

ОБРАЗОВАНИЕ ОНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУРЬМЫ В РЕАКЦИЯХ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

В.В. Шарутин[✉], В.С. Сенчурин, А.К. Ращупкина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

[✉]sharutin50@mail.ru

Аннотация. Взаимодействием *трис*(3-трифторметилфенил)сурьмы с 2,4-диметилбензолсульфоновой кислотой в присутствии *трет*-бутилгидропероксида (мольное соотношение 1:2:1) в эфире получен с выходом 34 % 2,4-диметилбензолсульфонат *тетракис*(3-трифторметилфенил)сурьмы (**1**), который был идентифицирован методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. РСА проводили на дифрактометре D8 QUEST фирмы Bruker, кристаллографические характеристики элементарной ячейки соединения следующие: пространственная группа моноклинная $P2_1/c$, $a = 12,160(8)$, $b = 14,561(11)$, $c = 21,755(14)$ Å, $\beta = 97,333(18)$, $V = 3821(5)$ Å³, $Z = 4$, $\rho_{\text{выч}} = 1,543$ г/см³, $\mu = 0,869$ мм⁻¹, $F(000) = 1760$, размер кристалла 0,56×0,15×0,1 мм, диапазон сбора данных по 2θ , град: 6,06–49,28, диапазон индексов $-14 \leq h \leq 12$, $-17 \leq k \leq 17$, $-25 \leq l \leq 25$, число измеренных рефлексов 23742, число независимых рефлексов 6398, $R_{\text{int}} = 0,0828$, $GOOF = 1,017$, число параметров 480, $R_1 = 0,0568$, $wR_2 = 0,1414$. По данным РСА, атомы сурьмы в соединении имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомом кислорода сульфонатной группы в аксиальном положении. Аксиальный угол CSbO составляет 174,08(18)°. Сумма экваториальных углов CSbC равна 352,8(2)°, расстояния Sb–C_{экв} (2,121(6), 2,121(6), 2,122(6) Å) значительно короче длины связи Sb–C_{акс} (2,129(7) Å) и Sb–O (2,463(4) Å). Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджской базе структурных данных (№ 2417629; deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Ключевые слова: *трис*(3-трифторметилфенил)сурьма, 2,4-диметилбензолсульфоновая кислота, *трет*-бутилгидропероксид, 2,4-диметилбензолсульфонат *тетракис*(3-трифторметилфенил)сурьмы, синтез, строение

Для цитирования: Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Ращупкина А.К. Образование ониеовых соединений сурьмы в реакциях окислительного присоединения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 2. С. 109–115. DOI: 10.14529/chem250208

Original article
DOI: 10.14529/chem250208

FORMATION OF ONIUM COMPOUNDS OF ANTIMONY IN OXIDATIVE ADDITION REACTIONS

V.V. Sharutin[✉], V.S. Sehchurin, A.K. Rashchupkina

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉]sharutin50@mail.ru

Abstract. The interaction of *tris*(3-trifluoromethylphenyl)antimony with 2,4-dimethylbenzenesulfonic acid in the presence of *tert*-butyl hydroperoxide (molar ratio 1:2:1) in ether yielded 12% *tetrakis*(3-trifluoromethylphenyl)antimony 2,4-dimethylbenzenesulfonate (**1**), which was identified by IR spectroscopy and X-ray structural analysis. The X-ray diffraction analysis was performed on a Bruker D8 QUEST diffractometer. The crystallographic characteristics of the unit cell of the compound are as follows: monoclinic space group $P2_1/c$, $a = 12.160(8)$, $b = 14.561(11)$, $c = 21.755(14)$ Å, $\beta = 97.333(18)$, $V = 3821(5)$ Å³, $Z = 4$, $\rho_{\text{calc}} = 1.543$ g/cm³, $\mu = 0.869$ mm⁻¹, $F(000) = 1760$, crystal size 0.56×0.15×0.1 mm, data collection range for 2θ , deg: 6.06–49.28, index range $-14 \leq h \leq 12$, $-17 \leq k \leq 17$,

$-25 \leq l \leq 25$, the number of measured reflections is 23742, the number of independent reflections is 6398, $R_{\text{int}} = 0.0828$, $GOOF = 1.017$, the number of parameters is 480, $R_1 = 0.0568$, $wR_2 = 0.1414$. According to the X-ray diffraction data, the antimony atoms in the compound have a distorted trigonal bipyramidal coordination with the oxygen atom of the sulfonate group in axial position. The CSbO axial angle is $174.08(18)^\circ$. The sum of the CSbC equatorial angles is $352.8(2)^\circ$, the Sb–C_{eq} distances [2.121(6), 2.121(6), 2.122(6) Å] are significantly shorter than the Sb–C_{ax} [2.129(7) Å] and Sb–O [2.463(4) Å] bond lengths. Complete tables of atomic coordinates, bond lengths, and bond angles have been deposited with the Cambridge Crystallographic Data Center (No. 2417629; deposit@ccdc.cam.ac.uk or http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Keywords: *tris*(3-трифторометилфенил)антимон, 2,4-диметилбензолсульфоновая кислота, *tert*-бутил гидропероксид, 2,4-диметилбензолсульфонат *tetrakis*(3-трифторометилфенил)антимон, синтез, структура

For citation: Sharutin V.V., Sehchurin V.S., Rashchupkina A.K. Formation of onium compounds of antimony in oxidative addition reactions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(2):109–115. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250208

Введение

Дикарбоксилаты триарилсурьмы, получаемые, как правило, по реакции окислительного присоединения из триарилсурьмы, карбоновой кислоты и гидропероксида *трет*-бутила (мольное соотношение 1:2:1 соответственно), являются хорошо изученным с точки зрения строения классом органических соединений сурьмы [1]. Среди структурно охарактеризованных соединений сурьмы общей формулы $\text{Ar}_3\text{Sb}[\text{OC}(\text{O})\text{R}]_2$ преобладают фенильные производные с карбоксилатными лигандами разнообразного строения [2]. Анализ структурных данных дикарбоксилатов триарилсурьмы показал, что искажение тригонально-бипирамидальной конфигурации их молекул в значительной степени определяется как природой карбоксилатных остатков, так и заместителей в арильных группах [3–20]. Взаимодействие эквимольных количеств исходных реагентов по этой схеме приводит к образованию мостиковых биядерных соединений сурьмы $[\text{Ar}_3\text{SbOC}(\text{O})\text{R}]_2\text{O}$, в которых атомы сурьмы также имеют тригонально-бипирамидальное строение с атомами кислорода в аксиальных положениях [18, 19]. К третьему классу наиболее известных арильных соединений пентавалентной сурьмы с ацильными лигандами относят монокарбоксилаты тетраарилсурьмы, которые синтезируют из пентаарилсурьмы и карбоновой кислоты [18, 19]. Отметим антилейшманиозную активность фторированных карбоксилатов, более всего проявляющаяся для производных с четырьмя *пара*-толильными лигандами при атоме сурьмы $p\text{-Tol}_4\text{SbOC}(\text{O})\text{R}^{\text{F}}$ [21], по сравнению с соединениями $p\text{-Tol}_3\text{Sb}[\text{OC}(\text{O})\text{R}^{\text{F}}]_2$ [22]. К эффективному методу синтеза карбоксилатов тетраарилсурьмы относят также и реакцию перераспределения лигандов, когда целевой продукт получают из дикарбоксилатов триарилсурьмы и пентаарилсурьмы [18, 19, 23, 24].

С целью изучения влияния природы кислоты на строение продукта реакции окислительного присоединения из *трис*(3-трифторметилфенил)сурьмы, *трет*-бутилгидропероксида и 2,4-диметилбензолсульфоновой кислоты, содержащей в ароматическом ядре два электроположительных метильных заместителя, которые могли бы обеспечить необычное протекание реакции окислительного присоединения, изучено взаимодействие указанных реагентов в растворе эфира при мольном соотношении 1:1:2 соответственно.

Экспериментальная часть

Исходный реагент – *трис*(3-трифторметилфенил)сурьму – получали по известной методике [25]. Синтез 2,4-диметилбензолсульфоната *тетракис*(3-трифторметилфенил)сурьмы (**1**) осуществляли путем прибавления к смеси *трис*(3-трифторметилфенил)сурьмы и кислоты в эфире 70%-ного водного раствора *трет*-бутилгидропероксида (мольное соотношение 1:2:1 соответственно). После медленного испарения эфира твердый остаток перекристаллизовывали из смеси бензол/*изо*-октан (5:1 объемн.). Получили бесцветные кристаллы, структура которых установлена методом рентгеноструктурного анализа (РСА).

$[(3\text{-CF}_3\text{C}_6\text{H}_4)_4\text{Sb}][\text{OSO}_2\text{C}_6\text{H}_3\text{Me}_2\text{-2,4}]$. Выход 34 %, т. пл. 87 °С. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3069, 3053, 2959, 2930, 1601, 1420, 1327, 1277, 1252, 1171, 1128, 1099, 1080, 1065, 999, 802, 696, 679, 646, 565, 501, 428. Найдено, %: С 48,60; Н 2,88. $\text{C}_{36}\text{H}_{25}\text{F}_{12}\text{O}_3\text{SSb}$. Вычислено, %: С 48,68; Н 2,82.

ИК-спектр соединения **1** записывали на ИК-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S в таблетке KBr в области 4000–400 см^{-1} .

РСА кристалла **1** проведен на дифрактометре D8 Quest фирмы Bruker (MoK α -излучение, $\lambda = 0,71073$ Å, графитовый монохроматор) при 296(2) К. Сбор, редактирование данных и уточнение параметров элементарной ячейки, а также учет поглощения проведены по программам SMART и SAINT-Plus [26]. Все расчеты по определению и уточнению структуры выполнены по программам SHELXL/PC [27] и OLEX2 [28]. Структура определена прямым методом и уточнена методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов.

Кристаллографические данные и результаты уточнения структуры 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 (№ 2217060; deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

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

Параметр	1
Стехиометрическая формула	$\text{C}_{36}\text{H}_{25}\text{O}_3\text{F}_{12}\text{SSb}$
<i>M</i>	887,37
Сингония	Моноклинная
Пространственная группа	$P2_1/c$
<i>a</i> , Å	12,160(8)
<i>b</i> , Å	14,561(11)
<i>c</i> , Å	21,755(14)
α , град.	90,00
β , град.	97,333(18)
γ , град.	90,00
<i>V</i> , Å ³	3821(5)
<i>Z</i>	4
$\rho_{\text{выч}}$, г/см ³	1,543
μ , мм ⁻¹	0,869
<i>F</i> (000)	1760,0
Размер кристалла, мм	0,56×0,15×0,1
Диапазон сбора данных по 2 θ , град.	6,06–49,28
Диапазон индексов	$-14 \leq h \leq 12, -17 \leq k \leq 17, -25 \leq l \leq 25$
Число измеренных рефлексов	23742
Число независимых рефлексов	6398
<i>R</i> _{int}	0,0828
GOOF	1,017
Число параметров	480
<i>R</i> -факторы по $I > 2\sigma(I)$	$R_1 = 0,0568, wR_2 = 0,1414$
<i>R</i> -факторы по всем рефлексам	$R_1 = 0,0809, wR_2 = 0,1619$
Остаточная электронная плотность (max/min), е/Å ³	0,85/–0,92

Таблица 2
Длины связей и валентные углы в структуре **1**

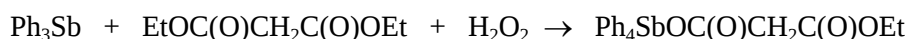
Связь	<i>d</i> , Å	Угол	ω , град.
Sb(1)–O(2)	2,463(4)	C(31)–Sb(1)–O(2)	174,08(18)
Sb(1)–C(1)	2,122(6)	C(11)–Sb(1)–C(1)	118,7(2)
Sb(1)–C(11)	2,121(6)	C(11)–Sb(1)–C(21)	124,4(2)
Sb(1)–C(21)	2,121(6)	C(21)–Sb(1)–C(1)	109,7(2)
Sb(1)–C(31)	2,129(7)	O(2)–S(1)–C(41)	104,4(3)
S(1)–O(2)	1,478(4)	O(3)–S(1)–O(2)	110,9(3)
S(1)–O(3)	1,452(5)	O(3)–S(1)–C(41)	107,8(3)

Связь	$d, \text{\AA}$	Угол	$\omega, \text{град.}$
S(1)–O(1)	1,445(3)	O(1)–S(1)–O(2)	111,4(3)
S(1)–C(41)	1,778(7)	O(1)–S(1)–O(3)	114,6(3)
F(5)–C(17)	1,242(11)	O(1)–S(1)–C(41)	107,1(3)
F(12)–C(37)	1,303(17)	C(21)–Sb(1)–C(31)	99,9(2)

Обсуждение результатов

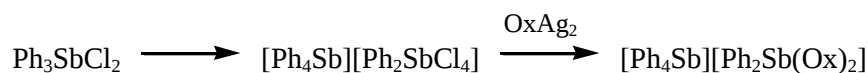
Известно, что реакции окислительного присоединения, независимо от соотношения исходных реагентов протекают без изменения группировок Ph_3Sb , которые в некоторых случаях превращаются в Ph_4Sb -группы [18, 19].

Так, взаимодействие эквимольных количеств трифенилсурьмы, малонового эфира и пероксида водорода в растворе эфира приводит к образованию ониевого соединения сурьмы [29]. Наличие в ИК-спектре полученного комплекса интенсивных полос поглощения в области валентных колебаний карбонильных групп (дублет в области 1725 и 1640 см^{-1}), свидетельствовало о присутствии в нем неэквивалентных карбонильных групп [30]. Качественная реакция на наличие в соединении Ph_4Sb -группировки и данные РСА подтверждали строение этилмалоната тетрафенилсурьмы $\text{Ph}_4\text{SbOC}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{OEt}$, выход которого составил 13 %.



Найдено, что при перекристаллизации дигидроксида трифенилсурьмы из хлороформа в атмосфере воздуха имело место образование триклинной модификации карбоната тетрафенилсурьмы [31], в котором формирование фрагмента Ph_4Sb можно объяснить, как и в предыдущей реакции, только переходом фенильных заместителей между атомами сурьмы.

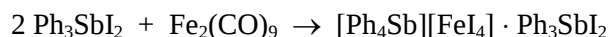
Авторы работы [32], изучая строение оксалата трифенилсурьмы, полученного из дихлорида трифенилсурьмы и оксалата серебра, показали, что данное соединение имеет солеобразное строение $[\text{Ph}_4\text{Sb}][\text{Ph}_2\text{SbOx}]_2$ ($\text{Ox} = \text{O}_2\text{CCO}_2$) и предложили следующую схему его образования.



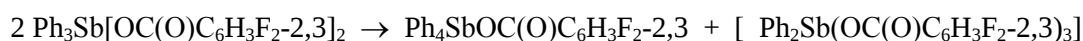
Весьма необычная реакция, позволявшая переходить от диiodида трифенилсурьмы к триiodиду тетрафенилсурьмы, была открыта в 1994 году [33]. Показано, что при растворении диiodида трифенилсурьмы в ацетонитриле имеет место следующая реакция диспропорционирования.



Другим примером реакции перераспределения лигандов является взаимодействие диiodида трифенилсурьмы с карбонилем железа $\text{Fe}_2(\text{CO})_9$ в диэтиловом эфире [34].



При изучении реакции трифенилсурьмы с 2,3-дифторбензойной кислотой в присутствии гидропероксида третичного бутила в эфире можно было ожидать, как и в большинстве реакций окислительного присоединения образование дикарбоксилата трифенилсурьмы, однако из реакционной смеси был выделен с выходом 12 % 2,3-дифторбензоат тетрафенилсурьмы [35]. Получение столь необычного продукта реакции окислительного присоединения можно объяснить диспропорционированием образующегося дикарбоксилата триарилсурьмы:



Выделение из реакционной смеси устойчивых ониевого соединений сурьмы во всех перечисленных случаях связано, как мы считаем, с диспропорционированием соединений Ph_3SbX_2 до Ph_4SbX -производных, плохо растворимых в ароматических растворителях. Вопрос о влиянии заместителей в арильных лигандах при атоме сурьмы на схему протекания аналогичной реакции ранее не изучался, поэтому нами в качестве исходного соединения трехвалентной сурьмы была выбрана *трис*(3-трифторметилфенил)сурьма.

Нами показано, что окисление этого соединения *трет*-бутилгидропероксидом в присутствии 2,4-диметилбензолсульфоновой кислоты протекает с образованием 2,4-диметилбензолсульфоната *тетра*-*кис*(3-трифторметилфенил)сурьмы.

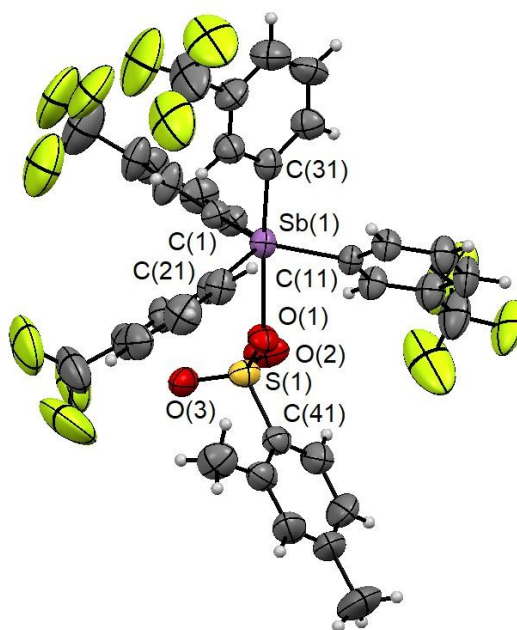


Рис. 1. Строение соединения 1 по данным РСА

В аксиальном положении находится атом кислорода аренсульфонатного заместителя, угол $\text{OSbC}_{\text{акс}}$ равен $174,08(18)^\circ$ (см. табл. 2). Интервал валентных углов $\text{OSbC}_{\text{экв}}$ составляет $77,25(19)–89,0(2)^\circ$, атом сурьмы выходит из экваториальной плоскости на $0,211 \text{ \AA}$ в сторону аксиального атома углерода. Сумма углов CSbC в экваториальной плоскости равна $353(2)^\circ$, при этом углы между экваториальными арильными заместителями неравноценны и составляют $109,7(2)$, $118,7(2)$, $124,4(2)^\circ$. Длины связей $\text{Sb–C}_{\text{экв}}$ ($2,121(6)–2,122(6) \text{ \AA}$) меньше расстояния $\text{Sb–C}_{\text{акс}}$ [$2,129(7) \text{ \AA}$]. Расстояние Sb–O составляет $2,463(4) \text{ \AA}$ и близко к подобным расстояниям в аренсульфонатах тетраарилсурьмы [1]. В молекуле соединения 1 не наблюдаются коротких внутримолекулярных контактов с участием атома металла, однако присутствуют межмолекулярные контакты $\text{H}\cdots\text{O}_{\text{sulf}}$, $2,54–2,57 \text{ \AA}$ близкие к сумме ван-дер-ваальсовых радиусов атомов водорода и кислорода ($2,62 \text{ \AA}$) [36].

На основании анализа ИК-спектра соединения 1 было предложено следующее отнесение полос поглощения, вызванных колебаниями в сульфонатной группе: $1327 \text{ см}^{-1} \nu_{\text{ас}}(\text{SO}_2)$, $1128 \text{ см}^{-1} \nu_{\text{с}}(\text{SO}_2)$ [30].

Выводы

Таким образом, взаимодействием *трис*(3-трифторметилфенил)сурьмы с 2,4-диметилбензолсульфоновой кислотой в присутствии *трет*-бутилпероксида (мольное соотношение (1:2:1) в эфире с выходом 34 % получен 2,4-диметилбензолсульфонат *тетракис*(3-трифторметилфенил)сурьмы (**1**), который был идентифицирован методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. По данным РСА, атомы сурьмы в соединении **1** имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомом кислорода в аксиальном положении.

Список источников

1. Cambridge Crystallographic Data Center. 2022. (deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).
2. Шарутин В.В., Шарутина О.К. Молекулярные структуры органических соединений сурьмы (V): монография. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. 395 с.
3. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К., Чагарова О.В. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Химия». 2011. № 33, № 6. С. 47. EDN: OJSELX
4. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакурина А.П., Бельский В.К. // Журн. общ. химии. 1997. Т. 67, № 9. С. 1536. EDN: PFLFSA
5. Шарутин В.В., Пакурина А.П., Платонова Т.П. и др. // Коорд. химия. 2002. Т. 28, № 11. С. 803. EDN: CYBNKD
6. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Бондарь Е.А. и др. // Коорд. химия. 2002. Т. 28, № 5. С. 356. EDN: EOICYB
7. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К., Акулова Е.В. // Журн. общ. химии. 2008. Т. 78, № 12. С. 1999. EDN: PAIKMJ
8. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакурина А.П. и др. // Коорд. химия. 2001. Т. 27, № 5. С. 396. EDN: DLCCED
9. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Журн. общ. химии. 2009. Т. 79, № 10. С. 1636. EDN: XJJGAB
10. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакурина А.П. и др. // Коорд. химия. 2003. Т. 29, № 11. С. 843. EDN: OVBNEB
11. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакурина А.П. и др. // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2003. № 1. С. 31. EDN: HPHZKQ
12. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Пакурина А.П. и др. // Коорд. химия. 2003. Т. 29, № 10. С. 750. EDN: OOFNQH
13. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 28, № 19. С. 54. EDN: OWFPWL
14. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С. и др. // Журн. неорг. химии. 2011. Т. 56, № 7. С. 1125. EDN: NYFYMV
15. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Журн. общ. химии. 2011. Т. 81, № 11. С. 1789. EDN: OIXLFD
16. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С. и др. // Журн. общ. химии. 2012. Т. 82, № 10. С. 1646. EDN: PCVVYV
17. Шарутин В.В., Сенчурин В.С., Шарутина О.К. и др. // Коорд. химия. 2011. Т. 37, № 10. С. 782. EDN: OJHAOP
18. Шарутин В.В., Поддельский А.И., Шарутина О.К. // Коорд. химия. 2020. Т. 46, № 10. С. 579. DOI: 10.31857/S0132344X20100011
19. Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 1. С. 5. DOI: 10.14529/chem240101
20. Тарасова Н.М. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 1. С. 54. DOI: 10.14529/chem240102
21. 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
22. 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

23. Шарутин В.В., Сенчуринов В.С., Шарутина О.К. и др. // Журн. общ. химии. 1996. Т. 66, № 10. С. 1755. EDN: BLATEE
24. Шарутин В.В., Сенчуринов В.С. Именные реакции в химии элементоорганических соединений. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. 427 с.
25. O'Donnell G.J. // Iowa State College Journal of Science. 1945. V. 20. P. 34.
26. Bruker. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and processing software for the SMART system. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.43.
27. 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.
28. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726
29. Шарутин В.В., Пакушина А.П., Задача О.П. и др. // Коорд. химия. 2004. Т. 30, № 6. С. 426. EDN: OWBOMB
30. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
31. Ferguson G., Hawley D.M. // Acta Cryst. 1974. V. B30, No. 1. P. 103. DOI: 10.1107/S0567740874002299
32. Millington P.L., Sowerby D.B. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1992. P. 1199. DOI: 10.1039/DT9920001199
33. Bricklebank N., Godfrey S.M., Lane H.P. et al. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1994. P. 1759. DOI: 10.1039/DT9940001759
34. Lane H.P., Godfrey S.M., McAuliffe C.A. et al. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1994. P. 3249. DOI: 10.1039/DT9940003249
35. Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 4. С. 191. DOI: 10.14529/chem240419
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.

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

Сенчуринов Владислав Станиславович – доктор химических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: senchurinvs@mail.ru

Ращупкина Александра Константиновна – бакалавр кафедры теоретической и прикладной химии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: alexandra.rash@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 января 2025 г.

The article was submitted 27 January 2025.