Научная статья УДК 546.185+547.53.024+548.312.3 DOI: 10.14529/chem250104

СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ НИТРАТОВ БЕНЗИЛ-И (4-КАРБОКСИБУТИЛ)ТРИФЕНИЛФОСФОНИЯ

В.В. Шарутин[⊠], Д.П. Шевченко, К.Р. Хажиева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия [™] sharutin50@mail.ru

Аннотация. Взаимодействием бромидов бензил- и (4-карбоксибутил)трифенилфосфония с синтезированы комплексы фосфора [Ph₃PCH₂Ph]NO₃ азотной кислотой (1) И [Ph₃P(CH₂)₄COOH]NO₃ (2) соответственно. Полученные соединения охарактеризованы методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА). По данным РСА, нитрат бензилтрифенилфосфония (1) [$C_{25}H_{22}NO_3P$, M = 415,41; триклинная сингония, пр. гр. P-1; параметры ячейки: *a* = 9,573(7) Å, *b* = 10,272(10) Å, *c* = 12,066(11) Å; *α* = 105,42(4)°, *β* = 107,06(4)°, $\gamma = 92,73(4)^{\circ}, V = 1083,3(16)$ Å³, $Z = 2; \rho_{BHY} = 1,273 \text{ г/cm}^3; \mu = 0,153 \text{ Mm}^{-1}; F(000) = 436,0; \text{ обл.}$ сбора по 20: 5,68–54,32°; $-12 \le h \le 12, -13 \le k \le 13, -15 \le l \le 15$; всего отражений 26281; независимых отражений 4802 (R_{int} = 0,0345); GOOF = 1,038; R-фактор 0,0451] и нитрат (4карбоксибутил) трифенилфосфония (2) [$C_{23}H_{24}NO_5P$, M = 425,40; моноклинная сингония, пр. гр. $P2_1/n$; параметры ячейки: a = 8,937(16) Å, b = 17,86(3) Å, c = 13,71(2) Å; $\alpha = 90,00^\circ$, $\beta = 95,04(11)^{\circ}, \gamma = 90,00^{\circ}, V = 2180(6)$ Å³, $Z = 4; \rho_{\text{BMY}} = 1,296 \text{ G/cm}^3; \mu = 0,160 \text{ Mm}^{-1};$ F(000) = 896,0; обл. сбора по 2 θ : 5,72–55,48°; $-11 \le h \le 11, -22 \le k \le 23, -17 \le l \le 17;$ всего отражений 18882; независимых отражений 4732 (R_{int} = 0,0952); GOOF = 1,040; R-фактор 0,0729] имеют ионное строение и состоят из органилтрифенилфосфониевых катионов с несколько искаженной тетраэдрической координацией атома фосфора (углы СРС варьируются в пределах 107,10(8)-111,56(10)° для 1 и 107,62(10)-111,99(16)° для 2; расстояния Р-С составляют 1,791(2)-1,803(2) Å и 1,786(4)-1,803(4) Å соответственно) и плоских тригональных нитрат-анионов (суммы углов ОNО равны 359,6° и 360°). Структурная организация в кристалле 1 обусловлена только межионными водородными связями С-H···O-NO₂ (2,24-2,61 Å). Кристалл 2, кроме взаимодействий C-H···O-NO₂ (2,12-2,72 Å), также содержит контакты O-H···O-NO₂ (2,12 и 2,42 Å), С-H···O=С (2,63 Å) и С-H···NO₃ (2,60 Å). Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов нитратов 1 и 2 депонированы в Кембриджском банке структурных данных (ССОС 2331486 (1), 2331490 (2); deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

Ключевые слова: нитраты алкилтрифенилфосфония, синтез, строение, рентгеноструктурный анализ

Для цитирования: Шарутин В.В., Шевченко Д.П., Хажиева К.Р. Синтез и строение нитратов бензил- и (4-карбоксибутил)трифенилфосфония // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 1. С. 70–77. DOI: 10.14529/chem250104

Original article DOI: 10.14529/chem250104

SYNTHESIS AND STRUCTURE OF BENZYL-AND (4-CARBOXYBUTYL)TRIPHENYLPHOSPHONIUM NITRATES

V.V. Sharutin[™], D.P. Shevchenko, K.R. Khazhieva

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia [™] sharutin50@mail.ru

Abstract. Interaction of benzyl- and (4-carboxybutyl)triphenylphosphonium bromides with nitric acid synthesized phosphorus complexes $[Ph_3PCH_2Ph]NO_3$ (1) and $[Ph_3P(CH_2)_4COOH]NO_3$ (2), respectively. The obtained compounds were characterized by IR spectroscopy and X-ray diffraction

```
© Шарутин В.В., Шевченко Д.П., Хажиева К.Р., 2025.
```

analysis. According to the X-ray diffraction data, benzyltriphenylphosphonium nitrate (1) $[C_{25}H_{22}NO_3P, M = 415.41;$ triclinic crystal system, P-1 space group; cell parameters: a = 9.573(7) Å, b = 10.272(10) Å, c = 12.066(11) Å; $\alpha = 105.42(4)^{\circ}$, $\beta = 107.06(4)^{\circ}$, $\gamma = 92.73(4)^{\circ}$, V = 1083.3(16) Å³, Z = 2; $\rho_{calc} = 1.273 \text{ g/cm}^3$; $\mu = 0.153 \text{ mm}^{-1}$; F(000) = 436.0; $20 5.68 - 54.32^\circ$; $-12 \le h \le 12, -13 \le k \le 13$, $-15 \le l \le 15$; collected reflections 26281; independent reflections 4802 ($R_{int} = 0.0345$); GOOF = 1.038; *R*-factor 0.0451] and 4-carboxybutyltriphenylphosphonium nitrate (2) $[C_{23}H_{24}NO_5P, M = 425.40;$ monoclinic crystal system, $P2_1/n$ space group; cell parameters: a = 8.937(16) Å, b = 17.86(3) Å, c = 13.71(2) Å; $\alpha = 90.00^{\circ}$, $\beta = 95.04(11)^{\circ}$, $\gamma = 90.00^{\circ}$, V = 2180(6) Å³, Z = 4; $\rho_{calc} = 1.296$ g/cm³; $\mu = 0.160 \text{ mm}^{-1}$; F(000) = 896.0; $2\theta 5.72-55.48^{\circ}$; $-11 \le h \le 11, -22 \le k \le 23, -17 \le l \le 17$; collected reflections 18882; independent reflections 4732 ($R_{int} = 0.0952$); GOOF = 1.040; *R*-factor 0.0729] have an ionic structure and consist of organyltriphenylphosphonium cations with a slightly distorted tetrahedral-coordinated phosphorus atom (the CPC angles vary in the range 107.10(8)– $111.56(10)^{\circ}$ for 1 and $107.62(10)-111.99(16)^{\circ}$ for 2: the P-C distances are 1.791(2)-1.803(2) Å and 1.786(4)-1.803(4) Å. respectively) and planar trigonal nitrate anions (the sums of the ONO angles are 359.6° and 360°). The structural organization in crystal 1 is determined only by the interionic hydrogen bonds $C-H\cdots O-NO_2$ (2.24–2.61 Å). Crystal 2, in addition to the C-H···O-NO₂ interactions (2.12–2.72 Å), also contains the O-H···O-NO₂ contacts (2.12 and 2.42 Å), C-H···O=C (2,63 Å), as well as C-H···NO₃ (2.60 Å). Complete tables of atomic coordinates, bond lengths, and bond angles of nitrates 1 and 2 are deposited with the Cambridge Crystallographic Data Centre (CCDC 2331486 (1), 2331490 (2); deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

Keywords: alkyltriphenylphosphonium nitrates, synthesis, structure, X-ray diffraction analysis

For citation: Sharutin V.V., Shevchenko D.P., Khazhieva K.R. Synthesis and structure of benzyland (4-carboxybutyl)triphenylphosphonium nitrates. *Bulletin of the South Ural State University*. *Ser. Chem.* 2025;17(1):70–77. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250104

Введение

Известно, что фосфорорганические соединения широко используются в качестве смазочных материалов, топливных присадок, антипиренов, пластификаторов, фармацевтических препаратов, реагентов в органическом синтезе и проявляют свойства инсектицидов, гербицидов или нервнопаралитических агентов [1-3]. Одними из наиболее исследованных органических производных фосфора являются соли тетраорганилфосфония [R₄P]X (где R – одинаковые или отличающиеся заместители), получаемые алкилированием/арилированием органофосфинов, а также по реакции пентаорганилфосфора с различными агентами [4, 5]. Важнейшей областью применения солей фосфония можно считать получение из них фосфорных илидов, используемых для синтеза алкенов заданного строения, кроме того, данные соединения широко применяются в качестве объемных катионов для стабилизации различных анионов [6-8], а также в качестве ионных жидкостей [9], межфазных катализаторов [10] и антипиренов [11]. Несмотря на значительный объем накопленных экспериментальных данных по тетраорганилфосфониевым солям, кристаллическое строение нитратных производных [R₄P]NO₃ известны для небольшого числа примеров [12–17]. С целью продолжения данного направления нами описан синтез нитратов бензилтрифенилфосфония (1) и (4-карбоксибутил)трифенилфосфония (2), строение которых доказано методами ИКспектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Экспериментальная часть

Синтез нитрата бензилтрифенилфосфония [PhCH₂P(Ph)₃][NO₃] (1). Бромид бензилтрифенилфосфония (0,200 г, 0,46 ммоль) растворяли в 20 мл воды при нагревании, охлаждали до комнатной температуры и прибавляли 1 мл раствора концентрированной азотной кислоты ($\rho = 1,382$ г/мл). Выпавший осадок соединения 1 фильтровали, сушили и перекристаллизовывали из 2-пропанола. Выход 0,164 г (85 %), т. пл. 213 °C. Найдено (%): С 72,11; Н 5,44. Для C₂₅H₂₂NO₃P рассчитано (%): С 72,22; Н 5,30. ИК-спектр: 3061, 3026, 2994, 2940, 2895, 2822, 1443, 1377, 1323, 995, 827 см⁻¹.

Синтез нитрата (4-карбоксибутил)трифенилфосфония [HO(O)C(CH₂)₄PPh₃][NO₃] (2). Синтезировали по аналогичной методике из бромида (4-карбоксибутил)трифенилфосфония (0,100 г, 0,23 ммоль) и азотной кислоты. Выход 0,078 г (81 %), т. пл. 175 °C. Найдено (%):

С 65,37; Н 5,71. Для С₂₃Н₂₄NO₅P рассчитано (%): С 64,92; Н 5,64. ИК-спектр: 3082, 3055, 3042, 3026, 2997, 2907, 2878, 2839, 1728, 1439, 1319, 995, 824 см⁻¹.

ИК-спектры соединений 1 и 2 записывали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S; образцы готовили таблетированием с KBr (область поглощения 4000–400 см⁻¹).

Рентгеноструктурный анализ соединений 1 и 2 проводили на автоматическом четырехкружном дифрактометре Bruker D8 QUEST (Мо К_{α}-излучение, $\lambda = 0,71073$ Å, графитовый монохроматор). Сбор, редактирование данных и уточнение параметров элементарной ячейки, а также учет поглощения проведены по программам *SMART* и *SAINT-Plus* [18]. Все расчеты по определению и уточнению структур выполнены по программам *SHELXL/PC* [19] и *OLEX2* [20]. Структуры определены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов в анизотропном приближении для неводородных атомов. Кристаллографические данные и результаты уточнения структуры приведены в табл. 1, длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Таблица 1

Кристаллографические данные	, параметры эксперимента і	и уточнения структур 1 и 🕯
-----------------------------	----------------------------	----------------------------

Параметр	1	2
Формула	$C_{25}H_{22}NO_3P$	$C_{23}H_{24}NO_5P$
М	415,41	425,40
Сингония	Триклинная	Моноклинная
Пространственная группа	<i>P</i> -1	$P2_1/n$
<i>a</i> , Å	9,573(7)	8,937(16)
b, Å	10,272(10)	17,86(3)
<i>c,</i> Å	12,066(11)	13,71(2)
α, град.	105,42(4)	90,00
β, град.	107,06(4)	95,04(11)
ү, град.	92,73(5)	90,00
$V, Å^3$	1083,3(16)	2180(6)
Z	2	4
ρ(выч.), г/см ³	1,273	1,296
μ, мм ⁻¹	0,153	0,160
F(000)	436,0	966,0
Форма кристалла (размер, мм)	$0,55 \times 0,5 \times 0,11$	$0,56 \times 0,26 \times 0,11$
Область сбора данных по 20, град.	5,68–54,32	5,72–55,48
	$-12 \le h \le 12$,	$-11 \le h \le 11,$
Интервалы индексов отражений	$-13 \le k \le 13,$	$-22 \le k \le 22,$
	$-15 \le l \le 15$	$-17 \le l \le 17$
Измерено отражений	26281	18882
Независимых отражений (R _{int})	4802 (0,0345)	4732 (0,0952)
Переменных уточнения	275	272
GOOF	1,038	1,040
R -факторы по $F^2 > 2\sigma(F^2)$	$R_1 = \overline{0,0451, wR_2 = 0,1170}$	$R_1 = \overline{0,0729, wR_2 = 0,1805}$
<i>R</i> -факторы по всем отражениям	$R_1 = 0,0569, wR_2 = 0,1262$	$R_1 = 0,1409, wR_2 = 0,2162$
Остаточная электронная		
плотность (min/max), $e/Å^3$	0,34/-0,27	0,28/-0,25

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структурах 1 и 2

Связь <i>d</i> , Å		Угол ω, град.	
		1	
P(1)-C(1)	1,791(2)	C(1)P(1)C(21)	110,52(9)
P(1)-C(21)	1,795(2)	C(1)P(1)C(11)	110,87(9)
P(1)-C(11)	1,7989(19)	C(1)P(1)C(37)	108,27(9)
P(1)-C(37)	1,803(2)	C(21)P(1)C(11)	107,10(8)

Связь <i>d</i> , Å		Угол ω, град.			
O(1)–N(1)	1,230(3)	C(21)P(1)C(37)	111,56(10)		
O(3)–N(1)	1,219(2)	C(11)P(1)C(37)	108,52(9)		
O(2)–N(1)	1,234(2)	O(1)N(1)O(2)	122,1(2)		
2					
P(1)-C(21)	1,802(4)	C(21)P(1)C(31)	108,77(19)		
P(1)-C(1)	1,786(4)	C(1)P(1)C(21)	107,62(16)		
P(1)-C(31)	1,803(4)	C(1)P(1)C(31)	111,99(16)		
P(1)-C(11)	1,795(4)	C(1)P(1)C(11)	109,52(18)		
O(5)–C(35)	1,193(5)	C(11)P(1)C(21)	108,04(16)		
N(1)-O(1)	1,231(4)	C(11)P(1)C(31)	110,78(16)		
N(1)-O(2)	1,180(5)	O(2)N(1)O(3)	118,4(4)		
N(1)-O(3)	1,229(5)	O(1)N(1)O(2)	122,3(4)		

Окончание табл. 2

Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов соединения 1 и 2 депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 2331486 и 2331490; deposit@ccdc.cam.ac.uk; http://www.ccdc.cam.ac.uk).

Обсуждение результатов

Известно, что реакции обмена галогенид-аниона в галогенидах органилтрифенилфосфония используются для получения комплексов платины, золота и серебра [6, 21, 22]. Интересный случай замещения галогенид-аниона на остаток более сильной кислоты описан авторами работы [23], в которой описываются реакции галогенидов органилтрифенилфосфония с аренсульфоновыми кислотами в воде, приводящие к образованию аренсульфонатов органилтрифенилфосфония. Единственный пример замещения атома хлора на нитрогруппу приведен в работе [24], где действие азотной кислоты на хлориды цианометил- и ацетонилтрифенилфосфония приводит к образованию с хорошим выходом соответствующих нитратов.

В продолжение исследований в области реакций замещения бром-аниона в производных фосфора [Ph₃PR]Вг нами получены нитраты бензилтрифенилфосфония и (4-карбоксибутил)трифенилфосфония [Ph₃PCH₂Ph]NO₃ (1) и [Ph₃P(CH₂)₄C(O)OH]NO₃ (2):

 $[Ph_3PR]Br + HNO_3 \xrightarrow[-HBr]{-HBr} [Ph_3PR]NO_3$ $R = CH_2Ph (1), (CH_2)_4C(O)OH (2)$

Структуры соединений 1 и 2 подтверждаются данными ИК-спектров, которые содержат характерные для органилтрифенилфосфониевых солей полосы поглощения колебаний связей P-C_{Ph} в областях 1450–1435 см⁻¹ и 1005–995 см⁻¹: 1439, 995 см⁻¹ (1) и 1443, 995 см⁻¹ (2). ИК-спектр комплекса 2 содержит интенсивную полосу поглощения валентных колебаний карбонильной группы при 1728 см⁻¹. Кроме того, в ИК-спектрах соединений 1 и 2 присутствуют полосы поглощения при 1319 см⁻¹ (1) и 1323, 1377 см⁻¹ (2), относящиеся к асимметричным валентным колебания N–O связи в анионах NO₃⁻. Также наблюдается слабые полосы поглощения при 824 см⁻¹ (1) и 827 см⁻¹ (2), характерные для деформационных колебаний O-N-O нитратных анионов. ИК-спектры обоих комплексов содержат полосы поглощения при 3061, 2994 (1), 3082, 2997 см⁻¹ (2), и 2940, 2822 см⁻¹ (1), 2907, 2839 см⁻¹ (2), относящиеся к валентным колебаниям связей C-H_{Ar} и C–H_{Alk} соответственно [25].

Комплексы 1 и 2 состоят из нитрат-анионов и органилтрифенилфосфониевых катионов с несколько искаженной тетраэдрической координацией атома фосфора (углы СРС варьируются в пределах $107,10(8)-111,56(10)^{\circ}$ для 1 (рис. 1) и $107,62(10)-111,99(16)^{\circ}$ для 2 (рис. 2); расстояния Р–С составляют 1,791(2)–1,803(2) Å и 1,786(4)–1,803(4) Å соответственно и не превышают суммы ковалентных радиусов атомов фосфора и *sp*³-гибридизованного углерода (1,88 Å [26]).

Химия элементоорганических соединений Organometallic chemistry



Рис. 1. Строение нитрата бензилтрифенилфосфония (1)



Рис. 2. Строение нитрата (4-карбоксибутил) трифенилфосфония (2)

В плоских тригональных нитрат-анионах суммы углов ONO равны 359,6° и 360° соответственно. Структурная организация в кристаллах **1** и **2** обусловлена межионными водородными связями C–H···O–NO₂ (2,24–2,61 Å и 2,12–2,72 Å соответственно), причем наиболее короткий контакт наблюдается в **2** между атомом водорода метиленовой группы при атоме фосфора и атомом азота нитрогруппы.

Кристаллическая организация нитратов **1** и **2** (рис. 3, 4), в основном, обусловлена водородными связями С–Н····O–NO₂, длины которых варьируют в интервале 2,25–2,61 Å, что не превышает суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов водорода и кислорода (H···O 2,62 Å [27]). Кристалл **2** имеет более сложную организацию, и, кроме контактов С–H···O–NO₂ (2,39–2,64 Å), также содержит водородные связи О–H···O–NO₂ (2,12 и 2,42 Å), С–H···O=C (2,63 Å) и С–H···NO₃ (2,60 Å), длины которых меньше сумм ван-дер-ваальсовых радиусов соответствующих атомов или близки к таковым (H···N 2,65 Å [27]).



Рис. 3. Пространственная организация кристалла 1



Рис. 4. Пространственная организация кристалла 2 (проекция вдоль оси а)

Выводы

Таким образом, нами впервые получены нитраты бензилтрифенилфосфония (1) и (4карбоксибутил)трифенилфосфония (2), которые состоят из слабо искаженных тетраэдрических алкилтрифенилфосфониевых катионов и плоских тригональных нитрат-анионов. Межионные взаимодействия в кристалле 1 представлены только водородными связями С–H…O–NO₂, в то время как пространственная организация кристалла 2 включает также контакты О–H…O–NO₂, С– H…O=C и С–H…NO₃.

Список источников

1. *Richardson R.J., Makhaeva G.F.* Organophosphorus Compounds // Encyclopedia of Toxicology: 3rd Ed. San Diego: Academic Press Inc., 2014. P. 714–719. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00173-1

2. Phosphorus Compounds: Advanced Tools in Catalysis and Material Sciences, ed. by M. Peruzzini, L. Gonsalvi. New York: Springer, 2011. 470 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3817-3

3. *Razuvaev G.A., Osanova N.A., Brilkina T.G., Zinovjeva T.I., Sharutin V.V. //* J. Organomet. Chem. 1975. V. 99, No. 1. P. 93. DOI: 10.1016/S0022-328X(00)86365-2

4. *Hartley F.R.* The Chemistry of Organophosphorus Compounds. Volume 3: Phosphonium Salts, Ylides and Phosphoranes. New York: John Wiley & Sons, 1994. 442 p. DOI: 10.1002/047003436X

5. Зыкова А.Р. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2020. Т. 12. № 4. С. 5. DOI: 10.14529/chem200401

6. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Сенчурин В.С., Ткачева А.Р. // Журн. общ. химии. 2018. Т. 88, № 7. С. 1165. DOI: 10.1134/S0044460X1807017X

7. Szell P.M.J., Gabidullin B., Bryce D.L. // Acta Crystallogr. B: Struct. Sci. Cryst. Eng. Mater. 2017. V. 73, No. 2. P. 153. DOI: 10.1107/S2052520617000944

8. *Diop M.B., Diop L., Oliver A.G.* // Acta Crystallogr. E: Crystallogr. Commun. 2018. V. 74, No. 1. P. 69. DOI: 10.1107/S205698901701800X

9. Macarie L., Simulescu V., Ilia G. // ChemistrySelect. 2019. V. 4, No. 32. P. 9285. DOI: 10.1002/slct.201901712

10. Liu S., Kumatabara Y., Shirakawa S. // Green Chem. 2016. V. 18, No. 2. P. 331. DOI: 10.1039/C5GC02692J

11. Weil E.D., Levchik S.V. // J. Fire Sci. 2008. V. 26, No. 3. P. 243. DOI: 10.1177/0734904108089485

12. Ling I., Skelton B.W., Sobolev A.N. et al. // New J. Chem. 2020. V. 44, No. 25. P. 10220. DOI: 10.1039/D0NJ01975E

13. *Ling I., Sobolev A.N., Skelton B.W., Raston C.L.* // Cryst. Eng. Comm. 2020. V. 22, No. 44. P. 7704. DOI: 10.1039/D0CE01274B

14. *Diop T., Diop L., Kučeráková M., Dušek M. //* Acta Crystallogr. E: Crystallogr. Commun. 2013. V. 69, No. 2. P. o303. DOI: 10.1107/S1600536813002110

15. Neumüller B., Dehnicke K. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2008. V. 634, No. 14. P. 2567. DOI: 10.1002/zaac.200800357

16. Mariyatra M.B., Panchanatheswaran K., Goeta A.E. // Acta Crystallogr. E: Crystallogr. Commun. 2002. V. 58, No. 8. P. o807. DOI: 10.1107/S1600536802011431

17. Li S.-L., Mark T.C.W. // J. Mol. Struct. 1996. V. 384, No. 2–3. P. 135. DOI: 10.1016/S0022-2860(96)09348-9

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

19. 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.

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

21. Попкова М.А., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2021. Т. 13, № 4. С. 110. DOI: 10.14529/chem210409

22. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н., Ельцов О.С. // Коорд. химия. 2020. Т. 46, № 9. С. 554. DOI: 10.31857/S0132344X20090030

23. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 41. DOI: 10.14529/chem220205

24. Шевченко Д.П., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 3. С. 62.

25. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных: пер. с англ. Б.Н. Тарасевича. М.: Мир, 2006. 440 с.

26. Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. No. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J

27. 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, главный научный сотрудник, химический факультет, институт естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sharutin50@mail.ru

Шевченко Дмитрий Павлович – аспирант, химический факультет, институт естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: Shepher56@gmail.com

Хажиева Кристина Райсовна – студент 4-го курса бакалавриата кафедры теоретической и практической химии, институт естественных и точных наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: kristi22623@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12 октября 2024 г. The article was submitted 12 October 2024.