

АРЕНСУЛЬФОНАТЫ ДИФЕНИЛВИСМУТА $\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{R}$

В.В. Шарутин, В.С. Сенчурин[✉]

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

[✉] senchurinvs@susu.ru

Аннотация. Взаимодействием эквимольных количеств трифенилвисмута с мезитиленсульфоновой, нафталин-1-сульфоновой, (1S)-(+)-камфора-10-сульфоновой и 2,5-дихлорбензолсульфоновой кислотой (1:1 мольн.) в эфире синтезированы соответствующие аренсульфонаты дифенилвисмута и структурно охарактеризованы мезитиленсульфонат дифенилвисмута (**1**) и нафталин-1-сульфонат дифенилвисмута (**2**), представляющие собой координационные полимеры, в которых атомы висмута имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомами кислорода сульфонатных групп в аксиальных положениях (Bi–O 2,404(4), 2,500(4) для **1** и 2,398(14)–2,435(13) Å для **2**) и атомами углерода фенильных заместителей в экваториальных (Bi–C 2,221(18)–2,250(18) Å). Третье положение в экваториальной плоскости занимает неподеленная электронная пара. По данным РСА кристаллы **1** [$\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{BiO}_3\text{S}$, M 562,42; сингония моноклинная, группа симметрии $P2_1/n$; параметры ячейки: $a = 11,821(5)$, $b = 9,056(5)$, $c = 19,275(9)$ Å; $\alpha = 90,00^\circ$, $\beta = 99,083(17)^\circ$, $\gamma = 90,00^\circ$; $V = 2037,5(17)$ Å³; $Z = 4$; $\rho_{\text{ввч}} = 1,833$ г/см³; $\mu/\text{мм}^{-1}$ 8,772; $F(000)$ 1080,0; 2θ 5,7–57 град.; всего отражений 38408; независимых отражений 5147; число уточняемых параметров 239; $R_{\text{int}} = 0,0572$; $GOOF$ 1,084; $R_1 = 0,0339$, $wR_2 = 0,0690$; остаточная электронная плотность (max/min): 2,16/–2,47 е/Å³], **2** [$\text{C}_{44}\text{H}_{34}\text{O}_6\text{S}_2\text{Bi}_2$, M 1140,79; сингония моноклинная, группа симметрии $P2_1/c$; параметры ячейки: $a = 17,098(8)$, $b = 11,939(6)$, $c = 19,818(8)$ Å; $\alpha = 90,00^\circ$, $\beta = 90,070(17)^\circ$, $\gamma = 90,00^\circ$; $V = 4045(3)$ Å³; $Z = 4$; $\rho_{\text{ввч}} = 1,873$ г/см³; $\mu/\text{мм}^{-1}$ 8,838; $F(000)$ 2176,0; 2θ 5,84–55,98 град.; всего отражений 120306; независимых отражений 9672; число уточняемых параметров 487; $R_{\text{int}} = 0,1780$; $GOOF$ 1,207; $R_1 = 0,1183$, $wR_2 = 0,2024$; остаточная электронная плотность (max/min): 1,84/–4,84 е/Å³].

Ключевые слова: трифенилвисмут, дефенилирование, аренсульфоновая кислота, аренсульфонат дифенилвисмута, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ

Для цитирования: Шарутин В.В., Сенчурин В.С. Аренсульфонаты дифенилвисмута $\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{R}$ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 1. С. 160–166. DOI: 10.14529/chem250115

Original article
DOI: 10.14529/chem250115

DIPHENYLBISMUTH ARENESULFONATES $\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{R}$

V.V. Sharutin, V.S. Senchurin[✉]

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] senchurinvs@susu.ru

Abstract. The corresponding diphenylbismuth arenesulfonates have been synthesized by the interaction of equimolar amounts of triphenylbismuth with mesitylenesulfonic, naphthalene-1-sulfonic, (1S)-(+)-camphor-10-sulfonic and 2,5-dichlorobenzenesulfonic acids (1:1 molar) in ether and the structural characteristics have been found for diphenylbismuth mesitylenesulfonate (**1**), diphenylbismuth naphthalene-1-sulfonate (**2**); they are coordination polymers in which the bismuth atoms have a distorted trigonal-bipyramidal coordination with the oxygen atoms of the sulfonate groups in the axial positions (the Bi–O distances are 2.404(4), 2.500(4) Å for **1** and 2.398(14)–2.435(13) Å for **2**) and the carbon atoms of phenyl substituents in the equatorial positions (the Bi–C distances are 2.221(18)–2.250(18) Å). The third position in the equatorial plane is occupied by an unshared electron pair. According to the X-ray diffraction data, crystals **1** [$\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{BiO}_3\text{S}$, M 562.42; monoclinic syngony,

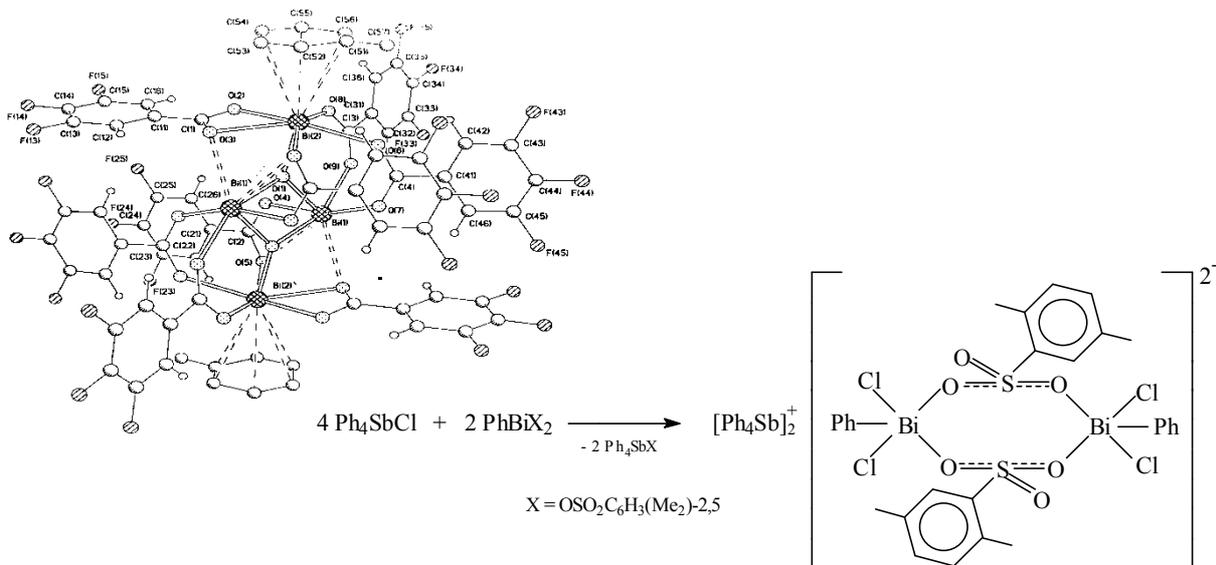
symmetry group $P2_1/n$; cell parameters: $a = 11.821(5)$, $b = 9.056(5)$, $c = 19.275(9)$ Å; $\alpha = 90.00^\circ$, $\beta = 99.083(17)^\circ$, $\gamma = 90.00^\circ$; $V = 2037.5(17)$ Å³; $Z = 4$; $\rho_{\text{calc}} = 1.833$ g/cm³; $\mu/\text{mm}^{-1} 8.772$; $F(000) 1080.0$; $2\theta 5.7\text{--}57$ deg.; total reflections 38408; independent reflections 5147; number of refined parameters 239; $R_{\text{int}} = 0.0572$; $GOOF 1.084$; $R_1 = 0.0339$, $wR_2 = 0.0690$; residual electron density (max/min): $2.16/\text{--}2.47$ e/Å³, **2** [C₄₄H₃₄O₆S₂Bi₂, $M 1140.79$; monoclinic syngony, symmetry group $P2_1/c$; cell parameters: $a = 17.098(8)$, $b = 11.939(6)$, $c = 19.818(8)$ Å; $\alpha = 90.00^\circ$, $\beta = 90.070(17)^\circ$, $\gamma = 90.00^\circ$; $V = 4045(3)$ Å³; $Z = 4$; $\rho_{\text{calc}} = 1.873$ g/cm³; $\mu/\text{mm}^{-1} 8.838$; $F(000) 2176.0$; $2\theta 5.84\text{--}55.98$ deg.; total reflections 120306; independent reflections 9672; number of refined parameters 487; $R_{\text{int}} = 0.1780$; $GOOF 1.207$; $R_1 = 0.1183$, $wR_2 = 0.2024$; residual electron density (max/min): $1.84/\text{--}4.84$ e/Å³].

Keywords: triphenylbismuth, dephenylation, arenesulfonic acid, diphenylbismuth arenesulfonate, synthesis, structure, X-ray diffraction analysis

For citation: Sharutin V.V., Senchurin V.S. Diphenylbismuth arenesulfonates Ph₂BiOSO₂R. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(1):160–166. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250115

Введение

Молекулы производных трехкоординированного висмута (электронная конфигурация Bi $s2p3$) имеют пирамидальное расположение трех связей с неподеленной электронной парой на атоме висмута. Вовлечение в образование связей d -орбиталей приводит к увеличению координационного числа атома висмута и обуславливает разнообразие структур соединений Bi(III), которые имеют тенденцию к ассоциации и формированию димеров и полимеров. Большинство из описанных структур димеров и полимеров не содержит связей Bi–C [1–3] и только некоторые из них относятся к элементоорганическим соединениям [3–7]. Все соединения, как правило, синтезировали из трифенилвисмута и карбоновых кислот в растворе арена. При избытке карбоновой кислоты имело место образование трикарбоксилата висмута, при мольном соотношении 1:2 конечным продуктом реакции являлся дикарбоксилат фенилвисмута. Обработка трифенилвисмута аренсульфоновой кислотой приводила, как правило, к образованию дисульфонатов фенилвисмута [8–11], которые являются прекурсорами необычных четырехядерных π -ареновых производных висмута [12, 13] и ионных комплексов висмута с тетрафенилстибониевыми катионами и биядерными анионами [14]:



Можно предположить, что при замене в последней реакции хлорида тетрафенилсурьмы на аренсульфонат тетраарилсурьмы будет иметь место образование комплекса подобного строения с аренсульфонатным лигандом при атоме висмута.

Но, если синтез аренсульфонатов тетрафенилсурьмы [15–21] не представлял трудностей, то получение дисульфонатов фенилвисмута описано на малом числе примеров [8–10], поэтому це-

люю настоящей работы являлись синтез диаренсульфонатов фенилвисмута $\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{R}$ ($\text{R} = \text{C}_6\text{H}_2(\text{CH}_3)_{3-2,4,6}$, $\text{C}_{10}\text{H}_7-1$, $\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_{2-2,5}$) и установление особенностей их строения.

Экспериментальная часть

Трифенилвисмут синтезировали по методике, описанной в [22]. В работе использовали аренсульфоновые кислоты производства фирмы Alfa Aesar. Элементный анализ выполнен на элементном анализаторе Carlo Erba CHNS-O EA 1108. Температуры плавления измерены на синхронном термоанализаторе Netzsch 449C Jupiter.

Мезитиленсульфонат дифенилвисмута (1). Смесь 0,30 г (0,68 ммоль) трифенилвисмута и 0,14 г (0,68 ммоль) мезитиленсульфоновой кислоты в 5 мл диэтилового эфира выдерживали в закрытой ампуле в течение 7 дней при комнатной температуре. После медленного испарения растворителя получили 0,25 г (64 %) неокрашенных кристаллов соединения **1** с т. разл. 209 °С. Найдено, %: С 44,56; Н 3,87. $\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{BiO}_3\text{S}$. Вычислено, %: С 44,81; Н 3,73. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3031, 1565, 1474, 1379, 1259, 1129, 1075, 851, 731, 677, 524, 442.

По аналогичной методике получены:

Нафталин-1-сульфонат дифенилвисмута (2), неокрашенные кристаллы, выход 73 %, т. разл. 212 °С. Найдено, %: С 45,96; Н 3,03. $\text{C}_{44}\text{H}_{34}\text{O}_6\text{S}_2\text{Bi}_2$. Вычислено, %: С 46,28; Н 2,98. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3043, 1507, 1476, 1394, 1236, 1098, 1029, 800, 726, 687, 516, 440.

(1S)-(+)-камфора-10-сульфонат дифенилвисмута (3), неокрашенные кристаллы, выход 65 %, т. разл. 246 °С. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3048, 1571, 1476, 1394, 1246, 1109, 1073, 853, 731, 692, 537, 452.

2,5-Дихлорбензолсульфонат дифенилвисмута (4), неокрашенные кристаллы, выход 61 %, т. разл. 243 °С. ИК-спектр (ν , см^{-1}): 3059, 1568, 1474, 1374, 1262, 1121, 1057, 856, 823, 684, 537, 440.

ИК-спектры соединений **1–4** записывали на ИК-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S в табл. 1 в области 4000–400 см^{-1} .

РСА кристаллов **1** и **2** проведен на дифрактометре D8 Quest фирмы Bruker (MoK α -излучение, $\lambda = 0,71073 \text{ \AA}$, 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 [23]. Все расчеты по определению и уточнению структуры выполнены по программам SHELXL/PC [24] и OLEX2 [25]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. 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 (№ 2164819 (**1**), № 2221091 (**2**); deposit@ccdc.cam.ac.uk; <http://www.ccdc.cam.ac.uk>).

Таблица 1

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

Параметр	1	2
Стехиометрическая формула	$\text{C}_{21}\text{H}_{21}\text{BiO}_3\text{S}$	$\text{C}_{44}\text{H}_{34}\text{O}_6\text{S}_2\text{Bi}_2$
<i>M</i>	562,42	1140,79
Сингония	Моноклинная	Моноклинная
Пространственная группа	$P2_1/n$	$P2_1/c$
<i>a</i> , Å	11,821(5)	17,098(8)
<i>b</i> , Å	9,056(5)	11,939(6)
<i>c</i> , Å	19,275(9)	19,818(8)
α , β , γ , град.	90,00	90,00
α , β , γ , град.	99,083(17)	90,070(17)
α , β , γ , град.	90,00	90,00
<i>V</i> , Å ³	2037,5(17)	4045(3)
<i>Z</i>	4	4
$\rho_{\text{выч}}$, г/см ³	1,833	1,873
μ , мм ⁻¹	8,772	8,838
<i>F</i> (000)	1080,0	2176,0

Окончание табл. 1

Параметр	1	2
Размер кристалла, мм	0,45 × 0,32 × 0,09	0,2 × 0,15 × 0,03
Диапазон сбора данных по 2θ, град.	5,7–57	5,84–55,98
Диапазон индексов	-15 ≤ h ≤ 15, -12 ≤ k ≤ 12, -25 ≤ l ≤ 25	-22 ≤ h ≤ 22, -15 ≤ k ≤ 15, -26 ≤ l ≤ 26
Число измеренных рефлексов	38408	120306
Число независимых рефлексов	5147	9672
R_{int}	0,0572	0,1780
GOOF	1,084	1,207
Число параметров	239	487
R-факторы по $I > 2\sigma(I)$	$R_1 = 0,0339$, $wR_2 = 0,0690$	$R_1 = 0,1183$, $wR_2 = 0,2024$
R-факторы по всем рефлексам	$R_1 = 0,0418$, $wR_2 = 0,0723$	$R_1 = 0,1617$, $wR_2 = 0,2217$
Остаточная электронная плотность (max/min), е/Å ³	2,16/-2,47	1,84/-4,84

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структурах 1 и 2

Связь	d , Å	Угол	ω , град.
1			
Bi1–O1	2,404(4)	O1–Bi1–O3 ¹	165,56(13)
Bi1–O3 ¹	2,500(4)	C11–Bi1–O1	88,45(16)
Bi1–C11	2,224(5)	C11–Bi1–O3 ¹	83,23(16)
Bi1–C1	2,244(5)	C11–Bi1–C1	98,13(18)
S1–O1	1,478(4)	C1–Bi1–O1	81,23(16)
S1–O2	1,432(4)	C1–Bi1–O3 ¹	88,26(15)
S1–O3	1,480(4)	O1–S1–O3	108,5(2)
S1–C21	1,785(5)	O1–S1–C21	106,0(2)
O3–Bi1 ²	2,500(4)	O2–S1–O1	111,5(3)
C11–C12	1,389(7)	O2–S1–O3	113,7(3)
C11–C16	1,397(7)	O2–S1–C21	109,4(2)
C21–C22	1,406(7)	O3–S1–C21	107,4(2)
Преобразования симметрии: ¹ 1/2 – x, –1/2 + y, 1/2 – z; ² 1/2 – x, 1/2 + y, 1/2 – z			
2			
Bi1–O1	2,407(14)	O1–Bi1–O4	166,8(5)
Bi1–C11	2,226(18)	C11–Bi1–O1	82,9(6)
Bi1–O4	2,420(16)	C11–Bi1–O4	84,9(6)
Bi1–C1	2,242(18)	C11–Bi1–C1	97,8(7)
Bi2–O6	2,398(14)	C1–Bi1–O1	92,2(6)
Bi2–O3 ¹	2,435(13)	C1–Bi1–O4	84,4(6)
Bi2–C31	2,250(18)	O6–Bi2–O3 ¹	166,2(5)
Bi2–C21	2,221(18)	C31–Bi2–O6	93,2(6)
S1–O1	1,478(14)	C31–Bi2–O3 ¹	82,9(6)
S1–O3	1,465(14)	C21–Bi2–O6	83,3(6)
S1–O2	1,431(16)	C21–Bi2–O3 ¹	84,1(6)
S1–C41	1,79(2)	C21–Bi2–C31	96,7(7)
S2–O5	1,411(15)	O1–S1–C41	104,5(9)
S2–O5	1,411(15)	O3–S1–O1	107,7(9)
S2–O6	1,485(14)	O3–S1–C41	106,8(9)
S2–O4	1,449(14)	O2–S1–O1	112,6(10)
S2–C51	1,761(18)	O2–S1–O3	114,9(10)
O3–Bi2 ²	2,435(13)	O2–S1–C41	109,7(10)
Преобразования симметрии: ¹ +x, –1+y, +z; ² +x, 1+y, +z			

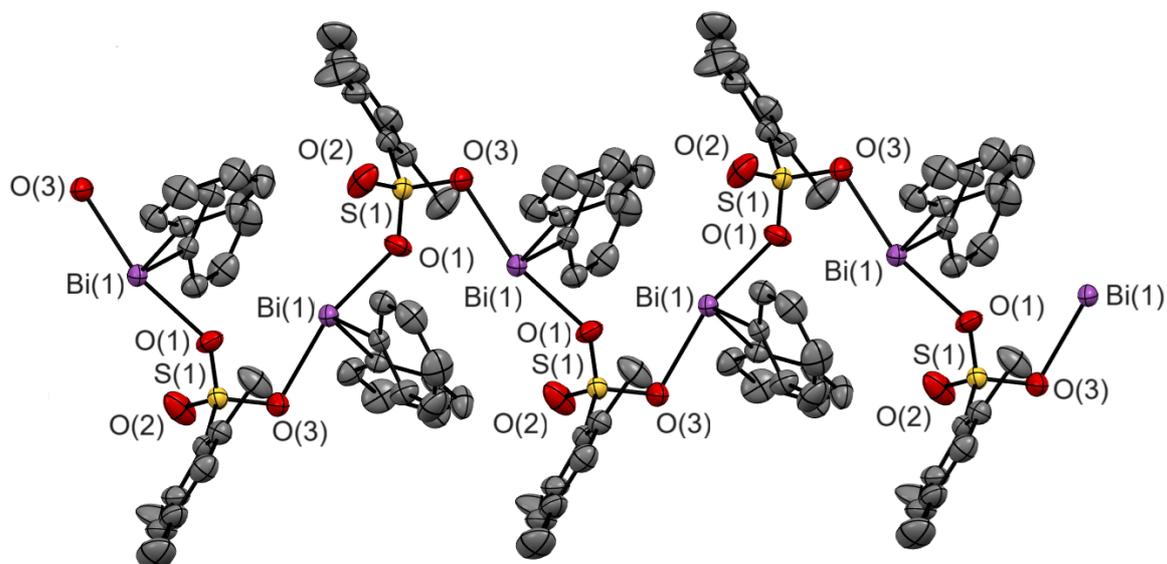


Рис. 1. Фрагмент координационного полимера мезитиленсульфоната дифенилвисмута (1). Атомы водорода не показаны. Проекция вдоль кристаллографической оси *b*

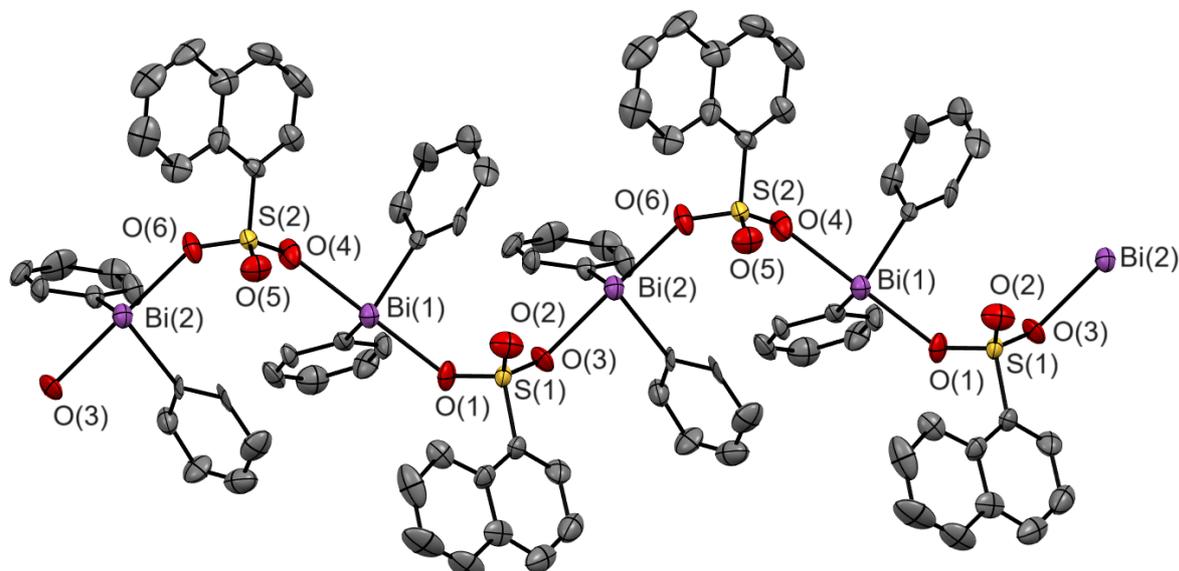
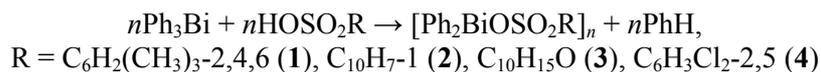


Рис. 2. Фрагмент координационного полимера нафталин-1-сульфоната дифенилвисмута (2). Атомы водорода не показаны. Проекция вдоль кристаллографической оси *b*

Обсуждение результатов

В настоящей работе органосульфаты дифенилвисмута синтезировали дефенилированием трифенилвисмута органосульфоновой кислотой в эфире.



Нагревание (90 °С, 1 ч) реагентов в мольном соотношении 1:2 приводило к образованию целевых продуктов в виде мелкокристаллических неокрашенных веществ с высоким выходом (61–73 %). Высокие температуры разложения и плохая растворимость в ароматических и алифатических углеводородах соединений 1–4 предполагали их полимерное строение.

ИК-спектры соединений 1–4 содержат характерные полосы валентных колебаний углеродного скелета ароматических фрагментов в области 1474–1571 см⁻¹ [26]. Валентным колебаниям связей C_{Ar}-H соответствуют полосы поглощения средней интенсивности при 3031–3059 см⁻¹; пло-

скостным деформационным колебаниям этих же связей – полосы при 1109–1073 cm^{-1} , внеплоскостным деформационным колебаниям – при 853–800 cm^{-1} . Также присутствуют характерные полосы поглощения сильной интенсивности при 1236–1259 cm^{-1} и средней интенсивности при 1029–1075 cm^{-1} , которые отвечают асимметричным и симметричным валентным колебаниям сульфонатной группы SO_3 . Полосы поглощения высокой интенсивности валентных колебаний связи S–O расположены при 692–677 cm^{-1} .

По данным PCA, комплексы **1** и **2** являются линейными координационными полимерами со структурными звеньями $[\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{CR}]$. Полимерные цепочки в кристалле **1** связаны с соседними цепочками через контакты $\text{O}_2\text{SO}\cdots\text{H}_{\text{Ph-p}}$ (2,67 Å), которые много меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов-партнеров (2,67 Å (3,32 Å) [27]). В кристалле **2** полимерные цепочки не имеют между собой коротких контактов, соответствующих сильным межмолекулярным взаимодействиям. Отметим к тому же присутствие в последнем кристалле двух типов кристаллографически независимых фрагментов $[\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{CR}]$, из которых состоит полимерная цепь. Атомы висмута с учетом стереохимически активной неподеленной электронной пары имеют, с учетом “фантом” лиганда (неподеленной электронной пары), искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомами кислорода сульфогрупп в аксиальных положениях и двумя атомом углерода фенильных групп в экваториальных. Аксиальные углы OBiO составляют 165,56(13)° и 166,8(5)° соответственно, экваториальные углы CBiC составляют 98,13(18)° и 97,8(7)°, валентные связи Bi–O (2,404(4) и 2,407(14) Å) короче координационных связей Bi \cdots O (2,500(4) и 2,420(16) Å). Длины связей Bi–C (2,224(5), 2,244(5) Å и (2,226(18), 2,242(18) Å) меньше суммы ковалентных радиусов атомов-партнеров (2,31 Å [27]). Расстояния между атомом серы и мостиковыми атомами кислорода (1,478(4), 1,480(4) и 1,465(14), 1,478(14) Å) длиннее терминальных связей S=O (1,432(4) и 1,431(16) Å).

Заключение

Таким образом, дисульфонаты фенилвисмута, полученные с выходом до 73 % из трифенилвисмута и органилсульфоновой кислоты, являются координационными полимерами, в которых атомы висмута имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию с атомами кислорода сульфогрупп в аксиальных положениях и двумя фенильными лигандами с неподеленной электронной парой – в экваториальных. Особенностью структуры **2** является присутствие в полимерной цепи двух типов чередующихся кристаллографически независимых фрагментов $[\text{Ph}_2\text{BiOSO}_2\text{CR}]$, при этом полимерные цепочки не имеют между собой коротких контактов, соответствующих сильным межмолекулярным взаимодействиям, в то время как в кристалле **1** такие контакты присутствуют.

Список источников

1. Шарутин В.В., Поддельский А.И., Шарутина О.К. // Коорд. химия. 2021. Т. 47, № 12. С. 719. DOI: 10.31857/S0132344X21120021
2. Шарутин В.В., Егорова И.В., Шарутина О.К., Невмешкина Л.А. // Журн. неорган. химии. 2008. Т. 53, № 11. С. 1853. EDN: JSJUXP
3. Шарутин В.В., Егорова И.В., Иваненко Т.К. и др. // Коорд. химия. 2004. Т. 30, № 5. С. 331. EDN: OWBFEN
4. Егорова И.В., Шарутин В.В., Шарутина О.К. и др. // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2005. Т. 7. С. 47. EDN: NYMZYT
5. Егорова И.В., Шарутин В.В., Иваненко Т.К. и др. // Коорд. химия. 2006. Т. 32, № 5. С. 336. EDN: HTPICD
6. Брегадзе В.И., Глазун С.А., Ефремов А.Н., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Химия. 2020. Т. 12, № 1. С. 5. DOI: 10.14529/chem200101
7. Брегадзе В.И., Ефремов А.Н., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Сер. Химия. 2023. Т. 15. № 1. С. 43. DOI: 10.14529/chem230104
8. Wrobel L., Ruffer T., Korb M. et al. // Chem.-Eur. J., 2018. V. 24. P. 16630. DOI: 10.1002/chem.201803664
9. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Павлушкина И.И. и др. // Журн. общей химии. 2001. Т. 71, № 1. С. 87. EDN: WPHPEC

10. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Житкевич М.В. и др. // Журн. общей химии. 2000. Т. 70, № 5. С. 737. EDN: RIMYCG
11. Шарутин В.В., Шарутина О.К. // Журн. неорган. химии. 2014. Т. 59, № 10. С. 1356. EDN: SMMPIT
12. Шарутин В.В., Егорова И.В., Шарутина О.К. и др. // Коорд. химия. 2003. Т. 29, № 12. С. 902. EDN: OOFNUN
13. Шарутин В.В., Егорова И.В., Шарутина О.К. и др. // Коорд. химия. 2005. Т. 31, № 1. С. 4. EDN: HRZYDD
14. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Житкевич М.В. и др. // Журн. общ. химии. 2000. Т. 70, Вып. 6. С. 923. EDN: GJFORJ
15. Шарутин В.В., Поддельский А.И., Шарутина О.К. // Коорд. химия. 2020. Т. 46, № 10. С. 579. DOI: 10.31857/S0132344X20100011
16. Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 1. С. 5. DOI: 10.14529/chem240101
17. Красносельская В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 33. DOI: 10.14529/chem220204.
18. Шарутина О.К. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 1. С. 24. DOI: 10.14529/chem220103.
19. Тарасова Н.М. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 25. DOI: 10.14529/chem220203.
20. Ефремов А.Н., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 3. С. 34. DOI: 10.14529/chem220304.
21. Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 4. С. 64. DOI: 10.14529/chem220406
22. Кочешков К.А., Сколдинов А.П., Землянский Н.Н. Методы элементоорганической химии. Сурьма, висмут.- М.: Наука, 1976.- 483 с.
23. Bruker. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Madison, Wisconsin, USA: Bruker AXS Inc., 1998.
24. Bruker. SHELXTL/PC. Versions 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures from Diffraction Data. Madison, Wisconsin, USA: Bruker AXS Inc., 1998.
25. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726
26. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
27. Бацанов С.С. Атомные радиусы элементов // Журн. неорган. химии. 1991. Т. 36. № 12. С. 3015.

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

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

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2024 г.

The article was submitted 1 November 2024.