

Авторы поздравляют академика И.Л. Еременко с 70-летним юбилеем

СИНТЕЗ И СТРУКТУРА НОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОТА(I) С 1,5-ДИАЗА-3,7-ДИФОСФАЦИКЛООКТАНАМИ

© 2020 г. Ю. С. Спиридонова¹, *, И. Д. Стрельник¹, Э. И. Мусина¹,
Е. Хей-Хокинс², И. А. Литвинов¹, А. А. Карасик¹

¹Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра РАН, Казань, Россия

²Институт неорганической химии Университета Лейпцига, Лейпциг, Германия

*e-mail: aik791@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 17.02.2020 г.

Взаимодействием хлорида золота(I) или тетрагидротиофензолото(I) хлорида с 1,5-ди(*p*-толил)-3,7-дифенил-1,5,3,7-диазадифосфациклооктаном в разных соотношениях получены новые би- и трехъядерные комплексы золота(I). Структура полученных соединений подтверждена методами ЯМР-спектроскопии, элементного анализа и РСА (CIF files CCDC № 1974032 (I), 1974031 (II)). Показано, что в отличие от *P*-пиридилсодержащих 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктанов *P*-фенилзамещенные лиганды не претерпевают перегруппировки с расширением цикла в ходе формирования трехъядерных комплексов золота(I).

Ключевые слова: комплекс, аминотетрафосфин, 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктан, золото(I), рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0132344X20070099

Металлокомплексы золота(I) с органическими лигандами, в которых возможно проявление ауорофильности, слабых взаимодействий, характерных для катионов *d*-металлов, – уникальные объекты для исследований [1–5]. Полифосфиновые лиганды в комплексах золота(I) являются структурообразующими, и в то же время в комплексеобразовании используются гибкие лиганды, способные подстраиваться под структуру формируемого ядра комплекса [6–11]. Лабильность лигандов в комплексах золота(I) используется для конструирования систем, обладающих люминесцентным откликом на наличие катионов металлов, органических растворителей и других субстратов [6, 12]. Намного реже используются полифосфиновые лиганды, имеющие жесткий каркас и обладающие ограниченной подвижностью, задающие геометрию ядра комплекса [13–15]. К такому классу лигандов можно отнести среднециклические аминотетрафосфины, в которых два атома фосфора связаны в одной достаточно жесткой циклической системе. Тем не менее недавно было продемонстрировано, что жесткий каркас этих восьмичленных гетероциклических лигандов в условиях комплексообразования способен трансформироваться, давая гетероциклы большего размера. В

частности, была показана возможность перегруппировки 1,5-ди(*p*-толил)-3,7-дипиридин-2-ил-1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктана на трехъядерном темплате золота(I) в комплекс с 16-членным лигандом [16].

С другой стороны, полученные недавно в нашей лаборатории комплексы золота(I) на основе *P*-пиридилзамещенных 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктанов проявляют отклик люминесценции на наличие молекул растворителей как в твердой фазе, так и в растворе [13, 14, 17, 18]. Это явление для комплексов 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктанов обусловлено несколькими факторами, основным из которых является формирование супрамолекулярных систем по типу “гость–хозяин”. В указанных выше системах ключевую роль в формировании граничных молекулярных орбиталей, участвующих в процессах переноса заряда, вызывающих эмиссионные свойства, играют пиридилные фрагменты.

В настоящей работе мы представляем синтез новых комплексов золота(I) с 1,5-ди(*p*-толил)-3,7-дифенил-1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктаном (L), в структуре которого отсутствует хромофорный

пиридильный фрагмент, изучение их структурных параметров и спектральных свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все операции с производными золота(I) проводили в инертной атмосфере. Растворители очищали и дегазировали стандартными методами. Синтез лиганда L осуществляли по методике [19]. Au(Tht)Cl и AuCl коммерчески доступны.

Все ЯМР-эксперименты проводили при 303 К. Спектры ЯМР ^1H и ^{31}P регистрировали на ЯМР-спектрометре Bruker Avance-DRX 400 на частотах 161.9 МГц (^{31}P) и 400.13 МГц (^1H). Химические сдвиги приводили по шкале δ (м.д.) относительно сигналов SiMe_4 (δ_{H} 0.0 м.д.) и H_3PO_4 (δ_{P} 0.0 м.д.).

Синтез дихлоро[1,5-ди(*p*-толил)-3,7-дифенил-1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктан]дизолото(I) (I). К раствору 0.100 г (0.21 ммоль) L в 2 мл CH_2Cl_2 приливали 0.134 г (0.42 ммоль) тетрагидротиофензолото(I) хлорида в 3 мл CH_2Cl_2 и перемешивали 3 ч. Образовавшийся осадок отфильтровывали и промывали CH_2Cl_2 , сушили в вакууме. Выход I 0.17 г (92%).

Кристаллы I, пригодные для PCA, выращивали медленным упариванием растворителя из раствора комплекса I в CH_3CN . Кристаллы I ($\text{C}_{30}\text{H}_{32}\text{N}_2\text{P}_2\text{Cl}_2\text{Au}_2$ + неопределенный растворитель, $M = 947.36$) бесцветные призматические, моноклинные.

Спектр ЯМР ^{31}P (CD_3CN ; δ , м.д.): 1.87. Спектр ЯМР ^1H (CD_3CN ; δ , м.д.): 2.26 (с., 6H, CH_3), 4.66 (м., ш, 2H, P- CH_2 -N), 4.69 (м., ш, 2H, P- CH_2 -N), 4.86 (д.д., $^2J_{\text{HH}} = 4.58$ Гц, $^2J_{\text{PH}} = 15.6$ Гц, 4H, P- CH_2 -N), 6.98 (д., $^2J_{\text{HH}} = 8.2$ Гц, 4H, C_6H_4), 7.06 (д., $^2J_{\text{HH}} = 8.24$ Гц, 4H, C_6H_4), 7.67–7.71 (м., ш, 6H, C_6H_5), 7.96–8.00 (м., ш, 4H, C_6H_5).

Найдено, %: C 39.70; H 4.20; N 3.30; P 6.30; Cl 5.60; Au 40.90.

Для $\text{C}_{30}\text{H}_{32}\text{N}_2\text{P}_2\text{Cl}_2\text{Au}_2$

вычислено, %: C 38.00; H 3.40; N 2.96; P 6.56; Cl 7.48; Au 41.60.

Синтез дихлоро[1,5-ди(*p*-толил)-3,7-дифенил-1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктан]тризолото(I) хлорида (II). К раствору 0.100 г (0.21 ммоль) L в 2 мл CH_2Cl_2 приливали 0.072 г (0.31 ммоль) хлорида золота в 3 мл CH_2Cl_2 и перемешивали 3 ч. Образовавшийся осадок отфильтровывали и промывали CH_2Cl_2 . Выход II 0.065 г (17%).

Кристаллы II, пригодные для PCA, выращивали из бифазной системы ДМФА- CH_3CN в соотношении 1 : 4. Кристаллы II ($[\text{C}_{60}\text{H}_{63}\text{N}_4\text{P}_4\text{Cl}_2\text{Au}_3]^+\text{Cl}^-$ + неопределенный растворитель, $M = 1661.29$) бесцветные, призматические, моноклинные.

Спектр ЯМР ^{31}P (ДМСО- d_6 ; δ , м.д.): -1.2. Спектр ЯМР ^1H (ДМСО- d_6 ; δ , м.д.): 1.90 (с., ш,

6H, CH_3); 2.07 (с., ш, 3H, CH_3 (скрыт за ацетоном)), 2.18 (с., ш, 3H, CH_3), 4.65–4.68 (м., ш, 4H, P- CH_2 -N), 5.16–5.20 (м., ш, 4H, P- CH_2 -N), 6.82–7.08 (м., ш, 8H, C_6H_4), 7.65–7.77 (м., ш, 10H, C_6H_5).

Найдено, %: C 42.80; H 3.40; N 4.02; P 6.78; Cl 6.24; Au 36.76.

Для $\text{C}_{60}\text{H}_{64}\text{N}_4\text{P}_4\text{Cl}_3\text{Au}_3$

вычислено, %: C 43.35; H 3.88; N 3.37; P 7.45; Cl 6.40; Au 35.55.

PCA I и II выполнен на дифрактометре Bruker Smart APEX II CCD в отделении PCA федерального центра коллективного пользования (ЦКП САЦ) на базе лаборатории дифракционных методов исследования ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН. Параметры ячеек и экспериментальные данные получены при $T = 296(2)$ К (Mo- K_{α} -излучение, $\lambda = 0.71073$ Å, ω -сканирование). Учет поглощения проведен по программе SADABS [20]. Структуры расшифрованы прямым методом по программе SHELXT 2014/4 [21] и уточнены полноматричным МНК по F^2 по программе SHELXL-2018/3 [22]. Все расчеты выполнены с использованием программного пакета WinGX-2014.1 [23] и APEX2 [24]. Неводородные атомы уточнены в анизотропном приближении. В обоих структурах выявлено множество интенсивных пиков электронной плотности, попытки задания их в качестве сольватных молекул не привели к успеху. Предприняты попытки задания сольватных молекул ацетонитрила, хлористого метилена, ацетона, диметилформамида. Во всех случаях приходилось фиксировать геометрию сольватных молекул, уточнять дробную заселенность позиций молекул. Тем не менее эти попытки приводили к нереальным параметрам тепловых колебаний. Понижение симметрии структур (переход в нецентросимметричные пространственные группы) не привело к исчезновению разупорядоченности. Было принято решение уточнить обе структуры по процедуре SQUEEZE из программы PLATON [25] для учета неопределенного растворителя. Атомы водорода при атомах углерода молекулярных комплексов помещены в вычисленные положения и уточнены по "схеме наездника". Кристаллографические данные и результаты уточнения структур приведены в табл. 1.

Координаты атомов, длины связей, валентные углы и температурные параметры депонированы в Кембриджской базе структурных данных (CCDC № 1974032 (I), 1974031 (II); deposit@ccdc.cam.ac.uk).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате взаимодействия тетрагидротиофензолото(I) хлорида с 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктаном в соотношении 1 : 2 с количественным выходом образуется биядерный комплекс I в виде белого порошка (схема 1).

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур I и II

Параметр	Значение	
	I	II
<i>M</i>	947.36	1662.30
<i>T</i> , К	296	296
Пр. гр.	<i>C2/c</i>	<i>P2₁/n</i>
<i>Z</i>	4 (молекула в частном положении на оси 2)	4
<i>a</i> , Å	23.04(3)	11.404(2)
<i>b</i> , Å	11.316(16)	26.382(5)
<i>c</i> , Å	16.01(2)	21.801(4)
β , град	126.222(16)	97.160(2)
<i>V</i> , Å ³	3367(8)	6508(2)
ρ (выч.), г см ⁻³	1.869	1.697
μ , мм ⁻¹	8.979	7.006
<i>F</i> (000)	1792	3200
$2\theta_{\max}$, град	57.2	58.0
Диапазон индексов <i>hkl</i>	$-30 \leq h \leq 30,$ $-15 \leq k \leq 15,$ $-20 \leq l \leq 21$	$-14 \leq h \leq 15,$ $-34 \leq k \leq 34,$ $-29 \leq l \leq 29$
Число отражений измеренных/независимых	13572/4089	56618/16042
<i>R</i> _{int}	0.1255	0.1349
Отражений с $I > 2\sigma(I)$	1697	6474
Число уточняемых параметров	172	667
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ ($I > 2\sigma(I)$)	0.0612/0.1340	0.0718/0.1677
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (по всем отражениям)	0.1572/0.1757	0.2093/0.2125
GOOF	0.852	0.995
Остаточная электронная плотность (max/min), e/Å ³	-3.02/1.22	-2.01/2.19

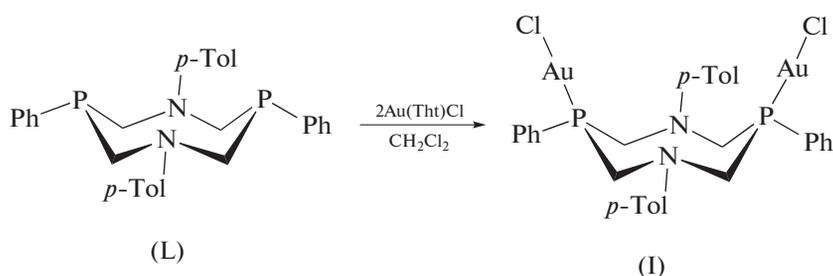


Схема 1.

Комплекс стабилен на воздухе как в твердом состоянии, так и в растворе. Полученное соединение растворимо в ДМСО, ДМФА и, ограниченно, в ацетонитриле.

В спектре ЯМР ³¹P соединения I регистрируется узкий сигнал при 1.87 м.д. Спектр ЯМР ¹H соединения содержит хорошо разрешенный набор сигналов как для ароматической, так и для ге-

тероциклической частей молекулы, аналогичный тому, который наблюдается для биядерного комплекса золота(I) с 1,5-ди(*p*-толил)-3,7-ди(пиридил-2-ил)-1,5,3,7-диазадифосфациклооктаном [13]. Ароматическая часть *p*-толильного фрагмента представлена АВ-системой при 6.98 и 7.08 м.д с константой спин-спинового взаимодействия (**КССВ**) 8.2 Гц. Протоны фенильных групп регистрируются двумя мультиплетами при 7.7 и 7.97 м.д. с соот-

ветствующими интегральными интенсивностями. Протоны гетероциклического фрагмента P—CH₂—N регистрируются при 4.68 и 4.88 м.д. в виде одного дублета дублетов с КССВ $^2J_{\text{HH}} = 15.6$ Гц и $^2J_{\text{PH}} = 4.58$ Гц и одного уширенного дублета. За-регистрированная спектральная картина позволяет утверждать, что гетероциклическая часть лиганда находится в C₂-симметричной конформации, близкой к конформации свободных лигандов. Протоны метильной группы *p*-толильного фрагмента регистрируются в виде узкого синглета при 2.26 м.д.

Структура комплекса была подтверждена методом РСА и представлена на рис. 1а. Пригодные для исследования кристаллы комплекса I были выращены медленным упариванием раствора комплекса в ацетонитриле. Молекула лиганда в комплексе I имеет конформацию “кресло-кресло” с экваториальной ориентацией заместителей при атомах фосфора и аксиальной ориентацией *p*-толильных заместителей при атомах азота, так что оба золотосодержащих фрагмента находятся с одной стороны цикла. Внутримолекулярное расстояние Au...Au составляет 5.834 Å, при таком строении молекулы в ней создается небольшая полость, образованная фрагментами P—Au—Cl и заместителями при атомах азота, находящимися с одной стороны цикла. Четыре аксиальных протона фрагмента P—CH₂—N молекулы лиганда с другой стороны гетероцикла предорганизованы для слабых электрофильных взаимодействий с моле-

кулой растворителя. К сожалению, не удалось однозначно определить сольватную молекулу, разупорядоченную осью симметрии. Локализация множества интенсивных пиков в разностных рядах электронной плотности в полости комплекса свидетельствует о нахождении в ней сольватных молекул (в качестве которых пытались задать ацетонитрил, хлористый метилен, ацетон, диметилформамид). В заключительных циклах структура уточнена по процедуре SQUEEZE [25] (учет неопределенного растворителя).

Анализ упаковки кристалла соединения I позволяет предположить, что молекулы неопределенного растворителя связывают молекулы комплекса в стопки по оси симметрии кристалла (вдоль оси *b*) по типу “голова к хвосту” слабыми взаимодействиями. Существуют также взаимодействия между атомами водорода при атомах углерода восьмичленного гетероцикла и сольватными молекулами с одной стороны, и атомами хлора, золота и *n*-толильными заместителями — с другой (рис. 2а). При этом можно предположить, что отсутствие в кристалле I сильных направленных межмолекулярных взаимодействий (типа классических водородных связей) приводит к разупорядоченности сольватных молекул в нем.

При взаимодействии лиганда L с хлоридом золота(I) в соотношении 2 : 3 с количественным выходом образуется трехядерный комплекс II катионного типа в виде белого порошка (схема 2).

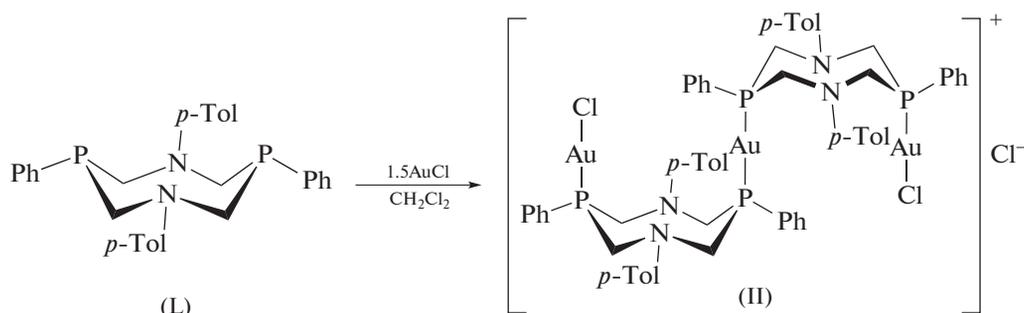


Схема 2.

В отличие от комплекса I соединение II растворимо только в ДМСО и ДМФА. Для раствора соединения II в ДМСО-d₆ в спектрах ЯМР наблюдается уширение сигналов, связанное с возможной диссоциацией и разрушением комплекса. Так, в спектре ЯМР ³¹P регистрируется слабоинтенсивный сигнал при 1.8 м.д. В спектре ЯМР ¹H соединения II протоны фенильного фрагмента регистрируются в виде двух групп неразрешенных мультиплетов при 7.07 и 7.67 м.д., протоны *p*-толильного фрагмента — в виде мультиплетов при 6.82–6.98 и 7.77–8.02 м.д., частично перекры-

вающихся с сигналами протонов фенильного фрагмента при атомах фосфора, протоны цикла регистрируются в виде двух дублетов при 4.68–5.16 м.д. и одного сильно уширенного мультиплета в области 4.38 м.д. Таким образом, в комплексе II в растворе наблюдается неэквивалентность двух частей аминотилфосфинового цикла, вызванного различным связыванием двух эндоциклических атомов фосфора с катионами золота(I). Интегральные интенсивности и расположение всех групп сигналов согласуются с предполагаемой структурой, показанной на схеме 2.

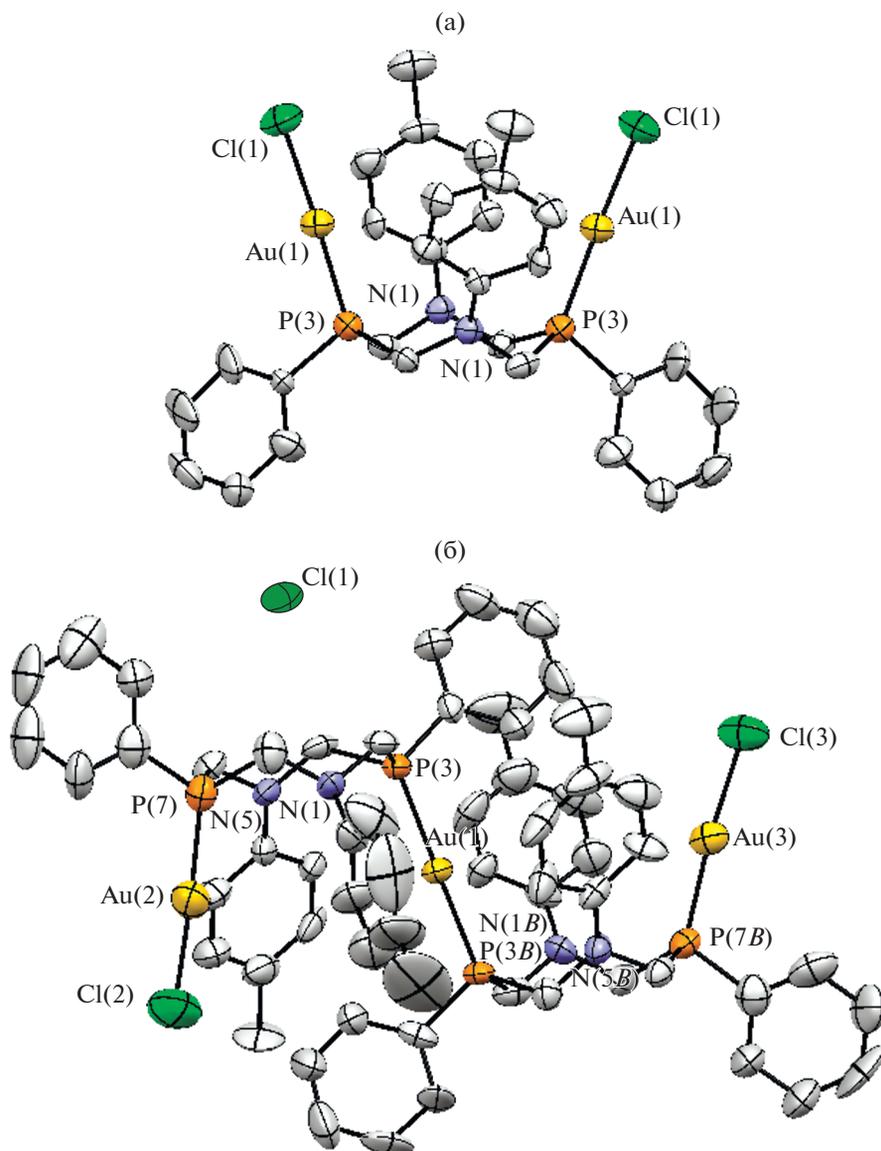


Рис. 1. Геометрия молекул I (a) и II (б) в кристалле. Атомы водорода не показаны. Эллипсоиды приведены с вероятностью 50%.

Структура комплекса II была окончательно установлена методом PCA. Пригодные для исследования кристаллы комплекса II выращены из бифазной смеси диметилформаида с ацетонитрилом. Так же, как и в структуре I, не удалось однозначно определить тип растворителя: в разностных рядах электронной плотности можно “собрать” из интенсивных пиков и молекулы ацетонитрила, и диметилформаида, и хлористого метилена, и ацетона. При уточнении даже с наложением ограничений на длины связей и параметры тепловых колебаний атомов эти молекулы с дробной заселенностью не дают разумной геометрии разупорядоченных фрагментов. Поэтому было принято решение уточнять структуру по

процедуре SQUEEZE [25] (учет неопределенного растворителя).

В кристалле II комплекс является катионом, противоионом – хлорид-анион (рис. 1б). В трехъядерном катионе один из атомов золота мостиковый между двумя гетероциклическими лигандами и имеет линейную координацию (валентный угол $P(3)Au(1)P(3B)$ $178.8(1)^\circ$). Атомы золота концевых групп также имеют практически линейную координацию (углы $Cl(2)Au(2)P(7)$ $176.95(17)^\circ$ и $Cl(3)Au(3)P(7B)$ $174.18(15)^\circ$). Длины связей $Au(1)–P(3)$ и $Au(1)–P(3B)$ $2.303(3)$ и $2.293(3)$ Å в пределах экспериментальных погрешностей одинаковы ($Au(2)–P(7)$ $2.223(4)$ и $Au(3)–P(7B)$ $2.222(3)$ Å) и немного меньше, чем длины связей

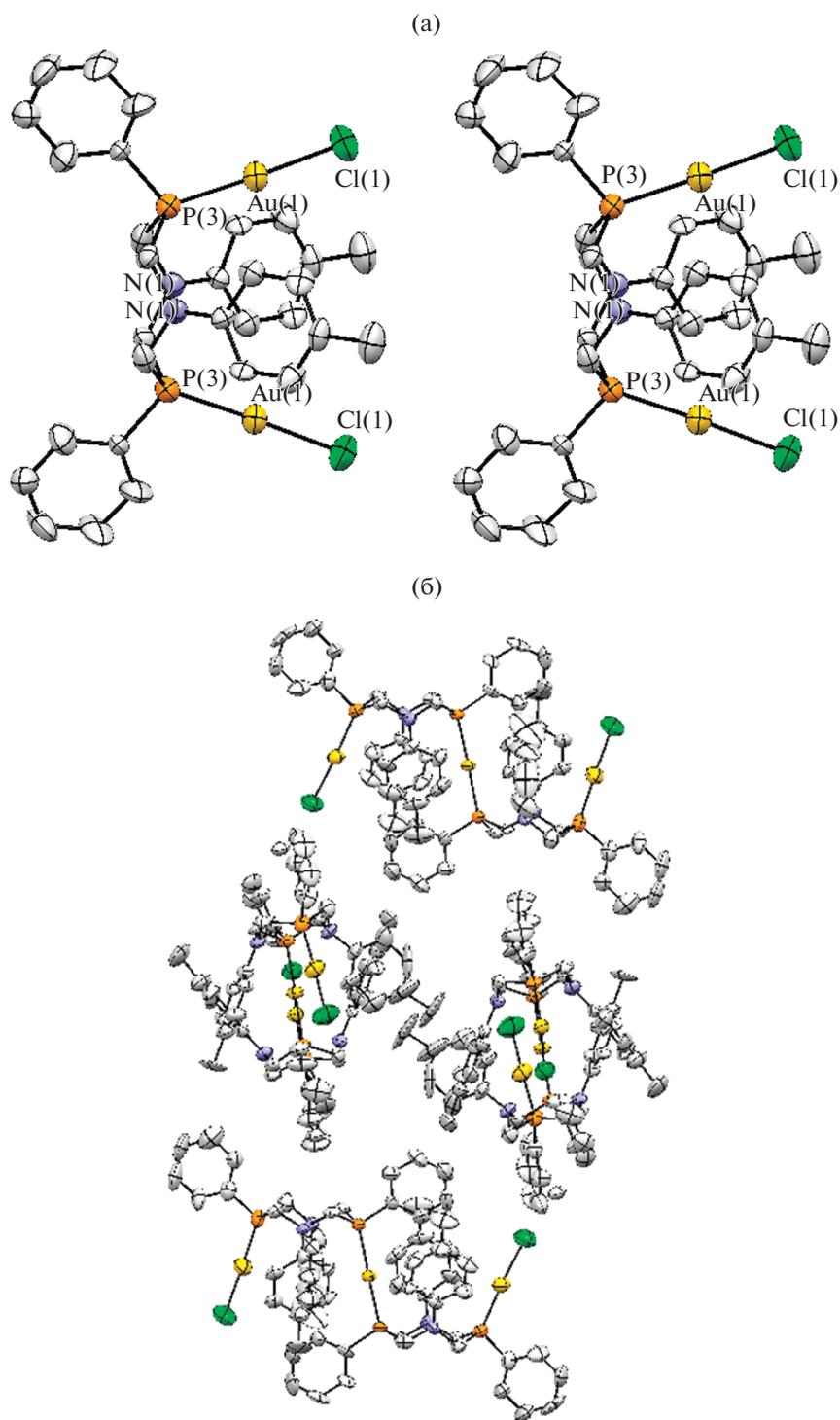


Рис. 2. Фрагмент упаковки кристалла соединений I (а) (показаны доступные для молекул растворителя полости между соседними молекулами) и II (б).

мостикового атома золота. Связи Au(2)–Cl(2) 2.284(5) и Au(3)–Cl(3) 2.282(4) Å также одинаковые. Внутримолекулярные расстояния Au(1)...Au(2) и Au(1)...Au(3) составляют 5.601 и 5.849 Å, что исключает какое-либо ауофильное взаимодей-

ствие. Казалось бы, что комплексный катион имеет симметричную конформацию и мог бы в кристалле находиться в частном положении. Но общее положение катиона в кристалле объясняется различной конформацией гетероцикличе-

ских лигандов. Несмотря на то что конформация восьмичленных гетероциклов одинаковая, “кресло-кресло”, как и в свободной молекуле лиганда, и фенильные заместители при атомах фосфора имеют экваториальную ориентацию, а *p*-толильные заместители при атомах азота — аксиальную ориентацию, лиганды различаются разворотом *p*-толильных заместителей. В лиганде *B* оба атома азота имеют практически плоскую координацию связей (сумма валентных углов при атомах N(1*B*) и N(5*B*) 356.8(9)° и 357.1(9)° соответственно) и плоскости ароматических колец при них компланарны плоскостям связей атомов азота (торсионные углы вокруг связей N(1*B*)—C(9*B*)—N(5*B*)—C(22*B*) 14(2)° и 3(2)°). В первом лиганде атом N(5) имеет практически плоскую координацию (сумма валентных углов при нем 357.7(9)°), а атом N(1) имеет тригонально-пирамидальную координацию (сумма валентных углов при нем 348.6(9)°). *p*-Толильный заместитель при атоме N(5) находится в плоскости его связей (торсионный угол вокруг связи N(5)—C(22) 2(2)°, но заместитель при атоме N(1) находится в бисекторной плоскости эндоциклических связей атома азота (торсионный угол вокруг связи N(1)—C(9) 75(2)°), что исключает сопряжение неподеленной электронной пары (НЭП) атома азота с ароматическим кольцом. Отсутствие сопряжения в первом лиганде проявляется в некотором удлинении связи N(1)—C(9) 1.420(16) Å по сравнению со связью N(1*B*)—C(9*B*) 1.394(15) Å.

Анализ упаковки кристалла соединения II показывает, что хлорид-анион имеет короткие контакты с атомами водорода при атомах углерода восьмичленных гетероциклов соседних молекул, а неопределенные сольватные молекулы располагаются в полостях между атомами Au(2) и Cl(2) соседних молекул (рис. 2б), связанных центром симметрии.

Важно отметить, что в аналогичной реакции хлорида золота(I) с *P*-пиридилзамещенным аминотетрафосфином происходит перегруппировка, сопровождающаяся расширением диазидофосфациклооктанового цикла до 16-членного макроцикла [16], и образуется изомерный комплекс. Вероятно, наличие пиридилной группы обуславливает большую лабильность фрагмента P—CH₂—N лиганда по сравнению с *P*-фенилзамещенными аналогами.

Таким образом, получены новые комплексы хлорида золота(I) на основе 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктанов и установлена их структура в растворах и твердой фазе. Показано, что в кристаллической структуре биядерного комплекса золота(I) реализуется так называемая “открытая” конформация комплекса, связанная с образованием комплекса по типу “гость-хозяин”, реализующегося за счет формирования слабых взаимодействий

с фрагментами P—Au—Cl с одной стороны и с фрагментами P—CH₂—N — с другой. Образование комплекса по типу “гость-хозяин” подтверждает тенденцию к реализации такого рода взаимодействий во всех аналогичных комплексах независимо от заместителей при атомах фосфора. Показано, что в отличие от пиридилсодержащих 1,5-диаза-3,7-дифосфациклооктанов *P*-фенилзамещенные лиганды не претерпевают перегруппировки с расширением цикла в ходе формирования трехядерных комплексов золота(I). Обнаружено необычное бисекторное расположение *p*-толильного заместителя в комплексе, вызывающее выход из сопряжения НЭП атома азота аминотетрафосфинового цикла. Полученные комплексы не проявляют существенной эмиссии в твердой фазе и в растворах, что подтверждает необходимость введения к атомам фосфора хромофорных групп, формирующих граничные молекулярные орбитали, участвующие в переносе заряда и вызывающие эмиссионные свойства, для конструирования люминесцентных комплексов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят ЦКП-САЦ ФИЦ КазНЦ РАН за проведенные исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-43-04119).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pyrkoe P. // Chem. Soc. Rev. 2008. V. 37. № 9. P. 1967.
2. Pyrkoe P. // Chem. Rev. 1997. V. 97. № 3. P. 597.
3. He X., Yam V.W.W. // Coord. Chem. Rev. 2011. V. 255. № 17–18. P. 2111.
4. Wong V.C.H., Po C., Leung S.Y.-L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2018. V. 140. № 2. P. 657.
5. Schmidbaur H., Schier A. // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. P. 370.
6. Lima J.C., Rodriguez L. // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40. P. 5442.
7. Yam V.W.W., Chan C.L., Li C.K., Wong K.M.C. // Coord. Chem. Rev. 2001. V. 216–217. P. 173.
8. Moreno-Alcantar G., Romo-Islas G., Flores-Alamo M. et al. // New J. Chem. 2018. V. 42. P. 7845.
9. Musina E.I., Wittmann T.I., Lonnecke P. et al. // Russ. Chem. Bull. 2018. V. 67. № 2. P. 328.
10. Shakirova J.R., Grachova E.V., Melnikov A.S. et al. // Organometallics. 2013. V. 32. № 15. P. 4061.
11. Koshevoy I.O., Karttunen A.J., Kritchenkou I.S. et al. // Inorg. Chem. 2013. V. 52. № 7. P. 3663.
12. Wenger O.S. // Chem. Rev. 2013. V. 113. P. 3686.

13. *Strelnik I., Gurzhiy V.V., Sizov V.V. et al.* // CrystEngComm. 2016. V. 18. P. 7629.
14. *Shamsutdinova N.A., Strelnik I.D., Musina E.I. et al.* // New J. Chem. 2016. V. 40. № 11. P. 9853.
15. *Arif T., Cazorla C., Bogliotti N. et al.* // Catal. Sci. Technol. 2018. V. 8. № 3. P. 710.
16. *Strelnik I.D., Dayanova I.R., Poryvaev T.M. et al.* // Mendeleev Commun. 2020. V. 30. № 1. P. 40.
17. *Karasik A.A., Musina E.I., Strelnik I.D. et al.* // Pure Appl. Chem. 2019. V. 91. № 5. P. 839.
18. *Nikolaeva Y.A., Balueva A.S., Khafizov A.A. et al.* // Dalton Trans. 2018. V. 47. № 23. P. 7715.
19. *Maerkl G., Jin G.Y., Schoerner Ch.* // Tetrahedron Lett. 1980. V. 21. № 15. P. 1409.
20. *Sheldrick G.M.* SADABS. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1997.
21. *Sheldrick G.M.* SHELXT (version 4). 2014.
22. *Sheldrick G.M.* SHELXL (version 3). 2018.
23. *Farrugia L.J.* // J. Appl. Cryst. 2012. V. 45. P. 849.
24. APEX2 (version 2.1). SAINTPlus. Data Reduction and Correction Program (version 7.31A). Bruker Advanced X-ray Solution. Bruker AXS Inc., 2006.
25. *Spek A.L.* // Acta Crystalligr. D. 2009. V. 65. P. 148.