

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ КООРДИНАЦИОННОЙ ХИМИИ

УДК 546.591

СИНТЕЗ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОТА(I) С 10-(АРИЛ)ФЕНОКСАРСИНАМИ

© 2022 г. М. Ф. Галимова^а, *, А. Б. Добрынин^а, Э. И. Мусина^а, Р. Р. Мусин^б, А. А. Карасик^а

^аИнститут органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ Казанский научный центр РАН,
ул. Академика Арбузова, 8, Казань, 420088 Россия

^бКазанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, 68, Казань, 420015 Россия

*e-mail: milya1949@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 18.03.2022 г.

Принята к публикации 18.03.2022 г.

Взаимодействием 10-(арил)феноксарсиновых лигандов с хлоро(тетрагидротиофен)золотом(I) в эквимолярном соотношении синтезирована серия димерных комплексов золота(I) состава $L_2Au_2Cl_2$. Структура комплексов 4–6 подтверждена комплексом физико-химических методов анализа. Кристаллическая структура комплекса 4 подтверждена данными рентгеноструктурного анализа. Рассчитаны углы Толмана известных третичных арсиновых лигандов и полученных в данной работе лигандов в комплексах золота. Показано, что димерная структура комплексов формируется за счет ауорофильного взаимодействия между двумя мономерами, при этом значительную роль играет величина угла Толмана феноксарсинового лиганда, которая в димерных комплексах составляет в среднем 147° .

Ключевые слова: третичные арсины, комплексы золота(I), димеры, угол Толмана

DOI: 10.31857/S0044457X22080128

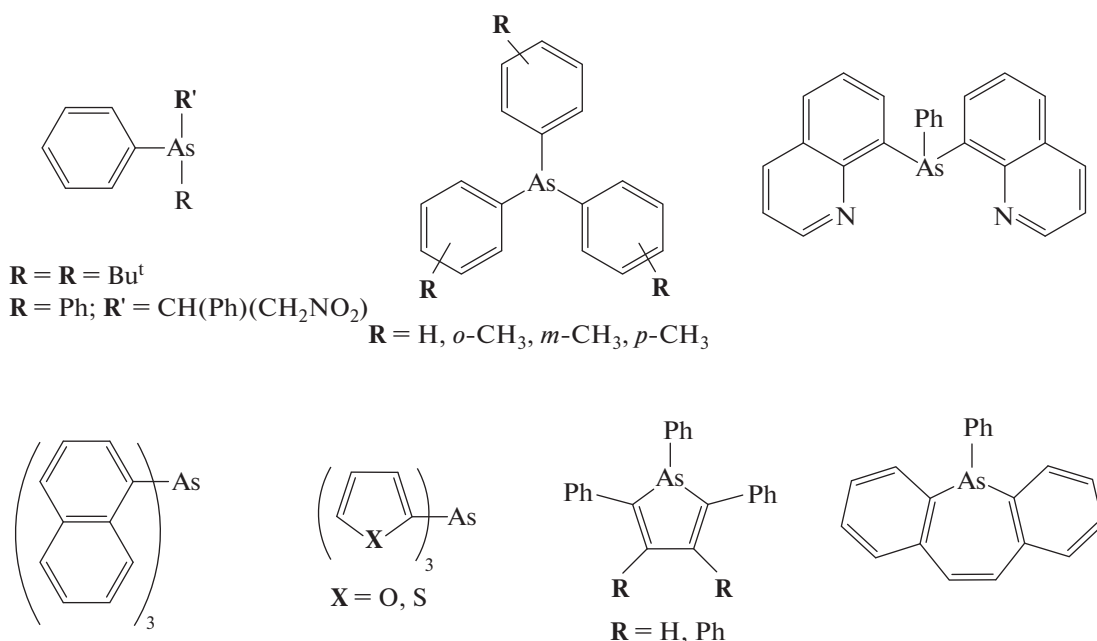
ВВЕДЕНИЕ

Химия золота в настоящее время является одной из стремительно развивающихся областей науки, которая охватывает как синтетические аспекты, так и прикладные, включая применение комплексов золота в создании новых материалов [1, 2], биологии [3–5], медицине [5, 6], в гетерогенном и гомогенном катализе [7–10], о чем свидетельствует множество обзоров. Особое внимание при этом уделяется супрамолекулярной химии золота(I), главным образом, из-за наличия взаимодействий золото–золото, которые некоторые из комплексов проявляют в твердом состоянии [11]. Эти дисперсионные взаимодействия (называемые “ауорофильными”) могут быть как внутри-, так и межмолекулярными. Расстояния золото–золото, наблюдаемые в соединениях, демонстрирующих ауорофильные взаимодействия, находятся в интервале от 2.47 (расстояние, наблюдаемое для молекулы Au_2 в газообразном состоянии) до 3.60 Å (сумма ван-дер-ваальсовых радиусов). Прочность ауорофильных взаимодействий выше, чем для обычных ван-дер-ваальсовых связей ($21–46$ кДж моль⁻¹), и сопоставима с водородной связью [12]. В химии фосфиновых комплексов золота(I) ауорофильные взаимодействия, как правило, проявляются в формировании димеров, где две мономерные единицы $[XAuL]$ (с атомом золота в линейной геометрии)

связаны друг с другом. Эти взаимодействия часто наблюдаются для триалкилфосфинов с малыми коническими углами и отсутствуют в соединениях с объемными лигандами, например, в комплексах на основе триизопротилфосфина или трифенилфосфина (конический угол лиганда составляет 145°). В то же время не всегда наличие объемных арильных заместителей в фосфинах препятствует реализации ауорофильных взаимодействий, в частности, для комплекса золота с $P(Tol-n)_3$ наблюдается ауорофильное взаимодействие, расстояние $Au \cdots Au$ составляет 3.375 Å, несмотря на конический угол 145° . По-видимому, наличие ауорофильных взаимодействий также сильно зависит от кристаллической упаковки и вклада других слабых взаимодействий [13].

По сравнению с фосфиновыми лигандами комплексообразующие свойства мышьякорганических соединений по отношению к иону $Au(I)$ исследованы значительно слабее [5]. Согласно теории Пирсона, арсиновые лиганды являются более мягкими основаниями по сравнению с фосфиновыми лигандами, что должно способствовать образованию димерных комплексов золота(I). Однако, согласно данным рентгеноструктурного анализа, большинство известных комплексов золота с третичными арсиновыми лигандами (трифениларсин [14], трис(*n*-толиларсин) [5], трис(*m*-толиларсин) [5], трис(*o*-толиларсин)

Лиганды, образующие мономерный комплекс [LAuCl]



Лиганд, образующий димерный комплекс [L₂Au₂Cl₂]

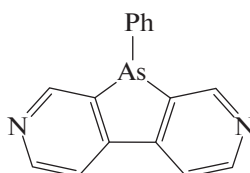


Рис. 1. Лиганды, на основе которых синтезированы комплексы золота(I).

син) [15], трис(1-нафтил)арсин [5], 2-(ди-*трет*-бутиларсин)бифенил [16], 2-нитро-(1-фенил-этил)(дифенил)арсин [17], трис(2-тиенил)арсин [18], трис(2-фурил)фосфин [18], 7-фенил-дибензоарсепин [19], фенилдихинолиниларсин [20] и фенилзамещенные арсолы [21, 22]) являются мономерными (рис. 1).

Известен лишь один представитель монодентатных третичных арсиновых лигандов – циклический дипиридиноарсол, который при взаимодействии с солями Au(I) образует димерный комплекс состава L₂Au₂Cl₂ [23] (рис. 1).

Ранее показано [24, 25], что 10-(арил)феноксарсины образуют устойчивые комплексы с младшим представителем d¹⁰ металлов подгруппы меди – ионом меди(I), при этом формируются либо димерные комплексы, либо кубаноподобные Cu₄I₄ кластеры, в которых реализуется металлофильное взаимодействие.

В настоящей работе исследовали комплексообразование циклических арсиновых лигандов 10-(арил)феноксарсинов по отношению к хлори-

ду золота(I) и возможность реализации ауروفильных взаимодействий в них.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Метиленхлорид, этанол, диэтиловый эфир и бензол очищали и высушивали перед использованием [26].

Согласно известным методикам синтезировали следующие исходные соединения: 10-(арил)феноксарсины [27] и Au(tht)Cl, где tht = тетрагидротиофен [28]. Для синтеза 10-(арил)феноксарсинов использовали следующие реактивы: 10-хлорфеноксарсин [29], соответствующие алкилмагнигалогеиды, сульфат натрия (ч. д. а.), диэтиловый эфир, бензол, этанол и дистиллированную воду. Реактивы для синтеза Au(tht)Cl (тетрахлороаурат(III) водорода, тетрагидротиофен) использовали товарные без предварительной очистки (Aldrich).

Спектры протонного магнитного резонанса арсиновых лигандов приведены в [24, 30].

Масс-спектры матрично-активированной лазерной десорбция/ионизация (МАЛДИ) получали

на масс-спектрометре Ultraflex III TOF/TOF (Bruker Daltonik GmbH, Германия), оснащенном лазером Nd:YAG ($\lambda = 355$ нм, частота 100 Гц), в линейном режиме с регистрацией положительно заряженных ионов. Масс-спектр получали с ускоряющим напряжением 25 кВ и временем задержки экстракции ионов 30 нс. Итоговый масс-спектр сформирован за счет многократного облучения лазером кристалла (50 лазерных импульсов). Использовали металлическую мишень MTP AnchorChipTM. На мишень последовательно наносили и упаривали 0.5 мкл 1%-ного раствора матрицы в ацетонитриле и 0.5 мкл 0.1%-ного раствора образца в метаноле. Данные получали с помощью программы FlexControl (Bruker Daltonik GmbH, Германия) и обрабатывали с помощью программы FlexAnalysis 3.0 (Bruker Daltonik GmbH, Германия).

Элементный анализ осуществляли на CHNS анализаторе EuroEA3028-НТ-ОМ производства Eurovector SpA (Италия). Образцы взвешивали на микровесах Sartorius CP2P (Германия) в оловянных капсулах. Для проведения количественных измерений, оценки полученных данных использовали программное обеспечение Callidus 4.1.

Комплексы **4–6** состава $[\text{Au}_2\text{Cl}_2\text{L}_2]$, где L = 10-(*n*-этоксифенил)феноксарсин, 10-(*n*-толил)феноксарсин и 10-фенилфеноксарсин, получали по однотипной методике синтеза. К раствору Au(tht)Cl (0.25 ммоль) в 3 мл дихлорметана при перемешивании добавляли соответствующий феноксарсиновый лиганд (0.25 ммоль). Реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 24 ч. Растворитель упаривали, полученный осадок перекристаллизовывали из диэтилового эфира, промывали три раза диэтиловым эфиром, высушивали при пониженном давлении (2×10^{-2} мбар) в течение 3 ч.

Комплекс 4. Выход: 63%. $t_{\text{пл}} = 120\text{--}121^\circ\text{C}$. MS (МАЛДИ, m/z (I_{rel} , %), ион): 1157.2 (100, $[\text{M}-\text{Cl}]^+$). ЯМР ^1H , м.д. (400 МГц, CDCl_3): 1.37 (т, 3H, $^3J = 7.00$ Гц, $-\text{CH}_3$); 3.99 (кв, 3H, $^3J = 7.00$ Гц, $\text{O}-\text{CH}_2$); 6.86 (д, 2H, $^3J = 8.7$ Гц, H_B); 7.25 (тд, 2H, $^3J_{21} = ^3J_{23} = 7.4$, $^4J_{24} = 1.0$ Гц, сигнал протона H_2 перекрывается с растворителем); 7.37 (дд, 2H, $^3J_{43} = 8.2$, $^3J_{42} = 1.0$ Гц, H_4); 7.41 (д, 2H, $^3J = 8.7$ Гц, H_A); 7.52 (ддд, 2H, $^3J_{32} = 7.4$, $^3J_{34} = 8.2$, $^4J_{31} = 1.6$ Гц, H_3); 7.60 (дд, 2H, $^3J_{12} = 7.4$, $^4J_{13} = 1.6$ Гц, H_1).

	C	H	Cl	Au	As
Найдено, %:	40.24;	2.86;	5.97;	32.98;	12.59.
Для $\text{C}_{40}\text{H}_{34}\text{As}_2\text{Au}_2\text{Cl}_2\text{O}_4$					
вычислено, %:	40.26;	2.87;	5.94;	33.01;	12.56.

Комплекс 5. Выход: 79%. $t_{\text{пл}} = 195\text{--}196^\circ\text{C}$. MS (МАЛДИ, m/z (I_{rel} , %), ион): 1097.3 (100, $[\text{M}-\text{Cl}]^+$). ЯМР ^1H , м.д. (400 МГц, CDCl_3): 2.31 (с, 3H, $-\text{CH}_3$); 7.17 (д, 2H, $^3J = 8.0$ Гц, H_B); 7.25 (тд, 2H, $^3J_{21} = ^3J_{23} =$

$= 7.5$, $^4J_{24} = 1.0$ Гц, сигнал протона H_2 перекрывается с растворителем); 7.36 (дд, 2H, $^3J_{43} = 8.0$, $^3J_{42} = 1.0$ Гц, H_4); 7.38 (д, 2H, $^3J = 8.0$ Гц, H_A); 7.53 (ддд, 2H, $^3J_{32} = 7.5$, $^3J_{34} = 8.0$, $^4J_{31} = 1.5$ Гц, H_3); 7.62 (дд, 2H, $^3J_{12} = 7.5$, $^4J_{13} = 1.5$ Гц, H_1).

	C	H	Cl	Au	As
Найдено, %:	40.25;	2.62;	6.29;	34.79;	13.24.
Для $\text{C}_{38}\text{H}_{30}\text{As}_2\text{Au}_2\text{Cl}_2\text{O}_2$					
вычислено, %:	40.27;	2.67;	6.26;	34.76;	13.22.

Комплекс 6. Выход: 86%. $t_{\text{пл}} = 194\text{--}195^\circ\text{C}$. MS (МАЛДИ, m/z (I_{rel} , %), ион): 1069.2 (100, $[\text{M}-\text{Cl}]^+$). ЯМР ^1H , м.д. (400 МГц, CDCl_3): 7.25 (тд, 2H, $^3J_{21} = ^3J_{23} = 7.4$, $^4J_{24} = 1.1$ Гц, H_2); 7.31–7.41 (м, 5H, Ph); 7.46 (дд, 2H, $^3J_{43} = 8.2$, $^4J_{42} = 1.1$ Гц, H_4); 7.52 (ддд, 2H, $^3J_{32} = 7.4$, $^3J_{34} = 8.2$, $^4J_{31} = 1.5$ Гц, H_3); 7.62 (дд, 2H, $^3J_{12} = 7.4$, $^4J_{13} = 1.5$ Гц, H_1).

	C	H	Cl	Au	As
Найдено, %:	39.15;	2.33;	6.38;	35.59;	13.60.
Для $\text{C}_{36}\text{H}_{26}\text{As}_2\text{Au}_2\text{Cl}_2\text{O}_2$					
вычислено, %:	39.12;	2.37;	6.41;	35.64;	13.56.

Рентгеноструктурный анализ. Кристаллы ($\text{C}_{40}\text{H}_{34}\text{As}_2\text{Au}_2\text{Cl}_2\text{O}_4 \cdot \text{CHCl}_3$, $M = 1312.72$), моноклинные, при 150 К $a = 33.591(7)$, $b = 13.237(3)$, $c = 24.401(9)$ Å, $\beta = 125.805(2)^\circ$, $V = 8799(4)$ Å³, $Z = 8$, пространственная группа C2/c, $d_{\text{выч}} = 1.982$ г/см³, $\mu = 8.497$ мм⁻¹, $F(000) = 4976$. Параметры ячейки и экспериментальные данные получены при $T = 150$ К на автоматическом дифрактометре Bruker Карра APEX II CCD [$\lambda(\text{MoK}_\alpha) = 0.71073$ Å, ω -сканирование], $2\theta < 56^\circ$, $R_{\text{int}} = 0.073$. Измерено 38833 отражений, из них 10 614 независимых, число наблюдаемых отражений с $I > 2\sigma(I)$ 8434.

Структура расшифрована прямым методом по программе SHELXS-97 [31] и уточнена полноматричным МНК по программе SHELXL-2018/3 [32]. Все расчеты выполнены с использованием программ WinGX [33], окончательные значения факторов расходимости R 0.0378, wR_2 0.0952, GOF = 0.99, число уточняемых параметров 489. Анализ межмолекулярных взаимодействий проведен с помощью программы PLATON [34]. Рисунок сделан в программе MERCURY [35].

Координаты атомов и структурные параметры кристаллов **4** депонированы в Кембриджской базе кристаллоструктурных данных (CCDC 2143396).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Комплексы **4–6** синтезированы взаимодействием 10-(арил)феноксарсинов **1–3** с Au(tht)Cl в эквимольном соотношении в хлористом метиле (схема 1).

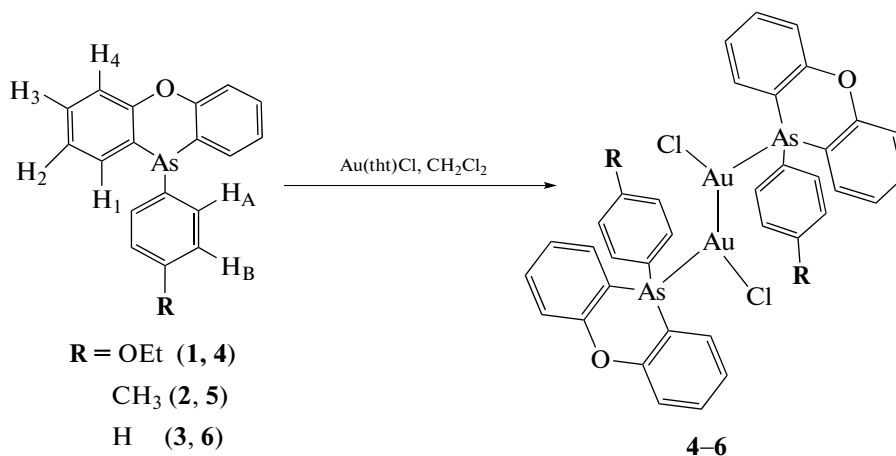


Схема 1. Синтез комплексов золота Au(I) 4–6.

После удаления растворителя и кристаллизации из диэтилового эфира получены комплексы 4–6 в виде белых порошков, хорошо растворимых в дихлорметане, хлороформе и ацетонитриле.

Структура комплексов установлена комплексом физико-химических методов анализа (ФХМА). В масс-спектрах МАЛДИ комплексов 4–6 регистрируется ион, соответствующий составу $[\text{M}-\text{Cl}]^+$, что свидетельствует о димерной структуре полученных комплексов, а данные элементного анализа свидетельствовали об образовании комплекса состава $\text{L}_2\text{Au}_2\text{Cl}_2$. Спектры ПМР комплексов 4–6 в CDCl_3 показывают сдвиг сигналов протонов в слабые поля по сравнению со свободным лигандом, в частности, протоны при атомах углерода, близких к атому мышьяка, смещены на 0.13–0.15 м.д. в случае протона H_1 , и на 0.23–0.37 м.д для протона H_A , что также подтверждает координацию атома мышьяка по атому золота.

Структура соединения 4 установлена методом рентгеноструктурного анализа. Желтоватые монокристаллы соединения 4, пригодные для РСА, получены медленной диффузией диэтилового эфира в насыщенный раствор комплекса в хлороформе. Проведенный РСА комплекса 4 свидетельствует о димерной структуре комплекса (рис. 2).

Комплекс 4 кристаллизуется в моноклинной пр. гр. $C2/c$ в виде кристаллосольвата с одной молекулой хлороформа. Атомы золота имеют линейную геометрию (без учета $\text{Au}\dots\text{Au}$ взаимодействия), углы $\text{As}-\text{Au}-\text{Cl}$ составляют 173.40° и 175.55° . Расстояние $\text{Au}\dots\text{Au}$ меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов и составляет 2.979 \AA , что и сопоставимо с расстоянием $\text{Au}\dots\text{Au}$ в комплексе золота(I) на основе дипиридиноарсола (3.077 \AA) [23]. Длина связей $\text{Au}-\text{As}$ составляет 2.337 и 2.338 \AA , что больше, чем в комплексах золота с третичными фосфинами [36], и сопоставимо с катионными комплексами золота(I) на осно-

ве PPh_3 [37]; расстояния $\text{Au}-\text{Cl}$ составляют 2.291 и 2.294 \AA . Феноксарсиновые фрагменты двух лигандов в комплексе 4 практически плоские и находятся в стабилизирующей молекулу стекинг-конформации. Выбранные длины связей (\AA) и углы (градусы) в комплексе 4 приведены в табл. 1.

Как было отмечено, стерические особенности лигандов играют важную роль в формировании димерных комплексов золота(I). Известно, что наиболее информативным для определения стерической загруженности лиганда является его конический угол, поэтому в данной работе были рассчитаны и проанализированы конические углы Толмана арсиновых лигандов как в известных комплексах, так и в новых на основе 10-(*n*-этоксифенил)феноксарсина.

Конические углы Толмана (Θ) соединений были рассчитаны по формуле [38]:

$$\Theta = \frac{2}{3} \sum_i \theta_i,$$

где θ_i – половинные конические углы для каждого заместителя у атома мышьяка.

Значение θ_i рассчитано по формуле:

$$\theta_i = \alpha + \frac{180}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{r_{\text{H}}}{d} \right),$$

где α – угол $\text{H}-\text{Au}-\text{As}$; d – расстояние $\text{H}-\text{Au}$; r_{H} – радиус атома H.

Расчет конических углов Толмана арсиновых лигандов в комплексах Au (I) представлен в табл. 2. Видно, что конический угол дипиридиноарсола в димерном комплексе L_2AuCl_2 составляет 134° , что меньше конических углов Толмана, рассчитанных для арсиновых лигандов в мономерных комплексах золота(I) (150° – 192°). Конический угол Толмана для двух молекул 10-(*n*-этоксифенил)феноксарсина в комплексе 4 составляет 142° и 151° , что меньше или равно наблюдаемым

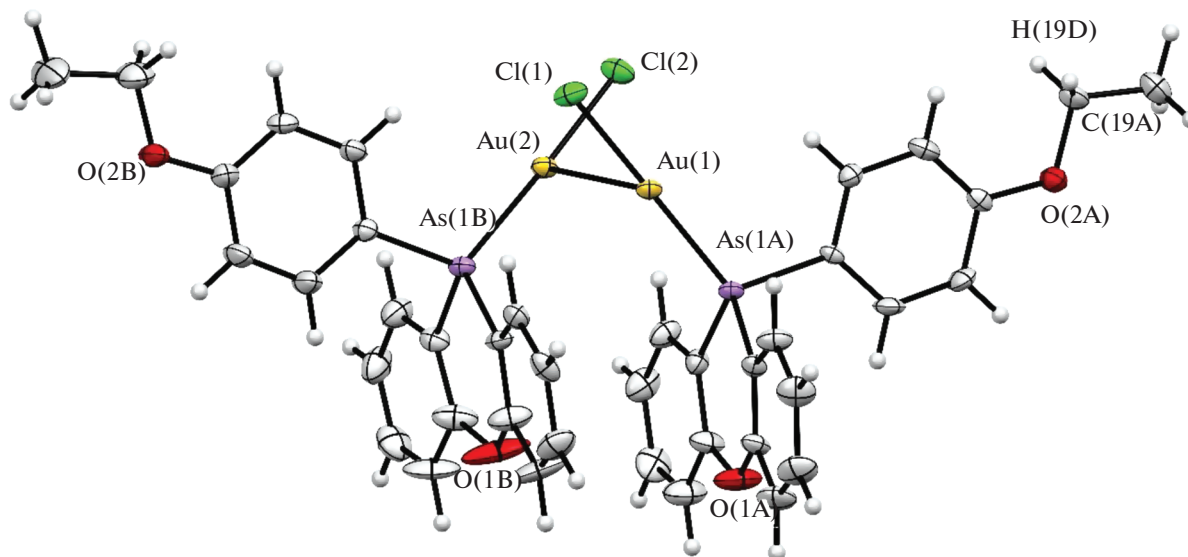


Рис. 2. Молекулярная структура комплекса **4**. Молекула растворителя не показана для упрощения рисунка.

для лигандов в мономерных комплексах. Вероятно, реализация межмолекулярных ауорофильных взаимодействий в комплексе **4** также, как это было показано для фосфиновых комплексов [13], в значительной мере зависит и от кристаллической упаковки и наличия/отсутствия других слабых внутри- и межмолекулярных взаимодействий. При анализе данных РСА кристаллической упаковки комплекса **4** обнаружили лишь взаимодействия С–Н...Cl-типа, которые приводят к образованию слоев вдоль оси $0b$ (рис. 3). Параметры межмолекулярных контактов в кристалле соединения **4** представлены в табл. 3. В то же время в кристалле присутствует большое количество

внутримолекулярных слабых π – π -взаимодействий, стабилизирующих димерную структуру.

Таким образом, малые конические углы феноксарсинового лиганда и наличие стабилизирующих внутримолекулярных взаимодействий в комплексе **4** способствуют реализации димерной структуры с ауорофильным взаимодействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взаимодействие феноксарсиновых лигандов с хлоро(тетрагидротиофен)золотом(I) приводит к образованию нейтральных димерных комплексов с As-монодентатной координацией лигандов. Показано, что в случае комплексов с третичными арсиновыми лигандами реализация ауорофильных взаимодействий зависит как от стерических свойств используемого лиганда, так и от стабилизации такой структуры за счет внутри- или межмолекулярных взаимодействий.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят ЦКП-САЦ ФИЦ КазНЦ РАН за техническую поддержку проведенных исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Таблица 1. Избранные геометрические параметры

Параметр	4
Au1–Au2	2.9786(13)
Au1–Cl1	2.2907(19)
Au2–Cl2	2.2931(18)
Au1–As1A	2.3378(11)
Au2–As1B	2.3367(11)
As1A–C13A	1.918(6)
As1B–C13B	1.917(6)
As1A–Au1–Cl1	174.55(6)
As1B–Au2–Cl2	173.40(6)
Au1–As1A–C13A	112.88(18)
Au2–As1B–C13B	114.19(18)
C1A–As1A–C12A	98.1(3)
C1B–As1B–C12B	97.8(3)

Таблица 2. Расчет конических углов арсиновых лигандов на основе данных РСА

Лиганд	Расстояние (Н–М)	Угол (Н–М–As), град	Половинный конический угол заместителя	Конический угол
Комплекс LAuCl				
Трис(2-тиенил)арсин	3.648	57.45	73.36	157
	3.387	64.29	81.46	
	3.408	63.30	80.36	
Фенилдихинолиниларсин	4.369	82.54	95.77	180
	3.136	63.23	81.83	
	4.517	79.63	92.42	
7-Фенил-добензоарсепин	3.006	64.57	84.00	153
	2.996	65.33	84.83	
	4.016	46.43	60.85	
1,2,5-Трифенил-1Н-арсол	3.380	59.35	76.56	151
	7.106	65.03	73.12	
	6.981	68.00	76.24	
Трифениларсин	3.235	61.20	79.21	150
	3.725	53.29	68.86	
	3.241	58.94	76.91	
Трис(1-нафтил)арсин	4.708	85.51	97.77	192
	4.730	84.42	96.63	
	4.877	81.03	92.86	
Трис(<i>o</i> -толил)арсин*	2.753	69.05	90.35	186
	2.992	72.07	91.60	
	3.032	77.94	97.20	
	2.813	71.63	92.45	188
	2.907	71.76	91.88	
	2.796	75.89	96.85	
Комплекс L ₂ AuCl ₂				
Дипиридиносарсол	4.071	49.58	63.80	134
	4.134	47.92	61.92	
	3.145	62.38	80.92	
10-(<i>n</i> -Этоксифенил)феноксарсин**	3.099	63.53	82.86	142
	3.988	46.51	61.03	
	3.647	53.26	69.17	
	3.032	64.76	84.02	151
	3.421	56.75	73.75	
	3.703	52.76	68.43	

* Конические углы рассчитаны для лигандов в двух независимых молекулах.

** Конические углы рассчитаны для двух лигандов в независимой части молекулы.

Таблица 3. Параметры межмолекулярных контактов в кристалле соединения **4**

D–H…A	D–H, Å	H…A, Å	D…A, Å	DHA, град	Операции симметрии
C19A–H19D…C11'	0.9900	2.7800	3.673(7)	151.00	1/2–x, –1/2 + y, 1/2 – z
C100–H100…C12'	1.0000	2.4900	3.452(9)	161.00	x, 1 + y, z

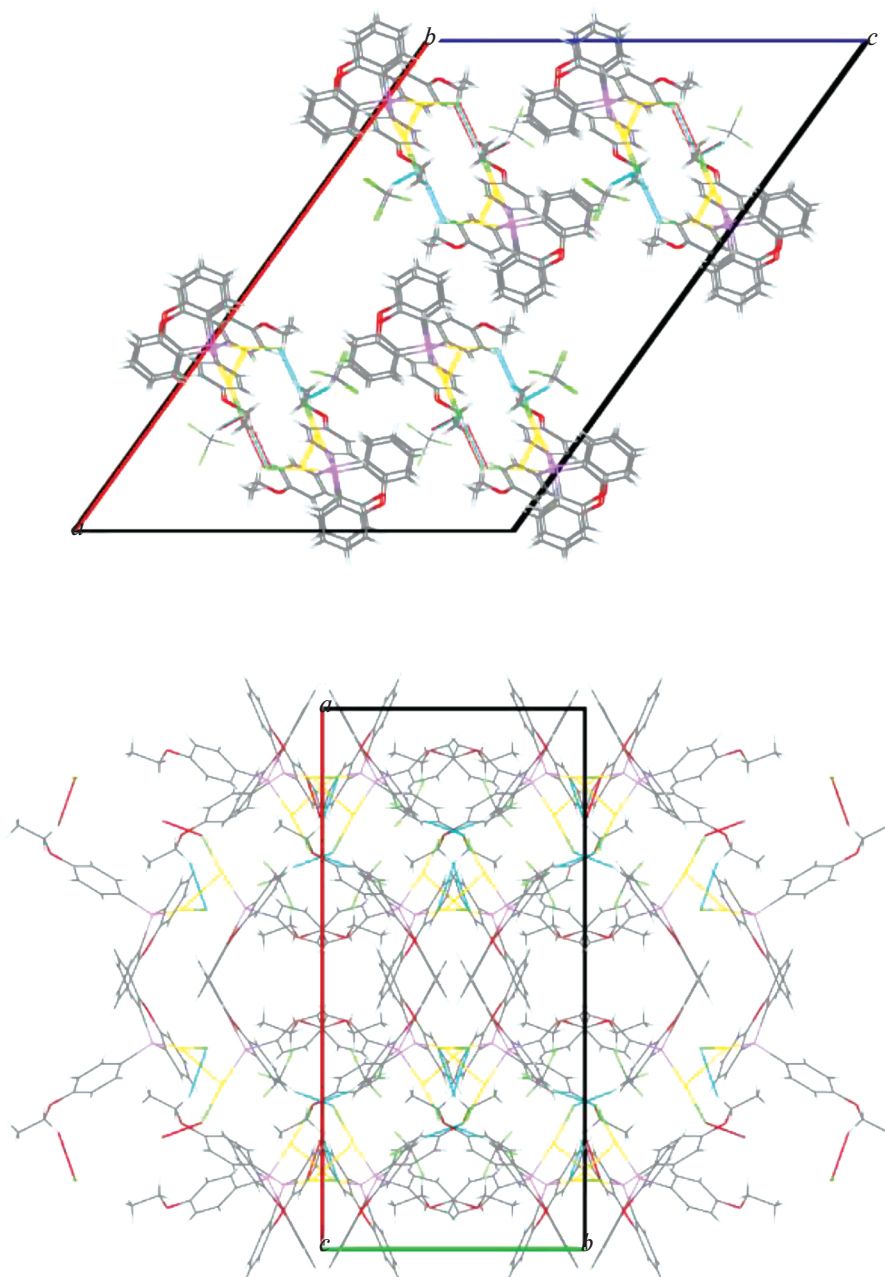


Рис. 3. Кристаллическая упаковка соединения **4** вдоль оси $0b$ и $0c$, соответственно (показаны $\text{C-H}\cdots\text{Cl}$ взаимодействия).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Статья подготовлена по материалам XXVIII Международной Чугаевской конференции по координационной химии, с. Ольгинка, Туапсинский район, 03–08 октября 2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grzelczak M., Perez-Juste J., Mulvaney P. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. № 9. P. 1783. <https://doi.org/10.1039/B711490G>
2. *Hakkinen H.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 1847. <https://doi.org/10.1039/B717686B>
3. *Sperling R. A., Rivera Gil P., Zhang F. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 1896. <https://doi.org/10.1039/B712170A>
4. *Wilson R.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 2028. <https://doi.org/10.1039/B712179M>
5. *Shawkataly Ob., Goh C.-P., Tariq A. et al.* // Plos One. 2015. V. 10. № 3. e0119620. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119620>

6. *Mironov I.V., Kharlamova V.Yu.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 7. P. 978.
<https://doi.org/10.1134/S0036023618070173>
7. *Della Pina C., Falletta E., Prati L. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 2077.
<https://doi.org/10.1039/B707319B>
8. *Chen M., Goodman D.W.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 1860.
<https://doi.org/10.1039/B707318F>
9. *Schmidbaur H., Schier A.* // Z. Naturforsch. 2011. V. 66. № 4. P. 329.
<https://doi.org/10.1515/znb-2011-0401>
10. *Marion N., Nolan S.* // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. P. 1776.
<https://doi.org/10.1039/B711132K>
11. *Ionov S.P., Kuznetsov N.T.* // Russ. J. Coord. Chem. 2001. V. 27. № 9. P. 628.
<https://doi.org/10.1023/A:1017945404464>
12. *Sarcher C., Farsadpour S., Taghizadeh Ghoochany L. et al.* // Dalton Trans. 2014. V. 43. P. 2397.
<https://doi.org/10.1039/C3DT52893F>
13. *Barnes N.A., Brisdon A.K., William Brown F.R. et al.* // Dalton Trans. 2011. V. 40. P. 1743.
<https://doi.org/10.1039/C3DT52893F>
14. *Weissbart B., Larson L.J., Olmstead M.M. et al.* // Inorg. Chem. 1995. V. 34. P. 393.
<https://doi.org/10.1021/ic00105a060>
15. *Barnes N.A., Flower K.A., Godfrey S.M. et al.* // CrystEngComm. 2010. V. 12. P. 4240.
<https://doi.org/10.1039/C0CE00024H>
16. *Carreras J., Pereira A., Zanini M. et al.* // Organometallics 2018. V. 37. P. 3588.
<https://doi.org/10.1021/acs.organomet.8b00276>
17. *Tay W.S., Yang X.-Y., Li Y. et al.* // Chem. Commun. 2017. V. 53. P. 6307.
<https://doi.org/10.1039/C7CC02044A>
18. *Monkowiak U., Nogai S., Schmidbau H.* // Z. Naturforsch. 2003. V. 58b. P. 751.
<https://doi.org/10.1515/znb-2003-0806>
19. *Kawashima I., Imoto H., Ishida M. et al.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2019. V. 58. № 34. P. 11686.
<https://doi.org/10.1002/anie.201904882>
20. *Kihara H., Tanaka S., Imoto H. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2020. V. 2020. № 38. P. 3662.
<https://doi.org/10.1002/ejic.202000542>
21. *Imoto H., Urushizaki A., Kawashima I. et al.* // Chem. Eur. J. 2018. V. 24. № 35. P. 8797.
<https://doi.org/10.1002/chem.201801589>
22. *Ishidoshiro M., Matsumura Y., Imoto H. et al.* // Org. Lett. 2015. V. 17. № 19. P. 4854.
<https://doi.org/10.1021/acs.orglett.5b02416>
23. *Fujii T., Tanaka S., Hayashi S. et al.* // Chem. Commun. 2020. V. 56. P. 6035.
<https://doi.org/10.1039/D0CC02389B>
24. *Musina E.I., Galimova M.F., Musin R.R. et al.* // ChemistrySelect. 2017. V. 2. P. 11755.
<https://doi.org/10.1002/slct.201702031>
25. *Galimova M.F., Zueva E.M., Dobrynin A.B. et al.* // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 482.
<https://doi.org/10.1039/C9DT04122B>
26. *Гордон А., Форд Р.* Спутник химика. Физико-химические свойства, методики, библиография / Пер. с англ. под ред. Розенберга Е.Л., Коппель С.И. М.: Мир, 1976.
27. *Гаврилов В. И., Хлебников В.Н., Комлева А.А. и др.* // Журн. общ. химии 1974. Т. 44. № 11. С. 2506.
28. *Hashmi A.S.K., Hengst T., Lothschütz C. et al.* // Adv. Synthesis Catalysis. 2010. V. 352. № 8. P. 1315.
<https://doi.org/10.1002/adsc.201000126>
29. *Гаврилов В.И., Гаврилова Г.Р., Хлебников В.Н. и др.* // Известия ВУЗов. Химия и хим. технол. 1973. Т. 16. С. 1602.
30. *Galimova M.F., Begaliev T.A., Zueva E.M. et al.* // Inorg. Chem. 2021. V. 60. № 9. P. 6804.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00672>
31. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr., Sect. A: Found. Crystallogr. 2008. V. 64. P. 112.
<https://doi.org/10.1107/S0108767307043930>
32. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun. 2015. V. 71. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>
33. *Farrugia L.J.* // J. Appl. Crystallogr. 1999. V. 32. P. 837.
<https://doi.org/10.1107/S0021889899006020>
34. *Spek A.L.* // Acta Crystallogr., Sect. D: Biol. Crystallogr. 2009. V. 65. P. 148.
<https://doi.org/10.1107/S090744490804362X>
35. *Macrae C.F., Bruno I.J., Chisholm J.A. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2008. V. 41. P. 466.
<https://doi.org/10.1107/S0021889807067908>
36. *Spiridonova Yu.S., Strelnik I.D., Musina E.I. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 7. P. 477.
<https://doi.org/10.1134/S107032842007009X>
37. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Belousova O.N. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. № 4. P. 524.
<https://doi.org/10.1134/S003602361104005X>
38. *Tolman A.C.* // Chem. Rev. 1977. V. 77. № 3. P. 313.
<https://doi.org/10.1021/cr60307a002>