

УДК 54-386/548-735]

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА 1,2,4,1',2',4'-ГЕКСАМЕТИЛФЕРРОЦЕНА

© 2020 г. Н. З. Ибрагимова¹, *, **, Г. М. Джафаров¹, Д. Б. Тагиев¹, И. У. Лягифов¹

¹Институт катализа и неорганической химии НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

*e-mail: iltifat@mail.ru

**e-mail: nigar-ibrahimova93@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.

После доработки 15.03.2019 г.

Принята к публикации 10.04.2019 г.

Методом РСА определена кристаллическая структура 1,2,4,1',2',4'-гексаметилферроцена ($\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$). В молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ C_5 -кольца находятся в заторможенной конформации. Длина связи Fe–Ц(центр C_5 -кольца) в ряду $\text{Me}_2\text{Fc}_{\text{сим}}$, $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$, $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ имеет тенденцию к удлинению. Взаимная конформация вицинальных Me-групп в молекулах $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$, $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$, а также особенность изменения ЯМР ^1H и ^{13}C сигналов Me-групп в ряду полиметилферроценов $\text{Me}_n\text{Fc}_{\text{сим}}$ ($n = 2, 4, 6, 8, 10$) по сравнению с аналогами в ряду метилбензолов указывают на то, что Me-группы в симметричных полиметилферроценах не находятся в зацепленном состоянии, а относительно свободно вращаются вокруг связи $\text{C}(\text{C}_5\text{-кольцо})\text{—C}(\text{Me})$ (CIF file CCDC № 1436882).

Ключевые слова: 1,2,4,1',2',4'-гексаметилферроцен, стерическое взаимодействие, конформация, РСА

DOI: 10.31857/S0132344X20010028

Химическая устойчивость и разнообразие производных ферроцена, наряду с их различными возможными прикладными аспектами [1], делает эти соединения одними из наиболее интенсивно изучаемых химических систем за последние 60 лет. Наш интерес к производным ферроцена связан с возможностью разработки на основе полиметилферроценов и соответствующих катионов полиметилферриция обратимых электрохимических электродов сравнения в неводных средах [2].

Из-за неустойчивости катиона ферриция в ряде растворителей и зависимости редокс потенциала системы ферроцен–ферриций от природы органического растворителя [3], в настоящее время полиметилферроцены и соответствующие им катионы полиметилферриция рассматриваются как более перспективные системы для создания электродов сравнения [2]. Учитывая это, в качестве объектов исследования мы выбрали 1,2,4,1',2',4'-гексаметилферроцен ($\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$) и гексафторфосфат-1,2,4,1',2',4'-гексаметилферриция ($\text{Me}_6\text{Fc}^+\text{PF}_6^-$). ЯМР ^1H исследование гомогенной системы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}\text{—Me}_6\text{Fc}^+\text{PF}_6^-$ в дегидроацетоне показало [4, 5], что электронный обмен в ней протекает в $\sim 3\text{—}4$ раза быстрее, чем в системе ферроцен–ферриций. Поэтому данная система удовлетворяет условию обратимости

одному из требований, предъявляемых к электродам сравнения [6] со стороны ИЮПАК.

Для выяснения соответствия редокс системы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}\text{—Me}_6\text{Fc}^+\text{PF}_6^-$ другим требованиям ИЮПАК к электродам сравнения, а также применения недавно усовершенствованного уравнения Маркуса [7] к электронному обмену в этой системе мы изучили кристаллические структуры этих двух комплексов.

В настоящей работе рассмотрены особенности кристаллической структуры молекулы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединение $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ синтезировали в соответствии с методикой [8]. Монокристаллы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ размером $0.16 \times 0.13 \times 0.11$ мм выращивали в гексане при -10°C .

РСА $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ проведен на автоматическом трехкружном дифрактометре с двухкоординатным детектором Bruker SMART APEX-II CCD ($T = 150$ К, MoK_α -излучение, $\lambda = 0.71073$ Å, графитовый монохроматор, φ - и ω -сканирование). Учет поглощения рентгеновского излучения проведен по программе SADABS [9]. Структура расшифрована прямыми методами и уточнена полноматричным МНК по F^2 в анизотропном приближении для неводородных атомов. Положения

Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$

Параметр	Значение
M	270.18
Сингония	Моноклинная
Пр. гр.	$P2_1/c$
Параметры ячейки:	
$a, \text{Å}$	8.685(6)
$b, \text{Å}$	10.871(7)
$c, \text{Å}$	7.513(5)
β , град	109.894(14)
$V, \text{Å}^3$	667.1(7)
Z	2
ρ (выч.), г/см^3	1.345
μ , мм^{-1}	1.106
$F(000)$	288
Размер кристалла, мм	$0.16 \times 0.13 \times 0.11$
Диапазон θ , град	3.120–24.964
Пределы индексов h, k, l	$-10 \leq h \leq 8,$ $-12 \leq k \leq 12,$ $-8 \leq l \leq 8$
Общее число отражений	4197
Число независимых отражений (R_{int})	1166 (0.1150)
GOOF для F^2	1.022
R -фактор ($I > 2\sigma(I)$)	$R_1 = 0.0579, wR_2 = 0.0893$
R -фактор (все отражения)	$R_1 = 0.1374, wR_2 = 0.1155$
$\Delta\rho_{\text{max}}/\Delta\rho_{\text{min}}, e \text{ Å}^{-3}$	0.370/–0.487

атомов водорода рассчитаны геометрически и включены в уточнение по модели “наездника” с фиксированными изотропными параметрами ($U_{\text{изо}}(\text{H}) = 1.5U_{\text{экв}}(\text{C})$ для CH_3 -групп и $U_{\text{изо}}(\text{H}) =$

$= 1.2U_{\text{экв}}(\text{C})$ для всех остальных групп). Все расчеты проведены по комплексу программ SHELXTL [10]. Основные характеристики эксперимента и параметры элементарной ячейки приведены в

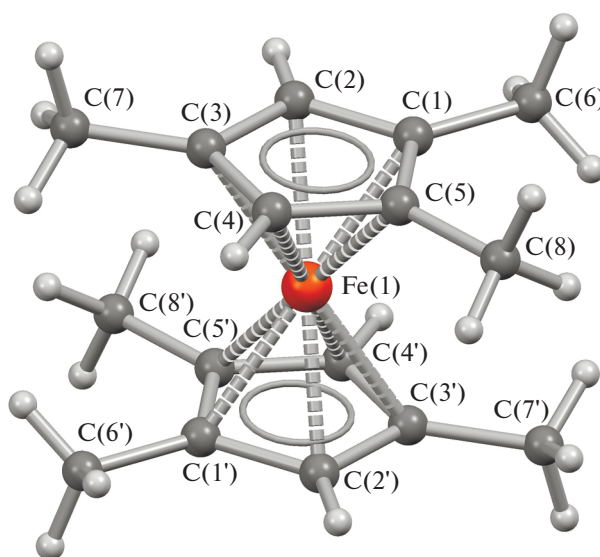
**Рис. 1.** Общий вид молекулы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ и схема нумераций атомов углерода.

Таблица 2. Некоторые длины связей и валентные углы в молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$

Связь	$d, \text{Å}$	Связь	$d, \text{Å}$	Угол	$\omega, \text{град}$
Fe(1)–C(4)	2.037(5)	C(1)–C(5)	1.420(7)	C(5)C(1)C(2)	107.8(4)
Fe(1)–C(2)	2.043(5)	C(1)–C(2)	1.425(7)	C(1)C(2)C(3)	108.7(5)
Fe(1)–C(1)	2.045(5)	C(2)–C(3)	1.430(7)	C(4)C(3)C(2)	106.5(5)
Fe(1)–C(5)	2.049(5)	C(3)–C(4)	1.416(7)	C(3)C(4)C(5)	109.6(5)
Fe(1)–C(3)	2.051(5)	C(4)–C(5)	1.420(6)	C(1)C(5)C(4)	107.5(5)
среднее	2.045(5)	среднее	1.422(7)		
C(1)–C(6)	1.504(7)			C(5)C(1)C(6)	126.8(5)
C(3)–C(7)	1.499(7)			C(2)C(1)C(6)	125.4(5)
C(5)–C(8)	1.503(6)			C(1)C(5)C(8)	126.2(5)
среднее	1.502(7)			C(4)C(5)C(8)	126.3(5)

табл. 1, некоторые длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблицы координат атомов, длин связей, валентных и торсионных углов и анизотропных параметров смещения для $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1861054; deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрия молекулы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ показана на рис. 1, 2. Как видно из рис. 2, в молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ C_5 -кольца расположены в заторможенной конформации ($\varphi = 35.67^\circ$), как и в молекулах $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ [11] и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ [12]. Поскольку в твердом состоянии в молекуле $\text{Me}_2\text{Fc}_{\text{сим}}$ [13, 14] C_5 -кольца имеют заслоненную конформацию, изменение конформации в молекулах перечисленных трех полиметилферроценов логичнее приписать к стерическим взаимодействиям Me-групп разных колец или же силам кристаллической упаковки.

C_5 -кольцо в молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ плоское, наибольшее отклонение от плоскости составляет 0.003(5) Å. C_5 -кольца параллельны. Величина угла, проходящего через центры C_5 -колец и атом железа, равна $180(16)^\circ$. Расстояние между центрами колец 3.298 Å.

В молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ все расстояния $\text{C}(\text{C}_5\text{-кольцо})\text{--C}(\text{C}_5\text{-кольцо})$ в пределах ошибки эксперимента одинаковы. Их среднее значение 1.422(7) Å

близко к соответствующим расстояниям в молекулах $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.428(4) Å) [11] и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.419(2) Å) [12]. Среднее расстояние $\text{C}(\text{C}_5\text{-кольцо})\text{--C}(\text{Me})$, равное 1.502(7) Å, соответствует длине обычной связи $\text{C}(sp^2)\text{--C}(sp^3)$ [15]. Средняя длина связи $\text{Fe}\text{--C}(\text{C}_5\text{-кольцо})$ 2.045(5) Å также соответствует длинам связи $\text{Fe}\text{--C}(\text{C}_5\text{-кольцо})$ в молекулах $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ (2.054(3) [11], 2.048(6) [16]) и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ (2.053(2) [17], 2.050(2) Å [12]).

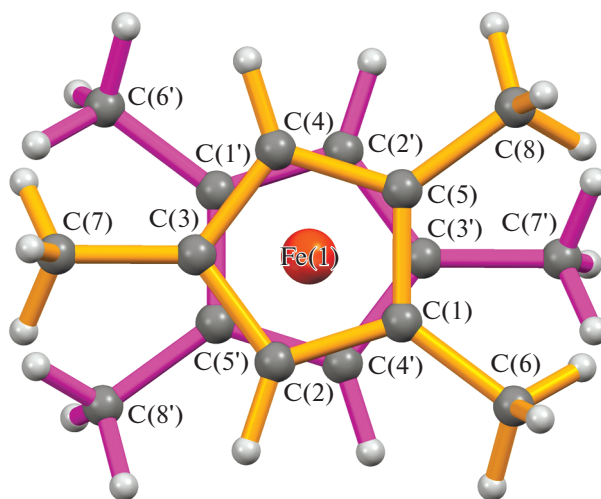


Рис. 2. Заторможенная конформация C_5 -колец молекулы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$.

Таблица 3. Химические сдвиги ЯМР $^1\text{H}(\text{CH}_3)$ и $^{13}\text{C}(\text{CH}_3)$ метильных групп (в CS_2 и CH_2Cl_2 соответственно) в ряду симметричных полиметилферроценов $\text{Me}_n\text{Fc}_{\text{сим}}$ ($n = 2, 4, 6, 8, 10$)* относительно соответствующего сигнала ТМС

$\text{Me}_n\text{Fc}_{\text{сим}}$	n				
	2	4	6	8	10
$^1\text{H}(\text{CH}_3)$	1.92	1.88	1.79(1) 1.76(2)	1.72 1.66	1.61
$^{13}\text{C}(\text{CH}_3)$	14.32	14.19	13.67(1) 11.85	11.59 9.64	9.48

* В скобке указано число метильных групп.

В структуре $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ наблюдается ряд слабых межмолекулярных нековалентных связей. Многие из них образуются между C_5 -кольцом (донором электронов) одной молекулы и атомом водорода (акцептором электронов) C_5 -кольца другой молекулы. Эти контакты фактически связывают металлоорганические цепочки в 3D-супрамолекулярный каркас, расширяя структуру в направлении x , y и z [18–20].

В табл. 2 приведены некоторые длины связей и валентные углы в молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$, в которой Me -группы отклоняются от плоскости C_5 -кольца (от атома Fe). Одиочная Me -группа отклоняется на 2.49° (C(7)), вицинальные Me -группы – на 0.87° (C(8)) и 1.64° (C(6)). Впервые об отклонении Me -групп от плоскости C_5 -кольца (от атома Fe) в молекулах метилзамещенных ферроценов было указано в [11] на примере кристаллических структур $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$, изучение которых было предпринято с целью установить причины аддитивного сильнополюсного смещения резонансных сигналов атомов углерода Me -групп, наблюдаемого в спектрах ЯМР ^{13}C $\text{Me}_n\text{Fc}_{\text{сим}}$ ($n = 2, 4, 6, 8, 10$) [21]. Несмотря на то что ближайшие невалентные контакты $\text{C}\cdots\text{C}$ Me -групп разных колец ($3.79\text{--}3.85 \text{ \AA}$) были меньше удвоенного ванн-дер-ваальсового радиуса Me -группы (4 \AA), отклонение Me -групп от плоскости C_5 -кольца авторы [11] не стали связывать со стерическими взаимодействиями Me -групп разных C_5 -колец, поскольку аналогичное отклонение Me -групп наблюдается и в молекуле $\text{Me}_5\text{C}_5\text{Fe}(\text{CO})_2\text{SO}_2\text{CH}_2\text{--CH=CH--C}_6\text{H}_5$ [22], где отсутствует второе метилзамещенное кольцо [11].

Впоследствии исследование спектров ЯМР ^{13}C несимметричных полиметилферроценов позволило выявить и оценить вышеуказанное стерическое взаимодействие между Me -группами, располо-

женными в разных кольцах симметричных полиметилферроценов ($\sim 0.4\text{--}0.5$ м.д.), что примерно в 3 раза меньше стерического взаимодействия между вицинальными Me -группами (~ 1.5 м.д.) [8, 23].

Причины отклонения Me -групп от атома Fe в молекуле $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ авторы [11, 12] связали только со стерическим взаимодействием вицинальных Me -групп, расположенных в одном C_5 -кольце.

Действительно, в молекулах полиметилферроценов невалентные контакты $\text{H}\cdots\text{H}$ вицинальных Me -групп наиболее короткие среди всех контактов $\text{H}\cdots\text{H}$. Например, в $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ указанные контакты $\text{H}\cdots\text{H}$ составляют 2.38 , в $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ – 2.23 и 2.26 \AA [11], а в $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ – средн. 2.4 \AA [11, 12]. Если причиной отклонения Me -групп от атома Fe является только взаимодействие вицинальных Me -групп в пределах одного кольца, следовало бы ожидать, что некоторые из метильных групп в полиметилферроценах должны были бы отклониться от плоскости кольца и к атому железа. Так, в молекуле полностью замещенного производного бензола Me_6C_6 стерическая перегруженность вицинальных метильных групп разрешается путем поочередного отклонения последних вверх и вниз от плоскости бензольного кольца [24, 25] и согласованным (зацепленным) вращением метильных групп вокруг связи $\text{C}(\text{C}_6)\text{--C}(\text{Me})$ [26, 27].

В отличие от метилбензолов, в гомологическом ряду полиметилферроценов из-за присутствия фрагмента $\text{Me}_m\text{C}_5\text{H}_{5-m}\text{M}$, связанного с рассматриваемым метилзамещенным C_5 -кольцом, метильные группы последнего не в состоянии отклониться в обе стороны от плоскости C_5 -кольца, т.е. и к атому Fe. Во вторых, из-за большего угла (72°) между вицинальными Me -группами Me_5C_5 -кольца (относительно аналогичного угла в 60° в Me_6C_6) стерическое взаимодействие между ними слабее, чем в Me_6C_6 . Под влиянием перечислен-

ных двух факторов, последовательно возрастающее стерическое напряжение в гомологическом ряду метилферроценов в комплексе $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ не разрешается, как в молекуле Me_6C_6 , и напряжение сохраняется. Все Me -группы отклонены в одну сторону от плоскости C_5 -кольца (от атома железа), авицинальные Me -группы находятся не в зацепленном состоянии (в конформации 2 : 1 или 1 : 2), а в конформации 2 : 2. Так, в конформации 2 : 2 (или близком к 2 : 2) находятся вицинальные Me -группы в молекуле Me_6Fc , все Me -группы в $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ [11] и шесть из десяти Me -групп в $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ [12].

Разные структурные следствия стерической перегруженности в метильных гомологах ферроцена и бензола позволяют объяснить и отличительную особенность их спектров ЯМР ^1H и ^{13}C [21, 27]. Так, в ряду $\text{Me}_2\text{Fc}_{\text{сим}}$, 1,3,1',3'- $\text{Me}_4\text{Fc}_{\text{сим}}$, $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$, $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ монотонно возрастающее стерическое взаимодействие вицинальных Me -групп проявляется в последовательном и аддитивном сильнополольном смещении резонансных сигналов ЯМР ^1H и ^{13}C Me -групп (табл. 3).

В ряду метил-, 1,2-диметил-, 1,3,5-триметил-, 1,2,4,5-тетраметил-, пентаметил-, гексаметилбензолов (и др.) резонансные сигналы ЯМР ^1H и ^{13}C Me -групп последовательно и также аддитивно смещаются в сильное магнитное поле включительно до $\text{Me}_5\text{C}_6\text{H}$ [27]. При переходе от пентаметилбензола к гексаметилбензолу эта тенденция в изменении химических сдвигов ЯМР ^1H и ^{13}C нарушается, наблюдается слабополольное смещение резонансных сигналов ЯМР ^1H и ^{13}C Me -групп, что указывает на ослабление стерического взаимодействия между вицинальными Me -группами в молекуле Me_6C_6 . По данным [24, 25], ослабление стерического взаимодействия в молекуле Me_6C_6 можно объяснить альтернирующим отклонением вниз и вверх от плоскости бензольного кольца и согласованным вращением последних [26, 27]. В симметричных полиметилферроценах не имеет место ни одно из перечисленных двух структурных изменений. Поэтому вопрос о причинах отклонения Me -групп от плоскости C_5 -кольца от атома Fe в полиметилферроценах пока остается открытым.

Сравнение длины связи $\text{Fe}-\text{C}(\text{C}_5\text{-кольца})$ в молекуле $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.649(5) Å) с таковой в комплексах $\text{Me}_2\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.647 [28], 1.6447(10) и 1.6487(10) [13], 1.649(6) [14]), $\text{Me}_8\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.653 [16], 1.655(8) [11]) и $\text{Me}_{10}\text{Fc}_{\text{сим}}$ (1.6568(8) [11], 1.651 Å [28]) позволяет предположить, что в гомологическом ряду связь $\text{Fe}-\text{C}(\text{C}_5\text{-кольца})$ имеет общую тенденцию к удлинению. Хотя это увеличение в ряду метилзамещенных гомологов ферроцена находится в пределах 2–3σ, однако оно соответству-

ет наблюдаемому в спектрах ЯМР ^{13}C комплексов $\text{Me}_n\text{Fc}_{\text{сим}}$ стерическому взаимодействию Me -групп, расположенных в разных кольцах, и оцениваемому в ~0.4–0.5 м.д. в сильное магнитное поле [8, 23].

Таким образом, рассмотренные особенности кристаллической структуры молекулы $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ в основном могут быть интерпретированы стерическими взаимодействиями вицинальных метильных групп, как между собой (в пределах рассматриваемого лиганда $\text{Me}_m\text{C}_5\text{H}_{5-m}$), так и с Me -группами, расположенными в другом лиганде $\text{Me}_m\text{C}_5\text{H}_{5-m}$ молекулы.

Сравнительный анализ результатов рентгеноструктурного исследования кристаллических структур $\text{Me}_6\text{Fc}_{\text{сим}}$ и его катиона 1,2,4,1',2',4'-гексаметилферрициния (в виде симметричного гексафторфосфата гексаметилферрициния) будет рассмотрен в следующей публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Astruc D.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. V. 1. P. 6.
2. *Bartlett P.N., Branch J.* // J. Electroanal. Chem. 2016. V. 780. P. 282.
3. *Nielson R.M., McManis G.E., Safford L.K., Weaver M.J.* // J. Phys. Chem. 1989. V. 93. P. 2152.
4. *Ибрагимова Н.З., Мамедов И.Г., Джафаров Г.М. и др.* // Chem. Problems. 2017. № 1. P. 51.
5. *Ibrahimova N.Z., Jafarov G.M., Tagiyev D.B., Lyatjov I.U.* // Chem. Problems. 2019. № 2. P. 310.
6. *Gritzner G., Kuta J.* // Pure Appl. Chem. 1984. V. 56. № 4. P. 461.
7. *Li Xiang-Yuan* // Intern. J. Quantum Chem. 2015. V. 115. P. 700.
8. *Лямуфов И.П.* Дис. ... докт. хим. наук. Ленинград: ЛТИ, 1990. 395 с.
9. *Sheldrick G.M.* SADABS. Version 2.03. Bruker/Siemens Area Detector Absorption Correction Program. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2003.
10. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
11. *Struchkov Yu.T., Andrianov V.G., Sal'nikova T.N. et al.* // J. Organomet. Chem. 1978. V. 145. P. 213.
12. *Freyberg D.P., Robbins J.L., Raymond K.N., Smart J.C.* // J. Am. Chem. Soc. 1979. V. 101. P. 892.
13. *Lousada C.M., Pinto S.S., Canongia Lopes J.N. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2008. V. 112. P. 2977.
14. *Foucher D.A., Honeyman Ch.H., Lough A.J. et al.* // Acta Crystallogr. C. 1995. V. 51. P. 1795.
15. Tables of Interatomic Distances and Configuration in Molecules and Ions. Supplement 1956–1959 / Ed. Sutton L.E., London: Chemical Society, 1965.
16. *Schmitz D., Fleischhauer J., Meier U. et al.* // J. Organomet. Chem. 1981. V. 205. P. 381.
17. *Arrais A., Diana E., Gobetto R. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2003. P. 1186.
18. *Gurbanov A.V., Mahmoudi G., Guedes da Silva M.F.C. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 471. P. 130.

19. *Hazra S., Martins N.M.R., Mahmudov K.T. et al.* // *J. Organomet. Chem.* 2018. V. 867. P. 193.
20. *Квватковская Е.А., Зайтсев В.П., Zubkov F.I. et al.* // *Acta Crystallogr. E.* 2017. V. 73. № 4. P. 515.
21. *Материкова Р.В., Babin V.N., Lyatifov I.R. et al.* // *J. Organomet. Chem.* 1977. V. 142. P. 81.
22. *Churchill M.R., Wormald J.* // *Inorg. Chem.* 1971. V. 10. № 3. P. 572.
23. *Мамедов И.Г., Оруджева А.Б., Салимов Р.М. и др.* // *Вестник БГУ.* 2013. № 3. С. 5.
24. *Stride J.* // *Acta Crystallogr. B.* 2005. V. 61. P. 200.
25. *Le Maguères P., Lindeman S.V., Kochi J.K.* // *Organometallics.* 2001. V. 20. P. 115.
26. *Wolfoenden W.R., Grant D.M.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1966. V. 88. P. 1496.
27. *Cheney B.V., Grant D.M.* // *J. Am. Chem. Soc.* 1967. V. 89. P. 5319.
28. *Makal A.M., Plazuk D., Zakrzewski J. et al.* // *Inorg. Chem.* 2010. V. 49. P. 4046.