствуют о том, что соединение 4 является перспективным материалом для создания OLED-устройств с белым излучением. Наконец, OLED на основе соединения Coe демонстрирует теплое, насыщенно-желто-оранжевое излучение.

Закключение

Исследованы фотофизические свойства четырех производных кумарина (соединения 1–4) и проведено их сравнение с соединением Coe, а также созданы многослойные органические светоизлучающие устройства на их основе и изучены их оптические и электрофизические характеристики. Установлено, что донорно-акцепторные взаимодействия и пространственные эффекты в молекулах кумариновых производных определяют их спектральные характеристики, при этом соединение 2 с 4-гидроксихроменовым и 4-метоксифенилпиразолиновым фрагментами продемонстрировало наиболее эффективный внутримолекулярный перенос заряда, что обусловило высокую яркость светодиода на его основе, сопоставимую с соединением Coe. Анализ вольт-амперных характеристик органических светоизлучающих устройств выявил два режима проводимости — ограниченной пространственным зарядом и процессами захвата носителей. Соединение 2 продемонстрировало наилучшие электролюминесцентные характеристики, что делает его перспективным кандидатом для создания высокоэффективных светодиодов. Также заслуживает внимания светодиод на основе соединения 4, показавший белое излучение с координатами цветности, близкими к дневному свету (цветовая температура около 6400 К) за счет синергизма электролюминесценции кумаринового красителя и электронного транспортно-го слоя, что открывает возможности его применения в осветительных системах.

Литература

1. Song J., Guan Y., Wang C., Li W., Bao X., Niu L. Effect of conductive polymers PEDOT:PSS on exciton recombination and conversion in doped-type BioLEDs // *Polymers*. 2023. V. 15. N 15. P. 3275. <https://doi.org/10.3390/polym15153275>
2. Kim J., Jeon M.-G., Yun S., Kirakosyan A., Choi J. Suppressing metal cation diffusion in perovskite light-emitting diodes via blending amino acids with PEDOT:PSS // *ACS Photonics*. 2025. V. 12. N 2. P. 971–980. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.4c02027>
3. Liu R., Yu T., Su R., Zhao Y., Zhang D., Zhang S., Su W. Photo-and electroluminescent properties of V-shaped fused-biscoumarins containing tert-butyl group modified imidazole/carbazole groups // *Organic Electronics*. 2025. V. 139. P. 107208. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107208>
4. Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibagya D.S., Ryzhov A.V., et al. Organic light-emitting diodes based on Eu(III) complexes involving 1,1,1-trifluoro-4-phenyl-2,4-butanedione with ethanoic and n-butanoic acids // *Physics of Wave Phenomena*. 2025. V. 33. N 1. P. 72–77. <https://doi.org/10.3103/S1541308X24700559>
5. Jia Z., Xie X., Guo Z., Kou Z. High-CRI warm white OLEDs based on TADF-doped exciplex co-host structure enabled by efficient reverse intersystem crossing // *Organic Electronics*. 2025. V. 141. P. 107229. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107229>

References

1. Song J., Guan Y., Wang C., Li W., Bao X., Niu L. Effect of conductive polymers PEDOT:PSS on exciton recombination and conversion in doped-type BioLEDs. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 15, pp. 3275. <https://doi.org/10.3390/polym15153275>
2. Kim J., Jeon M.-G., Yun S., Kirakosyan A., Choi J. Suppressing metal cation diffusion in perovskite light-emitting diodes via blending amino acids with PEDOT:PSS. *ACS Photonics*, 2025, vol. 12, no. 2, pp. 971–980. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.4c02027>
3. Liu R., Yu T., Su R., Zhao Y., Zhang D., Zhang S., Su W. Photo-and electroluminescent properties of V-shaped fused-biscoumarins containing tert-butyl group modified imidazole/carbazole groups. *Organic Electronics*, 2025, vol. 139, pp. 107208. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107208>
4. Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibagya D.S., Ryzhov A.V., et al. Organic light-emitting diodes based on Eu(III) complexes involving 1,1,1-trifluoro-4-phenyl-2,4-butanedione with ethanoic and n-butanoic acids. *Physics of Wave Phenomena*, 2025, vol. 33, no. 1, pp. 72–77. <https://doi.org/10.3103/S1541308X24700559>
5. Jia Z., Xie X., Guo Z., Kou Z. High-CRI warm white OLEDs based on TADF-doped exciplex co-host structure enabled by efficient reverse intersystem crossing. *Organic Electronics*, 2025, vol. 141, pp. 107229. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107229>

6. Осадченко А.В., Амброзевич С.А., Захарчук И.А., Ващенко А.А., Дайбаге Д.С., Рыжов А.В., Певцов Д.Н., Певцов Н.В., Селюков А.С. Электролюминесценция новых координационных соединений ионов европия с β -дикетонами, уксусной и масляной кислотами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 4. С. 570–576. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576>
7. Cao Y., Wang N., Tian H., Guo J., Wei Y., Chen H., et al. Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures // *Nature*. 2018. V. 562. N 7726. P. 249–253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0576-2>
8. Chiba T., Hayashi Y., Ebe H., Hoshi K., Sato J., Sato S., PuY.-J., Ohisa Kido J. Anion-exchange red perovskite quantum dots with ammonium iodine salts for highly efficient light-emitting devices // *Nature Photonics*. 2018. V. 12. N 11. P. 681–687. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0260-y>
9. Lin K., Xing J., Quan L.N., de Arquer F.P.G., Gong X., Lu J., et al. Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent // *Nature*. 2018. V. 562. N 7726. P. 245–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0575-3>
10. Liu Y., Cui J., Du K., Tian H., He Z., Zhou Q., et al. Efficient blue light-emitting diodes based on quantum-confined bromide perovskite nanostructures // *Nature Photonics*. 2019. V. 13. N 11. P. 760–764. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0505-4>
11. Li C.H.A., Zhou Z., Vashishtha P., Halpert J.E. The future is blue (LEDs): why chemistry is the key to perovskite displays // *Chemistry of Materials*. 2019. V. 31. N 16. P. 6003–6032. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b01650>
12. Wang Q., Wang X., Yang Z., Zhou N., Deng Y., Zhao J., et al. Efficient sky-blue perovskite light-emitting diodes via photoluminescence enhancement // *Nature Communications*. 2019. V. 10. N 1. P. 5633. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13580-w>
13. Kang S., Jillella R., Jeong J., Park Y.-I., Pu Y.-J., Park J. Improved electroluminescence performance of perovskite light-emitting diodes by a new hole transporting polymer based on the benzocarbazole moiety // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2020. V. 12. N 46. P. 51756–51765. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16593>
14. Zhang X., Guo M., Li J., Dai T., Yang Z., Lou Z., et al. Low-voltage RGB perovskite light-emitting transistors with magnetron sputtered Ta₂O₅ high-k dielectric layer // *Organic Electronics*. 2025. V. 142. P. 107241. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107241>
15. Worku M., Ben-Akacha A., Shonde T.B., Liu H., Ma B. The past, present, and future of metal halide perovskite light-emitting diodes // *Small Science*. 2021. V. 1. N 8. P. 2000072. <https://doi.org/10.1002/smssc.202000072>
16. Yu T., Zhang P., Zhao Y., Zhang H., Meng J., Fan D., Chen L., Qiu Y. Synthesis, crystal structure and photo- and electro-luminescence of the coumarin derivatives with benzotriazole moiety // *Organic Electronics*. 2010. V. 11. N 1. P. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.09.023>
17. Zhang H., Chai H., Yu T., Zhao Y., Fan D. High-efficiency blue electroluminescence based on coumarin derivative 3-(4-(anthracen-10-yl)phenyl)-benzo[5,6]coumarin // *Journal of Fluorescence*. 2012. V. 22. N 6. P. 1509–1512. <https://doi.org/10.1007/s10895-012-1088-3>
18. Shreykar M.R., Sekar N. Stimuli-responsive luminescent coumarin thiazole hybrid dye: synthesis, aggregation induced emission, thermochromism and DFT study // *Dyes and Pigments*. 2017. V. 142. P. 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.03.028>
19. Zhang H., Liu X., Gong Y., Yu T., Zhao Y. Synthesis and characterization of SFX-based coumarin derivatives for OLEDs // *Dyes and Pigments*. 2021. V. 185. Part A. P. 108969. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108969>
20. Zhang H., Luo Q., Mao Y., Zhao Y., Yu T. Synthesis and characterization of coumarin-biphenyl derivatives as organic luminescent materials // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2017. V. 346. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.05.039>
21. Traven V.F., Cheptsov D.A., Svetlova J.I., Ivanov I.V., Cuerva C., Lodeiro C. et al. The role of the intermolecular $\pi \cdots \pi$ interactions in the luminescence behavior of novel coumarin-based pyrazoline materials // *Dyes and Pigments*. 2021. V. 186. P. 108942. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108942>
22. Traven V.F., Cheptsov D.A., Bulanova M.V., Solovjova N.P., Chibisova T.A., Dolotov S.M., Ivanov I.V., et al. On the mechanism of photodehydrogenation of aryl(hetaryl)pyrazolines in the presence
6. Osadchenko A.V., Ambrozevich S.A., Zakharchuk I.A., Vashchenko A.A., Daibagya D.S., Ryzhov A.V., Pevtsov D.N., Pevtsov N.V., Selyukov A.S. Electroluminescence of new coordination compounds of europium ions with β -diketones, acetic and butyric acids. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 570–576. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2024-24-4-570-576>
7. Cao Y., Wang N., Tian H., Guo J., Wei Y., Chen H., et al. Perovskite light-emitting diodes based on spontaneously formed submicrometre-scale structures. *Nature*, 2018, vol. 562, no. 7726, pp. 249–253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0576-2>
8. Chiba T., Hayashi Y., Ebe H., Hoshi K., Sato J., Sato S., PuY.-J., Ohisa Kido J. Anion-exchange red perovskite quantum dots with ammonium iodine salts for highly efficient light-emitting devices. *Nature Photonics*, 2018, vol. 12, no. 11, pp. 681–687. <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0260-y>
9. Lin K., Xing J., Quan L.N., de Arquer F.P.G., Gong X., Lu J., et al. Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent. *Nature*, 2018, vol. 562, no. 7726, pp. 245–248. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0575-3>
10. Liu Y., Cui J., Du K., Tian H., He Z., Zhou Q., et al. Efficient blue light-emitting diodes based on quantum-confined bromide perovskite nanostructures. *Nature Photonics*, 2019, vol. 13, no. 11, pp. 760–764. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0505-4>
11. Li C.H.A., Zhou Z., Vashishtha P., Halpert J.E. The future is blue (LEDs): why chemistry is the key to perovskite displays. *Chemistry of Materials*, 2019, vol. 31, no. 16, pp. 6003–6032. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b01650>
12. Wang Q., Wang X., Yang Z., Zhou N., Deng Y., Zhao J., et al. Efficient sky-blue perovskite light-emitting diodes via photoluminescence enhancement. *Nature Communications*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 5633. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13580-w>
13. Kang S., Jillella R., Jeong J., Park Y.-I., Pu Y.-J., Park J. Improved electroluminescence performance of perovskite light-emitting diodes by a new hole transporting polymer based on the benzocarbazole moiety. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, vol. 12, no. 46, pp. 51756–51765. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16593>
14. Zhang X., Guo M., Li J., Dai T., Yang Z., Lou Z., et al. Low-voltage RGB perovskite light-emitting transistors with magnetron sputtered Ta₂O₅ high-k dielectric layer. *Organic Electronics*, 2025, vol. 142, pp. 107241. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2025.107241>
15. Worku M., Ben-Akacha A., Shonde T.B., Liu H., Ma B. The past, present, and future of metal halide perovskite light-emitting diodes. *Small Science*, 2021, vol. 1, no. 8, pp. 2000072. <https://doi.org/10.1002/smssc.202000072>
16. Yu T., Zhang P., Zhao Y., Zhang H., Meng J., Fan D., Chen L., Qiu Y. Synthesis, crystal structure and photo- and electro-luminescence of the coumarin derivatives with benzotriazole moiety. *Organic Electronics*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2009.09.023>
17. Zhang H., Chai H., Yu T., Zhao Y., Fan D. High-efficiency blue electroluminescence based on coumarin derivative 3-(4-(anthracen-10-yl)phenyl)-benzo[5,6]coumarin. *Journal of Fluorescence*, 2012, vol. 22, no. 6, pp. 1509–1512. <https://doi.org/10.1007/s10895-012-1088-3>
18. Shreykar M.R., Sekar N. Stimuli-responsive luminescent coumarin thiazole hybrid dye: synthesis, aggregation induced emission, thermochromism and DFT study. *Dyes and Pigments*, 2017, vol. 142, pp. 121–125. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.03.028>
19. Zhang H., Liu X., Gong Y., Yu T., Zhao Y. Synthesis and characterization of SFX-based coumarin derivatives for OLEDs. *Dyes and Pigments*, 2021, vol. 185, part A, pp. 108969. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108969>
20. Zhang H., Luo Q., Mao Y., Zhao Y., Yu T. Synthesis and characterization of coumarin-biphenyl derivatives as organic luminescent materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2017, vol. 346, pp. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.05.039>
21. Traven V.F., Cheptsov D.A., Svetlova J.I., Ivanov I.V., Cuerva C., Lodeiro C. et al. The role of the intermolecular $\pi \cdots \pi$ interactions in the luminescence behavior of novel coumarin-based pyrazoline materials. *Dyes and Pigments*, 2021, vol. 186, pp. 108942. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2020.108942>
22. Traven V.F., Cheptsov D.A., Bulanova M.V., Solovjova N.P., Chibisova T.A., Dolotov S.M., Ivanov I.V., et al. On the mechanism of photodehydrogenation of aryl(hetaryl)pyrazolines in the presence

- of perchloroalkanes // *Photochemistry and Photobiology*. 2018. V. 94. N 4. P. 659–666. <https://doi.org/10.1111/php.12918>
23. Secci D., Carradori S., Bolasco A., Chimenti P., Yáñez M., Ortuso F., Alcaro S., et al. Synthesis and selective human monoamine oxidase inhibition of 3-carbonyl, 3-acyl, and 3-carboxyhydrazido coumarin derivatives // *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2011. V. 46. N 10. P. 4846–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2011.07.017>
24. Huang Z.-L., Li N., Sun Y., Wang H., Song H., Xu Z. Synthesis and structure–photophysical property relationships for two coumarinyl-based two-photon induced fluorescent molecules // *Journal of Molecular Structure*. 2003. V. 657. N 1–3. P. 343–350. [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(03\)00427-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(03)00427-7)
25. Lee S., Sivakumar K., Shin W.-S., Xie F., Wang Q. Synthesis and anti-angiogenesis activity of coumarin derivatives // *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 2006. V. 16. N 17. P. 4596–4599. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2006.06.007>
26. Shreykar M.R., Sekar N. Coumarin-pyrazole hybrid with red shifted ESIPT emission and AIE characteristics — a comprehensive study // *Journal of Fluorescence*. 2017. V. 27. N 5. P. 1687–1707. <https://doi.org/10.1007/s10895-017-2106-2>
27. Gawad S.A.A., Sakr M.A.S. Spectroscopic investigation, DFT and TD-DFT calculations of 7-(Diethylamino) Coumarin (C466) // *Journal of Molecular Structure*. 2022. V. 1248. P. 131413. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131413>
28. Yang L., Liu Y., Zhou X., Wu Y., Ma C., Liu W., Zhang C. Asymmetric anthracene-fused BODIPY dye with large Stokes shift: synthesis, photophysical properties and bioimaging // *Dyes and Pigments*. 2016. V. 126. P. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.11.028>
29. Felorzabih N., Haley J.C., Bardajee G.R., Winnik M.A. Systematic study of the fluorescence decays of amino-coumarin dyes in polymer matrices // *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2007. V. 45. N 17. P. 2333–2343. <https://doi.org/10.1002/polb.21226>
30. Altalbawy F.M.A., Abdelkader M.H., Darwish E.S.S., Elnagdi M.H. Synthesis, electronic absorption, fluorescence and live time spectroscopic study of some new 3,7-disubstituted coumarin derivatives as new fluorescent probes // *Asian Journal of Chemistry*. 2016. V. 28. N 10. P. 2303–2310. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2016.19975>
31. Takizawa S., Montes V.A., Anzenbacher P. Phenylbenzimidazole-based new bipolar host materials for efficient phosphorescent organic light-emitting diodes // *Chemistry of Materials*. 2009. V. 21. N 12. P. 2452–2458. <https://doi.org/10.1021/cm9004954>
32. Kotchapadist P., Prachumrak N., Sunonnam T., Namuangruk S., Sudyoadsuk T., Keawin T., et al. Synthesis, characterisation, and electroluminescence properties of N-coumarin derivatives containing peripheral triphenylamine // *European Journal of Organic Chemistry*. 2015. V. 2015. N 3. P. 496–505. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201402680>
33. Sahoo R.K., Atta S., Singh N.D.P., Jacob C. Influence of functional derivatives of an amino-coumarin/MWCNT composite organic hetero-junction on the photovoltaic characteristics // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2014. V. 25. P. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.001>
34. Осадченко А.В., Вашенко А.А., Захарчук И.А., Дайбаге Д.С., Амброзевич С.А., Володин Н.Ю., Чепцов Д.А., Долотов С.М., Травень В.Ф., Авраменко А.И., Семенова С.Л., Селюков А.С. Органические светодиоды с новыми красителями на основе кумарина // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. Т. 22. № 6. С. 1112–1118. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118>
- of perchloroalkanes. *Photochemistry and Photobiology*, 2018, vol. 94, no. 4, pp. 659–666. <https://doi.org/10.1111/php.12918>
23. Secci D., Carradori S., Bolasco A., Chimenti P., Yáñez M., Ortuso F., Alcaro S., et al. Synthesis and selective human monoamine oxidase inhibition of 3-carbonyl, 3-acyl, and 3-carboxyhydrazido coumarin derivatives. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2011, vol. 46, no. 10, pp. 4846–4852. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2011.07.017>
24. Huang Z.-L., Li N., Sun Y., Wang H., Song H., Xu Z. Synthesis and structure–photophysical property relationships for two coumarinyl-based two-photon induced fluorescent molecules. *Journal of Molecular Structure*, 2003, vol. 657, no. 1–3, pp. 343–350. [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(03\)00427-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(03)00427-7)
25. Lee S., Sivakumar K., Shin W.-S., Xie F., Wang Q. Synthesis and anti-angiogenesis activity of coumarin derivatives. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2006, vol. 16, no. 17, pp. 4596–4599. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2006.06.007>
26. Shreykar M.R., Sekar N. Coumarin-pyrazole hybrid with red shifted ESIPT emission and AIE characteristics — a comprehensive study. *Journal of Fluorescence*, 2017, vol. 27, no. 5, pp. 1687–1707. <https://doi.org/10.1007/s10895-017-2106-2>
27. Gawad S.A.A., Sakr M.A.S. Spectroscopic investigation, DFT and TD-DFT calculations of 7-(Diethylamino) Coumarin (C466). *Journal of Molecular Structure*, 2022, vol. 1248, pp. 131413. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131413>
28. Yang L., Liu Y., Zhou X., Wu Y., Ma C., Liu W., Zhang C. Asymmetric anthracene-fused BODIPY dye with large Stokes shift: synthesis, photophysical properties and bioimaging. *Dyes and Pigments*, 2016, vol. 126, pp. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.11.028>
29. Felorzabih N., Haley J.C., Bardajee G.R., Winnik M.A. Systematic study of the fluorescence decays of amino-coumarin dyes in polymer matrices. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2007, vol. 45, no. 17, pp. 2333–2343. <https://doi.org/10.1002/polb.21226>
30. Altalbawy F.M.A., Abdelkader M.H., Darwish E.S.S., Elnagdi M.H. Synthesis, electronic absorption, fluorescence and live time spectroscopic study of some new 3,7-disubstituted coumarin derivatives as new fluorescent probes. *Asian Journal of Chemistry*, 2016, vol. 28, no. 10, pp. 2303–2310. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2016.19975>
31. Takizawa S., Montes V.A., Anzenbacher P. Phenylbenzimidazole-based new bipolar host materials for efficient phosphorescent organic light-emitting diodes. *Chemistry of Materials*, 2009, vol. 21, no. 12, pp. 2452–2458. <https://doi.org/10.1021/cm9004954>
32. Kotchapadist P., Prachumrak N., Sunonnam T., Namuangruk S., Sudyoadsuk T., Keawin T., et al. Synthesis, characterisation, and electroluminescence properties of N-coumarin derivatives containing peripheral triphenylamine. *European Journal of Organic Chemistry*, 2015, vol. 2015, no. 3, pp. 496–505. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201402680>
33. Sahoo R.K., Atta S., Singh N.D.P., Jacob C. Influence of functional derivatives of an amino-coumarin/MWCNT composite organic hetero-junction on the photovoltaic characteristics. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2014, vol. 25, pp. 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2014.01.001>
34. Osadchenko A.V., Vashchenko A.A., Zakharchuk I.A., Daibagya D.S., Ambrozevich S.A., Volodin N.Yu., Cheptsov D.A., Dolotov S.M., Traven V.F., Avramenko A.I., Semenova S.L., Selyukov A.S. Organic light-emitting diodes with new dyes based on coumarin. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1112–1118. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-6-1112-1118>

Авторы

Осадченко Анна Владимировна — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; ассистент, Российский технологический университет МИРЭА, Москва, 119454, Российская Федерация, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, anna.vl.osadchenko@gmail.com

Амброзевич Сергей Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Authors

Anna V. Osadchenko — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Assistant, Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation, [sc 57439684100](https://orcid.org/0000-0001-9556-4885), <https://orcid.org/0000-0001-9556-4885>, anna.vl.osadchenko@gmail.com

Sergey A. Ambrozevich — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 12789274600](https://orcid.org/0000-0002-3906-0735), <https://orcid.org/0000-0002-3906-0735>, s.ambrozevich@mail.ru

Захарчук Иван Александрович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Вашченко Андрей Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 35800121600](https://orcid.org/0000-0003-2084-5900), <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>, vashchenkoa@lebedev.ru

Дайбаге Даниил Саюзович — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Кармазин Леонид Игоревич — младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-3066-3474>, leokarm64@gmail.com

Чепцов Дмитрий Андреевич — кандидат химических наук, доцент, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 56711985600](https://orcid.org/0000-0002-9774-7922), <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>, dchepcov@yandex.ru

Травень Валерий Федорович — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-2204-7438), <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>, valerii.traven@gmail.com

Слюсаренко Алина Романовна — студент, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0003-6868-2503>, alilisha.2006@mail.ru

Селюков Александр Сергеевич — кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991, Российская Федерация; доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация; ассистент, Российский технологический университет МИРЭА, Москва, 119454, Российская Федерация; специалист II категории, Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 125190, Москва, Российская Федерация, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Ivan A. Zakharchuk — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57672815700](https://orcid.org/0000-0002-1502-6460), <https://orcid.org/0000-0002-1502-6460>, zakharchukia@yandex.ru

Andrey A. Vashchenko — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 35800121600](https://orcid.org/0000-0003-2084-5900), <https://orcid.org/0000-0003-2084-5900>, vashchenkoa@lebedev.ru

Daniil S. Daibagya — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57673090900](https://orcid.org/0000-0003-1944-1546), <https://orcid.org/0000-0003-1944-1546>, daibagya@mail.ru

Leonid I. Karmazin — Junior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0009-3066-3474>, leokarm64@gmail.com

Dmitry A. Cheptsov — PhD (Chemistry), Associate Professor, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, [sc 56711985600](https://orcid.org/0000-0002-9774-7922), <https://orcid.org/0000-0002-9774-7922>, dchepcov@yandex.ru

Valery F. Traven — D.Sc. (Chemistry), Professor, Head of Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, [sc 57208522812](https://orcid.org/0000-0002-2204-7438), <https://orcid.org/0000-0002-2204-7438>, valerii.traven@gmail.com

Alina R. Slyusarenko — Student, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0003-6868-2503>, alilisha.2006@mail.ru

Alexandr S. Selyukov — PhD (Physics & Mathematics), Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation; Assistant, Russian Technological University MIREA, Moscow, 119454, Russian Federation; 2nd Category Specialist, All Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125190, Russian Federation, [sc 55787344500](https://orcid.org/0000-0002-4007-6291), <https://orcid.org/0000-0002-4007-6291>, selyukov@lebedev.ru

Статья поступила в редакцию 31.07.2025
Одобрена после рецензирования 28.09.2025
Принята к печати 25.11.2025

Received 31.07.2025
Approved after reviewing 28.09.2025
Accepted 25.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»