

## ОКИСЛЕНИЕ ТРИС(2-МЕТОКСИФЕНИЛ)СУРЬМЫ ТРЕТ-БУТИЛГИДРОПЕРОКСИДОМ В ПРИСУТСТВИИ 2-ХЛОР-4-ФТОРФЕНОЛА

В.В. Шарутин<sup>1✉</sup>, О.К. Шарутина<sup>1</sup>, М.Р. Бянкина<sup>1</sup>,  
М.В. Кудряшов<sup>2</sup>, Н.В. Сомов<sup>2</sup>

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

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

✉ sharutin50@mail.ru

**Аннотация.** Окисление *трис*(2-метоксифенил)сурьмы *трет*-бутилгидропероксидом в присутствии 2-хлор-4-фторфенола в тетрагидрофуране или диэтиловом эфире приводит к образованию *бис*(2-хлор-4-фторфенолята) *трис*(2-метоксифенил)сурьмы (2-МеOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Sb(OC<sub>6</sub>H<sub>3</sub>Cl-2-F-4)<sub>2</sub> (**1**) которая, после перекристаллизации из смеси бензол – октан, была охарактеризована методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА). В ИК-спектре **1** присутствуют полосы, характеризующие колебания фрагмента SbC<sub>3</sub> (434 см<sup>-1</sup>) и связей Sb–O (536 см<sup>-1</sup>). Кристаллографические характеристики **1** [C<sub>33</sub>H<sub>27</sub>Cl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>O<sub>5</sub>Sb, M = 734,19; триклинная сингония, пр. гр. P-1; параметры ячейки: a = 8,41080(10) Å, b = 9,3964(2) Å, c = 19,6967(2) Å; α = 83,7850(10)°, β = 88,4990(10)°, γ = 81,8700(10)°; V = 1531,86(4) Å<sup>3</sup>, Z = 2; ρ<sub>выч</sub> = 1,592 г/см<sup>3</sup>; μ = 1,128 мм<sup>-1</sup>; F(000) = 736; обл. сбора по θ: 2,648–30,505°; –11 ≤ h ≤ 12, –13 ≤ k ≤ 13, –28 ≤ l ≤ 28; всего отражений 41617; независимых отражений 8942 (R<sub>int</sub> = 0,0426); GOOF = 1,035; R-фактор = 0,0215]. Из данных РСА в тригонально-бипирамидальных молекулах **1** с электроотрицательными лигандами в аксиальных положениях расстояния Sb–C составляют для 2,0973(12)–2,0996(13) Å; валентный угол OSbO равен 169,00(4)°. Расстояния Sb–O в [2,0686(9) и 2,0850(10) Å] сопоставимы с наблюдаемыми в подобных диароксидах триарилсурьмы. Экваториальные углы CSbC равны 109,56(5)°, 124,53(5)°, 125,87(5)°, сумма которых близка к 360°. Столь большое неравенство в экваториальных углах обусловлено присутствием внутримолекулярных контактов Sb···OMe [3,000(3), 3,092(3) и 3,124 Å]. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов для структуры **1** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 2478179 (**1**); deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

**Ключевые слова:** *трис*(2-метоксифенил)сурьма, *трет*-бутилгидропероксид, 2-хлор-4-фторфенол, диароксид *трис*(2-метоксифенил)сурьмы, синтез, рентгеноструктурный анализ

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

**Для цитирования:** Окисление *трис*(2-метоксифенил)сурьмы *трет*-бутилгидропероксидом в присутствии 2-хлор-4-фторфенола / В.В. Шарутин, О.К. Шарутина, М.Р. Бянкина и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 1. С. 52–58. DOI: 10.14529/chem260106

Original article  
DOI: 10.14529/chem260106

## OXIDATION OF TRIS(2-METHOXYPHENYL)ANTIMONY BY TERT-BUTYL HYDROPEROXIDE IN THE PRESENCE OF 2-CHLORO-4-FLUOROPHENOL

V.V. Sharutin<sup>1✉</sup>, O.K. Sharutina<sup>1</sup>, M.R. Byankina<sup>1</sup>, M.V. Kudryashov<sup>2</sup>, N.V. Somov<sup>2</sup>

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

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

✉ sharutin50@mail.ru

**Abstract.** Oxidation of *tris*(2-methoxyphenyl)antimony by *tert*-butyl hydroperoxide in the presence of 2-chloro-4-fluorophenol in tetrahydrofuran or diethyl ether led to formation of *tris*(2-

methoxyphenyl)antimony bis(2-chloro,4-fluorophenolate) (2-MeOC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Sb[OC<sub>6</sub>H<sub>3</sub>(Cl-2)(F-4)]<sub>2</sub> (**1**), which, after recrystallization from a benzene-octane mixture, was characterized by IR spectroscopy and X-ray diffraction analysis. The IR spectrum of **1** contains bands characterizing vibrations of the SbC<sub>3</sub> fragment (434 cm<sup>-1</sup>) and Sb–O bonds (536 cm<sup>-1</sup>), respectively. Crystallographic characteristics of **1** [C<sub>33</sub>H<sub>27</sub>Cl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>O<sub>5</sub>Sb, *M* = 734.19; triclinic syngony, space group *P*-1; cell parameters: *a* = 8.41080(10) Å, *b* = 9.3964(2) Å, *c* = 19.6967(2) Å; α = 83.7850(10)°, β = 88.4990(10)°, γ = 81.8700(10)°; *V* = 1531.86(4) Å<sup>3</sup>, *Z* = 2; σ<sub>calc</sub> = 1.592 g/cm<sup>3</sup>; μ = 1.128 mm<sup>-1</sup>; *F*(000) = 736; collection area by 2θ: 2.648–30.505°; –11 ≤ *h* ≤ 12, –13 ≤ *k* ≤ 13, –28 ≤ *l* ≤ 28; total reflections 41617; independent reflections 8942 (*R*<sub>int</sub> = 0.0426); *GOOF* = 1.035; *R*-factor = 0.0215]. According to the X-ray diffraction data, the Sb–C distances in trigonal bipyramidal molecules **1** with electronegative ligands in axial positions are 2.0973(12)–2.0996(13) Å; the OSbO bond angle is 169.00(4)°. The Sb–O distances [2.0686(9) and 2.0850(10) Å] are comparable with those observed in similar triarylantimony diarsenoxides. The CSbC equatorial angles are 109.56(5)°, 124.53(5)°, 125.87(5)°, the sum of which is close to 360°. Such a large inequality in the equatorial angles is due to the presence of intramolecular contacts Sb⋯OMe [3.000(3), 3.092(3), and 3.124 Å]. Complete tables of atomic coordinates, bond lengths and bond angles for structure **1** have been deposited with the Cambridge Crystallographic Data Centre (no. 2478179; deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

**Keywords:** tris(2-methoxyphenyl)antimony, tert-butyl hydroperoxide, 2-chloro,4-fluorophenol, tris(2-methoxyphenyl)antimony diarsenoxide, synthesis, X-ray structural analysis

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

**For citation:** Sharutin V.V., Sharutina O.K., Byankina M.R., Kudryashov M.V., Somov N.V. Oxidation of tris(2-methoxyphenyl)antimony by tert-butyl hydroperoxide in the presence of 2-chloro-4-fluorophenol. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(1):52–58. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260106

## Введение

Известно, что среди многочисленных известных арильных соединений сурьмы общей формулы Ar<sub>3</sub>SbX<sub>2</sub> (X – остаток различных органических НО-кислот) большую часть составляют производные карбоновых кислот (более 150); в меньшей степени представлены производные оксимов, сульфоновых кислот и фенолов [1]. Первые диароксиды трифенилсурьмы получали по реакциям замещения из дигалогенида трифенилсурьмы и соответствующего фенола. Таким методом синтезировали бис(2,4,6-трибромфенокс)трифенилсурьму Ph<sub>3</sub>Sb(OC<sub>6</sub>H<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>-2,4,6)<sub>2</sub> с выходом 80 %, которая, как оказалось, является ингибитором воспламенения полиэтилена [2]. Установлено, что дихлорид трифенилсурьмы также реагирует с дигидроксibenзолом – пирокатехином и его производными в присутствии сухого аммиака или другого акцептора хлороводорода с образованием хелатных комплексов [3–5]. В работе [6] приводится оригинальный метод синтеза диароксидов трифенилсурьмы с выходами 80–93 % из трифенилстибазосульфониларила Ph<sub>3</sub>Sb=NS(O)<sub>2</sub>Ar и фенола HOAr (Ar = C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>, 4-ClC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, 4-BrC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, 4-NO<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, 2,4-Br<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>Cl<sub>5</sub>).

Существует достаточно много публикаций, в которых описаны реакции окисления триарилсурьмы замещенными орто-хинонами, продуктами которых являются катехолаты триарилсурьмы, содержащие металлоцикл [SbO<sub>2</sub>C<sub>2</sub>] [7–11].

Впервые окислительный метод синтеза, который заключается в окислении триарилсурьмы окислителем с одновременным введением в реакцию смесь органической НО-кислоты с использованием фенолов был осуществлен на примере дигидроксibenзолов [12]. Авторами установлено, что строение продуктов реакции определяется расположением гидроксигрупп в ароматическом кольце: с пирокатехином образуется 5-членный орто-фенилендиоксид трифенилсурьмы, с резорцином – макроциклическое соединение, при взаимодействии с гидрохиноном получается полимерный гидрохинолят трифенилсурьмы.

По реакции окислительного присоединения из трифенилсурьмы, фенола и пероксида водорода (мольное соотношение реагентов 1:2:1) были синтезированы три диароксида трифенилсурьмы Ph<sub>3</sub>Sb(OAr)<sub>2</sub>, где Ar – C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(NO<sub>2</sub>)-4, C<sub>6</sub>H<sub>2</sub>(NO<sub>2</sub>)<sub>3</sub>-2,4,6 [13]. Автор отмечает, что получить диароксиды трифенилсурьмы с фенолами, имеющими электронодонорные заместители в кольце, не удалось.

В работе [14] описаны реакции трифенил- и три(*para*-толил)сурьмы с полифункциональными фенолами: 2,4,6-трибромфенолом, 4-ацетил-3-оксифенолом, 2-формил-4-бромфенолом в присутствии пероксида водорода. Показано, что наряду с диароксидами триарилсурьмы из реакционной смеси (соотношение исходных соединений 1:2:1 мольн.) выделяли  $\mu$ -оксобис[(ароксо)триарилсурьму], выход которой, например, в случае 2,4,6-трибромфенола достигал 44 %. Образование второго продукта –  $\mu$ -оксобис[(ароксо)триарилсурьмы] – авторы объяснили гидролитической неустойчивостью диароксидов триарилсурьмы, что подтвердили специальными экспериментами. Установлено, что при мольном соотношении реагентов в реакции триарилсурьмы, фенола и пероксида водорода 1:1:1 единственным сурьмаорганическим продуктом являлись биядерные соединения  $\mu$ -оксобис[(ароксо)триарилсурьмы]  $[\text{Ar}_3\text{Sb}(\text{OAr}')_2]\text{O}$ , где  $\text{Ar} = \text{Ph}$ , *p*-Tol;  $\text{Ar}' = \text{C}_6\text{H}_2\text{Br}_3$ -2,4,6,  $\text{C}_6\text{H}_3(\text{CHO}-2)(\text{Br}-4)$ ,  $\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}-3)(\text{Ac}-4)$ ,  $\text{C}_6\text{H}_4\text{I}-4$ .

Автор [15] детально исследовал реакции окислительного присоединения *трис*(4-метилфенил)-, *трис*(4-фторфенил)-, *трис*(3-фторфенил)- и *трис*(5-бром-2-метоксифенил)сурьмы и фенолов в присутствии *трет*-бутилгидропероксида. Установлено, что образование соединений  $\text{Ar}_3\text{Sb}(\text{OAr}')_2$  или  $[\text{Ar}_3\text{Sb}(\text{OAr}')_2]\text{O}$  обусловлено влиянием совокупности ряда факторов: объем, природа, количество и расположение заместителей в ароксидном лиганде, а также природа функциональной группы в арильном радикале при атоме металла.

В настоящей работе впервые в реакции окислительного присоединения с фенолами использована *трис*(2-метоксифенил)сурьма и синтезирован *бис*(2-хлор-4-фтор-феноксид) *трис*(2-метоксифенил)сурьмы, строение которой доказано методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

#### Экспериментальная часть

**Синтез *бис*(2-хлор-4-фтор-феноксид) *трис*(2-метоксифенил)сурьмы (1).** К бензольному раствору 0,10 г (0,226 ммоль) *трис*(2-метоксифенил)сурьмы приливали раствор 0,066 г (0,451 ммоль) 2-хлор-4-фтор-фенола в бензоле и прибавляли 0,03 г 70%-ного водного раствора (0,226 ммоль) *трет*-бутилгидропероксида. Реакционную смесь выдерживали при комнатной температуре до испарения растворителя. Остаток промывали диэтиловым эфиром и после перекристаллизации из смеси бензол–октан (5:1 объемн.) выделяли бесцветные кристаллы *бис*(2-хлор-4-фтор-феноксид) *трис*(2-метоксифенил)сурьмы, выход 46 %, т. пл. 153 °С. Найдено, %: С 53,82; Н 3,70.  $\text{C}_{33}\text{H}_{27}\text{Cl}_2\text{F}_2\text{O}_5\text{Sb}$ . Вычислено, %: С 53,94; Н 3,68. ИК-спектр ( $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ): 3424, 3065, 3005, 2961, 2938, 2835, 1630, 1582, 1476, 1431, 1398, 1277, 1251, 1188, 1165, 1123, 1061, 1043, 1024, 907, 878, 864, 802, 750, 714, 681, 573, 536, 509, 478, 434.

Элементный анализ проводили на анализаторе Euro EA3028-НТ.

**Рентгеноструктурный анализ** кристаллов **1** проводили на автоматическом дифрактометре Rigaku XtaLab при 100 °К. Первичные фрагменты структур найдены методом двойного пространства в программных комплексах *SHELX* [16], *ShelXle* [17]. Параметры остальных атомов, включая атомы водорода, определены по разностному синтезу электронной плотности и уточнены по  $|F|^2$  методом наименьших квадратов. Положения водородных атомов уточнялись в основном цикле метода наименьших квадратов в изотропном приближении. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC 2478179); deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk). Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структуры **1** приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

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

Параметр	<b>1</b>
Формула	$\text{C}_{33}\text{H}_{27}\text{Cl}_2\text{F}_2\text{O}_5\text{Sb}$
<i>M</i>	734,21
Сингония	Триклинная
Пр. группа	$P\bar{1}$
<i>a</i> , Å	8,41080(10)
<i>b</i> , Å	9,3964(2)
<i>c</i> , Å	19,6067(2)

Окончание табл. 1

Параметр	<b>1</b>
$\alpha$ , град	83,7850(10)
$\beta$ , град	88,4990(10)
$\gamma$ , град	81,8700(10)
$V$ , Å <sup>3</sup>	1531,86(4)
$Z$	2
$\rho_{\text{выч}}$ , г/см <sup>3</sup>	1,592
$\mu$ , мм <sup>-1</sup>	1,128
Поглощение $T/T_{\text{max}}$	0,210 / 1,000
Учет поглощения	Аналитический (Гаусс)
$F(000)$	736,0
Размер кристалла, мм	0,719 × 0,392 × 0,128
Дифрактометр / Излучение / Монохроматор / тип сканирования	Rigaku XtaLab, MM003, P200K / MoK $\alpha$ , $\lambda = 0,71073$ Å / MicroMax-003 / $\omega$ -сканирование
Область сбора данных по $\theta$ , град.	2,648–30,505
Интервалы индексов отражений	$-11 \leq h \leq 12$ , $-13 \leq k \leq 13$ , $-28 \leq l \leq 28$
Измерено отражений	41617
Независимых отражений	9327
$R_{\text{int}}$	0,0426
Переменных уточнения	469
$GOOF$	1,035
$R$ -факторы по $F^2 > 2\sigma(F^2)$	$R_1 = 0,0215$ , $wR_2 = 0,0575$
$R$ -факторы по всем отражениям	$R_1 = 0,0225$ , $wR_2 = 0,0579$
Остаточная электронная плотность (min/max), e/Å <sup>3</sup>	-0,640/0,797

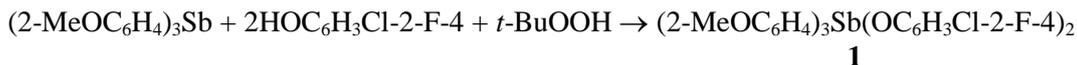
Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структуре 1

Связь $d$ , Å		Угол $\omega$ , град	
Sb(1)–O(1)	2,0686(9)	C(20)Sb(1)C(27)	109,56(5)
Sb(1)–O(2)	2,0850(10)	C(27)Sb(1)C(13)	124,53(5)
Sb(1)–C(20)	2,0973(12)	C(20)Sb(1)C(13)	125,87(5)
Sb(1)–C(27)	2,0983(12)	O(1)Sb(1)O(2)	169,00(4)
Sb(1)–C(13)	2,0996(13)	O(1)Sb(1)C(20)	89,68(5)
C(1)–O(1)	1,3377(16)	O(1)Sb(1)C(27)	86,52(4)
C(7)–O(2)	1,3228(17)	O(1)Sb(1)C(13)	91,50(4)
C(33)–O(3)	1,4238(18)	O(2)Sb(1)C(20)	96,00(5)
C(19)–O(4)	1,4226(17)	O(2)Sb(1)C(27)	82,70(4)
C(26)–O(5)	1,4193(18)	O(2)Sb(1)C(13)	92,78(5)
C(32)–O(3)	1,3630(17)	C(1)O(1)Sb(1)	130,40(8)
C(18)–O(4)	1,3615(16)	C(7)O(2)Sb(1)	134,61(9)
C(25)–O(5)	1,3622(17)		

### Обсуждение результатов

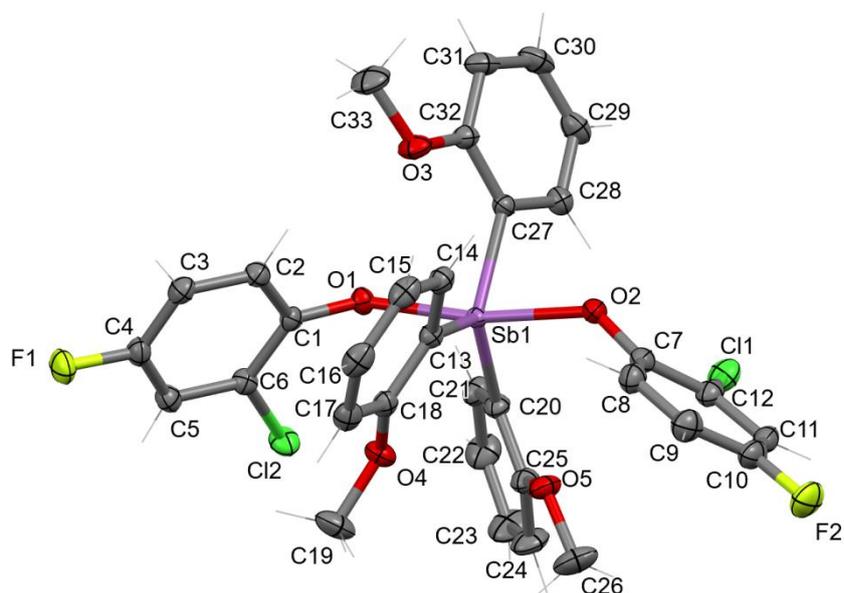
Реакционная способность трис(2-метоксифенил)сурьмы в настоящее время изучена недостаточно. Например, ее реакции окислительного присоединения с фенолами в литературе не описаны. Нами установлено, что взаимодействие 2-хлор-4-фторфенола с трис(2-метоксифенил)сурьмой в присутствии трет-бутилгидропероксида приводит к образованию бис(2-хлор-4-фторфеноксид) трис(2-метоксифенил)сурьмы (**1**) с выходом 46 % (после перекристаллизации из смеси бензол–октан). Для достижения гомогенности реакционной смеси в качестве растворителя был использован бензол, а не диэтиловый эфир, как обычно при проведении реакций окислительного присоединения с триарилсурьмой.



Соединение **1** было выделено в виде бесцветных кристаллов с температурой плавления 153°C, растворимых в ароматических углеводородах и нерастворимых в алканах. Строение соединения **1** было охарактеризовано методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

В ИК-спектре наблюдались характерные полосы при 434 см<sup>-1</sup> и 536 см<sup>-1</sup>, соответствующие валентным колебаниям связей Sb–C и Sb–O соответственно [18]. Колебания связи C<sub>Ar</sub>–O в фенолах находятся обычно при 1275–1150 см<sup>-1</sup> [19]. В спектре соединения **1** обнаружены полосы 1251 и 1277 см<sup>-1</sup>, которые можно отнести к колебаниям связей C–O в ароксильных лигандах и арильных группах соответственно. Отметим, что в спектре *трис*(2-метоксифенил)сурьмы имеет место полоса 1269 см<sup>-1</sup>. Кроме того, в спектре имеют место полосы при 1024 см<sup>-1</sup> и 1188 см<sup>-1</sup>, характеризующие колебания связей C–Cl и C–F соответственно [20].

По данным РСА, в молекулах **1** атомы сурьмы имеют координацию искаженной тригональной бипирамиды, в аксиальных положениях которой находятся более электроотрицательные ароксильные лиганды (см. рисунок).



Строение молекулы (2-МеОС<sub>6</sub>Н<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Сb(ОС<sub>6</sub>Н<sub>3</sub>Сl-2-Ф-4)<sub>2</sub>  
(атомы водорода не показаны)

Аксиальный угол OSbO отличается от линейного угла и составляет 169,00(4)°. Валентные углы CSbC в экваториальной плоскости равны 109,56(5); 124,53(5); 125,87(5)°, а их сумма практически равна 360° (359,96(5)°). Выход атома сурьмы из экваториальной плоскости к атому O(2) характеризуются малым значением (0,024 Å), а интервал изменения углов OSbC между экваториальными и аксиальными связями составляет 82,70(4)–96,00(5)°. Экваториальные связи Sb–C [2,0686(10)–2,0973(12) Å] меньше указанных расстояний в молекулах *трис*(2-метоксифенил)сурьмы (2,151(3) Å [21]). Расстояния Sb–O [2,0686(9), 2,0850(10) Å] несколько больше суммы ковалентных радиусов атомов-партнеров (2,05 Å [22]). Отметим, что наблюдаемые значения Sb–O попадают в интервал изменения указанных связей в молекулах Ar<sub>3</sub>Sb(OAr')<sub>2</sub>, где Ar = Ph, 4-CH<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, 4-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, 3-FC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>, а в группах Ar' присутствуют один или два электроотрицательных заместителя [15].

Расстояния C<sub>Ar</sub>–O в ароксигруппах равны 1,338(2) и 1,323(2) Å, в арильных группах (1,362(2), 1,362(2), 1,363(2) Å) несколько больше.

Арильные кольца в экваториальной плоскости имеют пропеллерную конформацию, которая считается наиболее энергетически выгодной. Так, двугранные углы между экваториальной плос-

костью [C(13)C(20)C(27)] и плоскостями [C(13)–C(18)], [C(20)–C(25)], [C(27)–C(32)] составляют 24,25; 37,77; 26,59°.

Обнаружено, что плоскость арильной группы [C(13)–C(18)] и плоскость ароксигруппы [C(1)–C(6)] составляют угол 32,43°. Наблюдаемая конформация арильных заместителей при атоме сурьмы обеспечивает возможность взаимодействия ароматических систем ( $\pi \cdots \pi$ -стекинг). Согласно литературным данным, расстояние между центроидами ароматических  $\pi$ -систем при наличии  $\pi \cdots \pi$ -стекинга варьирует в пределах 3,3–3,8 Å [23, 24], однако допускаются значения до 4 Å и более. В молекуле **1** расстояние между центрами  $\pi$ -систем арильного и ароксидного лигандов составляет 4,19 Å, а наименьшие расстояния  $C_{Ar} \cdots C_{ArO}$  [C(1)–C(13)] равно 3,21 Å. Косвенным доказательством взаимодействия можно считать уменьшение угла C(1)O(1)Sb (130,40(8)°) по сравнению с углом C(7)O(2)Sb (134,61(9)°). Наличие  $\pi \cdots \pi$ -взаимодействия, вероятно, является причиной искажения экваториальных углов: углы C(13)SbC(20) и C(13)SbC(27) больше теоретического значения на  $\approx 5$ –6°, а угол C(20)SbC(27) меньше на  $\approx 10$ °.

Особенностью строения молекул **1** является присутствие внутримолекулярных контактов атомов кислорода метоксигрупп с центральным атомом (расстояния Sb–OMe составляют 3,103(2)–3,127(2) Å, что меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов сурьмы и кислорода [25]). В молекуле трис(2-метоксифенил)сурьмы аналогичные расстояния составляют 3,054(2) Å [21].

Основными межмолекулярными взаимодействиями в кристалле **1** являются слабые водородные связи типа C–H $\cdots$ O и C–H $\cdots$ F, количественные характеристики которых сведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры водородных связей в структуре **1**

Атомы	D–H, Å	H $\cdots$ A, Å	D $\cdots$ A, Å	D–H $\cdots$ A, град.
C(5)–H(5) $\cdots$ O(2) <sup>(I)</sup>	0,94(2)	2,46(2)	3,3572(17)	158,8(17)
C(2)–H(2) $\cdots$ O(3)	0,99(2)	2,580(19)	3,3961(17)	139,4(15)
C(26)–H(26A) $\cdots$ F(2) <sup>(II)</sup>	0,97(3)	2,55(3)	3,414(2)	148(2)
C(3)–H(3) $\cdots$ F(1) <sup>(III)</sup>	0,98(2)	2,61(2)	3,4939(17)	149,1(16)

Симметрично эквивалентные позиции: I) x, y+1, z; II) –x, –y+1, –z; III) –x, –y+2, –z+1.

### Выводы

Окисление трис(2-метоксифенил)сурьмы трет-бутилгидропероксидом в присутствии 2-хлор-4-фторфенола приводит к образованию бис(2-хлор-4-фторфеноксида) трис(2-метоксифенил)сурьмы с выходом 46%. Атомы сурьмы в молекулах **1** имеют тригонально-бипирамидальную конфигурацию с ароксильными лигандами в аксиальных положениях. Особенностью строения молекулы **1** является наличие  $\pi \cdots \pi$ -взаимодействия между ароматическими системами, расположенными в экваториальном и аксиальном положениях, что приводит к искажению экваториальных углов. Кроме того, имеют место внутримолекулярные контакты Sb–OMe.

### Список источников

1. Cambridge Crystallographic Database. Release 2022. Cambridge.
2. Shu W., Liu D., Huang K. et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 1992. V. 2, No. 2. P. 32.
3. Hall M., Sowerby D.B. // J. Am. Chem. Soc. 1980. V. 102, No. 2. P. 628. DOI: 10.1021/ja00522a031
4. Holmes R.R., Day R.O., Chandrasekhar V. et al. // Inorg. Chem. 1987. V. 26, No. 1. P. 157. DOI: 10.1021/ic00248a031
5. Holmes R.R., Day R.O., Chandrasekhar V. et al. // Inorg. Chem. 1987. V. 26, No. 1. P. 163. DOI: 10.1021/ic00248a032
6. Пинчук А.М., Купленник З.И., Белая Ж.И. // Журн. общ. химии. 1976. Т. 66, № 10. С. 2242. EDN: ZSNOQV
7. Cherkasov V.K., Grunova E.V., Poddel'sky A.I. et al. // J. Organomet. Chem. 2005. V. 690. P. 1273. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2004.11.049

8. *Poddel'sky A.I., Smolyaninov I.V., Fukin G.K. et al.* // J. Organomet. Chem. 2018. V. 867. P. 238. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2017.12.006
9. *Schulz J., Antala J., Rezagui D. et al.* // Inorg. Chem. 2023. V. 62, No. 34. P. 14028. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.3c02075
10. *Murphy B.L., Maltz L.T., Gabbai F.P.* // Inorg. Chem. 2024. V. 63, No. 50. P. 23568. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.4c03178
11. *Murphy B.L., Gabbai F.P.* // J. American Chem. Society. 2024. V. 146, No. 11. P. 7146. DOI: 10.1021/jacs.4c00202
12. *Dodonov V.A., Fedorov A.Y., Usyatinsky R.I. et al.* // Russ. Chem. Bull. 1995. V. 44, No. 4. P. 730. DOI: 10.1007/BF00698512
13. *Осипов П.Е.* Арокситетраарильные соединения сурьмы. Синтез, строение и реакции термического разложения: дис. ... канд. хим. наук. Благовещенск. 2002. 95 с.
14. *Пакулина А.П.* Особенности химического поведения и строения арильных соединений сурьмы: дис. ... д-ра хим. наук. Благовещенск. 2006. 323 с.
15. *Ефремов А.Н.* Синтез и особенности строения производных сурьмы(V) с заместителями в арильных лигандах: дис. ... канд. хим. наук. Челябинск. 2023. 208 с.
16. *Sheldrick G.M.* // Acta Cryst. Sect. A. 2015. V. 71. P. 3. DOI: 10.1107/S2053273314026370
17. *Hübschle C.B., Sheldrick G.M., Dittrich B.* ShelXle: a Qt graphical user interface for SHELXL // J. Appl. Cryst. 2011. V. 44. P. 1281. DOI: 10.1107/S0021889811043202
18. *Гуцин А.В., Малеева А.И., Калистратова О.С. и др.* // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2021. Т. 13, № 1. С. 5. DOI: 10.14529/chem210101
19. *Преч Э.* Определение строения органических соединений. М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 439 с.
20. *Тарасевич Б.Н.* ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
21. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Efremov A.N. et al.* // Mendeleev Communications. 2022. V. 32, No. 1. P. 109. DOI: 10.1016/j.mencom.2022.01.035
22. *Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al.* // Dalton Trans. 2008. V. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J
23. *Janiak C.A.* // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 2000. No. 21. P. 3885. DOI: 10.1039/B003010O
24. *Alvarez S.* // Dalton Trans. 2013. V. 42, No. 24. P. 8617. DOI: 10.1039/C3DT50599E
25. *Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al.* // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113, No. 19. P. 5806. DOI: 10.1021/jp8111556

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

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

**Бянкина Мария Ринатовна** – студент кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: byankina.mari03@mail.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2025 г.*

*The article was submitted 12 September 2025.*