

СТРОЕНИЕ ЦИАНОАУРАТНОГО КОМПЛЕКСА [Ph₃PCH₂CN][Au{Cl_{0,54}(CN)_{0,46}}CN]

В.В. Шарутин[✉], А.Н. Ефремов, Д.П. Шевченко
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
[✉] sharutin50@mail.ru

Аннотация. По реакции дихлородицианоаурата калия с хлоридом цианометилтрифенилфосфония в качестве побочного продукта получен комплекс [Ph₃PCH₂CN][Au{Cl_{0,54}(CN)_{0,46}}CN] (**1**). Строение соединения **1** установлено методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Согласно данным РСА, цианоауратный комплекс **1** [C_{21,46}H₁₇N_{2,46}Cl_{0,54}PAu, *M* = 556,41; ромбическая сингония, пр. гр. *P*2₁2₁2₁; параметры ячейки: *a* = 8,420(4) Å, *b* = 13,638(6) Å, *c* = 18,053(9) Å; α = 90,00°, β = 90,00°, γ = 90,00°, *V* = 2073,1(16) Å³, *Z* = 4; ρ_{выч} = 1,783 г/см³; μ = 7,251 мм⁻¹; *F*(000) = 1065,0; обл. сбора по 2θ: 5,686–55,93°; –11 ≤ *h* ≤ 11, –17 ≤ *k* ≤ 17, –23 ≤ *l* ≤ 23; всего отражений 32243; независимых отражений 4942 (*R*_{int} = 0,0378); GOOF = 1,055; *R*-фактор 4,99 %] имеет ионное строение и состоит из цианометилтрифенилфосфониевого катиона с практически неискаженной тетраэдрической геометрией атома фосфора и почти линейного аниона [Au(CN)X][–], где X = Cl или CN (разупорядочены как 0,54_{Cl}:0,46_{CN}). В катионе углы CPC изменяются в интервале 106,1(2)–110,9(2)°; расстояния P–C составляют 1,778(5)–1,813(5) Å. В анионе *транс*-углы близки к 180°; расстояния Au–Cl и Au–C равны 2,405(10) Å и 1,968(7), 2,049(19) Å соответственно. Кристаллическая организация соединения **1** обусловлена межмолекулярными водородными контактами C–H⋯N≡C (2,22–2,74 Å), C–H⋯Cl–Au (2,91 Å) и C–H⋯π (2,80 Å). Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов нитрата **1** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC 2045164; deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

Ключевые слова: дихлородицианоаурат калия, хлорид цианометилтрифенилфосфония, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ

Для цитирования: Шарутин В.В., Ефремов А.Н., Шевченко Д.П. Строение цианоауратного комплекса [Ph₃PCH₂CN][Au{Cl_{0,54}(CN)_{0,46}}CN] // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 3. С. 57–63. DOI: 10.14529/chem250304

Original article
DOI: 10.14529/chem250304

STRUCTURE OF CYANOAUATE COMPLEX [Ph₃PCH₂CN][Au{Cl_{0,54}(CN)_{0,46}}CN]

V.V. Sharutin[✉], A.N. Efremov, D.P. Shevchenko
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
[✉] sharutin50@mail.ru

Abstract. The reaction of potassium dichlorodicyanoaurate with cyanomethyltriphenylphosphonium chloride has yielded the [Ph₃PCH₂CN][Au{Cl_{0,54}(CN)_{0,46}}CN] complex as a by-product. The crystal structure of compound **1** has been determined by X-ray diffraction analysis (XRD). According to the XRD data, cyanoaurate complex **1** [C_{21,46}H₁₇N_{2,46}Cl_{0,54}PAu, *M* = 556.41; orthorhombic crystal system, sp. gr. *P*2₁2₁2₁; cell parameters: *a* = 8.420(4) Å, *b* = 13.638(6) Å, *c* = 18.053(9) Å; α = 90.00°, β = 90.00°, γ = 90.00°, *V* = 2073.1(16) Å³, *Z* = 4; ρ_{calc} = 1.783 g/cm³; μ = 7.251 mm⁻¹; *F*(000) = 1065.0; 2θ_{max}: 5.686–55.93°; –11 ≤ *h* ≤ 11, –17 ≤ *k* ≤ 17, –23 ≤ *l* ≤ 23; 32243 reflections collected; 4942 independent reflections (*R*_{int} = 0.0378); GOOF = 1.055; *R*-factor 4.99 %] has an ionic structure and consists of the cyanomethyltriphenylphosphonium cation with almost undistorted tetrahedral coordination of the phosphorus atom

and of a nearly linear anion $[\text{Au}(\text{CN})\text{X}]^-$, where $\text{X} = \text{Cl}$ or CN (disordered as $0.54_{\text{Cl}} : 0.46_{\text{CN}}$). In the cation, the CPC angles vary from $106.1(2)^\circ$ to $110.9(2)^\circ$; the P–C distances are $1.778(5)$ – $1.813(5)$ Å. In the anion, the *trans*-angles are close to 180° ; the Au–Cl and Au–C distances are equal to $2.405(10)$ Å and $1.968(7)$, $2.049(19)$ Å, respectively. Crystal organization of compound **1** is caused by the C–H $\cdots$ N $\equiv$ C interionic contacts (2.22 – 2.74 Å), as well as the C–H $\cdots$ Cl–Au (2.91 Å) and C–H $\cdots$ π (2.80 Å) hydrogen contacts. Complete tables of atomic coordinates, bond lengths, and bond angles for compound **1** have been deposited with the Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC 2045164) and are available, free of charge, at deposit@ccdc.cam.ac.uk and <http://www.ccdc.cam.ac.uk>.

Keywords: potassium dichlorodicyanoaurate, cyanomethyltriphenylphosphonium chloride, synthesis, structure, X-ray diffraction analysis

For citation: Sharutin V.V., Efremov A.N., Shevchenko D.P. Structure of cyanoaurate complex $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}\{\text{Cl}_{0.54}(\text{CN})_{0.46}\}\text{CN}]$. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(3): 57–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250304

Введение

Ди- и тетрацианоауратные комплексы координационно-полимерного и ионного строения известны широким спектром потенциально применимых физико-химических свойств (люминесценцией [1–6], вапохромизмом [7–9], двулучепреломлением [1–13], высокими значениями теплового расширения [14, 15], магнитной [16–20] и противораковой активностью [21]), тонкая настройка которых возможна путем разнообразных структурных модификаций соответствующих золотосодержащих производных. Поэтому поиск эффективных путей и изучение особенностей получения новых цианоауратных комплексов являются актуальными задачами.

Ранее, в работе [22], нами были описаны некоторые нестандартные примеры взаимодействия $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Hal}_2]$ и $[\text{Ph}_3\text{PR}]\text{Hal}$ ($\text{Hal} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$). Реакция между ними является удобным и эффективным методом синтеза дигалогендицианоауратов органилтрифенилфосфония (а также комплексов с другими ониевыми катионами) и обычно протекает по ионно-обменному механизму [23–28], однако при определенных условиях может приводить к продуктам окислительно-восстановительного процесса [22, 29, 30]. В настоящей работе описан еще один пример такого нетипичного хода реакции дихлородицианоаурата калия с хлоридом цианометилтрифенилфосфония.

Экспериментальная часть

В работе использовали дихлородицианоаурат калия, полученный согласно [31] из дицианоаурата калия («ч.д.а.», ДЦМ-Аналитика), и хлорид цианометилтрифенилфосфония (98 %, «Alfa Aesar»).

Синтез $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}\{\text{Cl}_{0.54}(\text{CN})_{0.46}\}\text{CN}]$ (1**).** К раствору 100 мг (0,28 ммоль) дихлородицианоаурата калия в 10 мл воды прибавляли при перемешивании раствор 94 мг (0,28 ммоль) хлорида цианометилтрифенилфосфония в 5 мл воды. Образовавшийся осадок фильтровали, сушили и перекристаллизовывали из ацетонитрила. Наряду с бледно-желтыми кристаллами $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ получили 9 мг (6 %) бесцветных кристаллов комплекса **1** с т. пл. 174°C . ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3061, 2924, 2835, 2741, 2253, 2212, 2158, 2143, 1587, 1574, 1485, 1437, 1381, 1341, 1315, 1256, 1200, 1188, 1161, 1115, 1070, 1028, 997, 928, 839, 756, 745, 725, 689, 550, 505, 498, 463, 430.

ИК-спектр соединения **1** записывали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S; образцы готовили таблетированием с KBr (область поглощения 4000 – 400 cm^{-1}).

Рентгеноструктурный анализ соединения **1** проводили на автоматическом четырехкружном дифрактометре Bruker D8 QUEST (Mo K_α -излучение, $\lambda = 0,71073$ Å, графитовый монохроматор). Сбор, редактирование данных и уточнение параметров элементарной ячейки, а также учет поглощения проведены по программам SMART и SAINT-Plus [32]. Все расчеты по определению и уточнению структур выполнены по программам SHELXL/PC [33] и OLEX2 [34]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. Кристаллографические данные и результаты уточнения структуры приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблица 1

Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры 1

Параметр	1
Формула	C _{21,46} H ₁₇ N _{2,46} Cl _{0,54} PAu
<i>M</i>	556,41
Сингония	Ромбическая
Пространственная группа	<i>P</i> 2 ₁ 2 ₁ 2 ₁
<i>a</i> , Å	8,420(4)
<i>b</i> , Å	13,638(6)
<i>c</i> , Å	18,053(9)
α, град.	90,00
β, град.	90,00
γ, град.	90,00
<i>V</i> , Å ³	2073,1(16)
<i>Z</i>	4
ρ _{выч} , г/см ³	1,783
μ, мм ⁻¹	7,251
<i>F</i> (000)	1065,0
Форма кристалла (размер, мм)	0,43 × 0,26 × 0,17
Область сбора данных по 2θ, град.	5,686 – 55,93
Интервалы индексов отражений	–11 ≤ <i>h</i> ≤ 11, –17 ≤ <i>k</i> ≤ 17, –23 ≤ <i>l</i> ≤ 23
Измерено отражений	32243
Независимых отражений (<i>R</i> _{int})	4942 (0,0378)
Переменных уточнения	256
GOOF	1,055
<i>R</i> -факторы по <i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²)	<i>R</i> ₁ = 0,0243, <i>wR</i> ₂ = 0,0499
<i>R</i> -факторы по всем отражениям	<i>R</i> ₁ = 0,0277, <i>wR</i> ₂ = 0,0509
Остаточная электронная плотность (min/max), е/Å ³	0,85/–0,75

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структуре 1

Связь <i>d</i> , Å		Угол ω, град	
Au(1)–Cl(1)	2,405(10)	C(9)Au(1)Cl(1)	178,4(3)
Au(1)–C(9)	1,968(7)	C(9)Au(1)C(10)	178,1(16)
Au(1)–C(10)	2,049(19)	C(1)P(1)C(7)	110,4(2)
C(8)–N(1)	1,121(7)	C(1)P(1)C(11)	109,7(2)
C(9)–N(2)	1,132(8)	C(11)P(1)C(7)	109,4(2)
C(10)–N(3)	1,17(2)	C(21)P(1)C(1)	110,9(2)
P(1)–C(1)	1,786(4)	C(21)P(1)C(7)	106,1(2)
P(1)–C(7)	1,813(5)	C(21)P(1)C(11)	110,3(2)
P(1)–C(11)	1,794(5)	P(1)C(7)C(8)	113,7(4)
P(1)–C(21)	1,778(5)	–	–

Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов соединения **1** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 2045164; deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

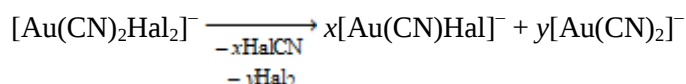
Обсуждение результатов

Ранее нами было продемонстрировано, что длительное стояние в водном растворе (несколько суток при стандартных условиях) и последующая перекристаллизация из ацетонитрила осажденных продуктов взаимодействия K[Au(CN)₂Hal₂] с солями [Ph₃PR]Cl (Hal = Cl, R = Ph; Hal = Br, R = CH₂CN, CH₂OMe) может сопровождаться восстановлением анионов [Au(CN)₂Hal₂][–] до [Au(CN)₂][–] за счет элиминирования молекул соответствующего галогена [22]. В результате нового эксперимента с дихлородицианоауратом калия и хлоридом цианометилтрифенилфосфония, проведенного в идентичных условиях, но без удерживания осадка в воде, нами в небольшом

количестве были выделены и структурно охарактеризованы кристаллы состава $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}\{\text{Cl}_{0,54}(\text{CN})_{0,46}\}\text{CN}]$ (**1**).

В литературе подобный случай был описан в работе [30]. Проведя направленный гидротермальный синтез с участием нитрата цинка, 4,4'-бипиридина (4,4'-bipy) и дибромодицианоаурата калия, авторы выделили продукт восстановительного элиминирования – $\text{Zn}(4,4'\text{-bipy})[\text{Au}(\text{CN})_2][\text{Au}\{\text{Br}_{0,68}(\text{CN})_{0,32}\}\text{CN}]$.

Точный механизм образования данных комплексов пока что неизвестен, однако предположительно может включать стадию элиминирования галогенциана из соответствующего дигалогенодицианоауратного производного:



$\text{Hal} = \text{Cl}$: $x = 0,54$, $y = 0,46$ (**1**); $\text{Hal} = \text{Br}$: $x = 0,68$, $y = 0,32$ [30].

Поскольку в нашем случае каких-либо вышеописанных условий для стимулирования окислительно-восстановительного процесса (длительное стояние осадка в воде, нагревание) не создавалось, для объяснения состава продукта **1** можно также предположить наличие примесных количеств анионов $[\text{Au}(\text{CN})\text{Hal}]^-$ и $y[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ в исходном дихлородицианоаурате калия, получаемого хлорированием коммерческого $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ [31].

ИК-спектр комплекса **1** содержит несколько полос поглощения валентных колебаний связей $\text{C}\equiv\text{N}$ в интервале $2253\text{--}2143\text{ см}^{-1}$, крайние значения которого соответствуют цианогруппам катиона $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}]^+$ (2253 см^{-1} , сл.) и аниона $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ (2143 см^{-1} , с.). Промежуточные полосы при 2158 (с.) и 2212 см^{-1} (оч. сл.) можно отнести к колебаниям $\text{C}\equiv\text{N}$ в анионах $[\text{Au}(\text{CN})\text{Cl}]^-$ и примесного $[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]^-$. В ИК-спектре также присутствуют полосы поглощения при 1437 и 997 см^{-1} , характерные колебаниям связей $\text{P}-\text{C}_{\text{Ph}}$, а также несколько полос валентных колебаний связей $\text{C}-\text{H}_{\text{Ph/Alk}}$ в интервале $3061\text{--}2741\text{ см}^{-1}$ [35, 36].

По данным РСА, комплекс **1** состоит из цианометилтрифенилфосфониевых катионов и линейных анионов $[\text{Au}(\text{CN})\text{X}]^-$, разупорядоченных как $\text{X} = \text{Cl}$ или CN в соотношении 54:46 соответственно (рис. 1).

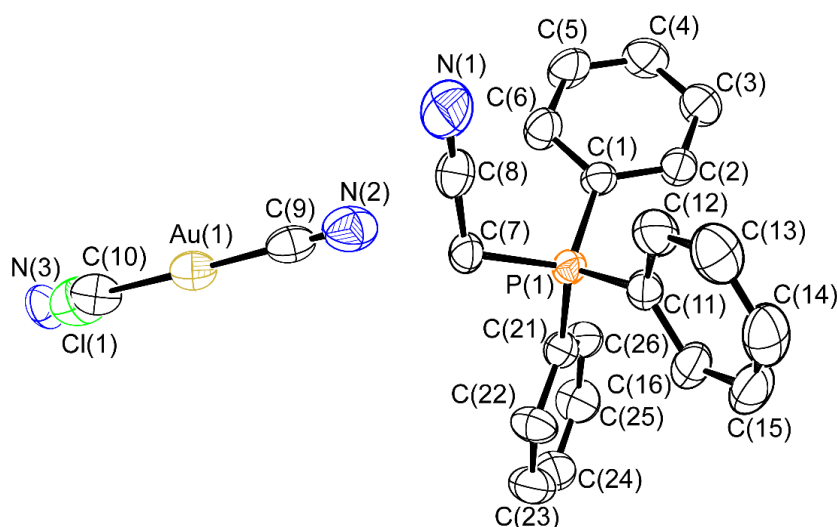


Рис. 1. Строение комплекса $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}\{\text{Cl}_{0,54}(\text{CN})_{0,46}\}\text{CN}]$ (**1**) (атомы водорода не показаны)

Геометрия атомов фосфора в катионах $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}]^+$ практически не искажена: углы CPC варьируются в пределах $106,1(2)\text{--}110,9(2)^\circ$; расстояния $\text{P}-\text{C}_{\text{Ph}}$ и $\text{P}-\text{C}_{\text{Alk}}$ составляют $1,778(5)\text{--}1,794(5)$ и $1,813(5)\text{ Å}$ соответственно и не превышают суммы ковалентных радиусов атомов фосфора и углерода соответствующей гибридизации ($\text{P}-\text{C}(\text{sp}^2) = 1,80\text{ Å}$; $\text{P}-\text{C}(\text{sp}^3) = 1,83\text{ Å}$ [37]).

Анионы [Au(CN)X][−] также не содержат существенных геометрических искажений: *транс*-углы SAuC/Cl близки к 180°, длины связей Au–Cl (2,405(10) Å), Au–C(9) (1,968(7) Å) и Au–C(10) (2,049(19) Å) близки к значениям суммы ковалентных радиусов атомов золота и хлора (2,38 Å [37]) и золота и *sp*-углерода (2,05 Å [37]) соответственно. Связь C(8)≡N(1) в катионе (1,121(7) Å) несколько короче связей C(9)≡N(2) (1,132(8) Å) и C(10)≡N(3) (1,17(2) Å) в анионе.

Пространственная организация в кристалле **1** обусловлена водородными связями C–H⋯N≡C (2,22–2,74 Å) и C–H⋯Cl–Au (2,91 Å) (рис. 2), длины которых близки к суммам ван-дер-ваальсовых радиусов соответствующих атомов или меньше таковых (H⋯N 2,65 Å, H⋯Cl 2,85 Å [38]). Дополнительные сведения по водородным взаимодействиям представлены в табл. 3. В кристалле также присутствуют дополнительные слабые C–H⋯π-контакты между атомами H(2) катионов и электронной плотностью связей C(9)≡N(2) анионов, с расстояниями от атомов водорода до центра указанных связей равными 2,80 Å [39].

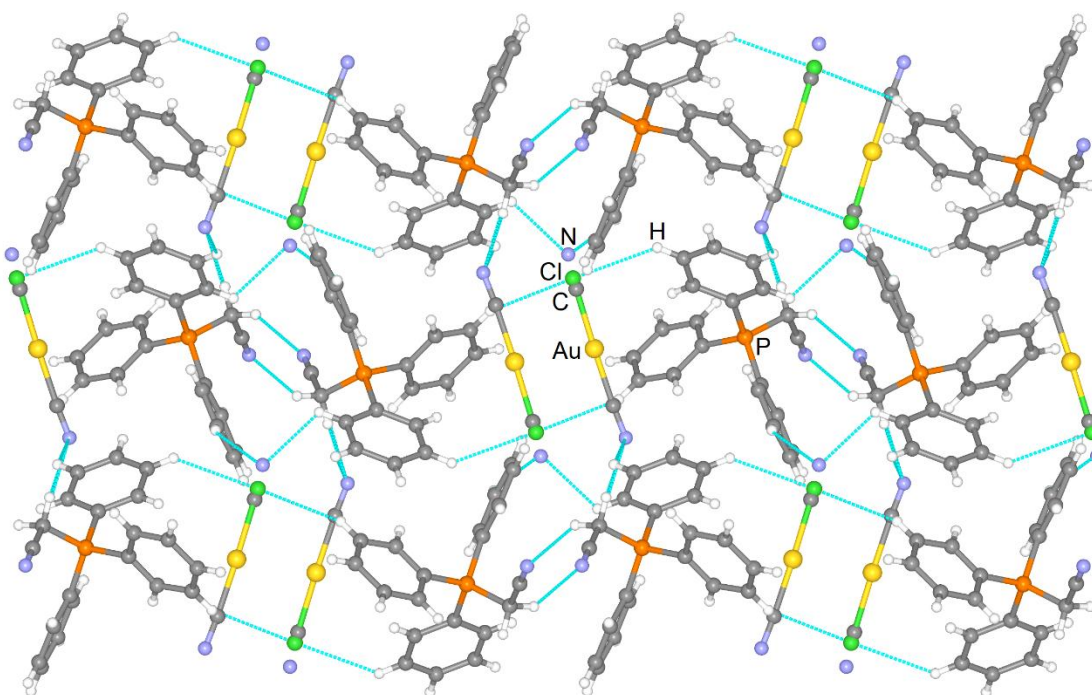


Рис. 2. Пространственная организация кристалла **1** (проекция вдоль кристаллографической оси *a*)

Геометрические параметры водородных контактов в кристалле **1**

Таблица 3

<i>D</i> –H⋯ <i>A</i>	H⋯ <i>A</i> , Å	<i>D</i> ⋯ <i>A</i> , Å	<i>D</i> –H⋯ <i>A</i> , град
C(7)–H(7A)⋯N(2)	2,22	3,18	169,1
C(7)–H(7B)⋯N(1)	2,53	3,38	146,4
C(15)–H(15)⋯N(3)	2,59	3,31	134,5
C(22)–H(23)⋯N(3)	2,69	3,22	117,0
C(23)–H(23)⋯N(2)	2,74	3,38	127,3
C(3)–H(3)⋯Cl(1)	2,91	3,74	148,0
C(25)–H(25)⋯Cl(1)	2,91	3,66	138,2

Стоит отметить, что несмотря на склонность производных золота(I) линейного строения к ди- и олигомеризации через аурофильные взаимодействия [40] в структуре **1** подобного поведения у анионов [Au(CN)X][−] не наблюдается: кратчайшие расстояния Au⋯Au составляют ~5 Å, что существенно превышает удвоенный ван-дер-ваальсовый радиус золота (3,32 Å [41]).

Выводы

Установлено, что побочным продуктом реакции хлорида цианометилтрифенилфосфония с дихлородицианоауратом калия является комплекс $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}\{\text{Cl}_{0,54}(\text{CN})_{0,46}\}\text{CN}]$ с разупорядоченным характером одного из двух лигандов у Au^{I} -ядра в анионе (Cl^- и CN^- занимают 0,54 и 0,46 вакансии соответственно). Комплекс имеет ионное строение без значимых геометрических искажений в катионе и анионе. Его кристаллическая организация обуславливается только межионными контактами $\text{H}\cdots\text{N}$, $\text{H}\cdots\text{Cl}$ и $\text{H}\cdots\pi(\text{CN})$ и не содержит ауорофильных взаимодействий.

Список источников

1. Belyaev A., Eskelinen T., Dau T.M. et al. // Chem. Eur. J. 2017. V. 24, No. 6. P. 1404. DOI: 10.1002/chem.201704642
2. Ovens J.S., Christensen P.R., Leznoff D.B. // Chem. Eur. J. 2016. V. 22, No. 24. P. 8234. DOI: 10.1002/chem.201505075
3. Yamagishi A., Kawasaki T., Hiruma K. et al. // Dalton Trans. 2016. V. 45, No. 18. P. 7823. DOI: 10.1039/C6DT00537C
4. Kumar K., Stefańczyk O., Chorazy S. et al. // Inorg. Chem. 2019. V. 58, No. 9. P. 5677. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b03634
5. Nicholas A.D., Bullard R.M., Pike R.D. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2019. V. 2019, No. 7. P. 956. DOI: 10.1002/ejic.201801407
6. Kisel K.S., Melnikov A.S., Grachova E.V. et al. // Inorg. Chem. 2019. V. 58, No. 3. P. 1988. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b02974
7. Varju B.R., Ovens J.S., Leznoff D.B. // Chem. Commun. 2017. V. 53, No. 48. P. 6500. DOI: 10.1039/C7CC03428H
8. Ovens J.S., Leznoff D.B. // Chem. Mater. 2015. V. 27, No. 5. P. 1465. DOI: 10.1021/cm502998w
9. Lefebvre J., Korčok J.L., Katz M.J. et al. // Sensors. 2012. V. 12, No. 3. P. 3669. DOI: 10.3390/s120303669
10. Katz M.J., Leznoff D.B. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131, No. 51. P. 18435. DOI: 10.1021/ja907519c
11. Ovens J.S., Geisheimer A.R., Bokov A.A. et al. // Inorg. Chem. 2010. V. 49, No. 20. P. 9609. DOI: 10.1021/ic101357y
12. Thompson J.R., Katz M.J., Williams V.E. et al. // Inorg. Chem. 2015. V. 54, No. 13. P. 6462. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.5b00749
13. Thompson J.R., Goodman-Rendall K.A.S., Leznoff D.B. // Polyhedron. 2016. V. 108. P. 93. DOI: 10.1016/j.poly.2015.12.026
14. Ovens J.S., Leznoff D.B. // Inorg. Chem. 2017. V. 56, No. 13. P. 7332. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.6b03153
15. Ovens J.S., Leznoff D.B. // CrystEngComm. 2018. V. 20, No. 13. P. 1769. DOI: 10.1039/C7CE02167D
16. Geisheimer A.R., Huang W., Pacradouni V. et al. // Dalton Trans. 2011. V. 40, No. 29. P. 7505. DOI: 10.1039/C0DT01546F
17. Palacios M.A., Díaz-Ortega I.F., Nojiri H. et al. // Inorg. Chem. Front. 2020. V. 7, No. 23. P. 4611. DOI: 10.1039/D0QI00996B
18. Lefebvre J., Callaghan F., Katz M.J. et al. // Chem. Eur. J. 2006. V. 12, No. 26. P. 6748. DOI: 10.1002/chem.200600303
19. Kumar K., Stefańczyk O., Chorazy S. et al. // Inorg. Chem. 2019. V. 58, No. 9. P. 5677. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b03634
20. Wu S.-G., Wang L.-F., Ruan Z.-Y. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2022. V. 144, No. 32. P. 14888. DOI: 10.1021/jacs.2c06313
21. Johnson A., Marzo I., Gimeno M.C. // Chem. Eur. J. 2018. V. 24, No. 45. P. 11693. DOI: 10.1002/chem.201801600
22. Шевченко Д.П., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 62. DOI: 10.14529/chem220207
23. Mason W.R. III // Inorg. Chem. 1970. V. 9, No. 12. P. 2688. DOI: 10.1021/ic50094a013

24. Ovens J.S., Truong K.M., Leznoff D.B. // *Inorganica Chim. Acta*. 2013. V. 403. P. 127. DOI: 10.1016/j.ica.2013.02.011
25. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Тарасова Н.М. и др. // *Изв АН. Сер. хим.* 2020. Т. 69, № 10. С. 1892. EDN: QOVSSF
26. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Тарасова Н.М. и др. // *Журн. общ. химии*. 2021. Т. 91, № 11. С. 1716. DOI: 10.31857/S0044460X21110081
27. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др. // *Коорд. химия*. 2020. Т. 46, № 9. С. 554. DOI: 10.31857/S0132344X20090030
28. Шарутин В.В. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия»*. 2020. Т. 12, № 2. С. 74. DOI: 10.14529/chem200208
29. Ericson A., Elding L.I., Elmroth S.K.C. // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1997. No. 7. P. 1159. DOI: 10.1039/A608001D
30. Ovens, J.S., Leznoff D.B. // *Dalton Trans.* 2011. V. 40, No. 16. P. 4140. DOI: 10.1039/C0DT01772H
31. Ovens J.S., Truong K.M., Leznoff D.B. // *Dalton Trans.* 2012. V. 41, No. 4. P. 1345. DOI: 10.1039/C1DT11741F
32. Bruker. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.
33. Bruker. SHELXTL/PC. Versions 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures From Diffraction Data. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.
34. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // *J. Appl. Cryst.* 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726
35. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффельтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных: пер. с англ. Б.Н. Тарасевича. М.: Мир, 2006. 440 с.
36. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
37. Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // *Dalton Trans.* 2008. No. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J
38. Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al. // *J. Phys. Chem. A*. 2009. V. 113, No. 19. P. 5806. DOI: 10.1021/jp8111556
39. Nishio M. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2011. V. 13, No. 31. P. 13873. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1CP20404A>
40. Schmidbaur H., Schier A. // *Chem. Soc. Rev.* 2008. V. 37, No. 9. P. 1931. DOI: 10.1039/B708845K
41. Bondi A. // *J. Phys. Chem.* 1964. V. 68, No. 3. P. 441. DOI: 10.1021/j100785a001

Шарутин Владимир Викторович – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutin50@mail.ru

Ефремов Андрей Николаевич – кандидат химических наук, доцент, кафедра теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: efremov_an94@mail.ru

Шевченко Дмитрий Павлович – аспирант, химический факультет, институт естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: Shepher56@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2024 г.

The article was submitted 3 December 2024.