

## КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

УДК 546.87+547.53.024+548.312.5

### СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ ФЕНИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ВИСМУТА(V) $\text{Ph}_3\text{Bi}[\text{OC}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_{2-2,5}]_2 \cdot 0.5\text{PhH}$ , $\text{Ph}_4\text{BiOC}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_{2-2,5}$ И $\text{Ph}_4\text{BiBr}$

© 2020 г. В. С. Сенчурин<sup>а</sup>, \*, В. В. Шарутин<sup>а</sup>, О. К. Шарутина<sup>а</sup><sup>а</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), пр-т Ленина 76, Челябинск, 454080 Россия

\*e-mail: senvl@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.06.2019 г.

После доработки 06.09.2019 г.

Принята к публикации 27.10.2019 г.

Трифенилвисмут, 2,5-динитрофенол и *трет*-бутилгидропероксид (мольное соотношение 1 : 2 : 1) реагируют в диэтиловом эфире с образованием *бис*(2,5-динитрофеноксида) трифенилвисмута, выделенного после перекристаллизации из бензола в виде сольвата  $\text{Ph}_3\text{Bi}[\text{OC}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_{2-2,5}]_2 \cdot 0.5\text{PhH}$  (I). 2,5-Динитрофеноксид тетрафенилвисмута (II) получен по реакции I с пентафенилвисмутом, а также дефенилированием пентафенилвисмута 2,5-динитрофенолом. Кинетически неустойчивый бромид тетрафенилвисмута (III) образуется в реакции перераспределения лигандов между пентафенилвисмутом и дибромидом трифенилвисмута. Структуры I–III определены методом РСА. Атомы висмута в I–III имеют искаженную тригонально-бипирамидальную координацию, в экваториальной плоскости молекулы I располагаются фенильные лиганды (Bi–C 2.196(5)–2.212(5) Å), а в аксиальной – два ароксильных (Bi–O 2.227(4), 2.228(3) Å) лиганда. Атом кислорода одной из *орто*-нитрогрупп остатка фенола координируется с атомом висмута (Bi⋯O 2.890(7) Å). В молекулах II и III экваториальные положения занимают фенильные лиганды (Bi–C<sub>эkv</sub> 2.195(3)–2.200(3) Å (II), 2.188(4)–2.199(4) Å (III)), а аксиальные – фенильный и 2,5-динитрофеноксидный лиганды (Bi–C<sub>акс</sub> 2.242(3) Å, Bi–O 2.527(2) Å, OBiC<sub>акс</sub> 175.55(9)° в II); фенильный лиганд и атом брома (Bi–C<sub>акс</sub> 2.231(4), Bi–Br 3.139(2) Å, BrBiC<sub>акс</sub> 174.87(10)° в III).

**Ключевые слова:** *бис*(2,5-динитрофеноксид) трифенилвисмута, 2,5-динитрофеноксид тетрафенилвисмута, бромид тетрафенилвисмута, синтез, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0044457X20030125

#### ВВЕДЕНИЕ

В связи с эффективным использованием арильных производных висмута в тонком органическом синтезе [1–4] интерес исследователей вызывает поиск неизвестных ранее устойчивых арильных соединений пятивалентного висмута, одними из которых являются производные  $\text{Ag}_4\text{BiX}$  и  $\text{Ag}_3\text{BiX}_2$ , содержащие ароксильные [5–8], сульфонатные [9–12], карбоксилатные [13–25] и другие [26] лиганды. Ароксиды тетрафенилвисмута получают по реакции пентафенилвисмута с фенолами [5, 6] либо по реакции лигандного обмена между пентафенилвисмутом и диароксидами трифенилвисмута [6, 7]. Результативными способами синтеза диароксидов трифенилвисмута являются реакции окислительного присоединения с участием трифенилвисмута, фенола и пероксида [8], а также реакция обмена между дибромидом трифенилвисмута и натриевыми солями фенолов [5].

С целью установления особенностей синтеза и строения арильных производных пятивалентного висмута в настоящей работе синтезирована

ны и структурно охарактеризованы сольват *бис*(2,5-динитрофеноксида) трифенилвисмута с бензолом  $\text{Ph}_3\text{Bi}[\text{OC}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_{2-2,5}]_2 \cdot 0.5\text{PhH}$  (I), 2,5-динитрофеноксид тетрафенилвисмута  $\text{Ph}_4\text{BiOC}_6\text{H}_3(\text{NO}_2)_{2-2,5}$  (II) и бромид тетрафенилвисмута  $\text{Ph}_4\text{BiBr}$  (III).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Сольват *бис*(2,5-динитрофеноксида) трифенилвисмута с бензолом (I).** К смеси 500 мг (1.14 ммоль) трифенилвисмута и 420 мг (2.28 ммоль) 2,5-динитрофенола добавляли 146 мг (1.14 ммоль) 70%-ного раствора *трет*-бутилгидропероксида в 20 мл диэтилового эфира. После удаления растворителя мелкокристаллический осадок растворяли в горячем бензоле и медленно испаряли при комнатной температуре. Выход темно-желтых кристаллов соединения I с  $t_{\text{разл}} = 128^\circ\text{C}$  составил 743 мг (74%).

ИК-спектр ( $\nu$ ,  $\text{cm}^{-1}$ ): 3136, 3094, 3063, 3032, 3013, 2990, 1618, 1533 ( $\nu_{\text{ас}}(\text{NO}_2)$ ), 1472, 1439, 1423,

1348, 1337 ( $\nu_s(\text{NO}_2)$ ), 1279 и 1250 ( $\nu(\text{CO})$ ) дублет, 1092, 1009, 986, 961, 881, 841, 818, 731, 683, 648, 588, 579, 447.

	С	Н
Найдено, %:	46.79;	2.97.
Для $\text{C}_{33}\text{H}_{24}\text{BiN}_4\text{O}_{10}$		
вычислено, %:	46.84;	2.84.

**2,5-Динитрофеноксид тетрафенилвисмута (II).**

а) Смесь 500 мг (0.84 ммоль) пентафенилвисмута и 155 мг (0.84 ммоль) 2,5-динитрофенола растворяли в 10 мл бензола. После испарения растворителя получили 359 мг (61%) светло-коричневых кристаллов соединения II с  $t_{\text{разл}} = 115^\circ\text{C}$ .

ИК-спектр ( $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ ): 3080, 3053, 2990, 1620, 1533 ( $\nu_{\text{as}}(\text{NO}_2)$ ), 1473, 1439, 1339 ( $\nu_s(\text{NO}_2)$ ), 1315, 1267 ( $\nu(\text{CO})$ ), 1146, 1086, 1053, 1011, 991, 961, 883, 849, 820, 727, 683, 583, 441.

	С	Н
Найдено, %:	51.38;	3.36.
Для $\text{C}_{30}\text{H}_{23}\text{O}_5\text{N}_2\text{Bi}$		
вычислено, %:	51.43;	3.29.

б) Навеску 423 мг (0.50 ммоль) соединения I растворяли в 15 мл бензола и при интенсивном перемешивании добавляли 297 мг (0.50 ммоль) пентафенилвисмута. После исчезновения фиолетовой окраски раствора и удаления растворителя выделили 580 мг (83%) соединения II.

По аналогичной методике из пентафенилвисмута и дибромид трифенилвисмута синтезировали бромид тетрафенилвисмута (III) (72%), который после перекристаллизации из воды имел  $t_{\text{пл}} = 119^\circ\text{C}$ .

ИК-спектр ( $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ ): 3059, 3048 ( $\nu(\text{CH})$ ), 2982, 1560, 1472, 1435, 1321, 1300, 1265, 1190, 1157, 1088, 1055, 1011, 989, 851, 729 и 683 ( $\nu(\text{CH})$ ), 646, 451, 442.

	С	Н
Найдено, %:	48.17;	3.42.
Для $\text{C}_{24}\text{H}_{20}\text{BiBr}$		
вычислено, %:	48.25;	3.35.

**ИК-спектры** комплексов I–III регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S в таблетках КВг в области 4000–400  $\text{см}^{-1}$ .

**РСА** монокристаллов I–III выполнен на дифрактометре Bruker D8 Quest ( $\text{MoK}_\alpha$ -излучение,  $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$ , графитовый монохроматор) при 293 К. Сбор, редактирование данных, уточнение параметров элементарной ячейки и учет поглощения проведены по программам SMART и SAINT-Plus [27]. Расчеты по определению и уточ-

**Таблица 1.** Основные длины связей и валентные углы в структурах I–III

Связь	$d$ , $\text{Å}$	Угол	$\omega$ , град
I			
Bi(1)–O(1)	2.228(3)	O(1)Bi(1)O(2)	177.48(11)
Bi(1)–O(2)	2.227(4)	C(1)Bi(1)C(11)	137.39(18)
Bi(1)–O(3)	2.890(5)	C(1)Bi(1)C(21)	113.91(18)
Bi(1)–C(1)	2.200(5)	C(11)Bi(1)C(21)	108.63(19)
Bi(1)–C(11)	2.196(5)	C(1)Bi(1)O(1)	92.73(16)
Bi(1)–C(21)	2.212(5)	C(1)Bi(1)O(2)	89.77(16)
O(1)–C(31)	1.317(6)	C(11)Bi(1)O(1)	91.62(16)
O(2)–C(41)	1.306(6)	C(11)Bi(1)O(2)	86.32(15)
N(1)–O(3)	1.220(6)	C(21)Bi(1)O(1)	87.07(16)
N(1)–O(4)	1.223(5)	C(21)Bi(1)O(2)	92.20(17)
N(1)–C(32)	1.454(6)	Bi(1)O(1)C(31)	132.2(3)
N(2)–O(5)	1.195(8)	Bi(1)O(2)C(41)	123.9(3)
N(2)–O(6)	1.202(8)	Bi(1)O(3)N(1)	130.76(10)
II			
Bi(1)–C(1)	2.200(3)	O(1)Bi(1)C(31)	175.55(9)
Bi(1)–C(11)	2.195(3)	C(1)Bi(1)C(11)	118.05(11)
Bi(1)–C(21)	2.200(3)	C(1)Bi(1)C(21)	111.17(12)
Bi(1)–C(31)	2.242(3)	C(11)Bi(1)C(21)	122.15(11)
Bi(1)–O(1)	2.527(2)	C(1)Bi(1)O(1)	82.92(9)
O(1)–C(41)	1.280(3)	C(11)Bi(1)O(1)	77.08(9)
N(1)–C(42)	1.457(4)	C(21)Bi(1)O(1)	80.82(8)
N(1)–O(2)	1.213(4)	C(1)Bi(1)C(31)	100.59(11)
N(1)–O(3)	1.225(3)	C(11)Bi(1)C(31)	98.77(11)
N(2)–C(45)	1.472(4)	C(21)Bi(1)C(31)	100.28(10)
N(2)–O(4)	1.219(4)	C(41)O(1)Bi(1)	132.52(17)
N(2)–O(5)	1.217(4)		
III			
Bi(1)–C(31)	2.189(4)	C(11)Bi(1)Br(1)	174.87(10)
Bi(1)–C(21)	2.188(4)	C(1)Bi(1)C(21)	115.07(15)
Bi(1)–C(1)	2.199(4)	C(1)Bi(1)C(31)	116.15(18)
Bi(1)–C(11)	2.231(4)	C(21)Bi(1)C(31)	124.89(16)
Bi(1)–Br(1)	3.1387(19)	C(21)Bi(1)Br(1)	80.55(12)
		C(1)Bi(1)C(11)	98.24(16)

нению структур выполнены с помощью программ SHELXL/PC [28] и OLEX2 [29]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов.

Кристаллы соединения I темно-желтые ( $\text{C}_{33}\text{H}_{24}\text{N}_4\text{O}_{10}\text{Bi}$ ,  $M = 845.54$ ), триклинные, пр. гр.  $P\bar{1}$ , при 293.15 К  $a = 10.575(6)$ ,  $b = 12.996(8)$ ,  $c = 14.798(8) \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 106.73(2)^\circ$ ,  $\beta = 98.93(2)^\circ$ ,  $\gamma = 105.49(4)^\circ$ ,  $V = 1816.6(18) \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 2$ ,  $\rho_{\text{выч}} =$

= 1.546 г/см<sup>3</sup>;  $\mu = 4.910 \text{ мм}^{-1}$ ,  $F(000) = 826.0$ . Измерено 74603 отражения, из них 11586 независимых ( $R_{\text{int}} = 0.0633$ ) и 8694 наблюдаемых отражения ( $I \geq 2\sigma(I)$ ), 433 параметра уточнения:  $R_1 = 0.0454$ ,  $wR_2 = 0.1046$ .

Кристаллы соединения II светло-коричневые ( $\text{C}_{30}\text{H}_{23}\text{N}_2\text{O}_5\text{Bi}$ ,  $M = 700.48$ ), моноклинные, пр. гр.  $P2_1/c$ , при 293.15 К  $a = 10.936(8)$ ,  $b = 14.358(10)$ ,  $c = 17.465(11) \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 90.00^\circ$ ,  $\beta = 96.55(2)^\circ$ ,  $\gamma = 90.00^\circ$ ,  $V = 2724(3) \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{\text{выч}} = 1.708 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 6.513 \text{ мм}^{-1}$ ,  $F(000) = 1360.0$ . Измерено 80345 отражений, из них 7666 независимых ( $R_{\text{int}} = 0.0570$ ) и 2975 наблюдаемых отражений ( $I \geq 2\sigma(I)$ ), 343 параметра уточнения:  $R_1 = 0.0253$ ,  $wR_2 = 0.0483$ .

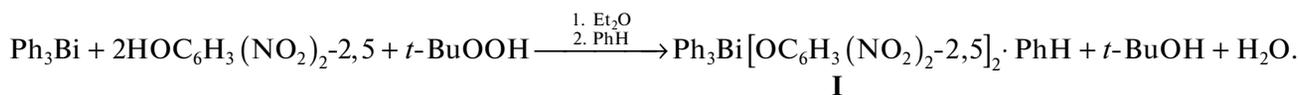
Кристаллы соединения III бесцветные ( $\text{C}_{24}\text{H}_{20}\text{BrBi}$ ,  $M = 597.29$ ), моноклинные, пр. гр.  $P2_1/n$ , при 293.15 К  $a = 12.405(9)$ ,  $b = 10.476(10)$ ,  $c = 16.601(12) \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 90.00^\circ$ ,  $\beta = 105.51(3)^\circ$ ,  $\gamma = 90.00^\circ$ ,  $V = 2079(3) \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 4$ ,  $\rho_{\text{выч}} = 1.908 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 10.407 \text{ мм}^{-1}$ ,  $F(000) = 1128.0$ . Измерено 61701 от-

ражение, из них 8813 независимых ( $R_{\text{int}} = 0.0664$ ) и 5161 наблюдаемое отражение [ $I \geq 2\sigma(I)$ ], 235 параметров уточнения:  $R_1 = 0.0407$ ,  $wR_2 = 0.0669$ .

Основные длины связей и валентные углы структур I–III приведены в табл. 1, полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 1902397 (I), № 1901678 (II), № 1901677 (III); deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

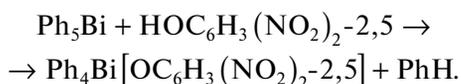
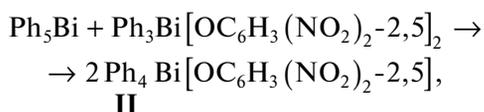
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами установлено, что реакция трифенилвисмута, 2,5-динитрофенола и *трет*-бутилгидропероксида, использованного в роли окислителя вместо пероксида водорода [8, 9], приводит к образованию соответствующего диароксида трифенилвисмута, который после перекристаллизации из бензола, по данным РСА, представляет собой сольват I:

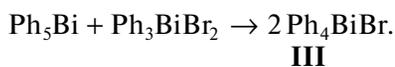


Темно-желтые кристаллы I хорошо растворимы в хлороформе, ацетонитриле, тетрагидрофуране, ароматических углеводородах, плохо — в изопропиловом спирте.

Соединение II синтезировано нами по реакции перераспределения лигандов из пентафенилвисмута и I с выходом 61%, а также дефенилированием пентафенилвисмута 2,5-динитрофенолом (83%):



Известно, что среди галогенидов тетрафенилвисмута относительно устойчивым является только фторид, который был структурно охарактеризован в [30], остальные галогениды были получены ранее, однако их строение не установлено [31]. Мы показали, что реакция пентафенилвисмута и дибромид трифенилвисмута приводит к образованию соединения III, выделенного из реакционной смеси с выходом 72%:



После перекристаллизации из воды кристаллы III имеют температуру плавления 119°C, которая

с течением времени понижается, что указывает на кинетическую неустойчивость соединения.

В ИК-спектрах I и II в области поглощения нитрогрупп (1560–1320 см<sup>-1</sup>) наблюдаются интенсивные полосы, отвечающие асимметричным (1533 см<sup>-1</sup>) и симметричным (1337 см<sup>-1</sup> для I и 1339 см<sup>-1</sup> для II) колебаниям [32, 33]. Наблюдаются также полосы при 1279, 1249 см<sup>-1</sup> (I) и 1267 см<sup>-1</sup> (II), характерные для связи С–О в фенолах [32, 33].

По данным РСА, координация атома висмута в I — искаженная тригонально-бипирамидальная (рис. 1). Аксиальный угол O(1)Bi(1)O(2) равен 177.48(11)°, углы между экваториальными связями C(1)Bi(1)C(11), C(1)Bi(1)C(21) и C(11)Bi(1)C(21) составляют 137.39(18)°, 113.91(18)° и 108.63(19)° соответственно. Расстояния Bi(1)—C(1,11,21) изменяются в интервале 2.196(5)–2.212(5) Å. Связи Bi(1)—O(1,2) равны 2.227(4) и 2.228(3) Å. Особенностью строения соединения I является наличие координации атома кислорода O(3) одной из нитрогрупп с атомом висмута (Bi(1)⋯O(3) 2.890(7) Å, что больше суммы ковалентных радиусов висмута и кислорода (2.14 Å [34]), но существенно меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов (3.59 Å [35]) указанных элементов). Невалентное взаимодействие приводит к искажению координационного полиэдра атома висмута, проявляющемуся в значительном (до 137.39(18)°) увеличении угла C(1)Bi(1)C(11) со стороны контакта. Таким образом, координационное число атома висмута в I

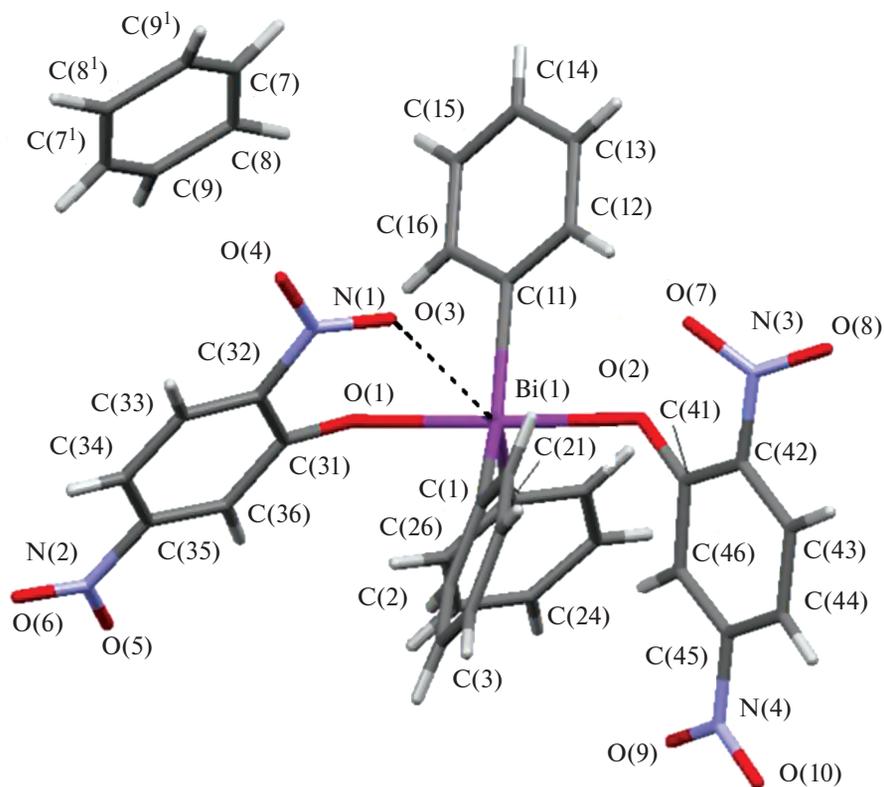


Рис. 1. Общий вид молекулы соединения I.

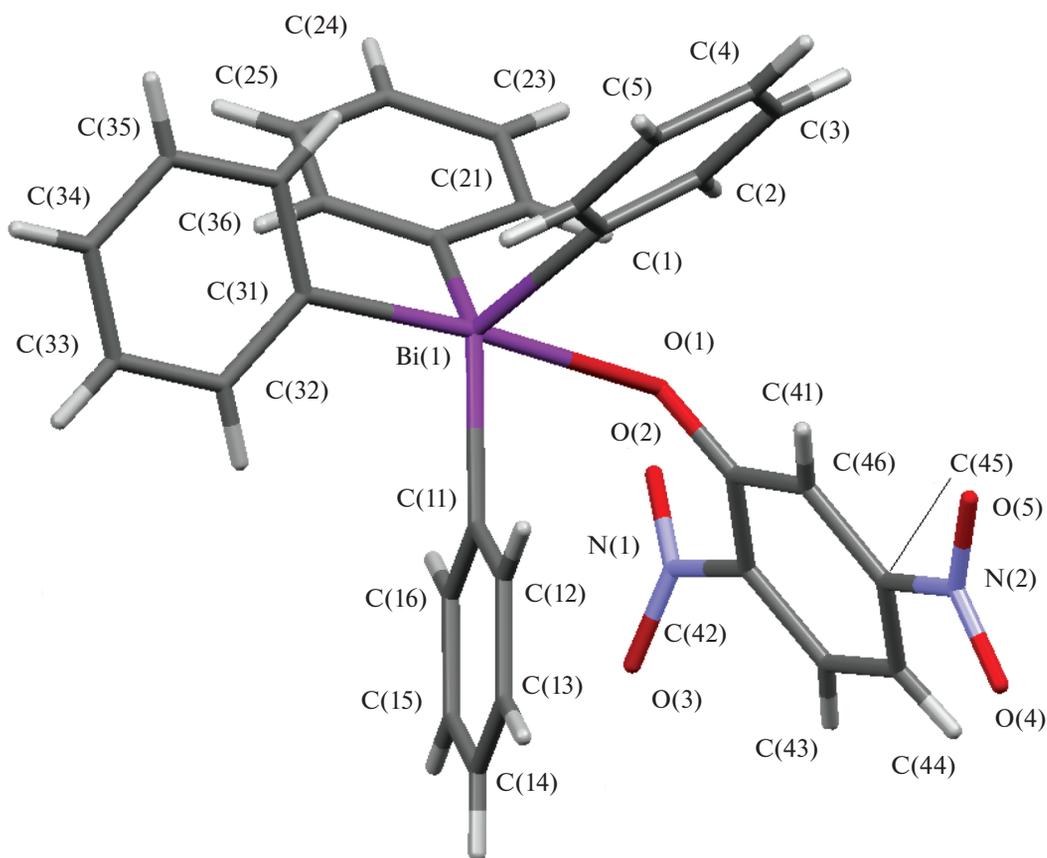


Рис. 2. Общий вид молекулы соединения II.

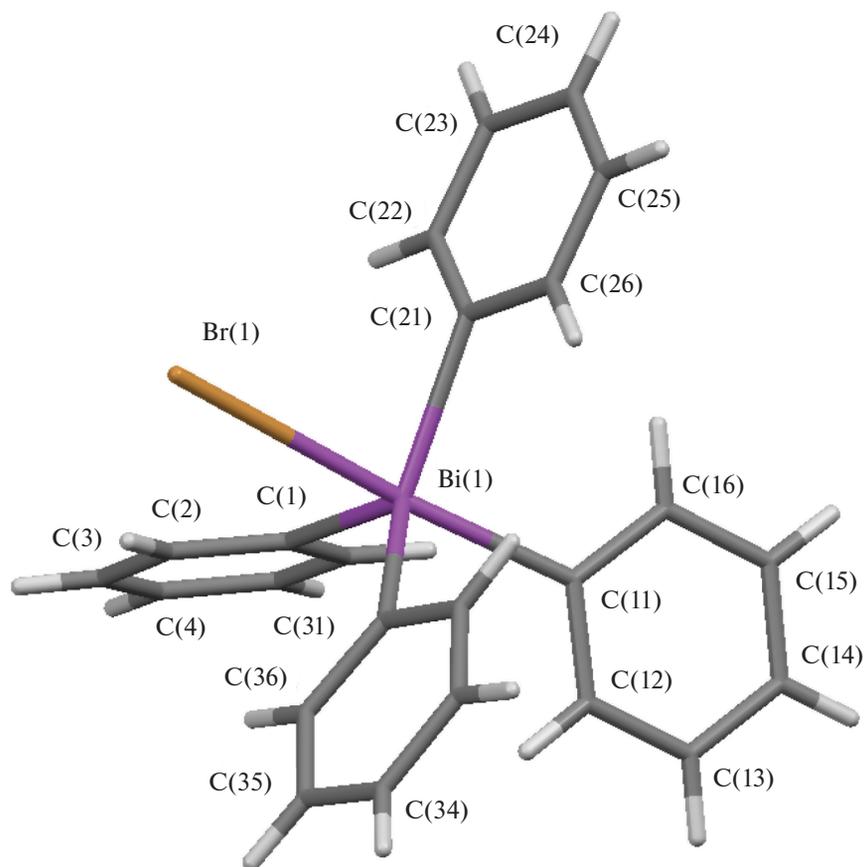


Рис. 3. Общий вид молекулы соединения III.

можно определить как  $5 + 1$ . Отметим, что столь необычная координация центрального атома с атомом кислорода в производных висмута  $Ag_3BiX_2$ , содержащих нитрогруппы в лиганде X, наблюдается впервые.

В кристалле соединения II (рис. 2) значение аксиального угла  $O(1)Bi(1)C(31)$  и сумма экваториальных углов  $CBiC$  составляют  $175.55(9)^\circ$  и  $351.37^\circ$  соответственно. Углы  $O(1)Bi(1)C(1,11,21)$  и  $C(31)Bi(1)C(1,11,21)$  между аксиальными и экваториальными заместителями изменяются в интервале  $77.08(9)^\circ - 100.59(11)^\circ$ , что свидетельствует о существенном искажении тригонально-бипирамидальной координации атома висмута. Длина аксиальной связи  $Bi(1)-O(1)$  составляет  $2.527(2)$  Å, связь  $Bi-C_{акс}(31)$  ( $2.242(3)$  Å) длиннее экваториальных связей  $Bi-C_{эқв}(1,11,21)$  ( $2.195(3) - 2.200(3)$  Å). Расстояние  $O(1)-C(1)$  ( $1.280(3)$  Å) меньше аналогичных расстояний в молекуле I ( $1.306(6)$  и  $1.317(6)$  Å).

В соединении III (рис. 3) наблюдается более сильное искажение тригонально-бипирамидальной конфигурации молекулы, чем во фториде тетрафенилвисмута.

Так, аксиальный угол  $BrBiC_{акс}$  в III равен  $174.87(10)^\circ$  по сравнению с  $179.12^\circ$  ( $FBiC_{акс}$ ) во фториде [30], сумма углов в экваториальной плоскости в III ( $356.11^\circ$ ) незначительно отличается от фторида ( $355.19^\circ$ ). Атом висмута в III выходит из экваториальной плоскости в направлении аксиально расположенного атома углерода, вследствие чего углы  $BrBiC_{эқв} < 90^\circ$ :  $80.55^\circ$ ,  $83.42^\circ$  и  $86.65^\circ$ . Напротив, валентные углы  $C_{акс}BiC_{эқв}$  составляют  $95.70^\circ$ ,  $95.92^\circ$  и  $98.24^\circ$ . Аксиальная связь  $Bi-C(11)$ , равная  $2.231(4)$  Å, больше экваториальных связей  $Bi-C(1,21,31)$ :  $2.199(4)$ ,  $2.188(4)$  и  $2.189(4)$  Å соответственно. Расстояние  $Bi(1)-Br(1)$  ( $3.1387$  Å) значительно превышает сумму ковалентных радиусов атомов висмута и брома ( $2.68$  Å [34]), во фториде тетрафенилвисмута длина связи  $Bi-F$  ( $2.218$  Å) близка к сумме ковалентных радиусов элементов ( $2.05$  Å).

Структурная организация кристаллов I–III обусловлена слабыми межмолекулярными водородными связями  $N-O \cdots H-C$  ( $2.45 - 2.66$  Å (I),  $2.54 - 2.69$  Å (II)) и  $Bi-Br \cdots H-C$  ( $3.00$ ,  $3.02$  Å (III)), что близко к суммам ван-дер-ваальсовых радиусов атомов кислорода и водорода ( $2.62$  Å), брома и водорода ( $2.93$  Å [35]).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реакцией окислительного присоединения осуществлен синтез бис(2,5-динитрофеноксида) трифенилвисмута, в котором координационное число атома висмута увеличивается за счет дополнительной координации атома кислорода одной из нитрогрупп. Впервые по реакции перераспределения лигандов получен бромид тетрафенилвисмута, который структурно охарактеризован методом РСА. Деарилирование пентафенилвисмута 2,5-динитрофенолом протекает с образованием 2,5-динитрофеноксида тетрафенилвисмута.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 4.6151.2017/8.9.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abramovitch R.A., Barton D.H.R., Finet J.-P.* // *Tetrahedron*. 1988. V. 44. № 11. P. 3039. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)85938-X](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)85938-X)
2. *Finet J.-P.* *Ligand Coupling Reactions with Heteroatomic Compounds*. Oxford: Pergamon Press, 1998. 291 p.
3. *Suzuki H., Matano Y.* *Organobismuth Chemistry*. New York: Elsevier, 2001. 619 p.
4. *Elliott G.I., Konopelski J.P.* // *Tetrahedron*. 2001. V. 57. № 27. P. 5683. [https://doi.org/10.1016/S0040-4020\(01\)00385-4](https://doi.org/10.1016/S0040-4020(01)00385-4)
5. *Hoppe S., Whitmire K.H.* // *Organometallics*. 1998. V. 17. № 7. P. 1347. <https://doi.org/10.1021/om970760r>
6. *Sharutin V.V., Egorova I.V., Tsiplukhina T.V. et al.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2004. V. 30. № 12. P. 884. [*Шарутин В.В., Егорова И.В., Циплухина Т.В. и др.* // *Коорд. химия*. 2004. Т. 30. № 12. С. 935.] <https://doi.org/10.1007/s11173-005-0009-2>
7. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Egorova I.V. et al.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2004. V. 30. № 1. P. 23. [*Шарутин В.В., Шарутина О.К., Егорова И.В. и др.* // *Коорд. химия*. 2004. Т. 30. № 1. С. 25.] <https://doi.org/10.1023/B:RUCO.0000011637.87876.55>
8. *Sharutin V.V., Egorova I.V., Sharutina O.K. et al.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2004. V. 30. № 1. P. 12. [*Шарутин В.В., Егорова И.В., Шарутина О.К. и др.* // *Коорд. химия*. 2007. Т. 33. № 1. С. 14.] <https://doi.org/10.1134/S1070328407010034>
9. *Ruiter R., Huber F., Preut H.* // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1986. V. 539. № 8. P. 110. <https://doi.org/10.1002/zaac.19865390811>
10. *Goswami M., Ellern A., Pohl N.L.B.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013. V. 52. № 32. P. 8441. <https://doi.org/10.1002/anie.201304099>
11. *Robertson A.P.M., Burford N., McDonald R. et al.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014. V. 53. № 13. P. 3480. <https://doi.org/10.1002/anie.201310613>
12. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Senchurin V.S. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2018. V. 63. № 7. P. 867. [*Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчуринов В.С. и др.* // *Журн. неорган. химии*. 2004. Т. 62. № 7. С. 823.] <https://doi.org/10.1134/S0036023618070185>
13. *Cui L., Bi C., Fan Y. et al.* // *Inorg. Chim. Acta*. 2015. V. 437. P. 41. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2015.07.008>
14. *Yu L., Ma Y.-Q., Wang G.-C. et al.* // *J. Organomet. Chem.* 2003. V. 679. № 2. P. 173. [https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(03\)00547-3](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(03)00547-3)
15. *Kumar I., Bhattacharya P., Whitmire K.H.* // *Organometallics*. 2014. V. 33. № 11. P. 2906. <https://doi.org/10.1021/om500337z>
16. *Yu L., Ma Y.-Q., Wang G.-C. et al.* // *Appl. Organomet. Chem.* 2004. V. 18. № 4. P. 187. <https://doi.org/10.1002/aoc.609>
17. *Wang G.-C., Xiao J., Lu Y.-N. et al.* // *Appl. Organomet. Chem.* 2005. V. 19. № 1. P. 113. <https://doi.org/10.1002/aoc.749>
18. *Barucki H., Coles S.J., Costello J.F. et al.* // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 2000. № 14. P. 2319. <https://doi.org/10.1039/B002337J>
19. *Sharutin V.V., Sharutina O.K., Ermakova V.A. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62. № 8. P. 1043. [*Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ермакова В.А. и др.* // *Журн. неорган. химии*. 2017. Т. 62. № 8. С. 1049.] <https://doi.org/10.1134/S0036023617080174>
20. *Suzuki H., Ikegami T., Matano Y. et al.* // *J. Chem. Soc., Perkin Trans.* 1993. V. 1. P. 2411. <https://doi.org/10.1039/P1993000241I>
21. *Hassan A., Wang S.* // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 1997. № 12. P. 2009. <https://doi.org/10.1039/A700477J>
22. *Ferguson G., Kaitner B., Glidewell C. et al.* // *J. Organomet. Chem.* 1991. V. 419. № 3. P. 283. [https://doi.org/10.1016/0022-328X\(91\)80241-B](https://doi.org/10.1016/0022-328X(91)80241-B)
23. *Hassan A., Breeze S.R., Courtenay S. et al.* // *Organometallics*. 1996. V. 15. № 26. P. 5613. <https://doi.org/10.1021/om960641w>
24. *Miloudi A., Boyer G., El-Abed D. et al.* // *Main Group Met. Chem.* 2001. V. 24. № 11. P. 767. <https://doi.org/10.1515/MGMC.2001.24.11.767>
25. *Kiran A.B., Mocanu T., Pollnitz A. et al.* // *Dalton Trans.* 2018. № 47. P. 2531. <https://doi.org/10.1039/C7DT04516F>
26. *Egorova I.V., Zhidkov V.V., Grinishak I.P. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2018. V. 63. № 7. P. 861. [*Егорова И.В., Жидков В.В., Гринишак И.П. и др.* // *Журн. неорган. химии*. 2018. Т. 63. № 7. С. 816.] <https://doi.org/10.1134/S0036023618070069>
27. Bruker (1998). SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Bruker AKCS Inc., Madison, Wisconsin, USA.

28. Bruker (1998). SHELXTL/PC. Versions 5.10. An Integrated System for Solving, Refining and Displaying Crystal Structures from Diffraction Data. Bruker AKCS Inc., Madison, Wisconsin, USA.
29. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.  
<https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
30. Ooi T., Goto R., Maruoka K. // J. Am. Chem. Soc. 2003. V. 125. № 35. P. 10494.  
<https://doi.org/10.1021/ja030150k>
31. Wittig G., Clauß K. // Lieb. Ann. 1952. V. 578. P. 136.  
<https://doi.org/10.1002/jlac.19525780116>
32. Шрайнер Р., Фьюзон Р., Кёртин Д. и др. Идентификация органических соединений. М.: Мир, 1983. 704 с.
33. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. М.: Мир, 2006. 440 с.
34. Cordero B., Gomez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. P. 2832.  
<https://doi.org/10.1039/B801115J>
35. Mantina M., Chamberlin A.C., Valero R. et al. // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113. № 19. P. 5806.  
<https://doi.org/10.1021/jp8111556>