

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКСА (E)-3-(4-МЕТОКСИФЕНИЛ)-6- ((ФЕНИЛИМИНО)МЕТИЛ)ПИКОЛИНОНИТРИЛА С ИОДИДОМ КАДМИЯ

Е.А. Кудряшова^{1,2}, А.В. Рыбакова^{3✉}, В.Е. Мацак¹, Ю.М. Сайфутдинова¹,
А.С. Маркина^{1,2}, А.С. Алексеева^{1,4}, М.А. Еремеева³, Н.В. Словеснова^{1,5},
Д.С. Копчук^{1,2}, Г.В. Зырянов^{1,2}

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

² Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

⁴ Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех), Москва, Россия

⁵ Уральский государственный медицинский университет Минздрава РФ,
Екатеринбург, Россия

✉ rybakovaav@susu.ru

Аннотация. Новый металлокомплекс был получен взаимодействием (E)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинонитрила и эквивалентного количества иодида кадмия. Структура подтверждена данными масс-спектрометрии и элементного анализа, а также детально изучена методом рентгеноструктурного анализа, в том числе в сравнении с имеющимися в литературе сведениями. Установлено, что комплекс в кристалле представляет собой моноядерные единицы, которые образуют бесконечные цепи вдоль оси *b* посредством слабых I...π-взаимодействий. В полученной структуре атом кадмия четырехкоординирован двумя атомами азота и двумя атомами иода, при этом в Кембриджской структурной базе данных был найден только один пример структуры с четырехкоординированным атомом кадмия и аналогичными лигандами. Значительно больше примеров centrosymmetric биядерных соединений с центральным ядром Cd₂I₂ и пентакоординированными атомами кадмия. Описаны особенности супрамолекулярной структуры нового комплекса и аналогичной ему структуре (N-(2,6-диизопропилфенил)-1-(6-метоксипиридин-2-ил)этанамин)-дииодокадмия.

Ключевые слова: металлокомплекс, рентгеноструктурный анализ, иодид кадмия, основания Шиффа

Благодарности. Работа проведена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений» (ЦКП «САОС») Института Органического Синтеза УрО РАН. Спектральные данные получены в Лаборатории комплексных исследований и экспертизы органических материалов Центра коллективного пользования уникальным оборудованием Уральского федерального университета, <https://ckp.urfu.ru>. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124020200072-0). <http://www.minobrnauki.gov.ru>.

Для цитирования: Рентгеноструктурное исследование структуры металлокомплекса (E)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинонитрила с иодидом кадмия / Е.А. Кудряшова, А.В. Рыбакова, В.Е. Мацак и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 2. С. 119–126. DOI: 10.14529/chem260210

XRD STUDY OF THE STRUCTURE OF THE METAL COMPLEX (*E*)-3-(4-METHOXYPHENYL)-6-((PHENYLIMINO)METHYL)PICOLINONITRILE WITH CADMIUM IODIDE

E.A. Kudryashova^{1,2}, A.V. Rybakova^{3✉}, V.E. Matsak¹, Yu.M. Sayfutdinova¹,
A.S. Markina^{1,2}, A.S. Alekseeva^{1,4}, M.A. Ereemeeva³, N.V. Slovesnova^{1,5},
D.S. Kopchuk^{1,2}, G.V. Zyryanov^{1,2}

¹ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

² I. Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis of UB of the RAS, Yekaterinburg, Russia

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

⁵ Ural State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation,
Yekaterinburg, Russia

✉ rybakovaav@susu.ru

Abstract. The new metal complex was obtained by the interaction of (*E*)-3-(4-methoxyphenyl)-6-((phenylimino)methyl)picolinonitrile and an equivalent amount of cadmium iodide. The structure has been confirmed by chromatography-mass spectrometry, elemental analysis, and detailed X-ray diffraction analysis, inc. in comparison with information available in the literature. It has been established that new complex in the crystal represents mononuclear units that form infinite chains along the *b* axis by means of weak I... π interactions. In the resulting structure, the cadmium atom is four-coordinated by two nitrogen atoms and two iodine atoms, while only one example of structure with a four-coordinated cadmium atom and similar ligands was found in the Cambridge Structural Database. There are significantly more examples of centrosymmetric binuclear compounds with a central Cd₂I₂ core and pentacoordinated cadmium atoms. The features of the supramolecular structure of new complex and a similar structure of (*N*-(2,6-diisopropylphenyl)-1-(6-methoxypyridine-2-yl)ethanimine) cadmium diiodide are described.

Keywords: metal complex, X-ray diffraction analysis, cadmium (II) iodide, Schiff bases

Acknowledgments. The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use "Spectroscopy and Analysis of Organic Compounds" (CCP "CAOS") Institute of Organic Synthesis, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Spectral data were obtained in the Laboratory of Complex Research and Expertise of Organic Materials of the Center for Collective Use of Unique Equipment of the Ural Federal University, <https://ckp.urfu.ru>. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 124020200072-0). <http://www.minobrnauki.gov.ru>.

For citation: Kudryashova E.A., Rybakova A.V., Matsak V.E., Sayfutdinova Yu.M., Markina A.S., Alekseeva A.S., Ereemeeva M.A., Slovesnova N.V., Kopchuk D.S., Zyryanov G.V. XRD study of the structure of the metal complex (*e*)-3-(4-methoxyphenyl)-6-((phenylimino)methyl)picolinonitrile with cadmium iodide. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(2):119–126. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260210

Введение

В настоящее время металлохелаты азометинов на основе производных пиридин-2-карбальдегида представляют значительный интерес благодаря широкому спектру применения и доступности синтеза. В частности, особый интерес вызывает каталитическая активность металлокомплексов азометинов. В частности, они используются в качестве катализаторов реакций окисления, что позволяет, например, осуществить превращение различных сульфидов до соответствующих сульфонов [1, 2], циклогексана до циклогексанола и циклогексанона в значительно более мягких условиях [3]; катализаторов трехкомпонентного синтеза биолов – активных функционализированных спирооксииндолов [4]; катализаторов синтеза производных 1,2,3-триазола [5]. Некоторые металлокомплексы азометинов являются ферромагнетиками [6]. Также следует отметить обширный спектр биологической активности азометиновых металлохелатов на основе пиридина, включая противоопухолевую [7, 8], антиоксидантную [9], антибактериальную, антимикробную [10] и т. д. Кроме того, собственно данные азометины являются важными реагентами

в органической химии, в том числе в реакциях гетероциклизации Поварова [11, 12], гетарилирования, включая асимметрическое [13], и т. д.

Целью настоящей работы является синтез и детальное изучение металлокомплекса (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинонитрила с иодидом кадмия методом РСА, в том числе в сравнении с имеющимися в литературе сведениями о структуре родственных соединений.

Экспериментальная часть

Масс-спектр (тип ионизации – электрораспыление) записан на приборе MicrOTOF-Q II фирмы Bruker Daltonics.

Элементный анализ выполнен на CHN анализаторе PE 2400 II фирмы Perkin Elmer.

Рентгеноструктурный анализ (РСА) проведен на автоматическом четырехкружном дифрактометре Xcalibur 3 с CCD-детектором по стандартной процедуре (MoK α -излучение, графитовый монохроматор, ω -сканирование с шагом 1°) при $T = 295(2)$ К. Была применена эмпирическая поправка на поглощение. Данные измеренных отражений проиндексированы, интегрированы и масштабированы с использованием пакета программ CrysAlisPro [14]. Структуры расшифрованы методом внутренней фазировки по программе SHELXT [15] и уточнены методом наименьших квадратов по F^2 с использованием программы SHELXL [16]. Расшифровка и уточнение структуры проведены в программной оболочке Olex2 [17]. Неводородные атомы уточнены в анизотропном приближении. Атомы водорода при атомах кислорода выявлены из разностных рядов Фурье. Все остальные атомы водорода помещены в вычисленные положения в соответствии со стереохимическими критериями и уточнены по «схеме наездника». Результаты рентгеноструктурного анализа зарегистрированы в Кембриджской базе структурных данных под номером CCDC 2535215. Эти данные находятся в свободном доступе и могут быть запрошены по адресу www.ccdc.cam.ac.uk.

Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структуры металлокомплекса (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинонитрила с иодидом кадмия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры металлокомплекса (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинонитрила и иодида кадмия

Параметр	Значение
Формула	C ₂₀ H ₁₅ CdI ₂ N ₃ O
<i>M</i>	679,55
Сингония	моноклинная
Пр. группа	<i>P</i> 2 ₁ / <i>c</i>
<i>a</i> , Å	11,9107(4)
<i>b</i> , Å	11,4895(3)
<i>c</i> , Å	15,9378(5)
α , град.	90
β , град.	100,345(3)
γ , град.	90
<i>V</i> , Å ³	2145,60(10)
<i>Z</i>	4
$\rho_{\text{выч}}$, г/см ³	2,104
μ , мм ⁻¹	3,910
<i>F</i> (000)	1272,0
Размер кристалла, мм	0,48 × 0,39 × 0,23
Область сбора данных по 2 θ , град.	4,966–62,25
Интервалы индексов отражений	-12 ≤ <i>h</i> ≤ 17, -15 ≤ <i>k</i> ≤ 15, -22 ≤ <i>l</i> ≤ 14

Параметр	Значение
Измерено отражений	10170
Независимых отражений	5908 [$R_{int} = 0,0359$, $R_{sigma} = 0,0578$]
Переменных уточнения	246
$GOOF$	1,009
R -факторы по $F^2 > 2\sigma(F^2)$	$R_1 = 0,0390$, $wR_2 = 0,0696$
R -факторы по всем отражениям	$R_1 = 0,0643$, $wR_2 = 0,0823$
Остаточная электронная плотность (min/max), $e/\text{Å}^3$	0,65/−0,86

Синтез металлокомплекса (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинитрила и иодида кадмия (5). Кристаллы комплекса, пригодные для РСА, получали медленным упариванием раствора лиганда **1** (45 мг, 0,1436 ммоль) и CdI_2 (52,6 мг, 0,1436 ммоль) в ацетонитриле (5 мл). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 680,83 (100) [$\text{M}+\text{H}$]⁺. Найдено, %: С 35,30; Н 2,29; N 6,11. $\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{CdI}_2\text{N}_3\text{O}$. Вычислено, %: С 35,35; Н 2,22; N 6,18.

Обсуждение результатов

Использованный лиганд – (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинитрил **1** – был синтезирован по ранее разработанной нами методике [18], представленной на схеме. Исходным соединением послужил гидразон изонитрозоацетофенона **2**, который при циклизации с иминоэфиром на основе хлорацетонитрила с последующим цианированием позволил получить 1,2,4-триазин **3**. Превращение в пиридин реакцией Боджера с 2,5-норборнадиеном и дальнейшие модификации хлорметильной группы привели к 3-(4-метоксифенил)-6-формилпиколинитрилу **4**. Азометин **1** был получен взаимодействием альдегида **4** с анилином. Целевой металлокомплекс **5** был синтезирован взаимодействием лиганда **1** с эквивалентным количеством иодида кадмия.

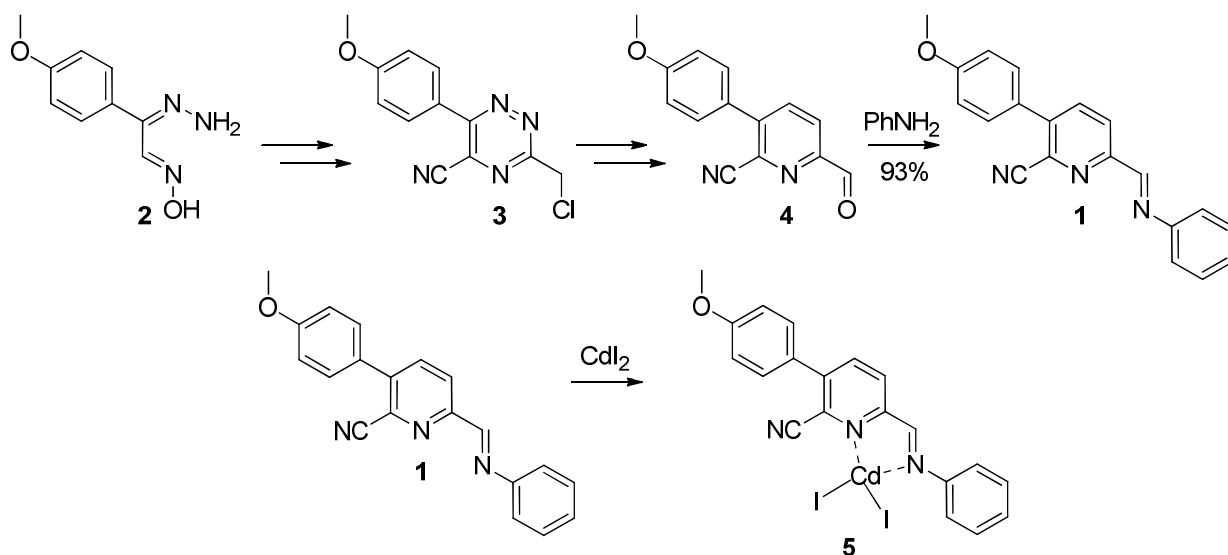


Схема синтеза металлокомплекса (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинитрила с иодидом кадмия (5)

Молекулярная структура металлокомплекса **5** по данным проведенного РСА приведена на рис. 1, а выбранные длины связей и валентные углы – в табл. 2.

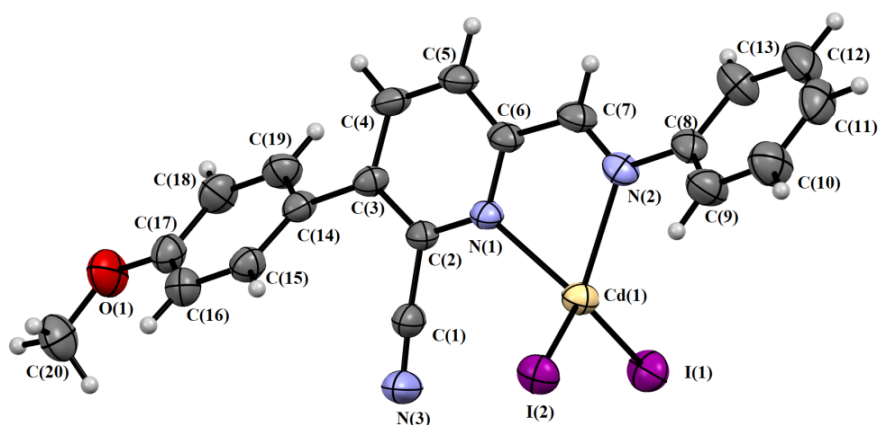


Рис. 1. Общий вид (ORTEP) молекулы, показывающий эллипсоиды с вероятностью смещения 50 % и нумерации атомов в рентгеноструктурном эксперименте для комплекса 5

Таблица 2

Выбранные длины связей и валентные углы для металлокомплекса 5

Связь	Значение	Угол	Значение
Cd1–I2	2,6916(4)	I1–Cd1–I2	123,362(15)
Cd1–I1	2,6674(4)	N2–Cd1–I2	112,78(8)
Cd1–N2	2,324(3)	N2–Cd1–I1	115,62(8)
Cd1–N1	2,337(3)	N2–Cd1–N1	72,42(12)
N1–C6	1,354(5)	N1–Cd1–I2	117,84(7)
N2–C7	1,257(5)	N1–Cd1–I1	103,51(8)

Соединение **5** кристаллизуется в пространственной группе $P2_1/c$ моноклинной сингонии. Атом Cd1 четырехкоординирован двумя атомами азота N1, N2 и двумя атомами иода I1 и I2. В Кембриджской структурной базе данных (Cambridge Structural Database <http://www.ccdc.cam.ac.uk>) нами был найден только один пример структуры с четырехкоординированным атомом кадмия и аналогичными лигандами – (*N*-(2,6-диизопропилфенил)-1-(6-метоксипиридин-2-ил)этанамин)дидиодакadmий(II) **6** (CCDC 1060020 [19]), значительно больше примеров centrosymmetric биядерных соединений с центральным ядром Cd_2I_2 и пентакоординированными атомами кадмия [20–22]. Ещё одна аналогичная структура с четырехкоординированным атомом кадмия найдена для случая, где двумя из четырех лигандов являются атомы брома [23].

Для структуры металлокомплекса **5** наибольшее отклонение от идеального тетраэдра выражено довольно узким углом N2–Cd1–N1, равным 72,42(12)°, что ранее уже было продемонстрировано в структуре аналогичного комплекса (71,62(11)°) [19]. Расстояния Cd–N, как и расстояния Cd–I (см. табл. 2), подобны по значению соответствующим длинам связей для известного в литературе [19] соединения.

Проекция элементарной ячейки вдоль оси *a*, показанная на рис. 2а, показывает, что комплекс **5** в кристалле представляет собой моноядерные единицы, которые образуют бесконечные цепи вдоль оси *b* посредством слабых I... π -взаимодействий. При этом расстояние от атома иода до центра пиридинового цикла составляет 3,79(7) Å, а самое короткое расстояние C...I равно 3,60(3) Å (сумма радиусов Ван-дер-Ваальса соответствующих атомов равна 3,68 Å [24]). Такая супрамолекулярная структура между одной и другой цепью дополнительно стабилизируется водородной связью C–H...N с расстоянием между атомом водорода и акцептором 2,58(8) Å, дополнительные геометрические параметры водородной связи представлены в табл. 3. Следует отметить, что для известного комплекса **6** (CCDC 1060020) нами также обнаружено формирование цепочечной структуры, но при этом основную роль играют sp^3 -CH₃... π -взаимодействия, характеризующиеся расстоянием от атома водорода до центра пиридинового цикла – 2,84(6) Å (рис. 2б), в то время как атомы иода не принимают участия в самоорганизации молекул в кристалле.

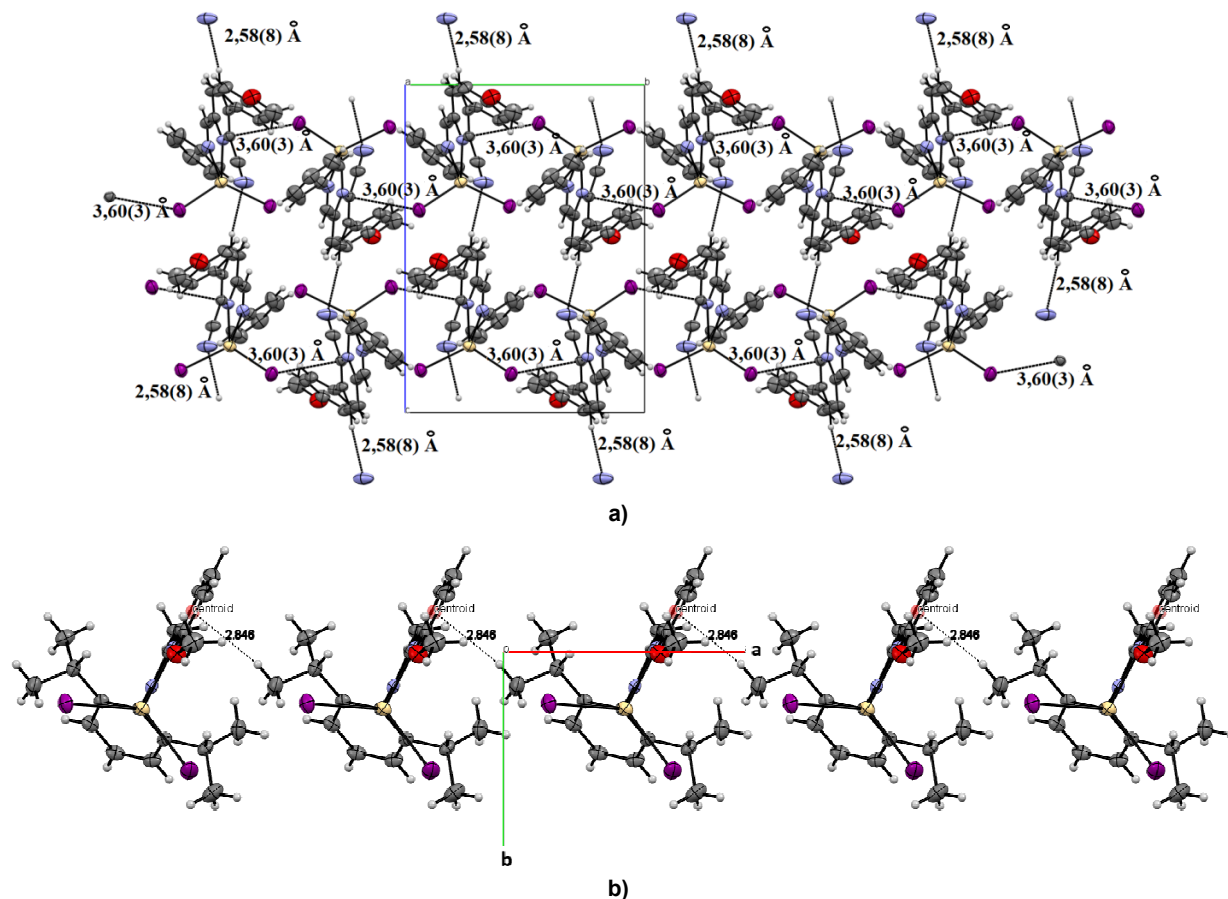


Рис. 2. Упаковка молекул: а) в структуре комплекса 5 за счёт слабых I...π-взаимодействий (проекция вдоль кристаллографической оси a); б) в структуре 6 CCDC 1060020 посредством sp^3 -CH₃...π-взаимодействий (проекция вдоль кристаллографической оси c)

Таблица 3

Геометрические параметры водородной связи в кристалле комплекса 5

Связь D-H...A	D-H, Å	D-H...A, Å	D...A, Å	∠ D-H...A, °
C-H...N	0,93(1)	2,58(8)	3,36(9)	141,8(7)

Заключение

Таким образом, нами получен новый металлокомплекс взаимодействием ранее описанного нами (*E*)-3-(4-метоксифенил)-6-((фенилимино)метил)пиколинитрила и иодида кадмия. Его структура подтверждена данными хромато-масс-спектрометрии, элементного анализа, а также детально изучена методом рентгеноструктурного анализа, в т. ч. в сравнении с имеющимися в литературе сведениями. Установлено, что комплекс **5** в кристалле представляет собой моноядерные единицы, которые образуют бесконечные цепи вдоль оси *b* посредством слабых I...π-взаимодействий. Описаны особенности супрамолекулярной структуры соединения **5** и аналогичной ему структуры (*N*-(2,6-диизопропилфенил)-1-(6-метоксипиридин-2-ил)этанамин)диiodокадмия **6**. Для обоих комплексов характерны цепочечные структуры. Однако структура комплекса **5** дополнительно стабилизируется водородной связью C-H...N между одной и другой цепью, а формирование цепочечной структуры комплекса **6** в основном происходит за счет sp^3 -CH₃...π-взаимодействия при безучастных в самоорганизации молекул атомов иода.

Список источников

1. Menati S., Rudbari H. A., Khorshidifard M., Jalilian F. J. Mol. Struc. 2016. V. 1103. P. 94. DOI: 10.1016/j.molstruc.2015.08.060
2. Digvijaysinh K.P., Pinal M.B., Niraj J.T., Pinal M.J., Ravi V.P., Paba R.S., Hares D.N., Nasim K., Dipak M. J. Mol. Catal. 2016. V. 474. No 110424.

3. *Buvaylo E.A., Kokozay V.N., Vassilyeva O.Y., Skelton B.W., Nesterova O.V., Pombeiro A.J.L.* Inorg. Chem. Commun. 2017. V. 78. P. 85. DOI: 10.1016/j.inoche.2017.03.008
4. *Ghorbani S. H., Hashemi M. M., Bazgir A. J.* Chem. Biol. Phys. Sci. Sec. B. 2015. V. 5. No. 3. P. 2762.
5. *Babaei B., Mamaghani M., Mokhtary M.* Reac. Kinet. Mech. Cat. 2019. V. 128. P. 379. DOI: 10.1007/s11144-019-01636-3
6. *Shi-Qiang B., Chen-Jie F., Zheng H., En-Qing G., Chun-Hua Y., Andy Hora T. S.* Dalton Trans. 2012. V. 41. P. 13379. DOI: 10.1039/c2dt31186k.
7. *Srdic-Rajic T., Zec M., Todorovic T., AnCelkovic K., Radulovic S.* Eur. J. Med. Chem. 2011. V. 46 P. 3734. DOI: 10.1016/j.ejmech.2011.05.039
8. *Mishra A., Tahlan S., Ramasamy K., Lim S. M., Shah S. A. A., Narasimhan B.* Mini-Rev. Med. Chem. 2020. V. 20. P. 1311. DOI: 10.2174/1389557520666200505124125
9. *Kostenkova K., Arhouma Z., Postal K., Crans D.C., Crick D.C., Nunes G.G., Rajan A., Kortz U.* J. Inorg. Biochem. 2021. V. 217. No. 111357. DOI:10.1016/j.jinorgbio.2021.111357
10. *Abdel-Rahman L.H., El-Khatib R.M., Nassr L.A.E., Abu-Dief A.M., Ismael M., Seleem A.A.* Spectrochimica Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc. 2014. V. 117. P. 366. DOI: 10.1016/j.saa.2013.07.056
11. *Ghashghaei O., Masdeu C., Alonso C., Palacios F., Lavilla R.* Drug Discovery Today: Technologies. 2018. V. 29 P. 71. DOI: 10.1016/j.ddtec.2018.08.004
12. *Chakraborty B., Kar A., Chanda R., Jana U.* J. Org. Chem. 2020. V. 14. P. 9281. DOI: 10.1021/acs.joc.0c01300
13. *Egorov I.N., Santra S., Kopchuk D.S., Kovalev I.S., Zyryanov G.V., Majee A., Ranu B.C., Rusinov V.L., Chupakhin O.N.* Adv. Synt. Cat. 2020. V. 20. P. 4293. DOI: 10.1002/adsc.202000548
14. CrysAlisPro, version 1.171.39.38a, Data Collection, Reduction and Correction Program, Rigaku Oxford Diffraction, 2017.
15. *Sheldrick G.M.* Acta Crystallogr. A. 2015. V. A71. P. 3. DOI: 10.1107/S2053273314026370
16. *Sheldrick G.M.* Acta Cryst. 2008. A64. 112. DOI: 10.1107/S2053229614024218
17. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J., et al.* J. Appl. Cryst. 2009. V. 42, Is. 2. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726
18. *Kudryashova E.A., Valieva M.I., Shtaitz Y.K., Mochulskaya N.N., Krinochkin A.P., Kopchuk D.S., Zyryanov G.V., Rusinov V.L.* Russ. J. Gen. Chem. 2023. V. 93. P. S73. DOI: 10.1134/S107036322314013X
19. *Ricica T., Dostal L., Bouska M., Ruzicka A., Jambor R.* Inorg. Chimica Acta. 2015. V. 436. P. 39. DOI: 10.1016/j.ica.2015.07.017
20. *Basu Baul T. S., Seik Weng Ng., Tiekink E. R. T., Kundu S.* Acta Cryst. 2013. V. 69, P. 623. DOI:10.1107/S160053681302905X
21. *Basu Baul T. S., Kundu S., Seik Weng Ng., Guchhait N., Tiekink E. R. T.* J. Coord. Chem. 2014. V. 67, P. 96. DOI: 10.1080/00958972.2013.864393
22. *Zhang Na, Liu D., Zhang H., Yu J., Wu Z., Zhou H.* RSC Adv. 2016. V. 6. P. 86158. DOI: 10.1039/C6RA16821C
23. *Gassara M., Liu X., Guesmi A., Houas A., Hamadid N.B., Naili H.* Mater. Adv. 2024. V. 5, P. 1130. DOI: 10.1039/d3ma00581j
24. *Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R., Cramer C.J., Truhlar D.G.* J. Phys. Chem. A 2009. V. 113. P. 5806. DOI:10.1021/jp8111556

Кудряшова Екатерина Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов, зеленых методов и биотехнологий НОИИЦ ХФТ ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; аспирант 1-го года обучения по специальности 1.4.3. Органическая химия, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: ekaterina.kudriashova@urfu.ru

Рыбакова Анастасия Владимировна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: rybakovaav@susu.ru

Мацак Виолетта Евгеньевна – студент 3-го курса бакалавриата по направлению 19.03.01 Биотехнология, кафедра технологии органического синтеза ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: violetta.evgenyevna.matsak@gmail.com

Сайфутдинова Юлия Мударисовна – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов, зеленых методов и биотехнологий НОиИЦ ХФТ ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: minjuliya1107@yandex.ru

Маркина Александра Сергеевна – лаборант-исследователь лаборатории перспективных материалов, зеленых методов и биотехнологий НОиИЦ ХФТ ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; лаборант-исследователь Технологической лаборатории, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: alexandra475747@gmail.com

Алексеева Анастасия Сергеевна – лаборант-исследователь лаборатории перспективных материалов, зеленых методов и биотехнологий НОиИЦ ХФТ ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия; лаборант Лаборатории доклинических исследований Института биофизики будущего, Московский физико-технический институт (МФТИ, Физтех), Москва, Россия. E-mail: aas10804@gmail.com

Еремеева Маргарита Александровна – студент 4-го курса бакалавриата по направлению 04.03.01 Химия, кафедра теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: gorshchitsa@gmail.com

Словеснова Наталья Валерьевна – ассистент кафедры фармации, Уральский государственный медицинский университет Минздрава РФ, Екатеринбург, Россия; младший научный сотрудник кафедры органической и биомолекулярной химии, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: natalislovesnova@yandex.ru

Копчук Дмитрий Сергеевич – доктор химических наук, старший научный сотрудник Лаборатории координационных соединений, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия; старший научный сотрудник кафедры органической и биомолекулярной химии ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: dkopchuk@mail.ru

Зырянов Григорий Васильевич – доктор химических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории координационных соединений, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия; профессор кафедры органической и биомолекулярной химии ХТИ, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: g.v.zyrianov@urfu.ru

*Статья поступила в редакцию 14 января 2026 г.
The article was submitted 14 January 2026.*