

## СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ БИЯДЕРНЫХ АРИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУРЬМЫ [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)(CF<sub>2</sub>)<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O и [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O

**В.В. Шарутин<sup>1</sup>✉, П.А. Слепухин<sup>2,3</sup>, О.К. Шарутина<sup>1</sup>,  
Е.В. Артемьев<sup>1</sup>, С.А. Гремицких<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

✉sharutin50@mail.ru

**Аннотация.** Взаимодействием *tris*(3-фторфенил)сурьмы (3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Sb с фторированными карбоновыми кислотами [CHF<sub>2</sub>(CF<sub>2</sub>)<sub>3</sub>C(O)OH и CHF<sub>2</sub>C(O)OH] в присутствии *трет*-бутилгидропероксида или пероксида водорода в эфире получены биядерные соединения с мостижным атомом кислорода [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)(CF<sub>2</sub>)<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O (1) и [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O (2) соответственно, строение которых доказано методом рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурные исследования проводили на автоматическом дифрактометре с CCD-детектором «Xcalibur 3» по стандартной процедуре (MoK<sub>α</sub>-излучение, графитовый монохроматор, сканирование с шагом 1° при T = 295(2) K). Кристаллы (1) C<sub>40</sub>H<sub>26</sub>F<sub>22</sub>O<sub>5</sub>Sb<sub>2</sub>, M 1320,17; сингония триклиническая, группа симметрии P-1; параметры ячейки: a = 11,6986(3), b = 14,2914(6), c = 16,1573(7) Å; α = 68,626(4)°, β = 75,574(3)°, γ = 83,762(3)°, V = 2435,74(16) Å<sup>3</sup>; Z = 11; ρ<sub>выч</sub> = 9,900 г/см<sup>3</sup>; 20 4,38–61,66 град.; всего отражений 19943; независимых отражений 13056; число уточняемых параметров 676; R<sub>int</sub> = 0,0318; GOOF 1,021; R<sub>1</sub> = 0,0532, wR<sub>2</sub> = 0,1292; остаточная электронная плотность (max/min): 1,25/–0,59 e/Å<sup>3</sup>], (2) C<sub>40</sub>H<sub>26</sub>F<sub>10</sub>O<sub>5</sub>Sb<sub>2</sub>, M 1020,13; сингония триклиническая, группа симметрии P-1; параметры ячейки: a = 10,0751(3), b = 37,9195(14), c = 10,2486(3) Å; α = 90,00°, β = 96,543(3)°, γ = 90,00°, V = 3889,9(2) Å<sup>3</sup>, Z = 17; ρ<sub>выч</sub> = 14,806 г/см<sup>3</sup>; 20 3,22–61,42 град.; всего отражений 17909; независимых отражений 14293; число уточняемых параметров 1035; R<sub>int</sub> = 0,0200; GOOF 1,044; R<sub>1</sub> = 0,0480, wR<sub>2</sub> = 0,1299; остаточная электронная плотность (max/min): 1,72/–0,64 e/Å<sup>3</sup>]. В кристаллах 1 и 2 молекулы имеют изогнутое строение центрального фрагмента с углами Sb–O–Sb 143,38(18)° и 141,17(13)° соответственно.

**Ключевые слова:** *tris*(3-фторфенил)сурьма, окислительное присоединение,  $\mu$ -оксо-*bis*(карбоксилатотриарилсурьма), строение, рентгеноструктурный анализ

**Для цитирования:** Синтез и строение фторсодержащих биядерных арильных соединений сурьмы [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)(CF<sub>2</sub>)<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O и [(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O / В.В. Шарутин, П.А. Слепухин, О.К. Шарутина и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 4. С. 35–43. DOI: 10.14529/chem250404

## SYNTHESIS AND STRUCTURE OF FLUORINE-CONTAINING BINUCLEAR ARYL COMPOUNDS OF ANTIMONY $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)(CF}_2)_3\text{CHF}_2]_2\text{O}$ AND $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)CHF}_2]_2\text{O}$

V.V. Sharutin<sup>1</sup>✉, P.A. Slepukhin<sup>2,3</sup>, O.K. Sharutina<sup>1</sup>,  
E.V. Artemyeva<sup>1</sup>, S.A. Gremitskikh<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> I.Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis of UB of the RAS, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

✉ sharutin50@mail.ru

**Abstract.** The interaction of *tris*(3-fluorophenyl)antimony ( $3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{Sb}$  with fluorinated carboxylic acids [ $\text{CHF}_2(\text{CF}_2)_3\text{C(O)OH}$  and  $\text{CHF}_2\text{C(O)OH}$ ] in the presence of *tert*-butylhydroperoxide or hydrogen peroxide in ether produced triarylantimony oxo-compounds  $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)(CF}_2)_3\text{CHF}_2]_2\text{O}$  (**1**) and  $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)CHF}_2]_2\text{O}$  (**2**), respectively. The X-ray structural studies were carried out on an Xcalibur 3automatic diffractometer with a CCD detector according to the standard procedure [ $\text{MoK}_\alpha$  radiation, graphite monochromator,  $\omega$ -scanning with a step of  $1^\circ$  at  $T=295(2)$  K]. Crystals **1** [ $\text{C}_{46}\text{H}_{26}\text{F}_{22}\text{O}_5\text{Sb}_2$ ,  $M$  1320.17; triclinic syngony, symmetry group  $P\bar{1}$ ; cell parameters:  $a = 11.6986(3)$ ,  $b = 14.2914(6)$ ,  $c = 16.1573(7)$  Å;  $\alpha = 68.626(4)^\circ$ ,  $\beta = 75.574(3)^\circ$ ,  $\gamma = 83.762(3)^\circ$ ,  $V = 2435.74(16)$  Å $^3$ ;  $Z = 2$ ;  $\sigma_{\text{calc}} = 1.800$  g/cm $^3$ ;  $2\theta$  4.38–61.66 deg.; total reflections 19943; independent reflections 13056; number of refined parameters 676;  $R_{\text{int}} = 0.0318$ ,  $GOOF = 1.021$ ;  $R_1 = 0.0532$ ,  $wR_2 = 0.1292$ ; residual electron density (max/min): 1.25/–0.59 e/Å $^3$ ] and **2** [ $\text{C}_{40}\text{H}_{26}\text{F}_{10}\text{O}_5\text{Sb}_2$   $M$  1020.13; monoclinic syngony, symmetry group  $P2_1/n$ ; cell parameters:  $a = 10.0751(3)$ ,  $b = 37.9195(14)$ ,  $c = 10.2486(3)$  Å;  $\alpha = 90.00^\circ$ ,  $\beta = 96.543(3)^\circ$ ,  $\gamma = 90.00^\circ$ ,  $V = 3889.9(2)$  Å $^3$ ,  $Z = 4$ ;  $\sigma_{\text{calc}} = 1.742$  g/cm $^3$ ;  $2\theta$  3.22–61.42 deg.; total reflections 17909; independent reflections 10417; number of refined parameters 568;  $R_{\text{int}} = 0.0224$ ,  $GOOF = 1.027$ ;  $R_1 = 0.0391$ ,  $wR_2 = 0.0889$ ; residual electron density (max/min): 1.13/–0.85 e/Å $^3$ ]. In crystals **1** and **2**, the molecules have a curved structure of the central fragment with the Sb–O–Sb angles of 143.38(18)° and 141.17(13)°, respectively.

**Keywords:** *tris*(3-fluorophenyl)antimony, oxidative addition,  $\mu$ -oxo-*bis*(carboxylatotriarylantimony), structure, X-ray structural analysis

**For citation:** Sharutin V.V., Slepukhin P.A., Sharutina O.K., Artemyeva E.V., Gremitskikh S.A. Synthesis and structure of fluorine-containing binuclear aryl compounds of antimony  $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)(CF}_2)_3\text{CHF}_2]_2\text{O}$  and  $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)CHF}_2]_2\text{O}$ . *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(4):35–43. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250404

### Введение

Наряду с очень распространенными моноядерными органическими производными сурьмы(V)  $\text{Ar}_3\text{SbX}_2$  описаны более редкие их биядерные аналоги  $(\text{Ar}_3\text{SbX})_2\text{O}$  (X = Hlg,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{OC(O)R}$ , OR,  $\text{OSO}_2\text{R}$  и другие электроотрицательные группы) [1], для синтеза которых предложены различные подходы [2–28]. Так, немногочисленные известные производные с карбоксилатными лигандами получали по реакциям замещения с использованием  $(\text{Ar}_3\text{SbBr})_2\text{O}$  и натриевых солей карбоновых кислот или карбоновых кислот в присутствии аминов [17, 23, 27]. Надо отметить, что реакции окислительного присоединения, с успехом применяемые для синтеза большинства соединений  $(\text{Ar}_3\text{SbX})_2\text{O}$ , лишь иногда приводили к биядерным карбоксилатам триарилсурьмы [14, 15, 19, 22]. Однако недавно опубликованы исследования, в которых сообщается, что более десяти соединений ангидридного строения  $[\text{Ar}_3\text{SbOC(O)R}]_2\text{O}$  синтезированы из триарилсурьмы, галогенсодержащей карбоновой кислоты и окислителя в диэтиловом эфире при соотношении реагентов 1:1:1 (мольн.) [29, 30].

Как в большинстве производных сурьмы с КЧ 5, атомы металла в молекулах  $(\text{Ar}_3\text{SbX})_2\text{O}$  имеют тригонально-бипирамидальную координацию, искажение которой проявляется в отклонении валентных углов от теоретических значений и выходе атомов сурьмы из экваториальной плоскости к мостиковому атому кислорода. Расстояния Sb–X значительно меньше аналогичных

связей в соединениях общей формулы  $Ar_4SbX$  и немного больше, чем в соединениях  $Ar_3SbX_2$ . Интерес вызывает центральный фрагмент Sb—O—Sb, который может быть линейным или изогнутым. Значения угла SbOSb, который изменяется от 130 до 180°, и причины, вызывающие его изменение, остаются не выявленными [31]. Кроме того, были выделены кристаллы, в ячейках которых одновременно присутствуют молекулы с угловым и линейным центральными фрагментами [32]. К особенностям строения можно отнести длины связей между атомами сурьмы и мостиковым атомом кислорода Sb—O<sub>мост</sub>, которые всегда меньше суммы ковалентных радиусов атомов сурьмы и кислорода (2,07 Å [33]) и уменьшаются с приближением угла SbOSb к линейному.

В настоящей работе синтезированы два неизвестных ранее фторсодержащих арильных биядерных производных сурьмы  $[(3-FC_6H_4)_3SbOC(O)(CF_2)_3CHF_2]_2O$  (1) и  $[(3-FC_6H_4)_3SbOC(O)CHF_2]_2O$  (2), строение которых определено методом рентгеноструктурного анализа.

### Экспериментальная часть

В работе использовали органические соединения производства фирмы Alfa Aesar.

Соединения 1, 2 получали по реакции окислительного присоединения, описанной в работе [32]. К раствору *tris*(3-фторфенил)сурьмы в 20 мл диэтилового эфира прибавляли карбоновую кислоту и 30%-ный водный раствор пероксида водорода или 70%-ный водный раствор *трет*-бутилгидропероксида (мольное соотношение 1:1:1). Смесь выдерживали при комнатной температуре до испарения растворителя.

**[(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)(CF<sub>2</sub>)<sub>3</sub>CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O (1):** После перекристаллизации из четыреххлористого углерода выход 79 %,  $T_{пл.} = 95^{\circ}C$ . ИК-спектр ( $\nu$ ,  $cm^{-1}$ ): 3066, 3032, 2995, 2884, 2840 (C—H), 1705 (C=O), 1351, 1269, 1218, 1174, 1165, 1126, 1090, 1075 (C—F), 785 (Sb—O—Sb), 436 (Sb—C).

**[(3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>SbOC(O)CHF<sub>2</sub>]<sub>2</sub>O (2):** После перекристаллизации из смеси бензола и гептана выход 85 %,  $T_{пл.} = 175^{\circ}C$ . ИК-спектр ( $\nu$ ,  $cm^{-1}$ ): 3092, 3063, 3038, 2996, 2942, 2878, 2854, 2805, 2735 (C—H), 1696 (C=O), 1345, 1316, 1302, 1269, 1217, 1163, 1123, 1086, 1057 (C—F), 791 (Sb—O—Sb), 439 (Sb—C).

Рентгеноструктурный анализ (РСА) кристаллов 1, 2 проводили на оборудовании ЦКП «САОС» ИОС УрО РАН в соответствии с темой НИР 124020200072-0 на автоматическом 4-кружном дифрактометре с CCD-детектором «Xcalibur 3» по стандартной процедуре (MoK<sub>α</sub>-излучение, графитовый монохроматор,  $\omega$ -сканирование с шагом 1° при  $T = 295(2)$  K). Введена эмпирическая поправка на поглощение. Структуры определены прямым статистическим методом и уточнены полноматричным МНК по  $F^2$  в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Атомы водорода C—H связей помещены в геометрически рассчитанные положения и уточнены в изотропном приближении в модели «наездника». Все расчеты проведены в программной оболочке Olex2 [34] с использованием программного пакета SHELX [35].

Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур 1, 2 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 (№ 2444782 (1), № 2446601 (2); deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>). Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур 1, 2 приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблица 1  
Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур 1 и 2

Параметр	1	2
Формула	$C_{46}H_{26}F_{22}O_5Sb_2$	$C_{40}H_{26}F_{10}O_5Sb_2$
$M$	1320,17	1020,11
Сингония	Триклинная	Моноклинная
Пр. группа	$P-1$	$P-1$
$a$ , Å	11,698(3)	10,075(3)
$b$ , Å	14,2914(6)	37,9195(14)
$c$ , Å	16,1573(7)	10,2486(3)

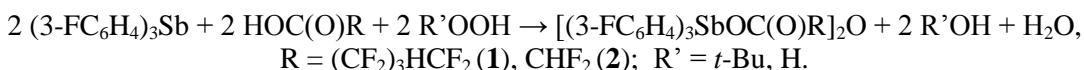
Параметр	1	2
$\alpha$ , град.	68,626(4)	90,00
$\beta$ , град.	75,574(3)	96,543(3)
$\gamma$ , град.	93,762(3)	90,00
$V$ , $\text{\AA}^3$	2435,74(16)	3889,9(2)
$Z$	2	4
$\rho$ (выч.), $\text{г/см}^3$	1,800	1,742
$\mu$ , $\text{мм}^{-1}$	1,238	1,480
$F(000)$	7062,0	1992,0
Размер кристалла (мм)	0,33×0,30×0,19	0,43×0,31×0,16
Область сбора данных по $2\theta$ , град.	4,38–61,66	4,2–61,42
Интервалы индексов отражений	$-16 \leq h \leq 15$ , $-19 \leq k \leq 19$ , $-21 \leq l \leq 23$	$-14 \leq h \leq 7$ , $-51 \leq k \leq 17$ , $-13 \leq l \leq 13$
Измерено отражений	19943	17693
Независимых отражений	13056	10417
Переменных уточнения	676	568
$GOOF$	1,021	1,027
$R$ -факторы по $F^2 > 2\sigma(F^2)$	$R_1 = 0,0532$ , $wR_2 = 0,1292$	$R_1 = 0,0391$ , $wR_2 = 0,0889$
$R$ -факторы по всем отражениям	$R_1 = 0,0931$ , $wR_2 = 0,1554$	$R_1 = 0,0605$ , $wR_2 = 0,1023$
Остаточная электронная плотность (min/max), $e/\text{\AA}^3$	1,25/–0,59	1,13/–0,85

Таблица 2  
Длины связей и валентные углы в структурах 1 и 2

Связь	$d$ , $\text{\AA}$	Угол	$\omega$ , град.
<b>1</b>			
Sb1–O5	1,965(3)	O5–Sb1–O1	177,37(13)
Sb1–O1	2,212(4)	C11–Sb1–C21	118,5(2)
Sb1–C21	2,119(5)	C11–Sb1–C21	118,5(2)
Sb1–C11	2,104(5)	C1–Sb1–C1	114,7(2)
Sb1–C1	2,108(5)	C1–Sb1–C21	125,6(2)
Sb2–O5	1,966(3)	O3–Sb2–O5	178,24(13)
Sb2–O3	2,246(4)	C31–Sb2–C51	115,3(2)
Sb2–C31	2,102(5)	C31–Sb2–C41	126,6(2)
Sb2–C51	2,108(5)	C41–Sb2–C51	117,4(2)
Sb2–C41	2,108(5)	Sb2–O5–Sb1	143,38(18)
Sb1···O2	3,221(6)	C61–O1–Sb1	116,9(3)
Sb2···O4	3,224(6)	C66–O3–Sb2	118,2(4)
<b>2</b>			
Sb1–O1	2,195(2)	O5–Sb1–O1	178,65(9)
Sb1–O5	1,974(2)	C11–Sb1–C12	122,17(15)
Sb1–C11	2,099(4)	C11–Sb1–C28	114,11(15)
Sb1–C12	2,099(4)	C12–Sb1–C28	122,66(14)
Sb1–C28	2,102(3)	O5–Sb2–O3	178,16(11)
Sb2–O3	2,176(2)	C5–Sb2–C17	111,29(14)
Sb2–O5	1,977(2)	C5–Sb2–C29	125,66(14)
Sb2–C5	2,095(4)	C29–Sb2–C17	122,05(14)
Sb2–C17	2,115(4)	C1–O1–Sb1	121,0(2)
Sb2–C29	2,106(3)	C4–O3–Sb2	118,5(2)
Sb1···O2	3,253(8)	Sb1–O5–Sb2	141,17(13)
Sb2···O4	3,196(7)	O5–Sb2–C17	94,77(13)

Обсуждение результатов

Соединения **1**, **2** синтезировали из *tricos*(3-фторфенил)сурьмы, карбоновой кислоты и окислителя (пероксида водорода или *тремт*-бутилгидропероксида) в диэтиловом эфире.



Монокристаллы  $\mu$ -оксо-*bис*[(5Н-перфторпентаноато)*tricos*(3-фторфенил)сурьму] (**1**) и  $\mu$ -оксо-*bис*[(дифторацетато)*tricos*(3-фторфенил)сурьму] (**2**) выделяли после перекристаллизации из подобранного растворителя с высокими выходами (79 и 85 % соответственно).

По данным РСА, кристаллы комплексов **1**, **2** состоят из биядерных молекул с угловым фрагментом Sb—O—Sb (рис. 1, 2). В кристаллах имеет место структурная разупорядоченность атомов фтора фторарильных заместителей, связанной с возможностью вращения арильных колец вокруг связи C—Sb. Кроме того, существенную структурную разупорядоченность проявляют фторалкильные заместители, что объясняет довольно высокие значения тепловых параметров атомов фтора данных фрагментов. Для упрощения восприятия общий вид молекул соединений **1**, **2** показан на шаростержневых моделях.

Арильные кольца относительно линии Sb—Sb находятся в заторможенной конформации. В молекулах **1** и **2** во фрагментах с центром Sb1 углы между экваториальной плоскостью [C1C11C21] и плоскостями [C1—C6], [C11—C16], [C21—C26] составляют 36,23°, 30,64°, 57,91° и 34,95°, 45,56°, 55,79° соответственно, во фрагментах с центром Sb2 расположение арильных колец относительно экваториальной плоскости несколько иное: углы между плоскостью [C31C41C51] и плоскостями [C31—C36], [C41—C46], [C51—C56] равны 55,39°, 49,77°, 11,24° и 51,09°, 52,20°, 19,83° соответственно.

Значения аксиальных углов  $O_{\text{мост}}SbO_{\text{терм}}$  в молекулах близки к теоретическому значению [178,24(13)°, 177,37(13)° и 178,65(9)°, 178,16(11)° в **1** и **2** соответственно], суммы экваториальных углов примерно равны 360° [359,3(2)°, 358,8(2)° и 358,9(2)°, 359,0(2)° соответственно]. Атомы Sb1 и Sb2 выходят из соответствующих экваториальных плоскостей к мостиковому атому кислорода в молекуле **1** на 0,131 и 0,102 Å, в молекуле **2** – на 0,118 и 0,126 Å. Расстояния Sb—O<sub>терм</sub>, как и предполагалось, несколько превышают сумму ковалентных радиусов атомов сурьмы и кислорода (2,07 Å [33]) и составляют 2,212(4), 2,246(4) и 2,195(2), 2,176(2) Å соответственно. Можно отметить, что удлинение указанных связей в **1** по сравнению с **2**, вероятно, связано с увеличением электроотрицательности группы R в остатке кислоты. Кроме того, в молекулах **1** и **2** присутствуют внутримолекулярные контакты атомов металла с карбонильными атомами кислорода [Sb…O=C 3,221(6), 3,237(7) и 3,221(6), 3,237(7) Å], которые свидетельствуют о большой степени асимметричности координации карбоксилатной группы на атом металла.

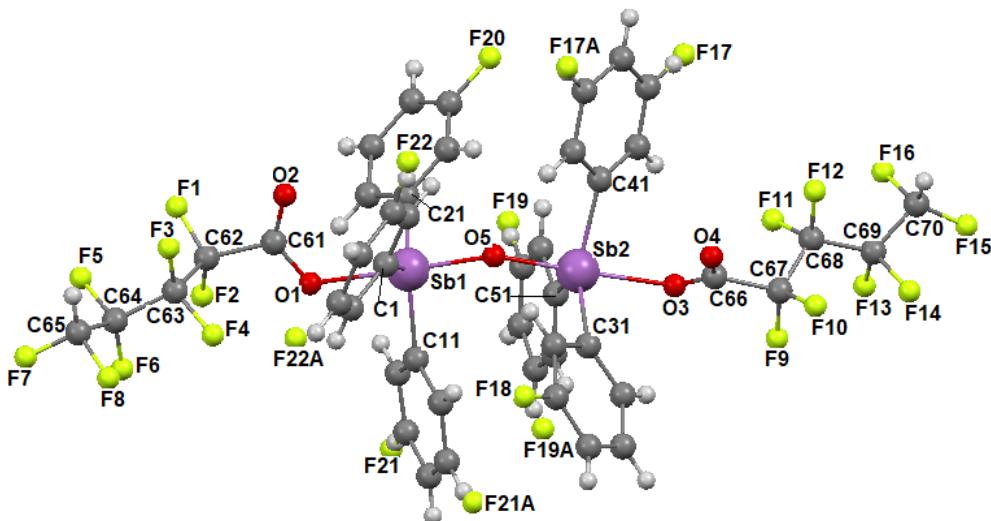


Рис. 1. Общий вид комплекса **1**

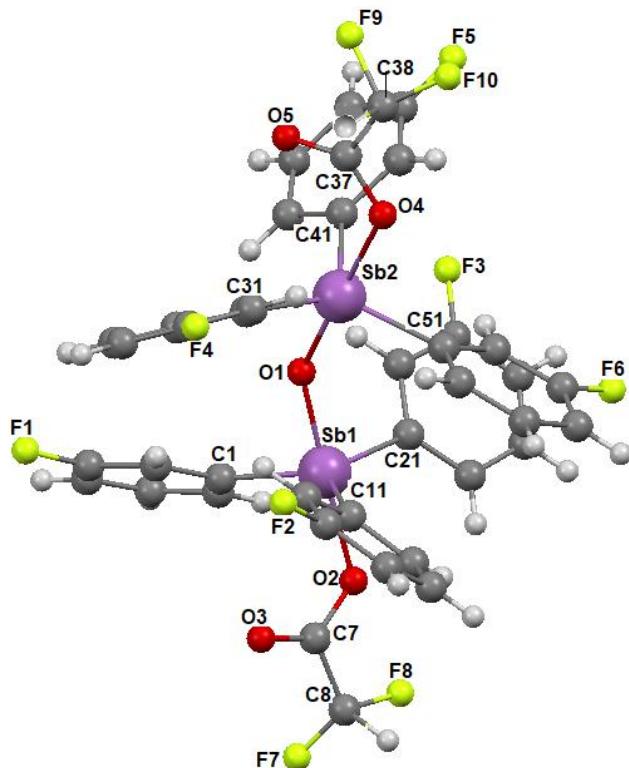


Рис. 2. Общий вид комплекса 2

В молекулах **1** угол SbOSb составляет  $143,38(18)^\circ$ , в молекулах **2** –  $141,2(2)^\circ$ . Длины связей Sb–O<sub>мост</sub> (1,966(3), 1,965(3) Å и 1,974(2), 1,977(2) Å в **1** и **2** соответственно) меньше, чем расстояния Sb–O<sub>терм</sub>, при этом можно отметить, что более длинным связям Sb–O<sub>терм</sub> в **1** соответствуют более короткие Sb–O<sub>мост</sub>, и наоборот – в молекуле **2**.

В соединениях сурьмы  $(Ar_3SbX)_2O$  угловая форма молекул подразумевает приближение друг к другу её концевых фрагментов, что может приводить к взаимодействию между ними и общему понижению энергии системы. В этом случае наиболее вероятными могли бы быть невалентные взаимодействия Sb…Sb, тем более что координационно-ненасыщенная сфера атома Sb допускает возможность его дополнительной координации. Действительно, в комплексах **1** и **2** расстояние Sb…Sb равно 3,733(6) и 3,727(5) Å, что меньше удвоенного ван-дер-ваальсового радиуса атома сурьмы (4,4 Å) [36], но больше, чем удвоенный ковалентный радиус сурьмы (2,82 Å) [33]. Можно предположить, что укорочение расстояний Sb…Sb и Sb…O по сравнению с суммой ван-дер-ваальсовых радиусов указанных атомов также связано с реализацией в комплексах **1** и **2** насыщения координационной сферы атомов сурьмы и увеличением их координационного числа.

Как и следовало ожидать, формирование кристаллической структуры **1** и **2** обеспечивается множеством слабых межмолекулярных водородных связей с участием атомов фтора и кислорода типа C–H…O, C–H…F.

Согласно литературным данным, расстояние между центроидами ароматических  $\pi$ -систем при наличии  $\pi\cdots\pi$ -стекинга варьирует в пределах 3,3–3,8 Å [37, 38]. В кристаллах соединения **1** фторарильные заместители [C51–C56] соседних молекул пространственно сближены, их плоскости параллельны друг другу и формируют  $\pi\cdots\pi$ -контакты с минимальным расстоянием между атомами углерода C53…C55 3,40 Å, что на 0,1 Å меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов углерода в  $sp^2$ -гибридизации [36], расстояние между центроидами колец составляет 3,66 Å (рис. 3). В результате вдоль кристаллографической оси 0b фторарильные заместители формируют стопки с возможным проявлением интересных электрофизических свойств.

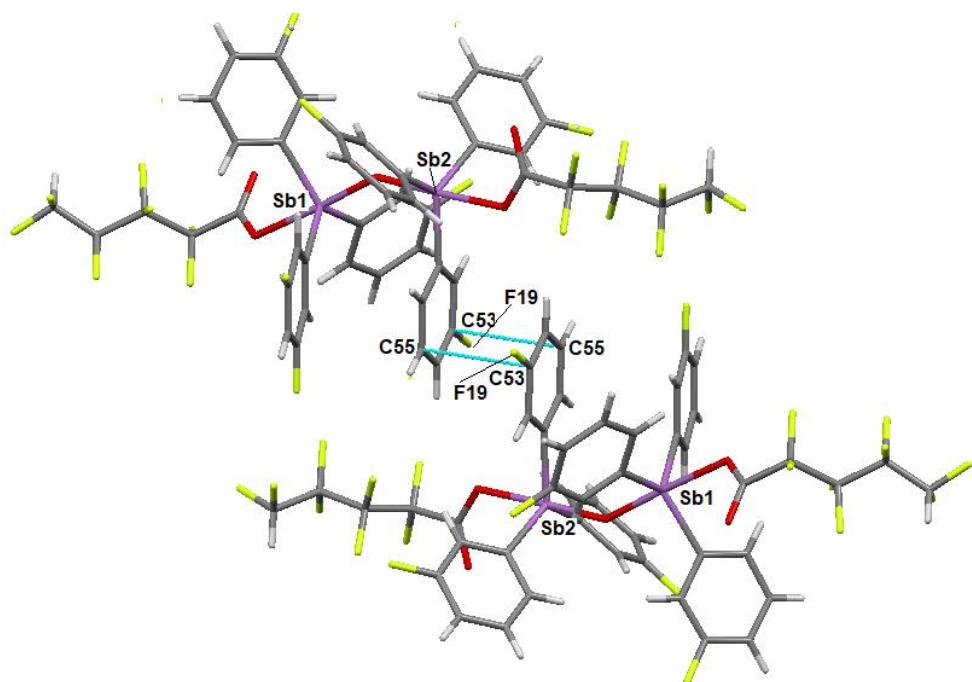


Рис. 3.  $\pi$ - $\pi$ -Взаимодействия в кристалле 1

### Выводы

По реакции окислительного присоединения синтезированы новые биядерные арильные соединения сурьмы с карбоксилатными лигандами  $[(3\text{-FC}_6\text{H}_4)_3\text{SbOC(O)R}]_2\text{O}$ ,  $\text{R} = (\text{CF}_2)_3\text{CF}_2\text{H}$  (1),  $\text{CF}_2\text{H}$  (2). Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что в молекулах углы  $\text{Sb}-\text{O}-\text{Sb}$  имеют значения  $143,38(18)^\circ$  и  $141,17(13)^\circ$  соответственно, какие наиболее часто встречается в молекулах подобных биядерных производных. V-Образное строение центральных фрагментов, которая, как мы полагаем, энергетически более выгодна из-за возникающего дополнительного взаимодействия между двумя атомами сурьмы  $\text{Sb}\cdots\text{Sb}$ . Можно предположить, что присутствие контактов  $\text{Sb}\cdots\text{O}$  и  $\text{Sb}\cdots\text{Sb}$  в молекулах 1 и 2 связано с реализацией насыщения координационной сферы атомов сурьмы.

### Список источников

1. Cambridge Crystallographic Database. Release 2022. Cambridge.
2. Grigsby E.W.J., Hart R.D., Raston C.L. et al. // Aust. J. Chem. 1997. V. 50, No. 6. P. 675. DOI: 10.1071/C96042
2. Tiekink E.R.T. // J. Organomet. Chem. 1987. V. 333, No. 2. P. 199. DOI: 10.1016/0022-328X(87)85152-5
3. Ouchi A., Sato S. // Bull. Chem. Soc. Jap. 1988. V. 61, No. 5. P. 1806. DOI: 10.1246/bcsj.61.1806
4. Шарутин В.В., Пакусина А.П., Шарутина О.К. и др. // Коорд. химия. 2007. V. 33, No. 2. C. 109. EDN: HZRVSL
5. Шарутин В.В., Пакусина А.П., Егорова И.В. и др. // Коорд. химия. 2008. Т. 34, № 3. С. 181. EDN: IJKFJX
6. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакусина А.П., Смирнова С.А. // Журн. неорган. химии. 2009. Т. 54, № 10. С. 1705. EDN: KWIUSL
7. Gibbons M.N., Blake A.J., Sowerby D.B. // J. Organomet. Chem. 1997. V. 543, No. 2. P. 217. DOI: 10.1016/S0022-328X(97)00208-8
8. Шарутин В.В., Пакусина А.П., Насонова Н.В. и др. // Коорд. химия. 2002. Т. 28, № 7. С. 506. EDN: ZATRQY
9. Balazs L., Breunig H.J., Ghosh I., Lork E. // J. Organometal. Chem. 2002. V. 648, No. 1. P. 33. DOI: 10.1016/S0022-328X(01)01467-X

10. *Taylor M.J., Baker L.-J., Rickard C.E.F., Surman P.W.J.* // *J. Organomet. Chem.* 1995. V. 498, No. 1. P. C14. DOI: 10.1016/0022-328X(95)05555-4
11. *Bordner J., Andrews B.C., Long G.G.* // *Cryst. Struct. Comm.* 1974. V. 3, No. 1. P. 53.
12. *Ferguson G., Ridley D.R.* // *Acta crystallogr.* 1973. V. B29, No. 10. P. 2221. DOI: 10.1107/S0567740873006370
13. *Старикова З.А., Щеголева Т.М., Трунов В.К., Покровская И.Е.* // *Кристаллография.* 1978. Т. 23, № 5. С. 969.
14. *Пупкова Ю.О., Шарутин В.В., Шарутина О.К. и др.* // *Координ. химия,* 2022. Т 48, № 8. С. 506. DOI: 10.31857/S0132344X22080059
15. *Шарутин В.В., Пакусина А.П., Шарутина О.К. и др.* // *Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения.* 2002. Т. 3, № 11. С. 13.
16. *Breneman G.L.* // *Acta Crystallogr.* 1979. V. 35B. P. 731. DOI: 10.1107/S0567740879004581
17. *Gibbons M.N., Sowerby D.B.* // *J. Organomet. Chem.* 1998. V. 555, No. 2. P. 271. DOI: 10.1016/S0022-328X(97)00759-6
18. *Grigsby E.W.J., Hart R.D., Raston C.L. et al.* // *Aust. J. Chem.* 1997. V. 50, No. 6. P. 675. DOI: 10.1071/C96042
19. *Polychronis N.M., Banti C.N., Raptopoulou C.P. et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2019. V. 489. P. 39. DOI: 10.1016/j.ica.2019.02.004
20. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С. и др.* // *Журн. неорган. химии.* 2018. Т. 63, № 7. С. 823. DOI: 10.1134/S0044457X18070188
21. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н.* // *Журн. неорг. химии.* 2018. Т. 63, № 3. С. 327. DOI: 10.7868/S0044457X18030091
22. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С.* // *Координ. химия.* 2014. Т. 40, № 2. С. 108. DOI: 10.7868/S0132344X14020108
23. *Quan L., Yin H., Wang D.* // *Acta Crystallogr. Sect. E: Struct. Rep. Online.* 2009. V. E65, No. 1. P. m99. DOI: 10.1107/S1600536808042335
24. *Preut H., Ruther R., Huber F.* // *Acta Crystallogr.* 1986. V. C42, No. 9. P. 1154. DOI: 10.1107/S010827018609306X
25. *Ruther R., Huber F., Preut H.* // *J. Organomet. Chem.* 1988. V. 342, No. 2. P. 185. DOI: 10.1016/S0022-328X(00)99456-7
26. *Abakumov G.A., Vavilina N.N., Kurskii Yu.A. et al.* // *Russ. Chem. Bulletin, International Edition,* 2007. V. 56, No. 9. P. 1813. DOI: 10.1007/s11172-007-0282-y
27. *L. Quan, H. Yin, D. Wang* // *Acta Crystallogr. Sect. E: Struct. Rep. Online.* 2008. V. 64E, No. 2. P. m349. DOI: 10.1107/S1600536808000676
28. *Шарутин В.В.* // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия.* 2024. Т. 16, № 4. С. 86. DOI: 10.14529/chem240407
29. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др.* // *Журн. общей химии.* 2019. Т. 89, № 1. С. 89. DOI: 10.1134/S0044460X19010141
30. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др.* // *Журн. неорг. химии.* 2019. Т. 64, № 10. С. 1051. DOI: 10.1134/S0044457X1910013134.
31. *Шарутина О.К., Шарутин В.В.* Молекулярные структуры органических соединений сурьмы(V). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. 395 с.
32. *Ефремов А.Н.* Синтез и особенности строения производных сурьмы(V) с заместителями в арильных лигандах: дис. ... канд. хим. наук. Владивосток, 2023. 208 с.
33. *Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al.* // *Dalton Trans.* 2008. V. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J
34. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // *J. Appl. Cryst.* 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726
35. *Sheldrick G.M.* // *Acta Cryst.* 2008. A64, P. 112. DOI: 10.1107/S0108767307043930
36. *Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al.* // *J. Phys. Chem. A.* 2009. V. 113, No. 19. P. 5806. DOI: 10.1021/jp8111556
37. *Janiak C.* // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 2000. V. 21. P. 3885. DOI: 10.1039/b003010o
38. *Alvarez S.* // *Dalton Trans.* 2013. V. 42, No. 24. P. 8617. DOI: 10.1039/C3DT50599E

**Шарутин Владимир Викторович** – доктор химических наук, главный научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutin50@mail.ru

**Слепухин Павел Александрович** – кандидат химических наук, руководитель группы РСА, Институт органического синтеза имени И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия; младший научный сотрудник, Научная лаборатория медицинской химии и перспективных органических материалов, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия. E-mail: slepukhin@ios.uran.ru

**Шарутина Ольга Константиновна** – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutinaok@susu.ru

**Артемьевая Екатерина Владимировна** – старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: artemevaev@susu.ru

**Гремицких Светлана Андреевна** – студент группы ЕТ-241, кафедра теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: gremickih2001@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 17 июля 2025 г.*

*The article was submitted 17 July 2025.*