

УДК 546.183+546.267+546.593+546.863+547.239.2+547.31+547.53.024+548.312.2

СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОТА $[\text{Ph}_3\text{PR}][\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ ($\text{R} = \text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_3$, CH_2CN) И $\text{Ph}_3\text{PC}(\text{H})(\text{CN})\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}$

© 2022 г. Д. П. Шевченко¹, *, А. Е. Хабина¹, В. В. Шарутин¹, О. К. Шарутина¹, В. С. Сенчурин¹

¹Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

*e-mail: Shepher56@gmail.com

Поступила в редакцию 23.05.2021 г.

После доработки 14.07.2021 г.

Принята к публикации 23.07.2021 г.

Взаимодействием хлоридов органилтрифенилфосфония с дихлородицианоауратом калия в воде с последующей перекристаллизацией из ацетонитрила получены ионные комплексы $[\text{Ph}_3\text{PR}][\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ ($\text{R} = \text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_3$ (I), CH_2CN (II)). Наряду с основным продуктом II, были выделены кристаллы молекулярного комплекса $\text{Ph}_3\text{PC}(\text{H})(\text{CN})\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}$ (III). Полученные соединения охарактеризованы методами рентгеноструктурного анализа (CIF files CCDC № 1957185 (I), 2060227 (II), 2066549 (III)), ЯМР- и ИК-спектроскопии. По данным PCA, комплексы I и II состоят из органилтрифенилфосфониевых катионов со слабоискаженными тетраэдрически-координированными атомами фосфора и центросимметричных квадратных анионов $[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]^-$, которые в случае комплекса II образуют координационные псевдополимерные цепи посредством межанионных контактов $\text{Au}\cdots\text{Cl}$ (3.40 Å). В комплексе III атомы фосфора и золота также тетраэдрически и квадратно координированы; илидный атом углерода располагается у золота в *транс*-положении относительно атома хлора.

Ключевые слова: дихлородицианоаурат, органилтрифенилфосфоний, трифенилфосфанилиденацетонитрил, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0132344X22010054

При разработке новых потенциально полезных соединений значительное внимание уделяется возможности участия молекул и других структурных единиц в нековалентных взаимодействиях, которые играют важную роль в определении физико-химических свойств, а также биологической активности данных соединений [1–6]. Кроме того, в настоящее время немалый интерес у исследователей вызывают металлоорганические координационные полимеры (МОКП) [7–12].

Среди обилия строительных блоков для МОКП важное место занимают цианидные комплексы, в частности соединения одновалентного и трехвалентного золота, обладающие такими свойствами, как люминесценция [13–16], двойное лучепреломление [17–19], вапохромизм [20–22], отрицательный коэффициент термического расширения [23, 24] и магнетизм [13, 25–27]. Стратегический выбор вспомогательных лигандов и противоионов позволяет модифицировать указанные свойства.

С целью обнаружения новых цианоауратных координационных полимеров и в продолжение ряда исследований, посвященных изучению строения и свойств дигалогенодицианоауратных комплексов

[28–33], мы осуществили синтез комплексов $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_3][\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ (I) и $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CN}][\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ (II) (в смеси с побочным продуктом $\text{Ph}_3\text{PC}(\text{H})(\text{CN})\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}$ (III)), а также описали особенности их строения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез проводили на воздухе. Коммерчески доступные хлориды (бут-2-енил)трифенилфосфония (97%, Alfa Aesar) и цианометилтрифенилфосфония (98%, Alfa Aesar), а также ацетонитрил (о. с. ч., Криохром) использовали без дополнительной очистки. Дихлородицианоаурат калия и цианометилдид трифенилфосфония получали по методикам [17, 34].

Синтез дихлородицианоаурата (бут-2-енил)трифенилфосфония (I). К раствору 0.100 г (0.28 ммоль) дихлородицианоаурата калия в 10 мл воды прибавляли при перемешивании водный раствор 0.094 г (0.28 ммоль) хлорида (бут-2-енил)трифенилфосфония. Образовавшийся желтый осадок отфильтровывали, промывали водой и сушили. Перекристаллизацией из ацетонитрила получили

кристаллы светло-желтого цвета. Выход комплекса I 0.160 г (90%). $T_{пл} = 146^\circ\text{C}$.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3065, 3053, 3030, 2990, 2945, 2905, 2851, 2216, 1638, 1616, 1585, 1485, 1435, 1398, 1377, 1339, 1315, 1180, 1159, 1111, 1055, 997, 970, 922, 839, 795, 746, 737, 723, 689, 615, 540, 503, 486, 451, 426.

Найдено, %: C 45.05; H 3.57.
Для $\text{C}_{24}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{P}_2\text{Cl}_2\text{Au}$
вычислено, %: C 45.23; H 3.49.

Соединение II – дихлородицианоаурат цианометилтрифенилфосфония – синтезировали по методике, аналогичной для I. Получили светло-желтые кристаллы. Выход 71%. $T_{пл} = 121^\circ\text{C}$.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3061, 3024, 2930, 2866, 2766, 2259, 1587, 1483, 1441, 1393, 1319, 1252, 1186, 1113, 995, 843, 756, 743, 723, 689, 550, 503, 453, 428.

Найдено, %: C 42.34, H 2.79.
Для $\text{C}_{44}\text{H}_{34}\text{N}_6\text{P}_2\text{Cl}_4\text{Au}_2$
вычислено, %: C 42.46, H 2.76.

Молекулярный комплекс III получили в качестве побочного продукта (6%) при синтезе комплекса II, а также встречным синтезом, для которого приведена методика.

Синтез (цианометилтрифенилфосфоний)хлородицианозолота (III). К раствору 0.100 г (0.28 ммоль) дихлородицианоаурата калия в 10 мл ацетонитрила прибавляли при перемешивании 0.084 г (0.28 ммоль) цианометилилида трифенилфосфония. После испарения растворителя из фильтрата выделили бесцветные кристаллы. Выход III 0.134 г (82%). $T_{пл} = 112^\circ\text{C}$.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 3059, 3024, 2930, 2866, 2766, 2257, 2156, 2143, 1587, 1483, 1439, 1395, 1339,

1317, 1250, 1186, 1113, 997, 843, 756, 743, 723, 689, 547, 500, 428.

Найдено, %: C 45.09, H 2.81.
Для $\text{C}_{22}\text{H}_{16}\text{N}_3\text{P}_2\text{ClAu}$
вычислено, %: C 45.11, H 2.76.

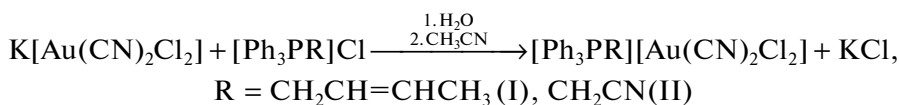
ИК-спектры соединений I–III записывали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S; образцы готовили таблетированием с KBr (область поглощения 4000–400 cm^{-1}).

РСА кристаллов I–III проводили на дифрактометре D8 QUEST Bruker (MoK_α -излучение, $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор). Сбор, редактирование данных и уточнение параметров элементарной ячейки, а также учет поглощения проведены по программам SMART и SAINT-Plus [35]. Все расчеты по определению и уточнению структур выполнены по программам SHELXL/PC [36] и OLEX2 [37]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур приведены в табл. 1, основные длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 1957185 (I), 2060227 (II), 2066549 (III)) для структур I–III соответственно, deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексы I и II были получены в результате взаимодействия водных растворов дихлородицианоаурата калия с хлоридами органилтрифенилфосфония (1 : 1 мольн.) с последующей перекристаллизацией из ацетонитрила.



Наряду с основным продуктом – ионным комплексом II светло-желтого цвета – был выделен минорный продукт в виде неокрашенных кристаллов цианометилтрифенилфосфоний)хлородицианозолота (III) с выходом 6%. Вероятно, в реакционной смеси в условиях синтеза происходит образование цианометилида трифенилфосфония $\text{Ph}_3\text{P}(\text{H})\text{CN}$, атакующего анионы $[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]^-$ с образованием комплекса III.

Нами был осуществлен встречный синтез III взаимодействием дихлородицианоаурата калия с

цианометилидом трифенилфосфония, специально полученным по методике [34]. В данном случае основным продуктом реакции был комплекс III, выделенный с выходом 82%.

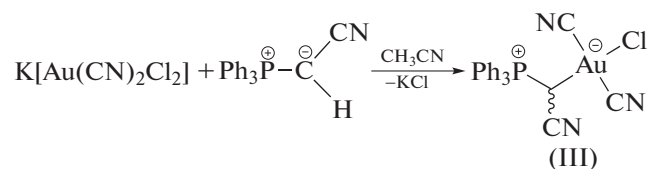


Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры соединений I–III

Параметр	Значение		
	I	II	III
<i>M</i>	637.27	1244.44	585.76
Сингония	Моноклинная	Моноклинная	Моноклинная
Пр. гр.	<i>P2/c</i>	<i>P2₁</i>	<i>P2₁/c</i>
<i>a</i> , Å	16.983(8)	8.710(5)	8.370(5)
<i>b</i> , Å	8.483(3)	14.036(6)	14.984(8)
<i>c</i> , Å	17.082(7)	19.376(9)	17.232(13)
α, град	90.00	90.00	90
β, град	91.18(2)	90.10(3)	92.63(3)
γ, град	90.00	90.00	90
<i>V</i> , Å ³	2460.4(18)	2368.7(19)	2159(2)
<i>Z</i>	4	2	4
ρ(выч.), г/см ³	1.720	1.745	1.802
μ, мм ⁻¹	6.275	6.517	7.024
<i>F</i> (000)	1232.0	1192.0	1120.0
Размер кристалла, мм	0.34 × 0.27 × 0.11	0.44 × 0.31 × 0.22	0.65 × 0.5 × 0.46
Область сбора данных по θ, град	5.86–65.66	5.9–54.28	5.93–56.996
Интервалы индексов отражений	–25 ≤ <i>h</i> ≤ 25, –12 ≤ <i>k</i> ≤ 12, –25 ≤ <i>l</i> ≤ 25	–11 ≤ <i>h</i> ≤ 11, –18 ≤ <i>k</i> ≤ 18, –24 ≤ <i>l</i> ≤ 24	–11 ≤ <i>h</i> ≤ 11, –20 ≤ <i>k</i> ≤ 20, –23 ≤ <i>l</i> ≤ 23
Измерено отражений	75 175	36 915	43 689
Независимых отражений (<i>R</i> _{int})	8951 (0.0425)	10 456 (0.0313)	5463 (0.0611)
Отражений с <i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)	8951	10 456	5463
Переменных уточнения	274	523	254
GOOF	1.074	1.077	1.060
<i>R</i> -факторы по <i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²)	<i>R</i> ₁ = 0.0357, <i>wR</i> ₂ = 0.0681	<i>R</i> ₁ = 0.0395, <i>wR</i> ₂ = 0.0959	<i>R</i> ₁ = 0.0460, <i>wR</i> ₂ = 0.1149
<i>R</i> -факторы по всем отражениям	<i>R</i> ₁ = 0.0593, <i>wR</i> ₂ = 0.0775	<i>R</i> ₁ = 0.0438, <i>wR</i> ₂ = 0.0990	<i>R</i> ₁ = 0.0508, <i>wR</i> ₂ = 0.1192
Остаточная электронная плотность (max/min), e/Å ³	1.42/–1.72	1.31/–2.86	2.71/–3.69

Таблица 2. Длины связей (d) и валентные углы (ω) в структурах I–III

Связь	d , Å	Угол	ω , град
I			
Au(1)–Cl(1)	2.2947(13)	Cl(1)Au(1)Cl(1a)	177.81(7)
Au(2)–Cl(2)	2.2808(12)	C(7)Au(1)C(7a)	179.0(2)
Au(1)–C(7)	2.002(4)	C(7a)Au(1)Cl(1a)	90.45(12)
Au(2)–C(8)	2.015(4)	C(7)Au(1)Cl(1a)	89.57(12)
P(1)–C(1)	1.793(3)	Cl(2)Au(2)Cl(2b)	180.0
P(1)–C(11)	1.797(3)	C(8)Au(2)C(8b)	179.999(1)
P(1)–C(21)	1.793(3)	C(8b)Au(2)Cl(2b)	89.65(12)
P(1)–C(27)	1.812(3)	C(8)Au(2)Cl(2b)	90.35(12)
Преобразования симметрии: (a) $-x, y, 3/2 - z$; (b) $1 - x, 2 - y, 1 - z$		C(1)P(1)C(11)	108.18(15)
		C(1)P(1)C(27)	111.17(16)
II			
Au(1)–Cl(1)	2.281(2)	Cl(1)Au(1)Cl(2)	178.28(10)
Au(1)–Cl(2)	2.286(2)	C(9)Au(1)C(10)	178.9(5)
Au(1)–C(9)	1.955(12)	C(9)Au(1)Cl(1)	89.6(3)
Au(1)–C(10)	2.054(12)	C(9)Au(1)Cl(2)	89.8(3)
Au(2)–Cl(3)	2.275(2)	C(10)Au(1)Cl(1)	90.0(3)
Au(2)–Cl(4)	2.280(2)	C(10)Au(1)Cl(2)	90.7(3)
Au(2)–C(39)	2.023(13)	Cl(3)Au(2)Cl(4)	178.49(10)
Au(2)–C(40)	2.021(12)	C(39)Au(2)C(40)	178.7(4)
P(1)–C(1)	1.792(7)	C(39)Au(2)Cl(3)	90.8(3)
P(1)–C(11)	1.786(7)	C(39)Au(2)Cl(4)	89.9(3)
P(1)–C(21)	1.792(7)	C(40)Au(2)Cl(3)	90.5(3)
P(1)–C(7)	1.827(7)	C(40)Au(2)Cl(4)	88.9(3)
P(2)–C(31)	1.797(6)	C(1)P(1)C(21)	111.7(3)
P(2)–C(41)	1.765(7)	C(11)P(1)C(7)	106.1(3)
P(2)–C(51)	1.789(7)	C(41)P(2)C(31)	112.3(3)
P(2)–C(37)	1.826(7)	C(41)P(2)C(37)	105.8(3)
III			
Au(1)–Cl(1)	2.318(2)	C(7)Au(1)Cl(1)	177.76(15)
Au(1)–C(9)	1.997(8)	C(9)Au(1)C(10)	176.3(3)
Au(1)–C(10)	2.006(7)	C(9)Au(1)C(7)	93.7(2)
Au(1)–C(7)	2.121(5)	C(9)Au(1)Cl(1)	88.5(2)
C(7)–C(8)	1.427(9)	C(10)Au(1)C(7)	88.2(2)
P(1)–C(1)	1.786(6)	C(10)Au(1)Cl(1)	89.7(2)
P(1)–C(11)	1.801(7)	P(1)C(7)Au(1)	113.8(3)
P(1)–C(21)	1.791(7)	C(8)C(7)Au(1)	111.1(4)
P(1)–C(7)	1.851(6)	C(8)C(7)P(1)	112.7(4)
C(8)–N(1)	1.137(10)	C(11)P(1)C(7)	105.4(3)
C(9)–N(2)	1.124(11)	C(21)P(1)C(7)	113.9(3)

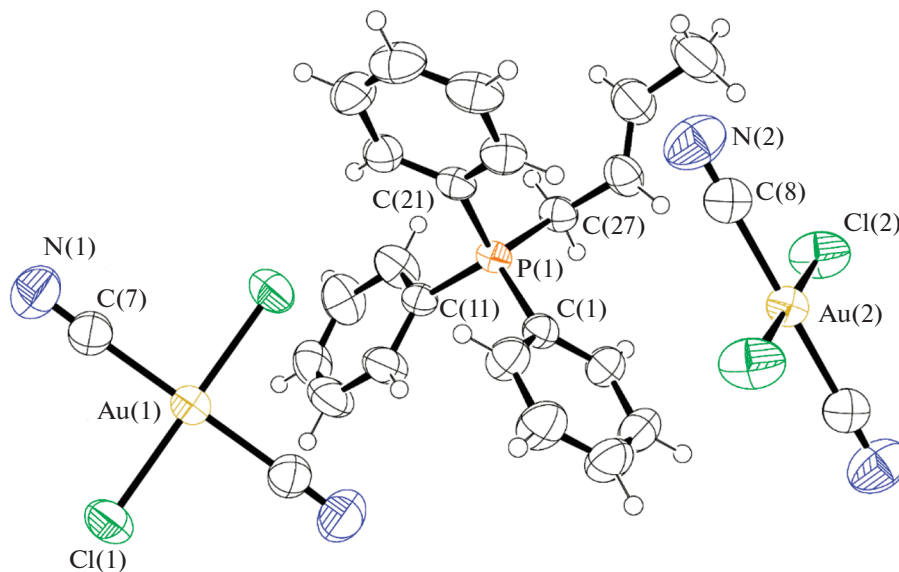


Рис. 1. Общий вид комплекса I (термические эллипсоиды приведены с 50% вероятностью).

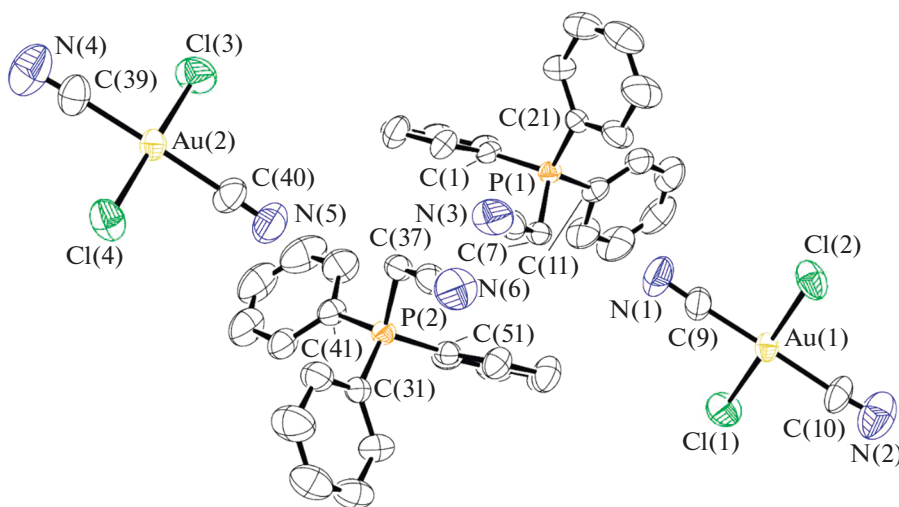


Рис. 2. Общий вид комплекса II (термические эллипсоиды приведены с 50% вероятностью; атомы водорода не показаны).

Отметим, что вследствие высокой подвижности метиленового атома водорода хлорида цианометилтрифенилфосфония образование илидного комплекса также возможно в ходе прямого C–H-аурирования, однако данный процесс более характерен для соединений золота(I) и обычно проходит в присутствии оснований [38–40].

В ИК-спектрах соединений I–III полосы поглощения валентных колебаний связей $\text{C}\equiv\text{N}$ наблюдаются при 2216 (I), 2259 (II), 2257, 2156 и 2143 (III) cm^{-1} и имеют низкую интенсивность. Колебаниям связей P–C_{Ph} соответствуют полосы

поглощения в области 1450–1435 и 1005–995 cm^{-1} (1435, 997 (I), 1441, 995 (II), 1439, 997 (III) cm^{-1}). Также в ИК-спектре комплекса I наблюдаются полосы поглощения, которые можно отнести к колебаниям связей $\nu(\text{C}=\text{C})$ (1683 cm^{-1}) и $\delta(\text{HC}=\text{CH})$ (970 cm^{-1}) бут-2-енильного фрагмента [41].

По данным РСА, кристаллы комплексов I и II состоят из органилтрифенилфосфониевых катионов и центросимметричных квадратных дихлородицианоауратных анионов (рис. 1 и 2 соответственно). Координация атомов фосфора незна-

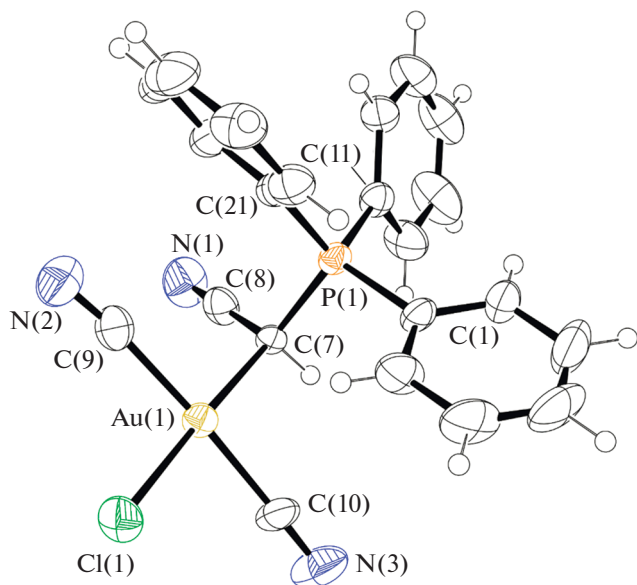


Рис. 3. Общий вид комплекса III (термические эллипсоиды приведены с 50% вероятностью).

чительно искажена: углы СРС изменяются в интервалах $108.18(15)^\circ$ – $111.17(16)^\circ$ (I) и $105.8(3)^\circ$ – $112.3(3)^\circ$ (II). Бут-2-енильный заместитель в комплексе II присутствует в форме *транс*-изомера, углы $C(27)C(28)C(29)$ и $C(28)C(29)C(30)$ в котором составляют $123.5(4)^\circ$ и $123.8(5)^\circ$ соответственно. Атомы золота в анионах $[Au(CN)_2Cl_2]^-$ имеют практически неискаженную квадратную геометрию с *транс*-углами $SAuC$ и *цис*-углами $SAuCl$, близкими к 180° и 90° .

Связи $P-C_{Alk}$ ($1.812(3)$ Å (I), $1.826(7)$ и $1.827(7)$ Å (II)) длиннее связей $P-C_{Ph}$ ($1.793(3)$ – $1.797(3)$ Å (I) и $1.765(7)$ – $1.797(6)$ Å (II)). Расстояния $Au-C$ $2.002(4)$, $2.015(4)$ Å (I) и $1.955(12)$ – $2.054(12)$ Å (II) меньше суммы ковалентных радиусов атомов золота и *sp*-гибризованного углерода (2.05 Å [42]). Длины связей $Au-Cl$ ($2.2808(12)$, $2.2947(13)$ Å (I), $2.275(2)$ – $2.286(2)$ Å (II)) также меньше суммы ковалентных радиусов атомов золота и хлора (2.38 Å [42]).

В комплексе III атомы фосфора и золота имеют тетраэдрическую и квадратную координацию соответственно, при этом *транс*-положение относительно атома хлора у золота занято илидным атомом углерода (рис. 3). Углы СРС ($105.4(3)^\circ$ – $113.9(3)^\circ$) незначительно отличаются от таковых для II и III; углы $P(1)C(7)Au(1)$, $C(8)C(7)Au(1)$ и $C(8)C(7)P(1)$ равны $113.8(3)^\circ$, $111.1(4)^\circ$ и $112.7(4)^\circ$ соответственно. Связи $P(1)-C_{Ph}$ короче, чем $P(1)-C(7)$ ($1.851(6)$ Å), и варьируются в интервале $1.786(6)$ – $1.801(7)$ Å.

Значения *транс*-углов $SAuC$ $176.3(3)^\circ$ и $177.76(15)^\circ$ свидетельствует о незначительном ис-

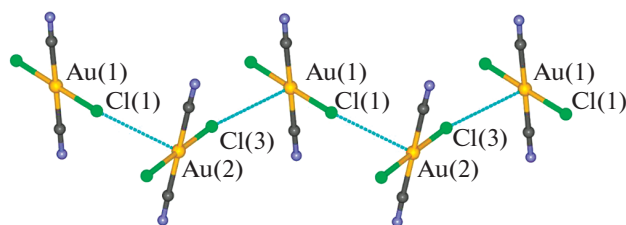


Рис. 4. Фрагмент координационной псевдополимерной цепи в кристаллах II.

кажении квадратной координации атома золота; *цис*-углы $SAuC$ и $SAuCl$ равны $93.7(2)^\circ$, $88.2(2)^\circ$ и $88.5(2)^\circ$, $89.7(2)^\circ$ соответственно. Расстояния $Au(1)-C_{CN}$ ($1.997(8)$, $2.006(7)$ Å) практически не отличаются от таковых в ионных комплексах; расстояние $Au(1)-C(7)$ составляет $2.121(5)$ Å и совпадает с суммой ковалентных радиусов атома золота и *sp*³-гибризованного атома углерода (2.12 Å [42]). Связь $Au(1)-Cl(1)$ ($2.318(2)$ Å) на 0.035 Å длиннее среднего значения длин связей $Au-Cl$ в I и II (2.283 Å), что обусловлено *транс*-влиянием илидного лиганда. Следует отметить, что в структурно охарактеризованном комплексе $Ph_3PC(H)(CN)AuCl_3$ сходного строения аналогичные длины связей атома золота с атомами углерода и хлора имеют меньшие значения ($Au-C$ $2.083(4)$, $Au-Cl$ $2.3095(13)$ Å) [43].

Структурная организация в кристаллах I–III обусловлена водородными связями $C-H\cdots N\equiv C$ (2.58 , 2.64 Å (I), 2.28 – 2.43 Å (II), 2.40 – 2.55 Å (III)) и $C-H\cdots Cl-Au$ (2.83 Å (I), 2.81 , 2.84 Å (II), 2.81 Å (III)). В кристалле II анионы $[Au(CN)_2Cl_2]^-$ образуют координационные псевдополимерные цепи, ориентированные вдоль кристаллографической оси *a* (рис. 4) и построенные на основе межанионных контактов $Au(1)\cdots Cl(3)$ и $Au(2)\cdots Cl(1)$ (3.40 Å), длины которых меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов золота и хлора (3.41 Å [44]).

Таким образом, взаимодействием хлорида (бут-2-енил)трифенилфосфония с дихлородицианоауратом калия получен ионный мономерный комплекс – дихлородицианоаурат (бут-2-енил)трифенилфосфония. В аналогичной реакции с участием хлорида цианометилтрифенилфосфония наблюдается образование дихлородицианоаурата цианометилтрифенилфосфония, структура которого содержит обусловленные контактами $Au\cdots Cl$ псевдополимерные цепи из анионов $[Au(CN)_2Cl_2]^-$, а также минорного продукта реакции – илидного комплекса (цианометилтрифенилфосфоний)хлоридицианозолота.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Janiak C.* // Dalton Trans. 2003. № 14. P. 2781. <https://doi.org/10.1039/B305705B>
2. *Desiraju G.R.* // Angew. Chem., Int. Ed. 2007. V. 46. № 44. P. 8342. <https://doi.org/10.1002/anie.200700534>
3. *Dunitz J.D., Gavezzotti A.* // Chem. Soc. Rev. 2009. V. 38. № 9. P. 2622. <https://doi.org/10.1039/B822963P>
4. *Sculfort S., Braunstein P.* // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40. № 5. P. 2741. <https://doi.org/10.1039/C0CS00102C>
5. *Alkorta I., Elguero J., Frontera A.* // Crystals. 2020. V. 10. № 3. P. 180. <https://doi.org/10.3390/cryst10030180>
6. *Rodina T.A., Loseva O.V., Ivanov A.V.* // J. Struct. Chem. 2021. V. 62. P. 123. <https://doi.org/10.1134/S0022476621010157>
7. *Batten S.R., Champness N.R.* // Phil. Trans. R. Soc. A. 2017. V. 375. № 2084. ID 20160025. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0032>
8. *Furukawa H., Cordova K.E., O’Keeffe M., Yaghi O.M.* // Science. 2013. V. 341. № 6149. ID 1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
9. *Liu J., Chen L., Cui H. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. № 16. P. 6011. <https://doi.org/10.1039/C4CS00094C>
10. *Liu J.-Q., Luo Z.-D., Pan Y. et al.* // Coord. Chem. Rev. 2020. V. 406. P. 213145. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213145>
11. *Baranov A.Yu., Rakhmanova M.I., Samsonenko D.G. et al.* // Inorganica Chim Acta. 2019. V. 494. P. 78. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.05.015>
12. *Petrovskii S.K., Paderina A.V., Sizova A.A. et al.* // Dalton Trans. 2020. V. 49. № 38. P. 13430. <https://doi.org/10.1039/D0DT02583F>
13. *Kumar K., Stefańczyk O., Chorazy S. et al.* // Inorg. Chem. 2019. V. 58. № 9. P. 5677. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b03634>
14. *Nicholas A.D., Bullard R.M., Pike R.D., Patterson H.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2019. V. 2019. № 7. P. 956. <https://doi.org/10.1002/ejic.201801407>
15. *Belyaev A., Eskelinen T., Dau T. et al.* // Chem. Eur. J. 2017. V. 24. № 6. P. 1404. <https://doi.org/10.1002/chem.201704642>
16. *Ovens J.S., Christensen P.R., Leznoff D.B.* // Chem. Eur. J. 2016. V. 22. № 24. P. 8234. <https://doi.org/10.1002/chem.201505075>
17. *Ovens J.S., Geisheimer A.R., Bokov A.A. et al.* // Inorg. Chem. 2010. V. 49. № 20. P. 9609. <https://doi.org/10.1021/ic101357y>
18. *Katz M.J., Leznoff D.B.* // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. № 51. P. 18435. <https://doi.org/10.1021/ja907519c>
19. *Thompson J.R., Goodman-Rendall K.A.S., Leznoff D.B.* // Polyhedron. 2016. V. 108. P. 93. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2015.12.026>
20. *Lefebvre J., Korčok J.L., Katz M.J., Leznoff D.B.* // Sensors. 2012. V. 12. № 3. P. 3669. <https://doi.org/10.3390/s120303669>
21. *Varju B.R., Ovens J.S., Leznoff D.B.* // Chem. Commun. 2017. V. 53. № 48. P. 6500. <https://doi.org/10.1039/C7CC03428H>
22. *Ovens J.S., Leznoff D.B.* // Chem. Mater. 2015. V. 27. № 5. P. 1465. <https://doi.org/10.1021/cm502998w>
23. *Ovens J.S., Leznoff D.B.* // Inorg. Chem. 2017. V. 56. № 13. P. 7332. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b03153>
24. *Ovens J.S., Leznoff D.B.* // CrystEngComm. 2018. V. 20. № 13. P. 1769. <https://doi.org/10.1039/C7CE02167D>
25. *Lefebvre J., Chartrand D., Leznoff D.B.* // Polyhedron. 2007. V. 26. № 9–11. P. 2189. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2006.10.045>
26. *Lefebvre J., Tyagi P., Trudel S. et al.* // Inorg. Chem. 2009. V. 48. № 1. P. 55. <https://doi.org/10.1021/ic801094m>
27. *Geisheimer A.R., Huang W., Pacradouni V. et al.* // Dalton Trans. 2011. V. 40. № 29. P. 7505. <https://doi.org/10.1039/C0DT01546F>
28. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Tarasova N.M., Efremov A.N.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 2. P. 169. <https://doi.org/10.1134/S0036023620020151>
29. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Efremov A.N., Eltsov O.S.* // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 9. P. 631. <https://doi.org/10.1134/S1070328420090031>
30. *Шарутин В.В.* // Вест. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. хим. 2020. Т. 12. № 2. С. 74 (*Sharutin V.V.* // Bull. South Ural State Univ., Ser. Chem. 2020. V. 12. № 2. P. 74). <https://doi.org/10.14529/chem200208>
31. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Tarasova N.M. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2020. V. 69 № 10. P. 1892. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2975-4>
32. *Efremov A.N., Sharutin V.V., Sharutina O.K. et al.* // Изв. вузов. Сер. хим. технол. 2020. Т. 63. № 3. С. 10. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206303.6097>
33. *Шевченко Д.П., Хабина А.Е.* // Вест. Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. хим. 2021. Т. 13. № 1. С. 58 (*Shevchenko D.P., Khabina A.E.* // Bull. South Ural State Univ. Ser. Chem. 2021. V. 13. № 1. P. 58). <https://doi.org/10.14529/chem210106>
34. *Johnson A.* Doctoral Thesis. Zaragoza: Zaragoza University, 2018. 401 p.
35. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1998.
36. SHELXTL/PC. Versions 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures from Diffraction Data. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1998.
37. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. <https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
38. *Vicente J., Chicote M.T.* // Coord. Chem. Rev. 1999. V. 193–195. P. 1143. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(99\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(99)00083-1)

39. Djordjevic B., Schuster O., Schmidbaur H. // Z. Naturforsch. B. 2005. V. 60. № 2. P. 169.
<https://doi.org/10.1039/C3CY00240C>
40. Ahlsten N., Perry G.J.P., Cambeiro X.C. et al. // Catal. Sci. Technol. 2013. V. 3. № 11. P. 2892.
<https://doi.org/10.1515/znb-2005-0207>
41. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. М.: Мир, 2006. 440 с.
42. Cordero, B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. № 21. P. 2832.
<https://doi.org/10.1039/B801115J>
43. Johnson A., Marzo I., Gimeno M.C. // Chem. Eur. J. 2018. № 45. P. 11693.
<https://doi.org/10.1002/chem.201801600>
44. Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al. // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113. № 19. P. 5806.
<https://doi.org/10.1021/jp8111556>