

## РЕАКЦИЯ ОКСИДА ТРИФЕНИЛФОСФИНА С ДИХЛОРОДИЦИАНОАУРАТОМ КАЛИЯ

**В.В. Шарутин<sup>1</sup>✉, Д.П. Шевченко<sup>1</sup>, Н.В. Сомов<sup>2</sup>, М.В. Кудряшов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет, Нижний Новгород, Россия

✉ sharutin50@mail.ru

**Аннотация.** Взаимодействием в ацетонитриле дихлородицианоаурата калия с продуктом реакции бромида пропаргилтрифенилфосфония и гидроксида натрия получен аддукт трифенилфосфиноксида с дихлородицианоауратом калия  $(\text{Ph}_3\text{P}=\text{O})\cdot\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$  (**1**), который был структурно охарактеризован методом РСА. Кристаллографические характеристики **1**  $[\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{N}_2\text{OPCl}_2\text{KAu}]$ ,  $M = 637,28$  г/моль; моноклинная сингония, пр. гр.  $P2_1/c$ ; параметры ячейки:  $a = 14,7417(10)$  Å,  $b = 8,47968(16)$  Å,  $c = 25,9453(17)$  Å;  $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ,  $\beta = 138,910(7)^\circ$ ,  $V = 2131,6(6)$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ ;  $\rho_{\text{выч}} = 1,986$  г/см<sup>3</sup>;  $\mu = 7,436$  мм<sup>-1</sup>;  $F(000) = 1216,0$ ; обл. сбора по  $\theta$ :  $2,683\text{--}28,281^\circ$ ;  $-19 \leq h \leq 19$ ,  $-11 \leq k \leq 11$ ,  $-34 \leq l \leq 34$ ; всего отражений 49043; независимых отражений 4454 ( $R_{\text{int}} = 0,0452$ );  $GOOF = 1,033$ ;  $R$ -фактор = 0,0194]. Из данных РСА следует, что кристаллы **1** состоят из молекул оксида трифенилфосфина ( $\text{P}=\text{O}$  1,4928(18) Å), координированным атомом кислорода на атом калия (расстояние  $\text{O}\cdots\text{K}$  2,610(2) Å). Соседние дихлородицианоауратные группы контактируют между собой через атомы хлора (расстояния  $\text{Cl}\cdots\text{Au}$  3,39(1), 3,54(1) Å). Цианогруппы анионов через атомы азота координированы с  $\mu_4$ -мостиковыми ионами калия ( $\text{N}\cdots\text{K}$  2,861(2)–2,945(2) Å), таким образом, аддукт **1** представляет собой 2D координационный полимер. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов соединения **1** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC 2477131; deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

**Ключевые слова:** дихлородицианоаурат калия, бромид пропаргилтрифенилфосфония, трифенилфосфиноксид, аддукт, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ.

**Благодарности.** Рентгеноструктурные исследования выполнены в рамках госзадания № FSWR-2026-0004 Министерства науки и высшего образования РФ.

**Для цитирования:** Реакция оксида трифенилфосфина с дихлородицианоауратом калия / В.В. Шарутин, Д.П. Шевченко, Н.В. Сомов, М.В. Кудряшов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 1. С. 59–65. DOI: 10.14529/chem260107

Original article  
DOI: 10.14529/chem260107

## REACTION OF TRIPHENYLPHOSPHINE OXIDE WITH POTASSIUM DICHLORODICYANOAUATE

**V.V. Sharutin<sup>1</sup>✉, D.P. Shevchenko<sup>1</sup>, N.V. Somov<sup>2</sup>, M.V. Kudryashov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod, Russia

✉ sharutin50@mail.ru

**Abstract.** The reaction product of propargyltriphenylphosphonium bromide and sodium hydroxide reacts with potassium dichlorodicyanoaurate in acetonitrile to yield an adduct of triphenylphosphine oxide with potassium dichlorodicyanoaurate  $(\text{Ph}_3\text{P}=\text{O})\cdot\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$  (**1**), which was structurally characterized by X-ray diffraction analysis. Crystallographic characteristics of **1**  $[\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{N}_2\text{OPCl}_2\text{KAu}]$ ,  $M = 637.28$  g/mol; monoclinic syngony, space group  $P2_1/c$ ; cell parameters:  $a = 14.7417(10)$  Å,  $b = 8.47968(16)$  Å,  $c = 25.9453(17)$  Å;  $\alpha = \gamma = 90^\circ$ ,  $\beta = 138.910(7)^\circ$ ,  $V = 2131.6(6)$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ ;  $\rho_{\text{calc}} = 1.986$  g/cm<sup>3</sup>;  $\mu = 7.436$  mm<sup>-1</sup>;  $F(000) = 1216.0$ ; collection area by  $\theta$ :  $2.683\text{--}28.281^\circ$ ;  $-19 \leq h \leq 19$ ,  $-11 \leq k \leq 11$ ,  $-34 \leq l \leq 34$ ; total reflections 49043; independent reflections 4454 ( $R_{\text{int}} = 0.0452$ );  $GOOF = 1.033$ ;  $R$ -factor = 0.0194]. From the X-

© Шарутин В.В., Шевченко Д.П., Сомов Н.В., Кудряшов М.В., 2026.

ray diffraction data, it follows that crystals of **1** consist of triphenylphosphine oxide molecules (P=O 1.4928(18) Å), coordinated by an oxygen atom to a potassium atom (O...K distance 2.610(2) Å). The adjacent dichlorodicyanoaurate groups are linked with each other via chlorine atoms (the Cl...Au distances Cl...Au 3.39(1), 3.54(1) Å). The cyano groups of the anions are coordinated via nitrogen atoms to the  $\mu_4$ -bridging potassium ions (N-K 2.861(2)–2.945(2) Å), thus adduct **1** is a 2D coordination polymer. Complete tables of atomic coordinates, bond lengths and valence angles of compound **1** is deposited in the Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC No. 2477131, deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

**Keywords:** potassium dichlorodicyanoaurate, propargyltriphenylphosphonium bromide, triphenylphosphine oxide, adduct, synthesis, structure, X-ray diffraction analysis.

**Acknowledgments:** X-ray structural studies were carried out within the framework of state assignment No. FSWR-2026-0004 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

**For citation:** Sharutin V.V., Shevchenko D.P., Somov N.V., Kudryashov M.V. Reaction of triphenylphosphine oxide with potassium dichlorodicyanoaurate. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(1):59–65. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260107

## Введение

Интерес к синтезу элементоорганических соединений (ЭОС) во многом определяется расширяющимся потенциалом различных областей их применения в практической деятельности: в фармацевтической промышленности, в качестве биоцидов, фунгицидов, антиоксидантов, а также реагентов в тонком органическом синтезе и компонентов каталитических систем при полимеризации и др. Методы получения ЭОС хорошо известны и поэтому число органических производных элементов каждый год значительно увеличивается, причем внимание химиков-синтетиков привлекают не только классические способы синтеза, но и пионерские работы, позволившие синтезировать новые классы органических соединений, такие как, например, сэндвичевые соединения переходных металлов [1–3]. Весьма интересны реакции циклоолигомеризации координированных ацетиленов, связанные с превращениями ацетиленовых лигандов, приводящими к возникновению новых углерод–углеродных связей [4, 5] или обратимого взаимодействия катехолатов трифенилсурьмы, *o*-амидофенолятов трифенилсурьмы с молекулярным кислородом с образованием циклических эндопероксидных комплексов, содержащих пятичленный триоксастиболоновый цикл [6–8]. Важным синтетическим инструментом в органической химии является реактив *Vituga*, позволяющий получать олефины из алкилиденфосфоранов и карбонилсодержащих соединений [9, 10].

О получении элементоорганических реактивов *Vituga* и их соединений с золотом сообщалось ранее в [11–13]. Так, например, нами описаны комплексы  $\text{Ph}_3\text{PC}(\text{H})(\text{R})\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}$  (R = CN [11], COOMe [12]), синтезированные из дихлородицианоаурата калия и стабилизированных илидов  $\text{Ph}_3\text{PC}(\text{H})\text{R}$ . Последние получены смешиванием водных растворов соответствующих хлоридов органилтрифенилфосфония и гидроксида натрия. В работе [14] также описаны несколько илидных и алленильных комплексов золота(I) и золота(III) (рис. 1), где в качестве исходного реагента использовались соли пропаргилтрифенилфосфония. Их депротонирование осуществлялось в присутствии  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  или NaH.

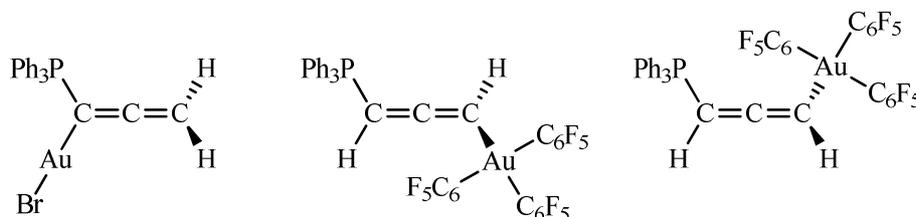


Рис. 1. Илидные и алленильные комплексы золота(I) и золота(III)

В настоящей работе последовательным взаимодействием бромида пропаргилтрифенилфосфония со щелочью и дихлородицианоауратом калия в ацетонитриле предпринята попытка получения нового комплекса золота(III) с илидным  $\text{Ph}_3\text{PC}=\text{C}=\text{CH}_2$  или алленильным  $\text{Ph}_3\text{PCH}=\text{C}=\text{CH}$  лигандами.

**Экспериментальная часть**

**Синтез аддукта  $(\text{Ph}_3\text{P}=\text{O})\cdot\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$  (**1**).**

*Способ (А).* К раствору 150 мг (0,39 ммоль) бромида пропаргилтрифенилфосфония в воде прибавляли 16 мг (0,40 ммоль) гидроксида натрия. Выпавший светло-желтый осадок (63 мг) промывали 5 мл воды и сушили. Порцию 42 мг осадка смешивали с 50 мг (0,14 ммоль) дихлородицианоаурата калия в ацетонитриле. Выпавший осадок фильтровали, фильтрат оставляли до испарения растворителя. Получили небольшое количество (~3 мг) зеленовато-желтых кристаллов **1** с т. пл. 190 °С. ИК спектр ( $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ ): 3069, 3059, 3034, 3021, 2181, 2176, 1583, 1576, 1483, 1435, 1396, 1337, 1312, 1279, 1184, 1159, 1119, 1096, 1067, 1030, 997, 978, 762, 750, 721, 694, 542, 509, 465, 459, 440, 419.

*Способ (Б).* В 5 мл ацетонитрила смешивали 50 мг (0,14 ммоль) дихлородицианоаурата калия и 39 мг (0,14 ммоль) трифенилфосфиноксида. После испарения растворителя получили 83 мг зеленовато-желтых кристаллов **1** (выход 93 %). Т. пл. и ИК-спектр кристаллов, полученных способами (А) и (Б) идентичны.

**ИК-спектр** соединения записывали на ИК-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S в таблетках KBr в области 4000–400  $\text{см}^{-1}$ .

**Рентгеноструктурный анализ** проводили на автоматическом дифрактометре Rigaku XtaLab при 100 °К. Первичные фрагменты структур найдены методом двойного пространства в программных комплексах *SHELX* [15], *ShelXle* [16]. Параметры остальных атомов, включая атомы водорода, определены по разностному синтезу электронной плотности и уточнены по  $|F|^2$  методом наименьших квадратов. Положения водородных атомов уточнялись в основном цикле метода наименьших квадратов в изотропном приближении. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных (2477131 для **1**; deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>). Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структуры **1** приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблица 1

Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры **1**

Параметр	<b>1</b>
Формула	$\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{AuCl}_2\text{KN}_2\text{OP}$
<i>M</i>	637,28
Сингония	Моноклинная
Пр. группа	$P2_1/c$
<i>a</i> , Å	14,7417(10)
<i>b</i> , Å	8,47968(16)
<i>c</i> , Å	25,9453(17)
$\alpha$ , град.	90,00
$\beta$ , град.	138,910(13)
$\gamma$ , град.	90,00
<i>V</i> , Å <sup>3</sup>	2131,6(6)
<i>Z</i>	4
$\rho_{\text{выч}}$ , г/см <sup>3</sup>	1,986
$\mu$ , мм <sup>-1</sup>	7,436
Поглощение <i>T</i> <sub>min</sub> / <i>T</i> <sub>max</sub>	0,046 / 0,448
Учет поглощения	Аналитический [17]
<i>F</i> (000)	1216,0
Размер кристалла, мм	0,638 × 0,406 × 0,152
Дифрактометр / Излучение / Монохроматор / тип сканирования	Rigaku XtaLab, MM003, P200K / MoK $\alpha$ , $\lambda$ = 0,71073 Å / MicroMax-003 / $\omega$ -сканирование
Область сбора данных по 2 $\theta$ , град.	2,683–28,281
Интервалы индексов отражений	$-19 \leq h \leq 19$ , $-11 \leq k \leq 11$ , $-34 \leq l \leq 34$
Измерено отражений	49043
Независимых отражений	4454
<i>R</i> <sub>int</sub>	0,0452

Параметр	1
Переменных уточнения	298
<i>GOOF</i>	1,033
<i>R</i> -факторы по $F^2 > 2\sigma(F^2)$	$R_1 = 0,0194, wR_2 = 0,0552$
Остаточная электронная плотность (min/max), $e/\text{Å}^3$	-1,653 / 0,977

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структуре 1

Связь <i>d</i> , Å		Угол $\omega$ , град	
K1 – O1	2,610(2)	N2 <sup>(II)</sup> – K1 – C2	169,81(6)
K1 – N2 <sup>(I)</sup>	2,861(2)	N1 <sup>(IV)</sup> – K1 – C1 <sup>(I)</sup>	172,39(6)
K1 – N2	2,8814(19)	C2 – N2 – K1 <sup>(III)</sup>	145,62(16)
K1 <sup>(II)</sup> – N1	2,9180(19)	N2 – C2 – K1	48,92(13)
K1 <sup>(III)</sup> – N1	2,945(2)	N2 – C2 – Au2	179,5(2)
K1 – C7 <sup>(I)</sup>	3,330(2)	N2 <sup>(II)</sup> – K1 – N1 <sup>(IV)</sup>	74,66(6)
K1 <sup>(II)</sup> – C1	3,456(2)	N2 – K1 – N1 <sup>(IV)</sup>	81,58(6)
K1 – C2	3,502(2)	N2 <sup>(II)</sup> – K1 – N1 <sup>(I)</sup>	82,39(6)
K1 – C6 <sup>(I)</sup>	3,514(3)	N2 – K1 – N1 <sup>(I)</sup>	118,00(6)
K1 – P1	3,8195(7)	N2 <sup>(II)</sup> – K1 – N2	153,38(5)
K1 – K1 <sup>(I)</sup>	4,3737(3)	N1 <sup>(I)</sup> – K1 – N1 <sup>(IV)</sup>	154,95(5)
K1 – K1 <sup>(IV)</sup>	4,3737(3)	N2 – C2 – Au2	179,5(2)
Au1 – C1	2,000(2)	C1 <sup>(I)</sup> – Au1 – Cl1 <sup>(I)</sup>	87,91(7)
Au1 – C1 <sup>(III)</sup>	2,000(2)	C1 – Au1 – Cl1	87,91(7)
Au1 – Cl1 <sup>(II)</sup>	2,2943(5)	C1 – Au1 – Cl1 <sup>(I)</sup>	92,09(7)
Au1 – Cl1	2,2943(5)	C1 <sup>(I)</sup> – Au1 – Cl1	92,09(7)
P1 – O1	1,4928(18)	C1 – Au1 – C1 <sup>(I)</sup>	180,0
P1 – C10	1,801(2)	Cl1 <sup>(I)</sup> – Au1 – Cl1	180,0
P1 – C16	1,807(2)	C2 – Au2 – Cl2	89,83(7)
P1 – C4	1,808(2)	C2 <sup>(V)</sup> – Au2 – Cl2 <sup>(V)</sup>	89,83(7)
Au2 – C2	1,997(3)	C2 <sup>(V)</sup> – Au2 – Cl2	90,17(7)
Au2 – C2 <sup>(V)</sup>	1,997(3)	C2 – Au2 – Cl2 <sup>(V)</sup>	90,17(7)
Au2 – Cl2	2,2996(5)	C2 – Au2 – C2 <sup>(V)</sup>	180,0
Au2 – Cl2 <sup>(V)</sup>	2,2996(5)	Cl2 – Au2 – Cl2 <sup>(V)</sup>	180,0
N1 – C1	1,150(3)	C15 – C10 – P1	119,80(16)
N2 – C2	1,147(3)	C11 – C10 – P1	120,64(15)

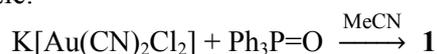
Преобразования симметрии: I)  $-x+1, -y, -z+1$ ; II)  $-x, y-1/2, -z+1/2$ ; III)  $-x, y+1/2, -z+1/2$ ; IV)  $x-1, -y+3/2, z+1/2$ ; V)  $-x+1, -y+1, -z+1$ ; VI)  $x+1, -y+3/2, z+3/2$

### Обсуждение результатов

Из анализа методов синтеза элементоорганических производных следует, что использование нетривиальных реакций может приводить к получению соединений, являющихся прекурсорами более сложных молекул. Так, например, реакция пентафенилфосфора с диоксидом углерода приводит к элиминированию молекулы бензола и образованию гетероциклического соединения фосфора, в котором карбонильная группа оксафосфоланового цикла может восстанавливаться магниорганическими соединениями [18, 19].

Нами предпринята попытка осуществить синтез фосфониевого илида  $\text{Ph}_3\text{PC}=\text{C}=\text{CH}_2$  (согласно [11, 12]) и его взаимодействие с дихлородицианоауратом калия. Полученный смешиванием водных растворов  $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{C}\equiv\text{CH}]\text{Br}$  и  $\text{NaOH}$  осадок был высушен, и его порция (из расчета  $\text{Ph}_3\text{PC}=\text{C}=\text{CH}_2 : \text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ , как 1 : 1 мольн.) была сразу запущена в реакцию с дихлородицианоауратом калия в ацетонитриле. Однако вместо ожидаемых илидного или алленильного комплексов золота(III) из реакционной смеси в небольшом количестве были выделены кристаллы аддукта  $(\text{Ph}_3\text{P}=\text{O})\cdot\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$  (1). В качестве основного продукта с хорошим выходом соеди-

нение **1** синтезировано взаимодействием дихлородицианоаурата калия с трифенилфосфиноксидом (1 : 1 мольн.) в ацетонитриле.



В ИК-спектре аддукта **1** присутствуют хорошо идентифицируемые полосы поглощения валентных колебаний связей  $\text{C}\equiv\text{N}$  ( $2181, 2176 \text{ см}^{-1}$ ) дихлородицианоауратного аниона, а также связей  $\text{C}-\text{H}$  ( $3069-3021 \text{ см}^{-1}$ ),  $\text{P}-\text{C}$  ( $1435 \text{ см}^{-1}$ ) и  $\text{P}=\text{O}$  ( $1184 \text{ см}^{-1}$ ) трифенилфосфиноксида [20, 21].

Из данных РСА следует, что кристаллы **1** состоят из катионов  $[\text{K}]^+$ , молекул оксида трифенилфосфина ( $\text{P}=\text{O} 1,4928(18) \text{ \AA}$ ), координированным атомом кислорода на атом калия (расстояние  $\text{O}\cdots\text{K} 2,610(2) \text{ \AA}$ ) и дихлородицианоауратных групп, связанных в единое целое (рис. 2). Цианогруппы через атомы азота координированы с  $\mu_4$ -мостиковыми ионами калия ( $\text{N}\cdots\text{K} 2,861(2)-2,945(2) \text{ \AA}$ ), поэтому аддукт **1** представляет собой 2D координационный полимер.

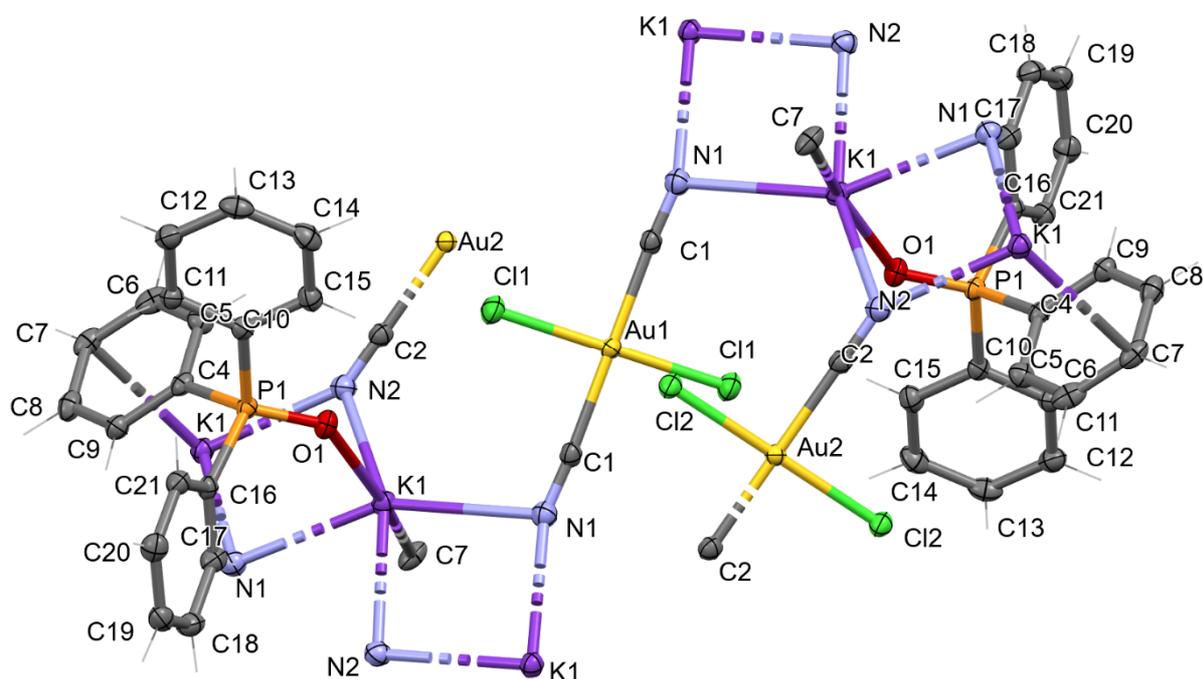


Рис. 2. Строение аддукта оксида трифенилфосфина с дихлородицианоауратом калия (**1**) (атомы водорода не приведены)

В комплексе **1** атомы фосфора и золота имеют тетраэдрическую и квадратную координацию соответственно, при этом углы  $\text{CPC}$  ( $104,76(2)^\circ-108,34(3)^\circ$ ) незначительно отличаются от таковых в подобных солях тетраорганилфосфония [22]. Атомы золота в анионах  $[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]^-$  имеют квадратную геометрию с *транс*-углами  $\text{CAuCl}$  ( $180^\circ$ ) и *цис*-углами  $\text{CAuCl}$ , близкими к  $90^\circ$ . Расстояния  $\text{Au}-\text{C}$  ( $1,997(3), 2,000(2) \text{ \AA}$ ) несколько меньше суммы ковалентных радиусов атомов золота и *sp*-гибридизованного углерода ( $2,05 \text{ \AA}$ ). Длины связей  $\text{Au}-\text{Cl}$  ( $2,2943(5), 2,2996(5) \text{ \AA}$ ) также меньше суммы ковалентных радиусов атомов золота и хлора ( $2,38 \text{ \AA}$  [23]). Значения *цис*-углов  $\text{CAuCl}$  и *транс*-углов  $\text{CAuCl}$  и  $\text{ClAuCl}$  составляют  $87,91(7)^\circ-90,17(7)^\circ$  и  $180^\circ$ , что свидетельствует о близкой к идеальной квадратной координации атома золота. Расстояния  $\text{Cl}(2)\cdots\text{Au}(1)$  и  $\text{Cl}(1)\cdots\text{Au}(2)$  между соседними дихлородицианоауратными анионами равны  $3,39(1)$  и  $3,54(1) \text{ \AA}$  соответственно. С учетом сопоставимого значения суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов хлора и золота ( $3,41 \text{ \AA}$  [24, 25]), координационный полиэдр атома  $\text{Au}(1)$  можно рассматривать как искаженный *псевдо*-октаэдр.

### Выводы

Продуктом реакции трифенилфосфиноксида с дихлородицианоуратом калия в ацетонитриле является их аддукт 2D координационно-полимерного строения  $(\text{Ph}_3\text{P}=\text{O})\cdot\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2\text{Cl}_2]$ , чья полимерная структура обусловлена  $\mu_4$ -мостиковыми ионами калия, координированными с дихлородицианоуратными анионами.

### Список источников

1. *Hein F.* // Chem. Ber. 1919. V. 52, No. 1. P. 195. DOI: 10.1002/cber.19190520126
2. *Kealy T.J., Pauson P.L.* // Nature. 1951. V. 168. P. 1039. DOI: 10.1038/1681039b0
3. *Шарутин В.В., Сенчурин В.С.* Именные реакции в химии элементоорганических соединений: справочник. Челябинск: ЮУрГУ, 2025. 420 с.
4. *Несмеянов А.Н., Анисимов К.Н., Колобова Н.Е. и др.* // Докл. АН СССР. 1968. Т. 182, № 1. С. 112. EDN: XDARFJ
5. *Пасынский А.А., Несмеянов А.Н., Анисимов К.Н. и др.* // Изв. АН СССР, серия хим. 1969. № 1. С. 183. EDN: ZZZMJM
6. *Abakumov G.A., Poddel'sky A.I., Grunova E.V. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2005. V. 44, No. 18. P. 2767. DOI: 10.1002/anie.200462503
7. *Абакумов Г.А., Черкасов В.К., Грунова Е.В. и др.* // Докл. АН. 2005. Т. 405, № 2. С. 199. EDN: HSFTXH
8. *Cherkasov V.K., Abakumov G.A., Grunova E.V. et al.* // Chem. Eur. J. 2006. V. 12, No. 14. P. 3916. DOI: 10.1002/chem.200501534
9. *Wittig G., Geissler G.* // Ann. 1953. V. 580, No. 1. P. 44. DOI: 10.1002/jlac.19535800107
10. *Wittig G., Schollkopf U.* // Chem. Ber. 1954. V. 87, No. 9. P. 1318. DOI: 10.1002/cber.19540870919
11. *Шевченко Д.П., Хабина А.Е., Шарутин В.В. и др.* // Корд. химия. 2022. Т. 48, № 1. С. 29. DOI: 10.31857/S0132344X22010054
12. *Шевченко Д.П., Шарутин В.В., Шарутина О.К.* // Журн. общ. химии. 2022. Т. 92, № 5. С. 799. DOI: 10.31857/S0044460X22050158
13. *Johnson A., Marzo I., Gimeno M.C.* // Chem. Eur. J. 2018. V. 24, No. 45. P. 11693. DOI: 10.1002/chem.201801600
14. *Johnson A., Laguna A., Gimeno M.C.* // J. Am. Chem. Soc. 2014. V. 136, No. 37. P. 12812. DOI: 10.1021/ja5055675
15. *Sheldrick G.M.* // Acta Cryst. Sect. A. 2015. V. 71. P. 3. DOI: 10.1107/S2053273314026370
16. *Hübschle C.B., Sheldrick G.M., Dittrich B.* ShelXle: a Qt graphical user interface for SHELXL // J. Appl. Cryst. 2011. V. 44. P. 1281. DOI: 10.1107/S0021889811043202
17. *Clark R.C., Reid J.S.* // Acta Cryst. 1995. V. 51, No. 6. P. 887. DOI: 10.1107/S0108767395007367
18. *Шарутин В.В., Бычков В.Т., Лебедев В.А. и др.* // Журн. общ. химии. 1986. Т. 56, № 2. С. 325. EDN: ZSMQSC
19. *Шарутин В.В.* // Журн. общ. химии. 1990. Т. 60, № 6. С. 1265. EDN: ZSNOTG
20. *Тарасевич Б.Н.* ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
21. *Васильев А.В., Гриненко Е.В., Щукин А.О., Федулina Т.Г.* Инфракрасная спектроскопия органических и природных соединений: учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2007. 54 с.
22. Cambridge Crystallographic Data Center, 2024.
23. *Cordero B., Gomez V., Platero-Prats A.E. et al.* // Dalton Trans. 2008. No 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J
24. *Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113, No. 19. P. 5806. DOI: 10.1021/jp8111556
25. *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.

**Шевченко Дмитрий Павлович** – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Россия. E-mail: Shepher56@gmail.com

**Сомов Николай Викторович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры кристаллографии и экспериментальной физики, Нижегородский государственный университет, Россия. E-mail: somov@phys.unn.ru

**Кудряшов Михаил Викторович** – аспирант, инженер 2-й категории кафедры кристаллографии и экспериментальной физики, Нижегородский государственный университет, Россия. E-mail: m.v.kudryashov@phys.unn

*Статья поступила в редакцию 30 октября 2025 г.  
The article was submitted 30 October 2025.*