

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЮМИНОФОРОВ BODIPY В КАЧЕСТВЕ СЕНСОРОВ НА СЕРОВОДОРОД, АРОМАТИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ И БИОГЕННЫЕ АМИНЫ

Гаврилова А.Н.¹, Шушкова А.С.¹, Блохина П.М.¹, Камардина В.И.^{2,3}, Молева Н.В.¹, Молчанов Е.Е.^{1*}, Клычева М.М.^{2,3}, Бобров А.В.¹, Марфин Ю.С.⁴

Гаврилова Анна Николаевна, Шушкова Анастасия Сергеевна, Блохина Полина Максимовна, Камардина Виктория Ивановна, Молева Наталья Васильевна, Молчанов Евгений Евгеньевич, Клычева Майя Михайловна, Бобров Александр Валерьевич, Марфин Юрий Сергеевич.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет»

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ивановский научно-исследовательский институт материнства и детства имени В.Н. Городкова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет»

E-mail: evgenmolch@mail.ru*

В данной работе представлены результаты первичных экспериментов, направленных на определение возможностей применения трех красителей семейства BODIPY. Показано, что эти соединения можно использовать в качестве молекулярных сенсоров в областях топливной, пищевой промышленности и медицине. Исследуемые BODIPY отличаются заместителем в 8-ом положении и проявляют интенсивный сенсорный отклик на бензол, H₂S и биогенные амины в зависимости от заместителя.

Ключевые слова: BODIPY, молекулярные сенсоры, флуоресцентный анализ, умные упаковки, нефтехимия, аналитическая химия

APPLICATION OF BODIPY LUMINOPHORS AS SENSORS FOR HYDROGEN SULFIDE, AROMATIC COMPOUNDS AND BIOGENIC AMINES

Gavrilova A.N.¹, Shushkova A.S.¹, Blokhina P.M.¹, Kamardina V.^{1,2,3}, Moleva N.V.¹, Molchanov E.E.^{1*}, Klycheva M.M.^{2,3}, Bobrov A.V.¹, Marfin Yu.S.⁴

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo State University of Chemistry and Technology"

²Federal State Budget Institute Ivanovo scientific-research institute motherhood and childhood named after V.N. Gorodkov

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ivanovo State Medical University» of the Ministry of Health of the Russian Federation (FSBEI HE «Ivanovo SMU» of MOH of Russia)

⁴Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pacific National University"

E-mail: evgenmolch@mail.ru*

The results of initial experiments conducted to determine the feasibility of using the three BODIPY dyes are contained in this article. It has been shown that these compounds can be used as molecular sensors in the fuel, food industries and medicine. Depending on the substituent in the eighth position the studied BODIPYs exhibit an intense sensory response to benzene, H₂S and biogenic amines, depending on the substituent.

Keywords: BODIPY, molecular sensors, fluorescent analysis, smart packaging, petrochemistry, analytical chemistry.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из наиболее перспективных областей исследований является создание люминесцентных сенсоров. Они нашли свое применение в качестве чувствительных на различные аналиты молекул для диагностики в медицине, биовизуализации [1] и молекулярной сенсорике [2-5]. В этой сфере наилучшим образом зарекомендовали себя борфторидные комплексы дипирролилметена или BODIPY. Это связано с тем, что соединения данного класса обладают рядом полезных для вышеперечисленных областей применения свойств, среди которых яркая люминесценция, чувствительность к молекулярному окружению и различным физико-химическим параметрам среды. Возможность тонкой настройки сенсорных свойств молекул BODIPY путем химической функционализации позволяет разрабатывать и синтезировать флуоресцентные красители, чувствительные к требуемому параметру среды или молекуле-аналиту [6-8]. Для эффективного решения актуальных проблем молекулярной сенсорики требуется создание сенсоров, обладающих высокой точностью и селективностью. Флуоресцентные индикаторы для измерения в режиме реального времени и получения флуоресцентных изображений являются незаменимыми инструментами в науке о жизни и материаловедении. Способность определять и отображать анализируемые вещества в решающей степени зависит от наличия соответствующих зондов. Рациональная конструкция полезных флуоресцентных зондов требует одновременной оптимизации целого ряда параметров. Прежде всего, зонд должен обеспечивать высокоселективную флуоресцентную реакцию на интересующий аналит, избегая при этом взаимодействия с другими анализируемыми веществами. Также важна устойчивость к воздействию химических веществ и света. Наконец, сигнал флуоресценции должен быть ярким и стабильным. Требуются как можно более высокие значения коэффициента молярной экстинкции $\epsilon(\lambda)$ при длине волны возбуждения (λ) и высокие квантовые выходы флуоресценции (Φ), т.е. высокая яркость красителя [9,10].

Хотя пока еще нет флуоресцентных индикаторов, которые бы полностью отвечали всем этим критериям одновременно, частичное соответствие все же полезно. Благодаря своим полезным свойствам, BODIPY является отличным выбором для использования в качестве флуоресцентного компонента в новых индикаторах. Флуорофор BODIPY обладает превосходной устойчи-

востью к воздействию химических веществ и света, небольшим размером молекулы и яркой флуоресценцией благодаря высоким значениям коэффициента молярной экстинкции $\epsilon(\lambda)$ и квантового выхода флуоресценции Φ , а также спектрам возбуждения и испускания флуоресценции в видимой области. Как было сказано ранее, наличие и природа заместителя в ядре BODIPY существенно влияют на спектральные и фотофизические свойства сенсора, что позволяет проводить его тонкую настройку [11]. В рамках данной работы были получены соединения, отличающиеся природой мезо-заместителя, и способные проявлять сенсорные свойства на такие аналиты, как сероводород, ароматические компоненты и биогенные амины. Сероводород (H_2S) – это газообразная сигнальная молекула, вырабатываемая в организме и участвующая в регуляции множества физиологических функций. Количественное определение уровня сероводорода в крови используют для диагностики и прогнозирования различных патологических состояний. Поэтому разработка новых методов определения концентрации H_2S в организме имеет большое значение. Создание сенсоров с высокой специфичностью и биосовместимостью для определения уровня H_2S в крови позволит понять его роль в физиологических и патологических процессах. Ароматические соединения, содержащиеся в бензинах, определяют их эксплуатационные свойства, степень их воздействия на двигатель и окружающую среду. Аммиак и его производные выделяются в процессе разложения продуктов питания. По количеству выделенных веществ можно судить о пригодности продукта к употреблению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Спектры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах 1H были получены в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований» (ЦКП ИХР РАН) на ЯМР-спектрометре BrukerAvanceIII 500 с рабочей частотой 500,17 МГц, в качестве растворителя использовался дейтерированный хлороформ $CDCl_3$. Масс-спектры были получены в Центре коллективного пользования научным оборудованием Ивановского государственного химико-технологического университета (ЦКП ИГХТУ) на времяпролетном масс-спектрометре с матричной лазерной десорбционной ионизацией (MALDI TOF (от англ. matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight) Shima-dzu AXIMA Confidence в режиме фиксации положительных ионов с использованием рефлектрона.

Спектры флуоресценции были получены на флуоресцентном спектрофотометре Agilent-CaryEclipse на длине волны возбуждения 480 нм с шагом сканирования 1 нм.

В работе использовали 3 красителя, отличающихся заместителем в 8-ом положении (схема 1). Соединения были получены по методикам, ранее описанным в литературе [11-15].

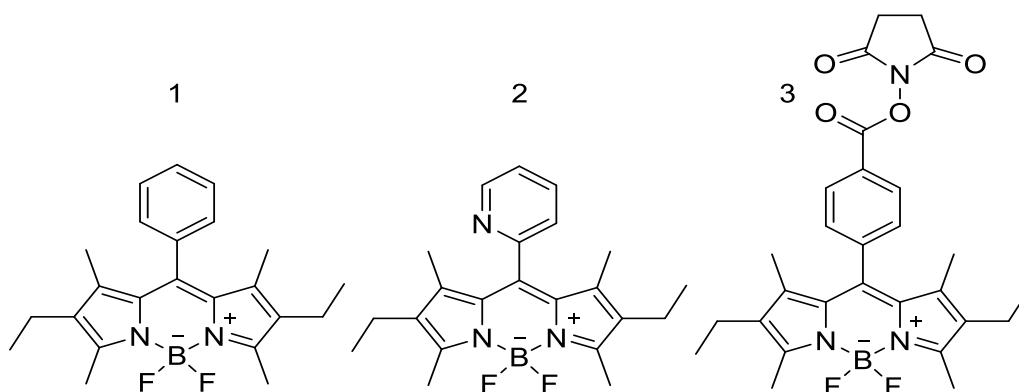


Схема 1
Scheme 1

1,3,5,7-тетраметил-2,6-диэтил-8-фенил-4-боро-3а,4а-диаза-симм-индацен (1).

¹H ЯМР (300МГц, CDCl₃). ¹H NMR (CDCl₃, 300 MHz): δ 0.98 (t, 6H), 1.39 (s, 6H), 2.30 (q, 4H), 2.57 (s, 6H), 7.27-7.30 (m, 2H), 7.48-7.49 (m, 3H), ppm. MALDI TOF MS, m/z, Да: 361.51 [M-F]⁺, C₂₃H₂₇BFN₂⁺. Вычислено для C₂₃H₂₇BF₂N₂⁺ [M]⁺:380,2. Выход 46%.

1,3,5,7-тетраметил-2,6-диэтил-8-(2-пиридин)-4-боро-3а,4а-диаза-симм-индацен (2).

¹H ЯМР (300МГц, CDCl₃) δ 0.96 (t, 6H), δ 1.19 (s, 6H), δ 2.28 (q, 4H), δ 2.52 (s, 6H), δ 7.41(m, 2H), δ 7.81 (t, 1H), δ 8.76 (d, 1H), ppm. MALDI TOF MS, m/z, Да: 381.46 [M]⁺, C₂₂H₂₆BF₂N₃⁺. Вычислено для C₂₂H₂₆BF₂N₃⁺ [M]⁺:381.2. Выход 38%.

Сукцинимидный эфир 4-(2,6-диэтил-4,4-дифтор-1,3,5,7-тетраметил-4-боро-3а,4а-диаза-симм-индацен-8-ин) - бензойной кислоты(3).

¹НЯМР (300МГц, CDCl₃): δ0.98 (t, 6H), 1.27 (s, 6H), 2.30 (q, 4H), 2.53 (s, 6H), 2.96 (d, 4H), 7.49 (d, 2H), 8.26 (d, 2H)ppm. ¹¹ВNMR: δ 0.76 (t, 1В)ppm.MALDI TOFMS: m/z, Да: 522.06 [M]⁺, для C₂₈H₃₁BF₂N₃O₄⁺.

Вычислено для C₂₈H₃₀BF₂N₃O₄⁺ [M]⁺:521.23. Выход 41%. Изготовление сенсоров на основе фильтровальной бумаги и BODIPY 2 и 3.

Для получения сенсорных материалов фильтровальную бумагу пропитывали раствором BODIPY2 или 3, с концентрацией 10⁻⁴ моль/лв ацетоне. Затем пропитанную фильтровальную бумагу извлекали из раствора и помещали в сушильный шкаф в чашке Петри на 30 минут при 50°С. Получение спектров люминесценции BODIPY 1 в бензине с разным содержанием бензола.

Для получения спектров люминесценции методом изомолярной серии готовили растворы BODIPY 1 в бензине с разным соотношением бензола (от 0 до 20%). Концентрация красителя в растворе 10⁻⁵моль/л.

Получение спектров люминесценции в присутствии сыворотки крови.

В качестве образцов использовалась сыворотка крови женщин (с известным содержанием сероводорода), поступивших в стационар ФГБУ «Ив НИИ М и Д им. В.Н. Городкова» Минздрава России (тест слепой). Полученный сенсор, содержащий BODIPY 2, выдерживали над сывороткой в течении 24 часов. Спектры флуоресценции фиксировали до и после выдержки над сывороткой. Получение спектров люминесценции в присутствии биогенных аминов:

В качестве образцов использовалось мясо курицы. Для получения спектров люминесценции BODIPY 3 в присутствии биогенных аминов сенсор, содержащий BODIPY 3, выдерживали над образцом куриного мяса в течении 7 суток, фиксируя спектры люминесценции каждые 24 часа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

BODIPY1 как сенсор на ароматические углеводороды. В рамках эксперимента показано, что при увеличении содержания примеси бензола в бензине происходит интенсивное тушение люминесценции растворенного в образце красителя 1.

На графике видно, что при изменении концентрации бензола на 20% интенсивность люминесценции уменьшается в 5 раз (Рис.1).

Предположительно, тушение связано со специфическими межмолекулярными взаимодействиями растворенного красителя и ароматическими компонентами, содержащимися в образце. Происходит π - π стекнинг, который и приводит к

безизлучательным электронным переходам. Таким образом, на основе данного явления возможно получать устройства, способные определять содержание ароматических углеводородов в бензинах.

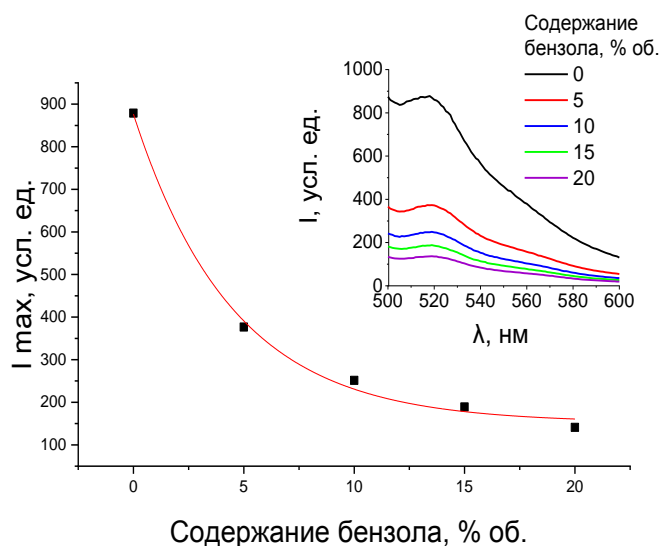


Рис.1. Зависимость интенсивности люминесценции BODIPY 1 от содержания бензола в бензине.
Fig.1. Dependence of the luminescence intensity of BODIPY 1 on the benzene content in gasoline.

BODIPY2 как сенсорна сероводород в сыворотке крови.

В настоящее время существует проблема диагностики и прогнозирования патологий, при которых изменяется содержание сероводорода в сыворотке крови, поскольку этот процесс является сложным и трудоёмким. Среди таких заболеваний можно отметить преэклампсию беременных, сахарный диабет, гипертоническую болезнь, и дру-

гие [16,17].Было показано, что материалы из фильтровальной бумаги на основе BODIPY₂ имеют чувствительность к сероводороду, который содержится в сыворотке крови (Рис. 2).

Измерения проводили в присутствии сыворотки крови с содержанием сероводорода 32-73 мкг/л. Предположительно, происходит взаимодействие молекул H₂S с пиридиновым фрагментом в 8-ом положении.

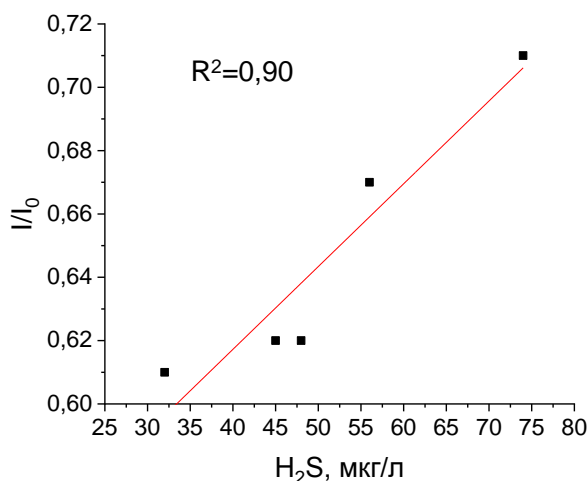


Рис.2. Зависимость относительной интенсивности люминесценции BODIPY 2 от содержания сероводорода в сыворотке крови.
Fig.2. Dependence of the relative intensity of BODIPY 2 luminescence on the content of hydrogen sulfide in blood serum.

BODIPY3 как сенсор на биогенные амины. Ранее BODIPY 3 зарекомендовал себя как

флуоресцентный маркер для подсвечивания аминокислот и белков, который присоединяется к

мишени по аминокруппе [14,18]. В результате эксперимента показано, что закрепленное на фильтровальной бумаге это соединение проявляет чувствительность к биогенным аминам. На рисунке 3 видно, что в течении первых суток происходит тушение люминесценции сенсора. В качестве

аналита использовалось мясо курицы, которое помещалось в закрытую камеру с сенсором на основе BODIPY 3. Данный эффект можно использовать для получения умных упаковок или способных показывать состояние продукта, или при транспортировке.

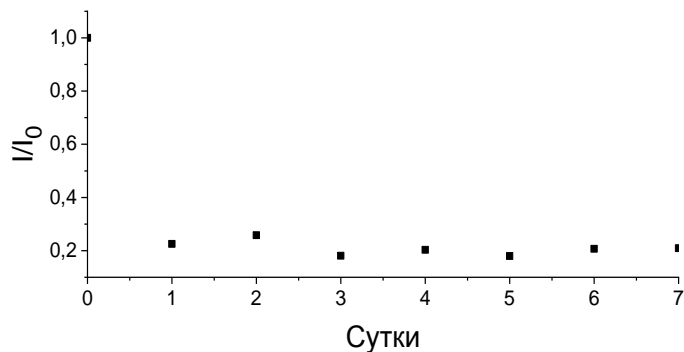


Рис.3. Зависимость относительной интенсивности люминесценции BODIPY 3 от времени нахождения с источником биогенных аминов.
Fig.3. Dependence of the relative intensity of BODIPY 3 luminescence on the residence time with a source of biogenic amines.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало потенциал использования BODIPY в новых сенсорных технологиях. Полученные данные открывают новые возможности использования явления флуоресценции. Представленные люминофоры семейства BODIPY в качестве сенсоров на сероводород, ароматические углеводороды, и биогенные амины не применялись. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (грант № 22-73-10167). Авторы выражают благодарность за использование услуг и возможностей Центра коллективного пользования

научным оборудованием Ивановского государственного химико-технологического университета (при поддержке Министерства науки и высшего образования). Центр коллективного пользования научным оборудованием «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований». Грант «Образование Российской Федерации» № 075-15-2021-671.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилова Е. А. Достижения в области химии макрогетероциклических соединений на кафедре технологии тонкого органического синтеза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 111-119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6826j
2. Ващурич А. С. и др. Химия жидкофазных систем и функциональных материалов на основе координационных соединений линейных и циклических полипирролов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 76-97. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6840j
3. Wen Y. et al. Molecular imprinting-based ratiometric fluorescence sensors for environmental and food analysis. *Analyt.* 2023. V. 148. N 17. P. 3971-3985. DOI: 10.1039/d3an00483j
4. Tian J. et al. Advances in fluorescent sensing carbon dots: An account of food analysis. *ACS omega.* 2023. V. 8. N 10. P. 9031-9039. DOI: 10.1021/acsomega.2c07986
5. Rajasekar M., Ranjitha V., Rajasekar K. Recent advances in Fluorescent-based cation sensors for biomedical applications.

REFERENECES

1. Danilova E.A. Achievements in the field of chemistry of macroheterocyclic compounds at the department of technology of fine organic. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 111-119.
2. Vashurin A.S. et al. Chemistry of liquid systems and functional materials based on coordination compounds of linear and cyclic polypyrroles. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 76-97. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6840j.
3. Wen Y. et al. Molecular imprinting-based ratiometric fluorescence sensors for environmental and food analysis. *Analyt.* 2023. V. 148. N 17. P. 3971-3985. DOI: 10.1039/d3an00483j
4. Tian J. et al. Advances in fluorescent sensing carbon dots: An account of food analysis. *ACS omega.* 2023. V. 8. N 10. P. 9031-9039. DOI: 10.1021/acsomega.2c07986
5. Rajasekar M., Ranjitha V., Rajasekar K. Recent advances in Fluorescent-based cation sensors for biomedical applications. *Results in Chemistry.* 2023. V. 5. P. 100850. DOI:10.1016/

- Results in Chemistry*. 2023. V. 5. P. 100850. DOI:10.1016/j.rechem.2023.100850
6. **Ksenofontova K. V. et al.** Insight into Spectral Properties and Solvatochromic Behavior of [b]-Fused BODIPYs: Experimental and Computational Study. *ChemPhotoChem*. P. e202400074. DOI:10.1002/cptc.202400074
 7. **Paez-Perez M., Kuimova M. K.** Molecular rotors: fluorescent sensors for microviscosity and conformation of biomolecules. *Angewandte Chemie*. 2024. V. 136. N6. P. e202311233. DOI: 10.1002/anie.202311233
 8. **Nguyen Y. T. et al.** BODIPY-based fluorescent sensors for detection of explosives. *Journal of Chemical Research*. 2023. V. 47. N 2. P. 17475198231168961. DOI:10.1177/ 17475198-231168961
 9. **Bumagina N. A., Antina E. V.** Review of advances in development of fluorescent BODIPY probes (chemosensors and chemodosimeters) for cation recognition. *Coordination Chemistry Reviews*. 2024. V. 505. P. 215688. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.215688
 10. **Glavaš M. et al.** Fluorescent pH sensors based on BODIPY structure sensitive in acidic media. *Dyes and pigments*. 2023. V. 220. P. 111660. DOI : 10.1016/j.dyepig.2023.111660
 11. **Moskaieva O. et al.** Conformational effect on the photophysics of two BODIPY dyes in a mixture of butanol and acetonitrile: Insight from the steady-state, fluorescence time-resolved spectroscopy and TD-DFT calculations. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 382. P. 121877. DOI:10.1016 /j.molliq.2023.121877
 12. **Shagurin A. Yu. et al.** Nir mono and bi 2-vinylthiophene substituted boron dipyrin dyes: from practice to theory to further practice. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. P. 1822 (2021) 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1822/1/012018
 13. **Banakova E. et al.** Supramolecular effects as driving force of dipyrin based functional materials engineering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 951. N 1. P. 012017. DOI:10.1088/1742-6596/951/1/012017
 14. **Ksenofontova K. V. et al.** Novel BODIPY-conjugated amino acids: Synthesis and spectral properties. *Journal of Molecular Liquids*. 2019. V. 283. P. 695-703. DOI:10.1016/j.molliq.2019.03.148
 15. **Ulrich G., Ziessel R.** Convenient and efficient synthesis of functionalized oligopyridine ligands bearing accessory pyromethene-BF₂ fluorophores. *The Journal of Organic Chemistry*. 2004. V. 69. N6. P. 2070-2083. DOI:10.1021/jo035825g
 16. **Попова И.Г., Ситникова О.Г., Назаров С.Б., Садов Р.И., Панова И.А., Кузьменко Г.Н., Клычева М.М., Веселкова Ю.Н.** Содержание сероводорода у женщин с умеренной и тяжелой преэклампсией в III триместре беременности их новорожденных. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2021. Т. 66. Вып. 7. С. 396-400. DOI: 10.51620/0869-2084-2021-66-7-396-400
 17. **Колесников С. И., Власов Б.И., Колесникова Л.И.** Сероводород как третья эссенциальная газовая молекула живых тканей. *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2015. Т. 70. Вып. 2. С. 237-241. DOI: 10.15690/vramn.v70i2.1318
 18. **Ksenofontova K. V. et al.** Amine-reactive BODIPY dye: *Molecules*. 2022. V. 27. N 22. P. 7911. DOI:10.3390/molecules27227911
 6. **Ksenofontova K. V. et al.** Insight into Spectral Properties and Solvatochromic Behavior of [b]-Fused BODIPYs: Experimental and Computational Study. *ChemPhotoChem*. P. e202400074. DOI:10.1002/cptc.202400074
 7. **Paez-Perez M., Kuimova M. K.** Molecular rotors: fluorescent sensors for microviscosity and conformation of biomolecules. *Angewandte Chemie*. 2024. V. 136. N 6. P. e202311233. DOI: 10.1002/anie.202311233
 8. **Nguyen Y. T. et al.** BODIPY-based fluorescent sensors for detection of explosives. *Journal of Chemical Research*. 2023. V. 47. N 2. P. 17475198231168961. DOI:10.1177/ 17475198-231168961
 9. **Bumagina N. A., Antina E. V.** Review of advances in development of fluorescent BODIPY probes (chemosensors and chemodosimeters) for cation recognition. *Coordination Chemistry Reviews*. 2024. V. 505. P. 215688. DOI: 10.1016/j.ccr.2024.215688
 10. **Glavaš M. et al.** Fluorescent pH sensors based on BODIPY structure sensitive in acidic media. *Dyes and pigments*. 2023. V. 220. P. 111660. DOI : 10.1016/j.dyepig.2023.111660
 11. **Moskaieva O. et al.** Conformational effect on the photophysics of two BODIPY dyes in a mixture of butanol and acetonitrile: Insight from the steady-state, fluorescence time-resolved spectroscopy and TD-DFT calculations. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 382. P. 121877. DOI:10.1016 /j.molliq.2023.121877
 12. **Shagurin A. Yu. et al.** Nir mono and bi 2-vinylthiophene substituted boron dipyrin dyes: from practice to theory to further practice. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. P. 1822 (2021) 012018. DOI:10.1088/1742-6596/1822/1/012018
 13. **Banakova E. et al.** Supramolecular effects as driving force of dipyrin based functional materials engineering. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 951. N 1. P. 012017. DOI:10.1088/1742-6596/951/1/012017
 14. **Ksenofontova K. V. et al.** Novel BODIPY-conjugated amino acids: Synthesis and spectral properties. *Journal of Molecular Liquids*. 2019. V. 283. P. 695-703. DOI:10.1016/j.molliq.2019.03.148
 15. **Ulrich G., Ziessel R.** Convenient and efficient synthesis of functionalized oligopyridine ligands bearing accessory pyromethene-BF₂ fluorophores. *The Journal of Organic Chemistry*. 2004. V. 69. N6. P. 2070-2083. DOI:10.1021/jo035825g
 16. **Popova I.G., Sitnikova O.G., Nazarov S.B., Sadov R.I., Panova I.A., Kuzmenko G.N., Klycheva M.M., Veselkova Yu.N.** Hydrogen sulfide content in women with moderate and severe preeclampsia in the third trimester of pregnancy of their newborns. *Clinical laboratory diagnostics*. 2021. Vol. 66. Issue 7. pp. 396-400. DOI: 10.51620/0869-2084-2021-66-7-396-400
 17. **Kolesnikov S. I., Vlasov B.I., Kolesnikova L.I.** Hydrogen sulfide as the third essential gas molecule of living tissues. *Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2015. Vol. 70. Issue. 2. pp. 237-241. DOI: 10.15690/vramn.v70i2.1318
 18. **Ksenofontova K. V. et al.** Amine-reactive BODIPY dye: *Molecules*. 2022. V. 27. N 22. P. 7911.

Поступила в редакцию (Received) 10.05.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 10.07.2024