

РЕАКЦИИ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ТРИАРИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУРЬМЫ С ФТОРИРОВАННЫМИ КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ. СТРОЕНИЕ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИИ**[3-CH₃C₆H₄]₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [3-CH₃C₆H₄]₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O, [4-CH₃C₆H₄]₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O и [(3-FC₆H₄)]₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O****В.В. Шарутин[✉], О.К. Шарутина, Е.В. Артемьева, В.В. Зубарева, С.А. Гремичких***Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*[✉] *sharutin50@mail.ru*

Аннотация. Взаимодействием триарилсурьмы с фторированными карбоновыми кислотами [CF₃(CF₂)₃C(O)OH и CHF₂CF₂C(O)OH] в присутствии *трет*-бутилгидропероксида в эфире получены μ -оксо-бис(карбоксилатотриарилсурьмы) [(3-МеС₆Н₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**1**) и [(3-МеС₆Н₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O (**2**), [(4-МеС₆Н₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**3**), [(3-FC₆Н₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O (**4**), строение которых доказано методом рентгеноструктурного анализа (РСА). РСА кристаллов **1–4** проводили на дифрактометре D8 QUEST фирмы Bruker, кристаллографические характеристики элементарной ячейки соединений **1**, пространственная группа триклинная *P*-1, $a = 11,175(7)$, $b = 19,597(9)$, $c = 20,074(9)$ Å, $\alpha = 90,934(17)^\circ$, $\beta = 96,79(2)^\circ$, $\gamma = 104,38(3)^\circ$, $V = 4224(4)$ Å³, $Z = 1$, $\rho_{\text{выч}} = 1,571$ г/см³, $\mu = 1,062$ мм⁻¹, $F(000) = 1974,0$, размер кристалла $0,22 \times 0,09 \times 0,05$ мм, диапазон сбора данных по 2θ , град: $5,92\text{--}54,4$, диапазон индексов $-14 \leq h \leq 14$, $-25 \leq k \leq 25$, $-25 \leq l \leq 25$, число измеренных рефлексов 103747, число независимых рефлексов 18654, $R_{\text{int}} = 0,1127$, $GOOF = 1,004$, число параметров 1050, $R_1 = 0,0535$, $wR_2 = 0,1265$; **2**, пространственная группа триклинная *P*-1, $a = 10,348(6)$, $b = 15,131(10)$, $c = 16,055(9)$ Å, $\alpha = 86,02(3)^\circ$, $\beta = 71,70(2)^\circ$, $\gamma = 86,14(2)^\circ$, $V = 2378(2)$ Å³, $Z = 2$, $\rho_{\text{выч}} = 1,531$ г/см³, $\mu = 1,210$ мм⁻¹, $F(000) = 1092,0$, размер кристалла $0,6 \times 0,2 \times 0,18$ мм, диапазон сбора данных по 2θ , град: $5,66\text{--}58,34$, диапазон индексов $-14 \leq h \leq 14$, $-20 \leq k \leq 20$, $-21 \leq l \leq 21$, число измеренных рефлексов 95624, число независимых рефлексов 12765, $R_{\text{int}} = 0,0470$, $GOOF = 1,053$, число параметров 574, $R_1 = 0,0374$, $wR_2 = 0,0902$; **3**, пространственная группа триклинная *P*-1, $a = 11,761(5)$, $b = 15,430(7)$, $c = 16,785(11)$ Å, $\alpha = 101,96(3)^\circ$, $\beta = 95,00(3)^\circ$, $\gamma = 106,726(18)^\circ$, $V = 2819(3)$ Å³, $Z = 2$, $\rho_{\text{выч}} = 1,570$ г/см³, $\mu = 1,061$ мм⁻¹, $F(000) = 1316,0$, размер кристалла $0,5 \times 0,3 \times 0,09$ мм, диапазон сбора данных по 2θ , град: $5,684\text{--}54,32$, диапазон индексов $-15 \leq h \leq 15$, $-19 \leq k \leq 19$, $-21 \leq l \leq 21$, число измеренных рефлексов 69659, число независимых рефлексов 12413, $R_{\text{int}} = 0,0561$, $GOOF = 1,068$, число параметров 700, $R_1 = 0,0461$, $wR_2 = 0,1177$; **4**, пространственная группа триклинная *P*-1, $a = 10,305(4)$, $b = 15,152(10)$, $c = 15,980(6)$ Å, $\alpha = 86,258(19)^\circ$, $\beta = 71,792(13)^\circ$, $\gamma = 86,40(2)^\circ$, $V = 2363(2)$ Å³, $Z = 2$, $\rho_{\text{выч}} = 1,574$ г/см³, $\mu = 1,238$ мм⁻¹, $F(000) = 1092,0$, размер кристалла $0,36 \times 0,2 \times 0,15$ мм, диапазон сбора данных по 2θ , град: $5,69\text{--}56,996$, диапазон индексов $-13 \leq h \leq 13$, $-20 \leq k \leq 20$, $-21 \leq l \leq 21$, число измеренных рефлексов 95211, число независимых рефлексов 11657, $R_{\text{int}} = 0,0597$, $GOOF = 1,037$, число параметров 574, $R_1 = 0,0465$, $wR_2 = 0,1139$]. По данным РСА, атомы сурьмы в молекулах **1–4** имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомами кислорода карбоксилатных групп и мостиковыми атомами кислорода в аксиальных положениях; в экваториальной плоскости располагаются арильные заместители. В кристалле **1** присутствуют два типа кристаллографически независимых молекул. Аксиальные углы OSbO составляют $177,18(19)\text{--}179,11(18)^\circ$ в **1**, $172,05(9)$, $174,10(10)^\circ$ в **2**, $174,76(16)$, $177,01(14)^\circ$ в **3**, $172,15(12)$, $178,31(13)^\circ$ в **4**. Углы Sb–O–Sb в двух мостиковых молекулах **1** составляют $142,8(2)^\circ$ и $179,999(1)^\circ$, аналогичные углы в **2**, **3**, **4** равны $143,63(13)$, $158,6(2)$, $143,91(17)^\circ$ соответственно. Длины связей Sb–O_{мост} [$1,9336(10)\text{--}1,965(4)$ Å] значительно короче расстояний Sb–O_{терм} [$2,207(7)\text{--}2,255(5)$ Å], которые, в свою очередь, длиннее связей Sb–C [$2,045(6)\text{--}2,115(6)$ Å]. В молекулах **1** наблюдаются внутримолекулярные контакты между атомами сурьмы и атомами кислорода карбонильных групп (расстояния Sb \cdots O=C составляют $3,330\text{--}3,463$ Å). Подобные контакты в **2**, **3**, **4** равны $3,313$ Å; $3,374$ Å, $3,424$ Å и $3,323$ Å соответственно. Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке

структурных данных (№ 2117717 (1), № 2232674 (2), № 2120417 (3), № 2170735 (4); deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Ключевые слова: окисление, *трис(мета-толил)сурьма*, *трис(пара-толил)сурьма*, *трис(3-фторфенил)сурьма*, *трет-бутилгидропероксид*, тетрафторпропионовая, перфторпропановая, кислота, дикарбоксилаты триарилсурьмы, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ

Для цитирования: Реакции окислительного присоединения триарильных соединений сурьмы с фторированными карбоновыми кислотами. Строение продуктов реакции [3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O, [4-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O и [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O / В.В. Шарутин, О.К. Шарутина, Е.В. Артемьева и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 1. С. 41–51. DOI: 10.14529/chem260105

Original article

DOI: 10.14529/chem260105

OXIDATIVE ADDITION REACTIONS OF TRIARYL ANTIMONY COMPOUNDS WITH FLUORINATED CARBOXYLIC ACIDS. STRUCTURE OF REACTION PRODUCTS

[3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O, [4-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O

V.V. Sharutin[✉], O.K. Sharutina, E.V. Artemyeva, V.V. Zubareva, S.A. Gremitskikh
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] sharutin50@mail.ru

Abstract. Reaction of triarylantimony with fluorinated carboxylic acids [CF₃(CF₂)₃C(O)OH and CHF₂CF₂C(O)OH] in the presence of *tert*-butyl hydroperoxide in ether led to triarylantimony oxo compounds [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**1**) and [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CHF₂]₂O (**2**), [(4-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**3**), [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CHF₂]₂O (**4**), the structure of which was proven by X-ray structural analysis (XRD). X-ray diffraction analysis of crystals **1–4** was performed on a D8 QUEST diffractometer from Bruker, the crystallographic characteristics of the unit cell of the compounds [**1**, triclinic space group *P*-1, *a* = 11.175(7), *b* = 19/597(9), *c* = 20.074(9) Å, α = 90.934(17)°, β = 96.79(2)°, γ = 104.38(3)°, *V* = 4224(4) Å³, *Z* = 1, ρ_{calc} = 1.571 g/cm³, μ = 1.062 mm⁻¹, *F*(000) = 1974.0; crystal size 0.22×0.09×0.05 mm, collection range data on 2θ, deg: 5.92°–54.4°, index range –14 ≤ *h* ≤ 14, –25 ≤ *k* ≤ 25, –25 ≤ *l* ≤ 25, number of measured reflections 103747, number of independent reflections 18654, *R*_{int} = 0.1127, *GOOF* = 1.004, number of parameters 1050, *R*₁ = 0.0535, *wR*₂ = 0.1265; **2**, space group triclinic *P*-1, *a* = 10.348(6), *b* = 15.131(10), *c* = 16.055(9) Å, α = 86.02(3)°, β = 71.70(2)°, γ = 86.14(2)°, *V* = 2378(2) Å³, *Z* = 2, ρ_{calc} = 1.531 g/cm³, μ = 1.210 mm⁻¹, *F*(000) = 1092.0, crystal size 0.6×0.2×0.18 mm, data collection range for 2θ, deg: 5.66–58.34, index range –14 ≤ *h* ≤ 14, –20 ≤ *k* ≤ 20, –21 ≤ *l* ≤ 21, number of measured reflections 95624, number of independent reflections 12765, *R*_{int} = 0.0470; *GOOF* = 1.053, number of parameters 574, *R*₁ = 0.0374, *wR*₂ = 0.0902; **3**, space group triclinic *P*-1, *a* = 11.761(5), *b* = 15.430(7), *c* = 16.785(11) Å, α = 101.96(3)°, β = 95.00(3)°, γ = 106.726(18)°, *V* = 2819(3) Å³, *Z* = 2, ρ_{calc} = 1.570 g/cm³, μ = 1.061 mm⁻¹, *F*(000) = 1316.0, crystal size 0.5×0.3×0.09 mm, data collection range for 2θ, deg: 5.684–54.32, index range: –15 ≤ *h* ≤ 15, –19 ≤ *k* ≤ 19, –21 ≤ *l* ≤ 21, number of measured reflections 69659, number of independent reflections 12413, *R*_{int} = 0.0561, *GOOF* = 1.068, number of parameters 700, *R*₁ = 0.0461, *wR*₂ = 0.1177; **4**, space group triclinic *P*-1, *a* = 10.305(4), *b* = 15.152(10), *c* = 15.980(6) Å, α = 86.258(19)°, β = 71.792(13)°, γ = 86.40(2)°, *V* = 2363(2) Å³, *Z* = 2, ρ_{calc} = 1.574 g/cm³, μ = 1.238 mm⁻¹, *F*(000) = 1092.0; crystal size 0.36×0.2×0.15 mm, data collection range for 2θ, deg: 5.69–56.996; index range: –13 ≤ *h* ≤ 13, –20 ≤ *k* ≤ 20, –21 ≤ *l* ≤ 21, number of measured reflections 95211, number of independent reflections 11657, *R*_{int} = 0.0597; *GOOF* = 1.037, number of parameters 574, *R*₁ = 0.0465, *wR*₂ = 0.1139]. According to the X-ray diffraction data, the antimony atoms in molecules **1–4** have a distorted trigonal-bipyramidal coordination with the oxygen atoms of the carboxylate groups and the bridging oxygen atoms in axial positions; the aryl substituents are located in the equatorial plane. Crystal **1** contains two types of crystallographically independent molecules. The OSbO axial angles are 177.18(19)–179.11(18)° in **1**, 172.05(9), 178.21(10)° in **2**, 174.76(16), 177.01(14)° in **3**, 172.15(12), 178.31(13)° in **4**. The Sb–O–Sb angles in two bridging molecules **1** are 142.8(2) and 179.999(1)°, similar

angles in **2**, **3**, **4** are 143.63(13), 158.6(2), 143.91(17)° respectively. The Sb–O_{bridge} bond lengths [1.9336(10)–1.965(4) Å] are significantly shorter than the Sb–O_{term} distances [2.207(7)–2.255(5) Å], which, in turn, are longer than the Sb–C bonds [2.045(6)–2.115(6) Å]. In molecules **1**, intramolecular contacts are observed between the antimony atoms and the oxygen atoms of the carbonyl groups (the Sb...O=C distances are 3.330–3.463 Å). Similar contacts in **2**, **3**, **4** are equal to 3.313 Å; 3.374 Å, 3.424 Å, and 3.323 Å, respectively. Complete tables of atomic coordinates, bond lengths and bond angles have been deposited with the Cambridge Crystallographic Data Centre (No. 2117717 (**1**), No. 2232674 (**2**), No. 2120417 (**3**), No. 2170735 (**4**); deposit@ccdc.cam.ac.uk or http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Keywords: oxidation, *tris(meta-tolyl)antimony*, *tris(para-tolyl)antimony*, *tris(3-fluorophenyl)antimony*, *tert-butylhydroperoxide*, tetra- and pentafluoropropionic acid, triarylantimony dicarboxylates, synthesis, structure, X-ray structural analysis

For citation: Sharutin V.V., Sharutina O.K., Artemyeva E.V., Zubareva V.V., Gremitskikh S.A. Oxidative addition reactions of triaryl antimony compounds with fluorinated carboxylic acids. Structure of reaction products [3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [3-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O, [4-CH₃C₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O, [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(1):41–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260105

Введение

Практический интерес к органическим соединениям сурьмы(V) обусловлен, главным образом, широким спектром их биологической активности, и, следовательно, могут рассматриваться как потенциально полезные для применения в медицине и сельском хозяйстве.

К настоящему времени для многих сурьмаорганических соединений доказана противоопухолевая [1–10] и противопаразитарная активность (например, противолейшманиозная [11–17]), а также способность подавлять рост и размножение бактерий. В публикациях сообщается также, что эффективность того или иного соединения определяется как их типом, так и окружением атома сурьмы: природой арильных групп и характером электроотрицательных лигандов. Чаще всего на биологическую активность исследуются дикарбоксилаты триарилсурьмы и карбоксилаты тетраарилсурьмы [3, 4, 6, 8, 10–24], очевидно, как более доступные с точки зрения синтеза, так и более перспективные в смысле практического использования. Значительно меньше изучено биологическое действие биядерных арильных производных с мостиковым атомом кислорода (Ar₃SbX)₂O (X = OC(O)R) [4], что обусловлено отсутствием удобных и надежных методов их синтеза. Так, реакции окислительного присоединения, с успехом применяемые для синтеза большинства соединений (Ar₃SbX)₂O, где X – OAr', ON=CRR', OSO₂Ar', лишь иногда приводили к биядерным карбоксилатам триарилсурьмы [4, 25–27]. Однако недавно опубликованы исследования, в которых сообщается, что более десяти соединений ангидридного строения [Ar₃SbOC(O)R]₂O синтезированы из триарилсурьмы, галогенсодержащей карбоновой кислоты и окислителя в диэтиловом эфире при соотношении реагентов 1:1:1 (мольн.) [28, 29].

В продолжение изучения особенностей окислительного синтеза μ -оксобис[карбоксилатотриарилсурьмы] нами синтезированы четыре неизвестных ранее фторсодержащих арильных биядерных производных сурьмы [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**1**), [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CHF₂]₂O (**2**), [(4-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**3**), [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CF₂H]₂O (**4**), строение которых определено методом рентгеноструктурного анализа. Фторированные карбоновые кислоты были выбраны в связи с тем, что уникальные свойства атома фтора – высокая электроотрицательность, способность образовывать прочные межмолекулярные связи фтор – водород, а также повышенная липофильность и метаболическая стабильность фторорганических соединений – используются в медицинской химии для направленного синтеза компонентов лекарственных средств [30–37]. Перспективность этого направления подтверждается тем, что около 30 % современных фармацевтических препаратов содержат в своем составе, по крайней мере, один атом фтора [37–39].

Экспериментальная часть

В работе использовали фторсодержащие карбоновые кислоты производства фирмы Alfa Aesar, соединения **1–4** получали по реакции окислительного присоединения из триарилсурьмы.

Синтез [(3-МеС₆Н₄)₃СbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (1). К раствору 0,1 г (0,25 ммоль) *трис*(3-метилфенил)сурьмы и 0,13 г (0,5 ммоль) перфторпентановой кислоты в 10 мл эфира прибавили 0,033 г 70%-ного водного раствора (0,25 ммоль) *трет*-бутилгидропероксида. Выдерживали смесь 24 ч при 20 °С. По испарении растворителя получили 0,219 г (95 %) бесцветных кристаллов с т. пл. 105 °С. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3056, 1843, 1748 (C=O), 1567, 1489, 1325, 1244 (C–F), 1221, 1130 (C–O), 820, 782, 713, 652, 630, 584 (Sb–O), 543, 446 (Sb–C), 423. Найдено, %: С 46,57; Н 3,24. С₅₂Н₄₂F₁₈O₅Sb₂. Вычислено, %: С 46,83; Н 3,15.

Синтез [(3-МеС₆Н₄)₃СbOC(O)CF₂CF₂H]₂O (2). К раствору 0,1 г (0,25 ммоль) *трис*(3-метилфенил)сурьмы и 0,038 г (0,25 ммоль) 3Н-тетрафторпропионовой кислоты в 10 мл эфира прибавили 0,028 г 30%-ного водного раствора (0,25 ммоль) пероксида водорода. Выдерживали смесь 24 ч при 20 °С. Получили 0,136 г (99 %) кристаллов **2** с т.пл. 165 °С. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3078, 1905, 1695 (C=O), 1670, 1468, 1241 (C–F), 1145 (C–O), 1069, 986, 857, 780, 746, 688, 558 (Sb–O), 500, 463 (Sb–C), 436. Найдено, %: С 52,51; Н 4,10. С₄₈Н₄₄O₅F₈Sb₂. Вычислено, %: С 52,54; Н 4,01.

Синтез [(4-МеС₆Н₄)₃СbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (3). К раствору 0,1 г (0,25 ммоль) *трис*(4-метилфенил)сурьмы сурьмы и 0,066 г (0,25 ммоль) перфторпентановой кислоты в 10 мл эфира прибавили 0,028 г 30%-ного водного раствора (0,25 ммоль) пероксида водорода. Выдерживали смесь 24 ч при 20 °С. Удаляли растворитель, остаток перекристаллизовывали из смеси ацетонитрил-изопропиловый спирт. Получили 0,160 г (96 %) желтоватых кристаллов **3** с т. пл. 190 °С. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3057, 1876, 1703 (C=O), 1545, 1496, 1396, 1375, 1334, 1245 (C–F), 1147 (C–O), 987, 914, 800, 763, 711, 584 (Sb–O), 446 (Sb–C). Найдено, %: С 46,72; Н 3,27. С₅₂Н₄₂F₁₈O₅Sb₂. Вычислено, %: С 46,83; Н 3,15.

Синтез [(3-FC₆Н₄)₃СbOC(O)CF₂CF₂H]₂O (4). К смеси 0,1 г (0,24 ммоль) *трис*(3-фторфенил)сурьмы в 20 мл диэтилового эфира добавили 0,072 г (0,24 ммоль) 3Н-тетрафторпропионовой кислоты, затем прибавили 0,031 г 70%-ного водного раствора (0,24 ммоль) *трет*-бутилгидропероксида. Получили 0,145 г (87 %) прозрачных кристаллов **4** с т. пл 192 °С. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3094, 3067, 3030, 3003 (C–H), 1706 (C=O), 1362, 1340, 1303, 1267, 1244, 1216, 1162, 1141, 1127, 1107, 1068 (C–F), 786 (Sb–O μ), 438 (C–Sb). Найдено, %: С 44,58; Н 2,39. С₄₂Н₂₆F₁₄O₅Sb₂. Вычислено, %: С 44,99; Н 2,32.

Рентгеноструктурное исследование кристаллов **1–4** проведено на дифрактометре D8 Quest фирмы Bruker (MoK α -излучение, $\lambda = 0,71073$ Å, графитовый монохроматор) при 293(2) К. Сбор, редактирование данных и уточнение параметров элементарной ячейки, а также учет поглощения проведены по программам SMART и SAINT-Plus [40]. Все расчеты по определению и уточнению структур выполнены по программам SHELXL/PC [41] и OLEX2 [42]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур **1–4** 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 (№ 2159775 (**1**), № 2170735 (**2**), 2117717 (**3**), № 2120417 (**4**); deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>). Основные кристаллографические данные и результаты уточнения структур **1–4** приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблица 1

Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур **1–4**

Параметр	1	2	3	4
Стехиометрическая формула	C ₅₂ H ₄₂ F ₁₈ O ₅ Sb ₂	C ₄₈ H ₄₄ O ₅ F ₈ Sb ₂	C ₅₂ H ₄₂ F ₁₈ O ₅ Sb ₂	C ₄₂ H ₂₆ F ₁₄ O ₅ Sb ₂
<i>M</i>	1332,38	1096,33	1332,38	1120,13
Сингония	Триклинная	Триклинная	Триклинная	Триклинная
Пространственная группа	<i>P</i> -1	<i>P</i> -1	<i>P</i> -1	<i>P</i> -1
<i>a</i> , Å	11,175(7)	10,348(6)	11,761(5)	10,305(4)
<i>b</i> , Å	19,597(9)	15,131(10)	15,430(7)	15,152(10)
<i>c</i> , Å	20,074(9)	16,055(9)	16,785(11)	15,980(6)
α , град.	90,934(17)	86,02(3)	101,96(3)	86,258(19)
β , град.	96,79(2)	71,70(2)	95,00(3)	71,792(13)
γ , град.	104,38(3)	86,14(2)	106,726(18)	86,40(2)
<i>V</i> , Å ³	4224(4)	2378(2)	2819(3)	2363(2)

Окончание табл. 1

Параметр	1	2	3	4
Z	1	2	2	2
$\rho_{\text{выч}}, \text{г/см}^3$	1,571	1,531	1,570	1,574
$\mu, \text{мм}^{-1}$	1,062	1,210	1,061	1,238
F(000)	1974,0	1092,0	1316,0	1092,0
Размер кристалла, мм	0,22×0,09×0,05	0,6×0,2×0,18	0,5×0,3×0,09	0,36×0,2×0,15
Диапазон сбора данных по 2 θ , град.	5,92–54,4	5,66–58,34	5,684–54,32	5,69–56,996
Диапазон индексов	$-14 \leq h \leq 14,$ $-25 \leq k \leq 25,$ $-25 \leq l \leq 25$	$-14 \leq h \leq 14,$ $-20 \leq k \leq 20,$ $-21 \leq l \leq 21$	$-15 \leq h \leq 15,$ $-19 \leq k \leq 19,$ $-21 \leq l \leq 21$	$-13 \leq h \leq 13,$ $-20 \leq k \leq 20,$ $-21 \leq l \leq 21$
Число измеренных рефлексов	103747	95624	69659	95211
Число независимых рефлексов	18654	12765	12413	11657
R_{int}	0,1127	0,0470	0,0561	0,0597
GOOF	1,004	1,053	1,068	1,037
Число параметров	350	574	700	574
R-факторы по $I > 2\sigma(I)$	$R_1 = 0,0535,$ $wR_2 = 0,1265$	$R_1 = 0,0374,$ $wR_2 = 0,0902$	$R_1 = 0,0461,$ $wR_2 = 0,1177$	$R_1 = 0,0465,$ $wR_2 = 0,1139$
R-факторы по всем рефлексам	$R_1 = 0,1383,$ $wR_2 = 0,1698$	$R_1 = 0,0634,$ $wR_2 = 0,1060$	$R_1 = 0,0847,$ $wR_2 = 0,1446$	$R_1 = 0,0750,$ $wR_2 = 0,1318$
Остаточная электронная плотность (max/min), e/Å ³	0,56/–0,52	1,09/–0,68	1,20/–0,67	1,08/–0,69

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структурах 1–4

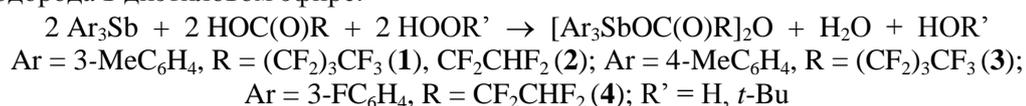
Связь	d, Å	Угол	ω , град.
1			
Sb1–O1	1,963(4)	O1–Sb1–O2	179,11(18)
Sb1–O2	2,221(5)	C11–Sb1–C1	123,7(3)
Sb1–C1	2,115(6)	C21–Sb1–C1	122,6(3)
Sb1–C11	2,109(7)	C21–Sb1–C11	112,6(3)
Sb1–C21	2,085(7)	O1–Sb2–O4	178,37(17)
Sb2–O1	1,965(4)	Sb1–O1–Sb2	142,8(2)
Sb2–O4	2,255(5)	C41–Sb2–C51	117,6(3)
Sb2–C41	2,045(6)	C41–Sb2–C31	119,4(2)
Sb2–C51	2,097(7)	C51–Sb2–C31	121,3(3)
Sb2–C31	2,106(6)	O6–Sb3–O7	177,18(19)
Sb3–O6	1,9336(10)	C71–Sb3–C61	117,9(3)
Sb3–O7	2,207(7)	C81–Sb3–C71	118,4(3)
Sb3–C71	2,094(7)	C81–Sb3–C61	122,8(3)
Sb3–C61	2,104(9)	Sb3 ¹ –O6–Sb3	179,999(1)
Sb3–C81	2,068(5)	O1–Sb1–C11	91,4(3)
Sb1…O3	3,330(7)	O1–Sb1–C21	96,5(2)
Sb2…O5	3,360(8)	O4–Sb2–C51	86,9(2)
Sb3…O8	3,483(9)	O7–Sb3–C71	83,5(3)
Преобразования симметрии: ¹ 1–X, –Y, 2–Z			
2			
Sb1–O1	1,959(2)	O1–Sb1–O2	178,21(10)
Sb1–O2	2,260(3)	C1–Sb1–C11	120,55(15)
Sb1–C1	2,108(3)	C11–Sb1–C21	124,02(15)
Sb1–C11	2,120(3)	C1–Sb1–C21	114,42(14)
Sb1–C21	2,103(4)	O1–Sb2–O4	172,05(9)
Sb2–O1	1,975(2)	C41–Sb2–C51	116,54(14)
Sb2–O4	2,215(3)	C31–Sb2–C51	123,01(15)
Sb2–C31	2,100(4)	C31–Sb2–C41	118,83(12)

Связь	<i>d</i> , Å	Угол	ω, град.
Sb2–C41	2,119(4)	Sb1–O1–Sb2	143,63(13)
Sb2–C51	2,097(4)	O1–Sb1–C11	92,42(12)
O2–C7	1,269(6)	O2–Sb1–C11	89,37(12)
O4–C10	1,267(5)	O1–Sb2–C31	93,07(11)
Sb1…O3	3,820(8)	O4–Sb2–C31	86,87(12)
Sb2…O5	3,313(5)		
3			
Sb1–O1	1,955(3)	O1–Sb1–O2	177,01(14)
Sb1–O2	2,250(4)	C1–Sb1–C21	116,73(19)
Sb1–C1	2,093(5)	C1–Sb1–C11	123,3(2)
Sb1–C21	2,106(5)	C11–Sb1–C21	118,60(18)
Sb1–C11	2,096(5)	O1–Sb2–O4	174,76(16)
Sb2–O1	1,956(3)	C51–Sb2–C61	113,2(2)
Sb2–O4	2,264(4)	C41–Sb2–C61	121,5(2)
Sb2–C61	2,107(5)	C41–Sb2–C51	123,4(2)
Sb2–C51	2,104(5)	Sb1–O1–Sb2	158,6(2)
Sb2–C41	2,099(5)	C1–Sb1–O2	87,20(19)
Sb1…O3	3,424(8)	O1–Sb1–C11	94,53(18)
Sb2…O5	3,374(7)	C61–Sb2–O4	81,34(17)
4			
Sb1–O1	1,962(3)	O1–Sb1–O2	172,15(12)
Sb1–O2	2,264(3)	C1–Sb1–C11	118,57(16)
Sb1–C1	2,098(4)	C21–Sb1–C1	123,38(15)
Sb1–C21	2,081(3)	C21–Sb1–C11	116,40(16)
Sb1–C11	2,106(4)	O1–Sb2–O4	178,31(13)
Sb2–O4	2,213(3)	C31–Sb2–C41	120,4(2)
Sb2–O1	1,978(3)	C51–Sb2–C31	114,48(19)
Sb2–C31	2,096(5)	C51–Sb2–C41	124,07(19)
Sb2–C41	2,104(5)	Sb1–O1–Sb2	143,91(17)
Sb2–C51	2,086(5)	C31–Sb2–O4	81,80(15)
Sb1…O3	3,806(9)	O1–Sb2–C31	97,30(15)
Sb1…O5	3,323(6)	O1–Sb1–C21	97,88(14)

Обсуждение результатов

В отличие от реакций триарилсурьмы с большинством карбоновых кислот в присутствии окислителя, которые независимо от мольного соотношения реагентов, как правило, приводят к дикарбоксилатам триарилсурьмы, реакции окислительного присоединения триарилсурьмы с фторированными кислотами при соблюдении стехиометрического соотношения реагирующих веществ эффективны для синтеза *μ*-оксо-*бис*[карбоксилатотриарилсурьмы] [28, 29].

Синтезы соединений **1–4** нами осуществлялись по методике, описанной в [28, 29], из эквимолярных количеств триарилсурьмы, карбоновой кислоты и *трет*-бутилгидропероксида или пероксида водорода в диэтиловом эфире.



Выходы соединений **1–4** составили 86–99 %, что подтверждает результативность используемой методики. Нерастворимые в алифатических углеводородах бесцветные кристаллы полученных соединений имеют четкие температуры плавления, растворяются в ароматических углеводородах и полярных органических растворителях.

Строение соединений **1–4** установлено методом рентгеноструктурного анализа. Атомы сурьмы в молекулах имеют мало искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомами кислорода карбоксилатных групп и мостиковыми атомами кислорода в аксиальных положениях; в экваториальных плоскостях располагаются арильные заместители (рис. 1–4).

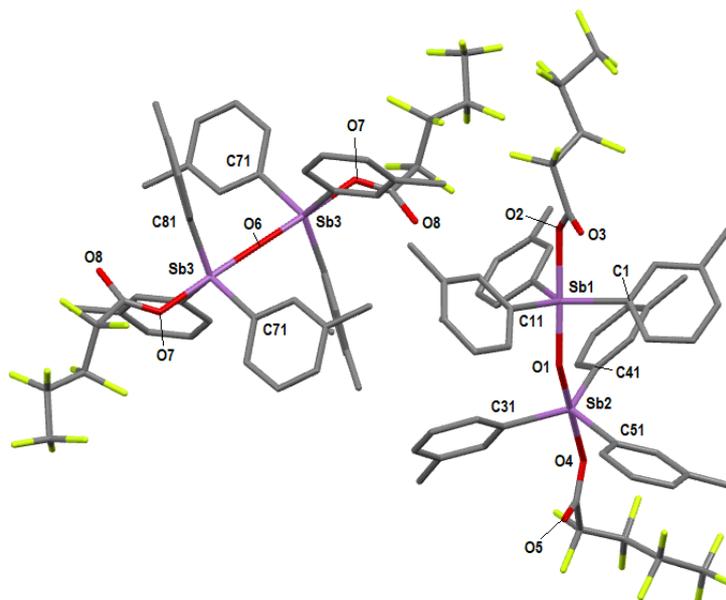


Рис. 1. Общий вид соединения 1

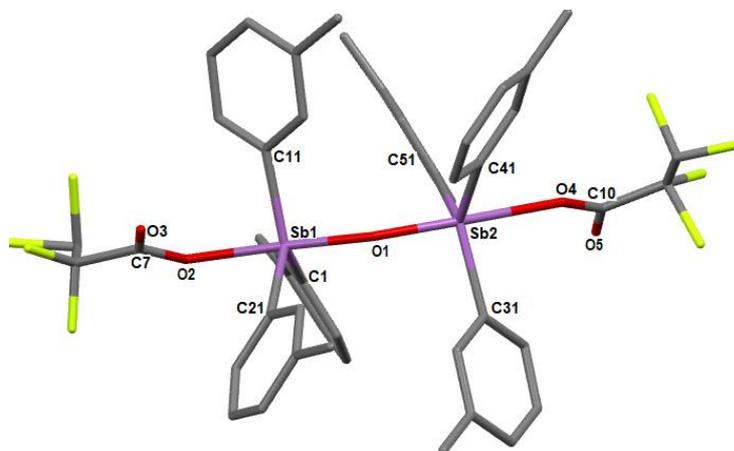


Рис. 2. Общий вид соединения 2

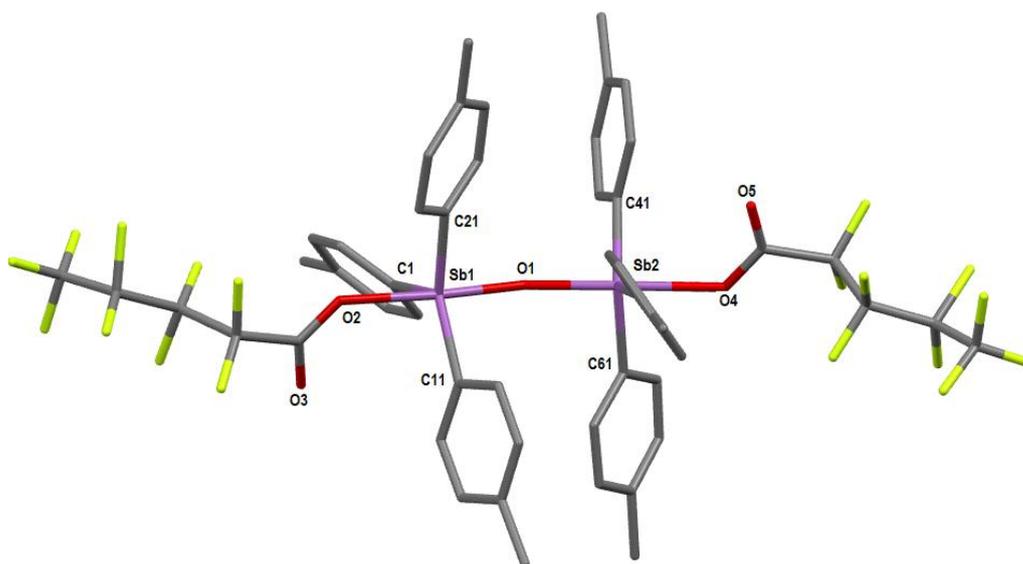


Рис. 3. Общий вид соединения 3

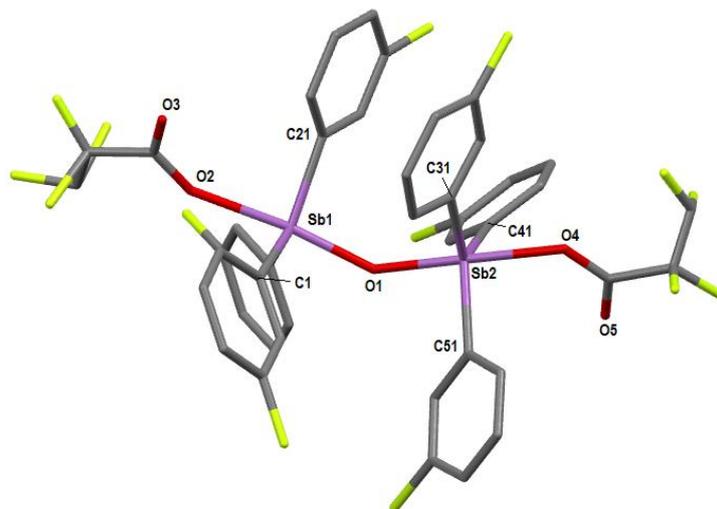


Рис. 4. Общий вид соединения 4

Кристалл **1** включает два типа кристаллографически независимых молекул *a* и *b*, геометрические параметры которых наиболее заметно отличаются строением центрального фрагмента: в *a* угол SbOSb равен $142,8(2)^\circ$, в *b* угол SbOSb – линейный, при этом молекула centrosymmetric. В молекулах **2–4** указанные углы составляют $143,63(13)^\circ$, $158,6(2)^\circ$, $143,91(17)^\circ$.

В молекулах **1–4** арильные кольца относительно линии Sb–Sb находятся в заторможенной конформации, а плоскости арильных колец расположены относительно экваториальной плоскости в пропеллерной конформации, которая считается более энергетически выгодной. Значения аксиальных углов $O_{\text{мост}}\text{Sb}O_{\text{терм}}$ в молекулах близки к теоретическому значению [$179,11(18)^\circ$, $178,37(17)^\circ$, $177,18(19)^\circ$ Å в **1a** и **b**; $178,21(10)^\circ$, $172,05(9)^\circ$ Å; $177,01(14)$, $174,76(16)$ Å; $172,15(12)$, $178,31(13)$ Å в **2**, **3** и **4** соответственно], суммы экваториальных углов примерно равны 360° [$358,9(3)^\circ$, $358,3(3)^\circ$, $359,1(3)^\circ$; $358,99(15)^\circ$, $358,38(14)^\circ$; $358,6(2)^\circ$, $358,1(2)^\circ$; $358,35(16)^\circ$, $358,95(19)^\circ$ в **1a,b**, **2**, **3** и **4** соответственно]. Атомы Sb1 и Sb2 выходят из соответствующих экваториальных плоскостей к мостиковому атому кислорода в молекуле **1a** на $0,126$ и $0,160$ Å, в молекуле **1b** на $0,113$ Å, в молекуле **2** – на $0,122$ и $0,155$ Å, в молекуле **3** – на $0,142$ и $0,171$ Å, в молекуле **4** – на $0,156$ и $0,122$ Å. Длины экваториальных связей Sb–C изменяются в интервалах $2,045(6)$ – $2,115(6)$ Å (**1**), $2,097(4)$ – $2,120(3)$ Å (**2**), $2,093(5)$ – $2,107(5)$ Å (**3**), $2,081(3)$ – $2,106(4)$ Å (**4**). Расстояния Sb– $O_{\text{терм}}$, как и предполагалось, несколько превышающие сумму ковалентных радиусов атомов сурьмы и кислорода ($2,07$ Å [43]), длиннее экваториальных связей и составляют $2,221(5)$, $2,255(5)$ Å **1a**, $2,207(7)$ Å **1b**, $2,215(3)$, $2,260(3)$ Å **2**, $2,250(4)$, $2,264(4)$ Å **3**, $2,264(3)$, $2,213(3)$ Å **4**. Кроме того, в молекулах **1–4** присутствуют внутримолекулярные контакты атомов металла с карбонильными атомами кислорода [$\text{Sb}\cdots\text{O}=\text{C}$ $3,330(6)$, $3,360(5)$; $3,46(1)$ Å; $3,313(5)$, $3,820(4)$ Å; $3,424(7)$, $3,374(5)$ Å; $3,806(5)$, $3,323(7)$ Å], которые свидетельствуют о большой степени асимметричности координации карбоксилатной группы на атом металла. Длины связей Sb– $O_{\text{мост}}$ ($1,963(4)$, $1,965(3)$ и $1,934(1)$ Å; $1,959(2)$, $1,975(2)$ Å; $1,955(3)$, $1,956(3)$ Å; $1,962(3)$, $1,978(3)$ Å в **1a** и **b** – **4** соответственно) меньше, чем расстояния Sb– $O_{\text{терм}}$.

В молекулах **1a** и **1b**, которые отличаются значением угла в центральном фрагменте, длины связей Sb–C [$2,093(6)$ и $2,089(6)$ Å] практически равны, но в **1a** с угловым строением центрального фрагмента расстояния Sb– $O_{\text{мост}}$ ($1,963(4)$, $1,965(4)$ Å) и Sb– $O_{\text{терм}}$ ($2,221(5)$, $2,255(5)$ Å) больше, чем в молекуле **1b** [$1,934(1)$ и $2,207(7)$ Å соответственно], где угол SbOSb равен 180° .

При анализе геометрических параметров молекул **2** и **4**, которые отличаются арильными группами, но содержат одинаковые карбоксилатные лиганды, обнаружено, что значения валентных углов, характеризующие координационные узлы атомов сурьмы, и углов SbOSb, практически не отличаются, средние значения связей Sb– $O_{\text{терм}}$ [$2,237(3)$ и $2,238(3)$ Å соответственно] и Sb– $O_{\text{мост}}$ [$1,967(2)$ и $1,970(3)$ Å соответственно] совпадают, однако в **2** связи Sb–C [среднее значение $2,108(4)$ Å] несколько длиннее, чем в **4** [$2,095(4)$ Å].

Соединения **1** и **3** являются изомерами и отличаются только положением метильных групп в арильных кольцах. В молекулах **1a** и **3** с одинаковым строением центральных фрагментов [углы SbOSb 142,8(2)° и 143,9(2)° соответственно], аксиальные и экваториальные углы, углы между экваториальными и аксиальными связями, характеризующие координационные полиэдры атомов сурьмы, имеют близкие значения. Связи Sb–C [средние значения 2,093(7) Å и 2,101(5) Å в **1a** и **3**] в *мета*-толильном и *пара*-толильном производных практически равны. В *пара*-толильном производном **3** среднее значение связей Sb–O_{терм} (2,257(3) Å) больше, а связей Sb–O_{мост} [1,955(3) Å] меньше, чем в *мета*-толильном производном **1a** [2,238(4) Å и (1,964(4) Å соответственно].

Формирование кристаллической структуры **1–4**, ожидаемо, обеспечивается множеством слабых межмолекулярных водородных связей с участием атомов фтора и кислорода типа C–H...O, C–H...F.

Выводы

Подтверждена эффективность окислительного метода для синтеза μ -оксобис[карбоксилатотриарилсурьмы] при использовании фторированных карбоновых кислот. Синтезированы с высокими выходами четыре новых биядерных соединений триарилсурьмы [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**1**) и [(3-MeC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CHF₂]₂O (**2**), [(4-MeC₆H₄)₃SbOC(O)(CF₂)₃CF₃]₂O (**3**) и [(3-FC₆H₄)₃SbOC(O)CF₂CHF₂]₂O (**4**) с различными арильными группами. По данным РСА, валентные углы, характеризующие координационные полиэдры атомов сурьмы, в молекулах **1–4** мало отличаются. Наличие двух типов кристаллографически независимых молекул с различным строением центрального фрагмента в кристалле **1** позволяет предположить, что значение угла SbOSb определяется условиями кристаллизации и особенностью кристаллической упаковки. Установлено, что в молекулах с линейным фрагментом SbOSb связи Sb–O_{терм} и Sb–O_{мост} короче, чем в аналогичной молекуле с угловым фрагментом. В изомерах **1** и **3** положение метильной группы в ароматическом кольце в большей степени влияет на связи Sb–O, чем на связи Sb–C. В молекулах **2** и **4** с одинаковыми карбоксилатными лигандами, но с арильными заместителями, содержащими в *мета*-положении электронодонорную группу (CH₃) или электроноакцепторную группу (F), при одинаковых значениях связей Sb–O, среднее значение связей Sb–C несколько больше в **2**. Для интерпретации полученных результатов и выявления закономерностей необходимо расширить ряд соединений данного класса.

Список источников

1. Tiekink E. // Crit. Rev. Oncol. Hematol. 2002. V. 42, No. 3. P. 217. DOI:10.1016/S1040-8428(01)00217-7.
2. Wang F., Yin H., Yue C. et al. // J. Organomet. Chem. 2013. V.738, No. 15. P. 35. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2013.03.046
3. Islam A., Rodrigues B.L., Marzano I.M. et al. // Eur. J. Med. Chem. 2016. V.109, No. 15. P. 254. doi.org/10.1016/j.ejmech.2016.01.003
4. Polychronis N.M., Banti C.N., Raptopoulou C.P. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2019. V. 489, No. 1. P. 39. DOI: 10.1016/j.ica.2019.02.004
5. Gkaniatsou E.I., Banti C.N., Kourkoumelis N. et al. // J. Inorg. Biochem. 2015. V. 150. P. 108. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2015.04.014
6. Yu L., Ma Y., Liu R. et al. // Polyhedron. 2004. V.23. P. 823. DOI: 10.1016/j.poly.2003.12.002
7. Wang G., Xiao J., Yu L. et al. // J. Organomet. Chem. 2004. V. 689. P. 1631. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2004.02.015.
8. Ma Y., Li J., Xuan Z. et al. // J. Organomet. Chem. 2001. V. 620. P. 235. DOI: 10.1016/S0022-328X(00)00799-3
9. Wang G., Lu Y., Xiao J. et al. // J. Organomet. Chem. 2005. V. 690. P. 151. doi.org/10.1016/j.jorganchem.2004.09.002
10. Geng H., Hong M., Yang Y. et al. // J. Coord. Chem. 2015. V. 68, No. 15. P. 2938. DOI:10.1080/00958972.2015.1060322
11. Ali M.I., Rauf M.K., Badshah A. et al. // Dalton Trans. 2013. V. 42, No. 48. P. 16733. DOI: 10.1039/c3dt51382c

12. *Mushtaq R., Rauf M, Bolte M. et al.* // Appl. Organomet. Chem. 2016. V. 30. P. 465. DOI: 10.1002/aoc.3456
13. *Mushtaq R, Rauf MK, Bolte M. et al.* // Appl. Organomet. Chem. 2017. V. 31. P. e3606. DOI:10.1002/aoc.3606
14. *Duffin R.N., Blair V.L., Kedzierskib L. et al.* // Dalton Trans. 2018. V. 47, No. 3. P. 971. DOI: 10.1039/c7dt04171c
15. *Artem'eva E.V., Efremov A.N., Sharutina O.K. et al.* // J. Inorg. Biochem. 2022. V. 234. P. 111864. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2022.111864
16. *Артемяева Е.В., Шарутина О.К., Шарутин В.В.* Фторсодержащие дикарбоксилаты триарилсурьмы(V), обладающие противолейшманиозной активностью. Патент на изобретение RU 2816109 C1, 26.03.2024. Заявка № 2023113561 от 25.05.2023.
17. *Artem'eva E.V., Efremov A.N., Sharutina O.K. et al.* // Polyhedron. 2022. V. 213. P. 115627. DOI: 10.1016/j.poly.2021.115627
18. *Singhal K., Rastogi R., Raj P.* // Indian J. Chem. 1987. V. 26A. P. 146.
19. *Li J.S., Ma Y.Q., Cui J.R. et al.* // Appl. Organomet. Chem. 2001. V. 15, No. 7. P. 639. DOI: 10.1002/aoc.200
20. *Yu L., Ma Y.Q., Wang G.C. et al.* // Heteroat. Chem. 2004. V. 15, No. 1. P. 32. DOI: 10.1002/hc.10208
21. *Saleem L., Altaf A.A., Badshah A. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 474. P. 148. DOI: 10.1016/j.ica.2018.01.036
22. *Liu R.C., Ma Y.Q., Yu L. et al.* // Appl. Organomet. Chem. 2003. V. 17, No. 9. P. 662. DOI: 10.1002/aoc.491
23. *Li J.S., Liu R.C., Chi X.B. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2004. V. 357, No. 7. P. 2176. DOI: 10.1016/j.ica.2003.12.012
24. *Iftikhar T., Rauf M.K., Sarwar S. et al.* // J. Organomet. Chem. 2017. V. 851. P. 89. DOI: 10.1016/j.jorganchem.2017.09.002
25. *Пупкова Ю.О., Шарутин В.В., Шарутина О.К. и др.* // Коорд. химия, 2022. Т 48, № 8. С. 506. DOI: 10.31857/S0132344X22080059
26. *Шарутин В.В., Пакузина А.П., Шарутина О.К. и др.* // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. Т. 3, № 11. С. 13. EDN: GZCCWA
27. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчуринов В.С.* // Коорд. химия. 2014. Т. 40, № 2. С. 108. DOI: 10.7868/S0132344X14020108
28. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др.* // Журн. общей химии. 2019. Т. 89, № 1. С. 89. DOI: 10.1134/S0044460X19010141
29. *Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др.* // Журн. неорг. химии. 2019. Т. 64, № 10. С. 1051. DOI: 10.1134/S0044457X1910013134.
30. *Evans T.A., Seddon K.R.* // Chemical Communications. 1997. No. 21. P. 2023. DOI: 10.1039/A705239A
31. *Meyer E.A., Castellano R.K., Diederich F.* // Angewandte Chemie International Edition. 2003. V. 42, No. 11. P. 1210. DOI: 10.1002/anie.200390319
32. *Bégué J.-P., Bonnet-Delpon D.* // J. Fluorine Chem. 2006. V. 127, No. 8. P. 992. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2006.05.006
33. *Isanbor C., O'Hagan D.* // J. Fluorine Chem. 2006. V. 127, No. 3. P. 303. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2006.01.011
34. *Kirk K.L.* // J. Fluorine Chem. 2006. V. 127, No. 8. P. 1013. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2006.06.007
35. *Hagmann W.K.* // Journal of Medicinal Chemistry. 2008. V. 51, No. 15. P. 4359. DOI: 10.1021/jm800219f
36. *O'Hagan D.* // J. Fluorine Chem. 2010. V. 131, No. 11. P. 1071. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2010.03.003
37. *Han J., Remete A. M., Dobson L. S. et al.* // J. Fluorine Chem.. 2020. V. 239. No. 109639. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2020.109639
38. *Zhou Y., Wang J., Gu Z. et al.* // Chemical Reviews. 2016. V. 116, No. 2. P. 422. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00392

39. Han J., Kiss L., Mei H. et al. // Chemical Reviews. 2021. V. 121, No. 8. P. 4678. DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c01263?ref=pdf

40. Bruker. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.

41. Bruker. SHELXTL/PC. Versions 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures from Diffraction Data. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.

42. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726

43. Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. V. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J

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

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

Зубарева Валерия Витальевна – студент группы ЕТ-241, кафедра теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: valerochka.zubareva@bk.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 15 августа 2025 г.

The article was submitted 15 August 2025.