

УДК 547.652:535.37
DOI: 10.7868/25000640230102

ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЕ ХЕМОСЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ИМИНОВ 4-ФОРМИЛ-3-ГИДРОКСИ-2-НАФТОЙНОЙ КИСЛОТЫ

© 2023 г. Е.Н. Шепеленко¹, В.А. Подшибякин², И.В. Дубоносова²,
О.Ю. Карлутова², А.Д. Дубоносов¹, В.А. Брень²

Аннотация. Синтезированы имины 4-формил-3-гидрокси-2-нафтойной кислоты. Исследованы их спектрально-люминесцентные и иохрохромные свойства. В спектрах ариламинов в ацетонитриле наблюдается небольшой гипсохромный сдвиг полосы поглощения при добавлении катионов *d*-металлов без заметного изменения окраски раствора. Спектры испускания близки к исходным спектрам флуоресценции лигандов, лишь в случае иона меди(II) наблюдается практически полное тушение флуоресценции. Бензилимин демонстрирует селективное относительное увеличение интенсивности эмиссии I/I_0 в 180 раз в присутствии катионов цинка. Все синтезированные имины проявляют отчетливый «naked-eye» эффект с изменением ярко-желтого цвета раствора на бледно-желтый в случае фторид- и цианид-анионов, тогда как остальные анионы незначительно влияют на характер абсорбции. В случае бензилимина отмечены рекордные значения относительного увеличения интенсивности эмиссии I/I_0 – 470 и 575 для цианид- и фторид-анионов соответственно. Таким образом, бензилимин 4-формил-3-гидрокси-2-нафтойной кислоты представляет собой эффективный и селективный полифункциональный флуоресцентный сенсор для детектирования ионов Zn^{2+} , F^- и CN^- .

Ключевые слова: нафталин, имины, флуоресценция, хемосенсоры, катионы, анионы.

FLUORESCENT CHEMOSENSORS BASED ON IMINES OF 4-FORMYL-3-HYDROXY-2-NAPHTHOIC ACID

E.N. Shepelenko¹, V.A. Podshibyakin², I.V. Dubonosova²,
O.Yu. Karlutova², A.D. Dubonosov¹, V.A. Bren²

Abstract. The imines of 4-formyl-3-hydroxy-2-naphthenic acid were synthesized. Their spectral-luminescent and ionochromic properties were investigated. In the spectra of arylamines in acetonitrile, a slight hypsochromic shift of the absorption band was observed upon the addition of *d*-metal cations without an appreciable change in the solution coloration. The emission spectra are close to the original fluorescence spectra of the ligands, and only in the case of copper(II) ion almost complete quenching of fluorescence is observed. Benzylimine shows a selective relative increase in emission intensity (I/I_0) by a factor of 180 in the presence of zinc cations. All synthesized imines exhibit a distinct “naked-eye” effect with a change in the bright yellow color of the solution to pale yellow in the case of fluoride and cyanide anions, while the other anions have little effect on the absorption character. In the case of benzylimine, record values of the relative increase in emission intensity (I/I_0) – 470 and 575 were found for cyanide and fluoride anions, respectively. Therefore, benzylimine of 4-formyl-3-hydroxy-2-naphthoic acid is an efficient and selective polyfunctional fluorescent sensor for the detection of Zn^{2+} , F^- and CN^- ions.

Keywords: naphthalene, imines, fluorescence, chemosensors, cations, anions.

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: aled@ipoc.sfedu.ru

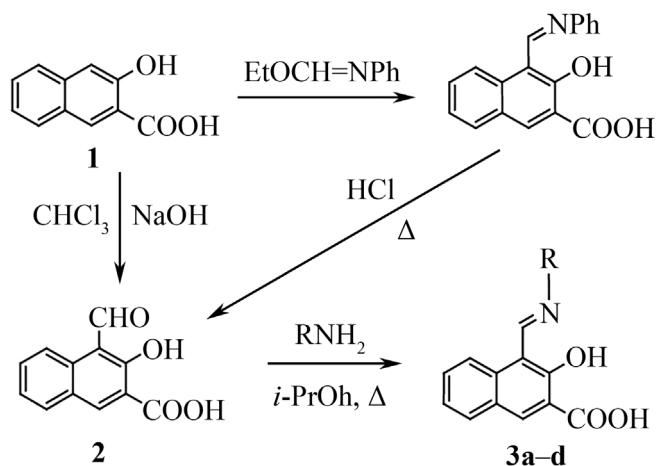
² Научно-исследовательский институт физической и органической химии Южного федерального университета (Institute of Physical and Organic Chemistry, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/2

Катионы *d*-металлов (в первую очередь Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} и Mn^{2+}) относятся к микроэлементам, необходимым для нормального функционирования живых организмов. Однако избыток этих и других ионов представляет серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья человека даже при низких концентрациях [1; 2]. Фторид-анион важен для поддержания здоровой структуры костей и зубов, хотя в больших количествах приводит к развитию флюороза и других опасных заболеваний [3]. Цианид-анионы обладают чрезвычайно высокой физиологической токсичностью, но постоянно присутствуют в окружающей среде из-за широкого использования в золотодобывающей и нефтехимической промышленности [4]. В связи с этим разработка органических хемосенсоров для экспресс-мониторинга токсичных катионов и анионов в различных образцах представляет собой активно развивающуюся область органической и экологической химии [5–9]. Основания Шиффа – продукты конденсации аминов с ароматическими или алифатическими карбальдегидами – благодаря своей превосходной ко-

ординационной способности часто используются в качестве флуоресцентных и колориметрических хемосенсоров для обнаружения различных катионов металлов [10–12] и анионов [13; 14]. Несмотря на значительный интерес к таким соединениям, сведения о бифункциональных хемосенсорных основаниях Шиффа, предназначенных для определения и катионов, и анионов, крайне ограничены [15].

В настоящей работе описаны синтез полифункциональных флуоресцентных хемосенсоров, способных к эффективному детектированию катионов и анионов, и исследование их спектрально-люминесцентных и иохромных свойств. Новые основания Шиффа – имины 4-формил-3-гидрокси-2-нафтойной кислоты **3a–d** – получали согласно схеме 1 конденсацией альдегида **2** с ариламинами или бензиламином. Альдегид **2** получается из 3-гидрокси-2-нафтойной кислоты **1** по реакции Реймера – Тимана [16]. Однако оптимальные выходы были достигнуты при использовании модифицированной методики с использованием этил-N-фенилимидоформата [17].

Схема 1



R = Ph (**a**), 4-MeC₆H₄ (**b**), 4-MeOC₆H₄ (**c**), CH₂Ph (**d**)

ИК-спектры иминов **3a–d** содержат полосы валентных колебаний связей C=O и C=N в областях 1620–1625 и 1550–1585 см^{–1} соответственно и связей OH при 3500–3515 см^{–1}. В спектрах ЯМР ¹H регистрируются сигналы протонов групп CH=N в районе 9,58–9,69 м.д., а в области 14,77–15,95 м.д. – сигналы протонов карбоксильных и гидроксильных групп OH.

В электронных спектрах поглощения арилиминов **3a–c** содержатся длинноволновые максимумы в диапазоне 456–472 нм. Бензилимин **3d** поглоща-

ет в более коротковолновой области 422 нм. Все имины обнаруживают флуоресценцию в районе 471–520 нм (табл. 1, рис. 1). Спектры возбуждения флуоресценции хорошо совпадают с соответствующими максимумами поглощения.

Иохромные свойства иминов **3a–d** по отношению к катионам и анионам были исследованы в ацетонитриле при помощи электронных спектров поглощения и спектров флуоресценции.

Арилимины **3a–c** демонстрируют незначительный гипсохромный сдвиг полосы погло-

Таблица 1. Спектры поглощения и флуоресценции иминов **3a–d** в ацетонитриле*
Table 1. Absorption and fluorescence spectra of imines **3a–d** in acetonitrile*

Соединение Compound	Поглощение, $\lambda_{\max}^{\text{abs}}/\text{нм}$, ($\epsilon \cdot 10^{-3}$, л $\times$ моль $^{-1} \times$ см $^{-1}$) Absorption, $\lambda_{\max}^{\text{abs}}/\text{нм}$, ($\epsilon \cdot 10^{-3}$, L mol $^{-1}$ cm $^{-1}$)	Флуоресценция, $\lambda_{\max}^{\text{fl}}/\text{нм}$, (I_{fl} , отн. ед.) Fluorescence, $\lambda_{\max}^{\text{fl}}/\text{нм}$, (I_{fl} , a.u.)
3a	345 (10200), 456 (15400)	498 (380)
3b	350 (15200), 465 (22400)	520 (580)
3c	353 (14000), 472 (23600)	533 (390)
3d	330 (9200), 422 (9500)	471 (465)

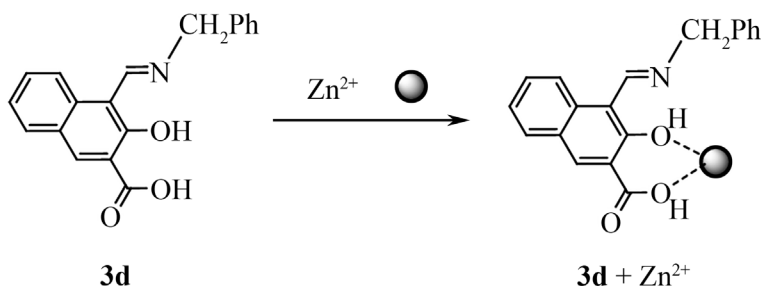
Примечание. * – $\lambda_{\max}^{\text{abs}}$, $\lambda_{\max}^{\text{fl}}$ – максимумы полос поглощения и флуоресценции соответственно; I_{fl} – интенсивность флуоресценции при $V = 940$ В.

Note. * – $\lambda_{\max}^{\text{abs}}$, $\lambda_{\max}^{\text{fl}}$ – maxima of absorption and fluorescence bands, respectively; I_{fl} – fluorescence intensity at $V = 940$ V.

щения при добавлении катионов d -металлов без существенного изменения окраски раствора (рис. 2, на примере фенилимина **3a**). Спектры испускания (рис. 2) в основном также близки к исходным спектрам флуоресценции лигандов. Однако в присутствии ионов Zn^{2+} эмиссия демонстрирует батофлорный сдвиг на 20 нм. В случае иона Cu^{2+} наблюдается практически полное тушение флуоресценции, что обусловлено парамагнитными свойствами катиона меди(II) [18].

Бензилимин **3d** имеет сходные спектры поглощения в присутствии катионов, однако демонстрирует селективное относительное увеличение интенсивности эмиссии I/I_0 в 180 раз в присутствии ионов Zn^{2+} , что значительно выше, чем у известных флуоресцентных хемосенсоров на цинк(II), также содержащих координационно-активные *орто*-расположенные заместители COOH и OH [19]. По данным метода изомолярных серий стехиометрия комплексообразования соединения **3d** с катионами цинка(II) соответствует соотношению 1 : 1 (схема 2).

Схема 2



При добавлении тетра-бутиламмониевых солей (TBAX: X = F, Cl, Br, I, CN, SCN, NO_3 , HSO_4 , H_2PO_4) к растворам иминов **3a–d** наблюдается отчетливый «naked-eye» эффект с изменением ярко-желтого цвета раствора на бледно-желтый в случае фторид- и цианид-анионов (рис. 3, на примере бензилимина **3d**), тогда как остальные анионы незначительно влияют на характер абсорбции.

По аналогии с известными литературными данными [20] можно полагать, что анионы образуют координационные связи с атомами водорода групп OH (вплоть до полного или частичного отрыва протона). Одновременно происходит гипсохромный сдвиг полосы испускания на 40–50 нм. Однако если для арилиминов **3a–c** интенсивность эмиссии меняет-

ся незначительно, то бензилимин **3d** демонстрирует рекордные значения относительного увеличения интенсивности эмиссии I/I_0 – 470 и 575 (цианид- и фторид-анионы соответственно) (рис. 4). Для удобства отображения полученных данных на одном рисунке спектры флуоресценции комплексов бензилимина **3d** с анионами были измерены при низком напряжении $V = 600$ В (ср. с таблицей 1, в которой интенсивность эмиссии приведена при стандартном напряжении $V = 940$ В). В этих условиях исходная флуоресценция лиганда **3d** уменьшается практически до нулевых значений (рис. 4, кривая 1).

По данным спектрофотометрического титрования и метода изомолярных серий соединение **3d** образует с анионами CN^- и F^- комплексы состава 1 : 1.

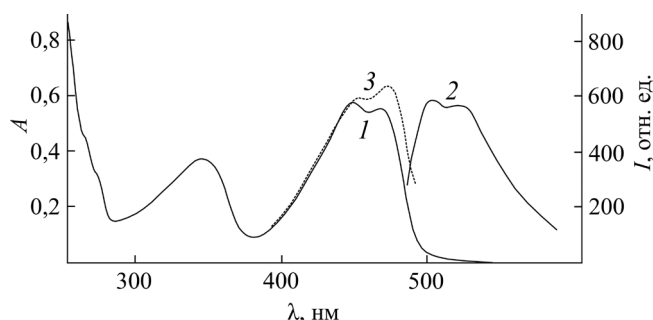


Рис. 1. Спектры поглощения (1), флуоресценции (2) и возбуждения флуоресценции (3) соединения **3b** в ацетонитриле ($c 2,5 \times 10^{-5}$ моль/л).

Fig. 1. Absorption (1), fluorescence (2) and fluorescence excitation (3) spectra of compound **3b** in acetonitrile ($c 2.5 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹).

Таким образом, синтезированы имины 4-формил-3-гидрокси-2-нафтойной кислоты и исследованы их спектрально-люминесцентные и иохромные свойства. Арилимины показывают небольшой гипсохромный сдвиг полосы поглощения при добавлении катионов *d*-металлов. Спектры испускания близки к исходным спектрам флуоресценции лигандов, лишь в случае иона Cu²⁺ наблюдается практически полное тушение флуоресценции. Бензилимин демонстрирует селективное относительное увеличения интенсивности эмиссии I/I_0 в 180 раз в присутствии катионов Zn²⁺. Все синтезированные имины проявляют отчетливый «naked-eye» эффект с изменением ярко-желтого цвета раствора на бледно-желтый в случае фторид- и цианид-анионов, тогда как остальные анионы незначительно влияют на характер абсорбции. При этом бензилимин обнаруживает рекордные значения относи-

тельного увеличения интенсивности эмиссии I/I_0 – 470 и 575 для анионов CN⁻ и F⁻ соответственно, что позволяет считать его эффективным и селективным полифункциональным флуоресцентным сенсором для детектирования ионов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Спектры ЯМР ¹H получали на спектрометре Bruker Avance Neo 300 (300 МГц) в ДМСО-*d*₆. В качестве внутреннего стандарта использовался остаточный сигнал ДМСО. Колебательные спектры записывали на приборе FT/IR-6800 FTIR (JASCO). Электронные спектры поглощения снимали на спектрофотометре Varian Cary 100. Спектры люминесценции измеряли на спектрофлуориметре Varian Cary Eclipse. Для приготовления растворов использовали ацетонитрил спектральной чистоты, перхлораты и ацетаты *d*-металлов и тетрабутиламмониевые соли (Aldrich). Температуры плавления измеряли в стеклянных капиллярах на приборе ПТП (М). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Южного федерального университета «Молекулярная спектроскопия».

4-формил-3-гидрокси-2-нафталин-2-карбоновая кислота (2). К этил-N-фенилимидоформиату (15 мл) добавляли 3-гидрокси-2-нафталин-2-карбоновую кислоту (35 ммоль) **1** и нагревали при 170–180 °С в течение 6 ч. Реакционную смесь охлаждали, разбавляли 25 мл этилового спирта, осадок фенилимина отфильтровывали. Полученный осадок растворяли в диоксане (100 мл), нагревали до 60–70 °С и разбавляли 18%-й соляной кислотой (40 мл). Раствор выдерживали при этой температуре 10–15 мин, добавляли 100 мл воды и охлаждали. Выделившийся осадок кислоты **2** отфильтровывали, промывали водой, сушили и перекристаллизовывали из толуола. Выход 48 %. Т. пл. 225–227 °С [17].

Фенилимин 4-формил-3-гидрокси-2-нафталин-2-карбоновой кислоты (3a). Растворяли 1 ммоль 4-формил-3-гидрокси-2-нафталин-2-карбоновой кислоты в *i*-PrOH и прибавляли 1 ммоль анилина. Смесь кипятили 0,5 ч, охлаждали, отфильтровывали осадок и перекристаллизовывали из смеси *n*-бутанол – ДМФА (1 : 1). Выход 70 %, т. пл. 260–262 °С. ИК-спектр, ν , см⁻¹: 3500 (ОН), 1620 (C=O), 1580 (C=N), 1550 (C=C). Спектр ЯМР ¹H, δ , м.д.: 7,39–7,46 м (2H_{Ar}), 7,55–7,60 м (2H_{Ar}), 7,69–7,74 м (1H_{Ar}), 7,89–7,92 м (1H_{Ar}), 8,00–8,07 м (1H_{Ar}), 8,50–8,60 м (1H_{Ar}), 8,84 с (1H_{Ar}), 9,72 д (1H, СН,

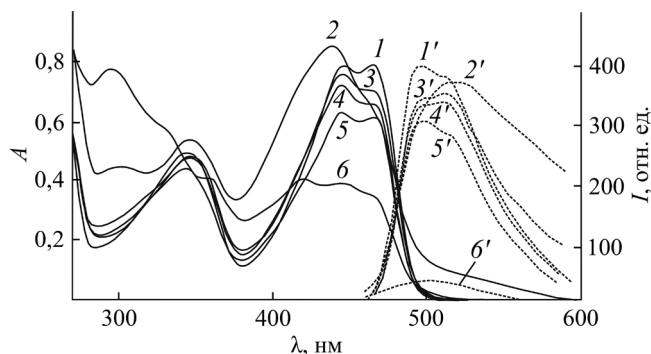


Рис. 2. Спектры поглощения и флуоресценции фенилимина **3a** в ацетонитриле ($c 5,0 \times 10^{-5}$ моль/л) до (1, 1') и после прибавления катионов Zn²⁺ (2, 2'), Cd²⁺ (3, 3'), Hg²⁺ (4, 4'), Co²⁺ (5, 5') и Cu²⁺ (6, 6') ($c 7,5 \times 10^{-5}$ моль/л).

Fig. 2. Absorption and fluorescence spectra of phenylimine **3a** in acetonitrile ($c 5.0 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹) before (1, 1') and after addition of Zn²⁺ (2, 2'), Cd²⁺ (3, 3'), Hg²⁺ (4, 4'), Co²⁺ (5, 5') and Cu²⁺ (6, 6') cations ($c 7.5 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹).

$J = 8,7$ Гц), 14,77 д (1H, OH, $J = 11,6$ Гц), 15,68 уш. с (1H, OH). Найдено, %: С 74,29; Н 4,43; N 4,86. $C_{18}H_{13}NO_3$. Вычислено, %: С 74,22; Н 4,50; N 4,81.

4-толилимин 4-формил-3-гидрокси-нафталин-2-карбоновой кислоты (3b). Получали аналогично вышеописанной методике для имина **3a**. Выход 73 %, т. пл. 265–267 °С. ИК-спектр, ν , cm^{-1} : 3501 (OH), 1622 (C=O), 1583 (C=N), 1550 (C=C). Спектр ЯМР 1H , δ , м.д.: 2,38 с (3H, Me), 7,37–7,45 м (2H_{Ar}), 7,55–7,60 м (2H_{Ar}), 7,68–7,81 м (3H_{Ar}), 8,01–8,03 м (1H_{Ar}), 8,50–8,54 м (1H_{Ar}), 8,83 с (1H_{Ar}), 9,67–9,69 м (1H, CH), 14,81 уш. с (1H, OH), 15,78 уш. с (1H, OH). Найдено, %: С 74,69; Н 4,93; N 4,56. $C_{19}H_{15}NO_3$. Вычислено, %: С 74,74; Н 4,95; N 4,59.

4-метоксифенилимин 4-формил-3-гидрокси-нафталин-2-карбоновой кислоты (3c). Получали аналогично вышеописанной методике для имина **3a**. Выход 73 %, т. пл. 258–260 °С. ИК-спектр, ν , cm^{-1} : 3505 (OH), 1621 (C=O), 1585 (C=N), 1548 (C=C). Спектр ЯМР 1H , δ , м.д.: 3,80 с (3H, MeO), 7,12 д (2H_{Ar}, $J = 9,0$ Гц), 7,38–7,43 м (1H_{Ar}), 7,66–7,71 м (1H_{Ar}), 7,86 д (2H_{Ar}, $J = 9,0$ Гц), 7,99–8,01 м (1H_{Ar}), 8,48–8,51 м (1H_{Ar}), 8,79 с (1H_{Ar}), 9,64 уш. с (1H, CH), 14,83 уш. с (1H, OH), 15,85 уш. с (1H, OH). Найдено, %: С 71,09; Н 4,73; N 4,46. $C_{19}H_{15}NO_4$. Вычислено, %: С 71,02; Н 4,71; N 4,36.

Бензилимин 4-формил-3-гидрокси-нафталин-2-карбоновой кислоты (3d). Получали аналогично вышеописанной методике для имина **3a**. Выход 73 %, т. пл. 255–257 °С. ИК-спектр, ν , cm^{-1} : 3515 (OH), 1625 (C=O), 1572 (C=N), 1555 (C=C). Спектр ЯМР 1H , δ , м.д.: 5,01 уш. с (2H, CH₂), 7,34–7,52 м (6H_{Ar}), 7,65–7,70 м (1H_{Ar}), 7,96–7,99 м (1H_{Ar}), 8,29–8,32 м (1H_{Ar}), 8,75 с (1H_{Ar}), 9,58 уш. с (1H, CH), 14,89 уш. с (1H, OH), 15,95 уш. с (1H, OH). Найдено, %: С 74,79; Н 4,83; N 4,46. $C_{19}H_{15}NO_3$. Вычислено, %: С 74,74; Н 4,95; N 4,59.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ) за проведение ЯМР-экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. 2020. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*. 6(9): E04691. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
2. Fu F., Wang Q. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of Environmental Management*. 92(3): 407–418. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011

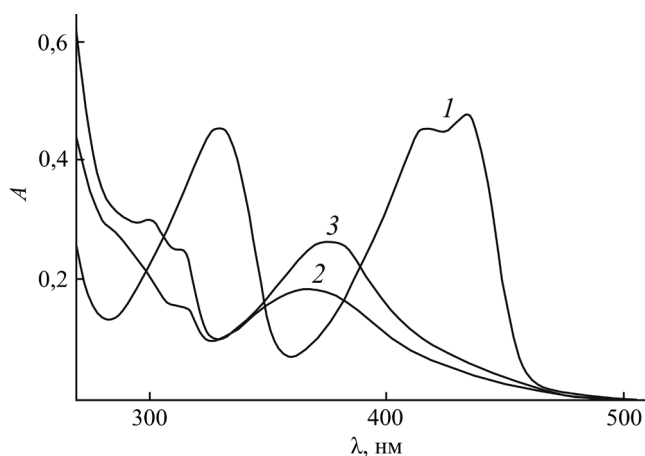


Рис. 3. Спектры поглощения бензилимина **3d** в ацетонитриле ($c 2,5 \times 10^{-5}$ моль/л) до (1) и после прибавления анионов CN^- (2) и F^- (3) ($c 5,0 \times 10^{-5}$ моль/л).

Fig. 3. Absorption spectra of benzylimine **3d** in acetonitrile ($c 2,5 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹) before (1) and after addition of anions CN^- (2) and F^- (3) ($c 5,0 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹).

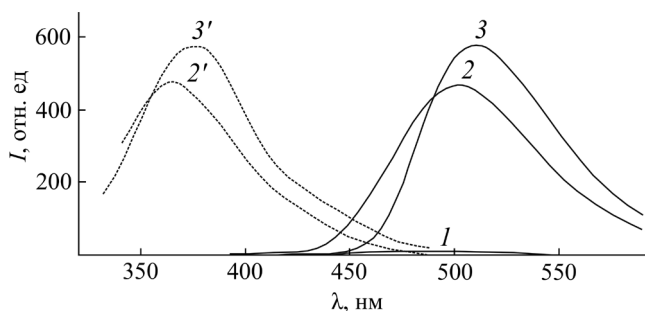


Рис. 4. Спектры флуоресценции и возбуждения флуоресценции бензилимина **3d** в ацетонитриле ($c 2,5 \times 10^{-5}$ моль/л) до (1) и после прибавления анионов CN^- (2, 2') и F^- (3, 3') ($c 5,0 \times 10^{-5}$ моль/л).

Fig. 4. Fluorescence and fluorescence excitation spectra of benzylimine **3d** in acetonitrile ($c 2,5 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹) before (1) and after addition of CN^- (2, 2') and F^- (3, 3') anions ($c 5,0 \times 10^{-5}$ mol L⁻¹).

Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2023-2020, а также в рамках реализации государственного задания Южного научного центра Российской академии наук № 122020100282-6 (Е.Н. Шепеленко и А.Д. Дубоносов).

3. Peckham S., Awofeso N. 2014. Water fluoridation: a critical review of the physiological effects of ingested fluoride as a public health intervention. *The Scientific World Journal*. 2014: 293019. doi: 10.1155/2014/293019
4. Jaszczak E., Polkowska Z., Narkowicz S., Namieśnik J. 2017. Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 24(19): 15929–15948. doi: 10.1007/s11356-017-9081-7

5. Dongare P.R., Gore A.H. 2021. Recent advances in colorimetric and fluorescent chemosensors for ionic species: design, principle and optical signalling mechanism. *ChemistrySelect*. 6(23): 5657–5669. doi: 10.1002/slct.202101090
6. Patil N.S., Dhake R.B., Ahamed M.I., Fegade U. 2020. A mini review on organic chemosensors for cation recognition (2013–19). *Journal of Fluorescence*. 30(6): 1295–1330. doi: 10.1007/s10895-020-02554-7
7. Upadhyay S., Singh A., Sinha R., Omer S., Negi K. 2019. Colorimetric chemosensors for *d*-metal ions: A review in the past, present and future prospect. *Journal of Molecular Structure*. 1193: 89–102. doi: 10.1016/j.molstruc.2019.05.007
8. Chen L., Berry S.N., Wu X., Howe E.N.W., Gale P.A. 2020. Advances in anion receptor chemistry. *Chem*. 6(1): 61–141. doi: 10.1016/j.chempr.2019.12.002
9. Busschaert N., Caltagirone C., Van Rossom W., Gale P.A. 2015. Applications of supramolecular anion recognition. *Chemical Reviews*. 115(15): 8038–8155. doi: 10.1021/acs.chemrev.5b00099
10. Khan S., Chen X., Almahri A., Allehyani E.S., Alhumaydhi F.A., Ibrahim M.M., Ali S. 2021. Recent developments in fluorescent and colorimetric chemosensors based on schiff bases for metallic cations detection: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(6): 106381. doi: 10.1016/j.jece.2021.106381
11. Krishnan U., Iyer S.K. 2022. Iminothiophenol Schiff base-based fluorescent probe for dual detection of Hg^{2+} and Cr^{3+} ions and its application in real sample analysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 425: 113663. doi: 10.1016/j.jphotochem.2021.113663
12. Gopalakrishnan K., Angamaly S.A., Pradeep S.D., Madhusoodhanan D.T., Manoharan D.K., Mohanan P.V. 2022. A novel imidazole bound Schiff Base as highly selective “turn-on” fluorescence sensor for Zn^{2+} and colorimetric kit for Co^{2+} . *Journal of Fluorescence*. 32(1): 189–202. doi: 10.1007/s10895-021-02839-5
13. Parchegani F., Amani S., Zendejdel M. 2021. Eco-friendly chitosan Schiff base as an efficient sensor for trace anion detection. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 255: 119714. doi: 10.1016/j.saa.2021.119714
14. Özdemir Ö. 2019. Synthesis of new luminescent bis-azo-linkage Schiff bases containing aminophenol and its derivative. Part I: Studying of their tautomeric, acidochromic, thermochromic, ionochromic, and photoluminescence properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 380: 111868. doi: 10.1016/j.jphotochem.2019.111868
15. Arabahmadi R. 2022. Hydrazone-based Schiff base dual chemosensor for recognition of Cu^{2+} and F^{-} by 1:2 demultiplexer, half adder, half subtractor, molecular keypad lock and logically reversible transfer gate logic circuits and its application as test kit. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 427: 113797. doi: 10.1016/j.jphotochem.2022.113797
16. Wynberg H., Meijer E.W. 1982. The Reimer-Tiemann reaction. *Organic Reactions*. 28: 1–36. doi: 10.1002/0471264180.or028.01
17. Bellerby J.M., Morris J.H., Smith W.E. 1985. An aromatic Schiff base stabilised as a coordinated enol iminium zwitterion by complex formation with a series of divalent metal ions. *Inorganica Chimica Acta*. 96(2): 203–207. doi: 10.1016/S0020-1693(00)87582-9
18. Cotruvo J.A. Jr., Aron A.T., Ramos-Torres K.M., Chang C.J. 2015. Synthetic fluorescent probes for studying copper in biological systems. *Chemical Society Reviews*. 44(13): 4400–4414. doi: 10.1039/c4cs00346b
19. Mariyappan M., Malini N., Sivamani J., Sivaraman G., Harikrishnan M., Murugesan S., Siva A. 2019. Turn-on fluorescence chemosensor for Zn^{2+} ion using salicylate based azo derivatives and their application in cell-bioimaging. *Journal of Fluorescence*. 29(3): 737–749. doi: 10.1007/s10895-019-02382-4
20. Udhayakumari D. 2020. Detection of toxic fluoride ion via chromogenic and fluorogenic sensing. A comprehensive review of the year 2015–2019. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 228: 117817. doi: 10.1016/j.saa.2019.117817

Поступила 26.01.2023