

РЕАКЦИИ ХЛОРИДОВ АЦЕТОНИЛТРИФЕНИЛФОСФОНИЯ И 2-БУТЕН-1,4-БИС(ТРИФЕНИЛФОСФОНИЯ) С АЗОТНОЙ КИСЛОТОЙ

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

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

[✉] sharutin50@mail.ru

Аннотация. Взаимодействием хлоридов ацетонилтрифенилфосфония и 2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) с азотной кислотой синтезированы алкилтрифенилфосфониевые нитраты $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{C}(\text{O})\text{Me}]\text{NO}_3$ (**1**) и $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{PPh}_3][\text{NO}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (**2**) соответственно. Полученные соединения охарактеризованы методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (РСА). По данным РСА, нитрат ацетонилтрифенилфосфония (**1**) $[\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{NO}_4\text{P}]$, $M = 381,35$; моноклинная сингония, пр. гр. $C2/c$; параметры ячейки: $a = 14,301(13) \text{ \AA}$, $b = 12,756(11) \text{ \AA}$, $c = 21,40(2) \text{ \AA}$; $\alpha = 90,00^\circ$, $\beta = 90,66(3)^\circ$, $\gamma = 90,00^\circ$, $V = 3904(8) \text{ \AA}^3$, $Z = 8$; $\rho_{\text{выч}} = 1,298 \text{ г/см}^3$; $\mu = 0,167 \text{ мм}^{-1}$; $F(000) = 1600,0$; обл. сбора по 2θ : $5,7\text{--}56,96^\circ$; $-16 \leq h \leq 19$, $-17 \leq k \leq 17$, $-28 \leq l \leq 28$; всего отражений 46344; независимых отражений 4894 ($R_{\text{int}} = 0,0808$); $GOOF = 1,034$; R -фактор 0,0631] и гидрат нитрата (2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) (**2**) $[\text{C}_{40}\text{H}_{40}\text{N}_2\text{O}_8\text{P}_2]$, $M = 738,68$; триклинная сингония, пр. гр. $P-1$; параметры ячейки: $a = 9,259(7) \text{ \AA}$, $b = 9,514(6) \text{ \AA}$, $c = 12,247(9) \text{ \AA}$; $\alpha = 68,43(4)^\circ$, $\beta = 72,47(5)^\circ$, $\gamma = 84,06(3)^\circ$, $V = 956,7(12) \text{ \AA}^3$, $Z = 1$; $\rho_{\text{выч}} = 1,282 \text{ г/см}^3$; $\mu = 0,168 \text{ мм}^{-1}$; $F(000) = 388,0$; обл. сбора по 2θ : $5,9\text{--}54,34^\circ$; $-11 \leq h \leq 11$, $-12 \leq k \leq 12$, $-15 \leq l \leq 15$; всего отражений 21543; независимых отражений 4219 ($R_{\text{int}} = 0,0354$); $GOOF = 1,029$; R -фактор 0,0493] имеют ионное строение и состоят из органилтрифенилфосфониевых катионов с несколько искаженной тетраэдрической координацией атома фосфора (углы СРС варьируются в пределах $104,99(11)\text{--}112,25(12)^\circ$ для **1** и $107,61(11)\text{--}111,28(11)^\circ$ для **2**; расстояния Р–С составляют $1,792(3)\text{--}1,802(3) \text{ \AA}$ и $1,792(2)\text{--}1,815(2) \text{ \AA}$ соответственно) и плоских тригональных нитрат-анионов (суммы углов ОНО равны $359,5^\circ$ и 360° соответственно). Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов нитратов **1** и **2** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC 2155176 (**1**), 2335887 (**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. Реакции хлоридов ацетонилтрифенилфосфония и 2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) с азотной кислотой // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 4. С. 79–85. DOI: 10.14529/chem240406

Original article
DOI: 10.14529/chem240406

REACTIONS OF ACETONYLTRIPHENYLPHOSPHONIUM AND 2-BUTENE-1,4-BIS(TRIPHENYLPHOSPHONIUM) CHLORIDES WITH NITRIC ACID

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

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

[✉] sharutin50@mail.ru

Abstract. Reactions of acetonyltriphenylphosphonium and 2-butene-1,4-bis(triphenylphosphonium) chlorides with nitric acid synthesized alkyltriphenylphosphonium compounds $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{C}(\text{O})\text{Me}]\text{NO}_3$ (**1**) and $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{PPh}_3][\text{NO}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (**2**), respectively. The resulting compounds were characterized by IR spectroscopy and X-ray diffraction analysis (XRD). According to the X-ray diffraction data, acetonyltriphenylphosphonium nitrate (**1**) $[\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{NO}_4\text{P}]$, $M = 381.35$; monoclinic system, sp. gr. $C2/c$; cell

parameters: $a = 14.301(13)$ Å, $b = 12.756(11)$ Å, $c = 21.40(2)$ Å; $\alpha = 90.00^\circ$, $\beta = 90.66(3)^\circ$, $\gamma = 90.00^\circ$, $V = 3904(8)$ Å³, $Z = 8$; $\rho_{\text{calc}} = 1.298$ g/cm³; $\mu = 0.167$ mm⁻¹; $F(000) = 1600.0$; collection region at 2θ : $5.7\text{--}56.96^\circ$; $-16 \leq h \leq 19$, $-17 \leq k \leq 17$, $-28 \leq l \leq 28$; total reflections 46344; independent reflections 4894 ($R_{\text{int}} = 0.0808$); $GOOF = 1.034$; R -factor = 0.0631] and (2-butene-1,4-bis(triphenylphosphonium nitrate hydrate) (**2**) [$C_{40}H_{40}N_2O_8P_2$, $M = 738.68$; triclinic system, space group $P\bar{1}$; cell parameters: $a = 9.259(7)$ Å, $b = 9.514(6)$ Å, $c = 12.247(9)$ Å; $\alpha = 68.43(4)^\circ$, $\beta = 72.47(5)^\circ$, $\gamma = 84.06(3)^\circ$, $V = 956.7(12)$ Å³, $Z = 2$; $\rho_{\text{calc}} = 1.282$ g/cm³; $\mu = 0.168$ mm⁻¹; $F(000) = 388.0$; collection region for 2θ : $5.9\text{--}54.34^\circ$; $-11 \leq h \leq 11$, $-12 \leq k \leq 12$, $-15 \leq l \leq 15$; total reflections 21543; independent reflections 4219 ($R_{\text{int}} = 0.0354$); $GOOF = 1.029$; R -factor = 0.0493] have an ionic structure and consist of organyltriphenylphosphonium cations with a slightly distorted tetrahedral coordination of the phosphorus atom (the CPC angles vary between $105.5(3)\text{--}111.8(2)^\circ$ for **1** and $107.61(11)\text{--}111.28(11)^\circ$ for **2**; the P–C distances are $1.751(6)\text{--}1.805(5)$ Å and $1.792(2)\text{--}1.815(2)$ Å, respectively) and planar trigonal nitrate anions (the sums of the ONO angles equal to 359.5° and 360° , respectively). Complete tables of atomic coordinates, bond lengths, and bond angles of nitrates **1** and **2** have been deposited in the Cambridge Structural Data Bank (CCDC 2338987 (**1**), 2335887 (**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. Reactions of acetoniltriphenylphosphonium and 2-butene-1,4-bis(triphenylphosphonium) chlorides with nitric acid. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;16(4):79–85. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240406

Введение

Известно, что фосфорорганические соединения широко используются в качестве смазочных материалов, топливных присадок, антипиренов, пластификаторов, фармацевтических препаратов, реагентов в органическом синтезе [1–3]. Одними из наиболее исследованных органических производных фосфора являются соли тетраорганилфосфония $[R_4P]X$ (где R – одинаковые или отличающиеся заместители), которые преимущественно получают алкилированием/арилированием оргаофосфинов, 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 $[R_4P]NO_3$ известны для небольшого числа примеров [12–18].

С целью продолжения данного направления нами описан синтез нитратов ацетонилтрифенилфосфония (**1**) и гидрата (2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) (**2**), строение которых доказано методами ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Экспериментальная часть

Синтез нитратов алкилтрифенилфосфония осуществляли по методике, описанной в [18].

Нитрат ацетонилтрифенилфосфония $[Ph_3PCH_2C(O)Me]NO_3$ (1**)** – бесцветные кристаллы, выход 96 %, т. пл. 161°C . ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3090, 3049, 3022, 2905, 2860, 2367, 1721, 1585, 1485, 1437, 1385, 1337, 1192, 1159, 1109, 1028, 995, 934, 845, 829, 795, 783, 748, 716, 691, 615, 505, 496, 446, 409.

Нитрат гидрата (2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) $[Ph_3PCH_2CHCHCH_2PPh_3][NO_3]_2 \cdot 2H_2O$ (2**)** – бесцветные кристаллы, выход 96 %, т. пл. $101\text{--}138^\circ\text{C}$ (т.разл. 153°C). Найдено (%): C 64,84; H 5,49. Для $C_{20}H_{20}NO_4P$ рассчитано (%): C 64,98; H 5,42. ИК-спектр (ν , см⁻¹): 3462, 3059, 2932, 2882, 1647, 1585, 1485, 1437, 1369, 1335, 1195, 997, 974, 746, 719, 691, 544, 500, 444, 414.

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

Рентгеноструктурный анализ соединений **1** и **2** проводили на автоматическом четырехкрупном дифрактометре Bruker D8 QUEST (Mo K_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 [19]. Все расчеты по определе-

нию и уточнению структур выполнены по программам *SHELXL/PC* [20] и *OLEX2* [21]. 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 и уточнения структур 1 и 2

Параметр	1	2
Формула	C ₂₁ H ₂₀ NO ₄ P	C ₂₀ H ₂₀ NO ₄ P
<i>M</i>	381,35	369,34
Сингония	Моноклинная	Триклинная
Пространственная группа	<i>C2/c</i>	<i>P-1</i>
<i>a</i> , Å	14,301(13)	9,259(7)
<i>b</i> , Å	12,756(11)	9,514(6)
<i>c</i> , Å	21,40(2)	12,247(9)
α, град.	90,00	68,43(4)
β, град.	90,66(3)	72,47(5)
γ, град.	90,00	84,06(3)
<i>V</i> , Å ³	3904(6)	956,7(12)
<i>Z</i>	8	2
ρ _{выч} , г/см ³	1,298	1,282
μ, мм ⁻¹	0,167	0,168
<i>F</i> (000)	1600,0	388,0
Форма кристалла (размер, мм)	0,5 × 0,13 × 0,08	0,34 × 0,2 × 0,13
Область сбора данных по 2θ, град.	5,7–56,96	5,9–54,34
Интервалы индексов отражений	-16 ≤ <i>h</i> ≤ 19, -17 ≤ <i>k</i> ≤ 17, -28 ≤ <i>l</i> ≤ 28	-11 ≤ <i>h</i> ≤ 11, -12 ≤ <i>k</i> ≤ 12, -15 ≤ <i>l</i> ≤ 15
Измерено отражений	46344	21543
Независимых отражений (<i>R</i> _{int})	4894 (0,0808)	4219 (0,0354)
Переменных уточнения	245	238
GOOF	1,034	1,029
<i>R</i> -факторы по <i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²)	<i>R</i> ₁ = 0,0631, <i>wR</i> ₂ = 0,1468	<i>R</i> ₁ = 0,0493, <i>wR</i> ₂ = 0,1288
<i>R</i> -факторы по всем отражениям	<i>R</i> ₁ = 0,0950, <i>wR</i> ₂ = 0,1630	<i>R</i> ₁ = 0,0672, <i>wR</i> ₂ = 0,1414
Остаточная электронная плотность (min/max), e/Å ³	0,63/-0,56	0,52/-0,39

Таблица 2

Длины связей и валентные углы в структурах 1 и 2

Связь <i>d</i> , Å		Угол ω, град	
1			
P(1)–C(21)	1,792(2)	C(21)P(1)C(1)	110,03(11)
P(1)–C(1)	1,794(3)	C(21)P(1)C(11)	108,87(12)
P(1)–C(11)	1,799(3)	C(21)P(1)C(7)	111,75(13)
P(1)–C(7)	1,802(3)	C(1)P(1)C(11)	108,74(12)
O(1)–C(8)	1,204(3)	C(1)P(1)C(7)	112,25(12)
O(2)–N(1)	1,213(3)	C(11)P(1)C(7)	104,99(11)
O(3)–N(1)	1,224(4)	O(2)N(1)O(3)	124,1(3)
O(4)–N(1)	1,240(4)	O(2)N(1)O(4)	121,1(3)
C(21)–C(26)	1,383(3)	O(3)N(1)O(4)	114,3(3)
2			
P(1)–C(11)	1,792(2)	C(11)P(1)C(21)	108,38(11)
P(1)–C(21)	1,800(2)	C(11)P(1)C(7)	107,61(11)
P(1)–C(7)	1,815(2)	C(11)P(1)C(1)	110,56(10)
P(1)–C(1)	1,794(2)	C(21)P(1)C(7)	111,28(11)
O(1)–N(1)	1,228(3)	C(1)P(1)C(21)	109,96(11)
O(2)–N(1)	1,198(3)	C(1)P(1)C(7)	109,02(11)

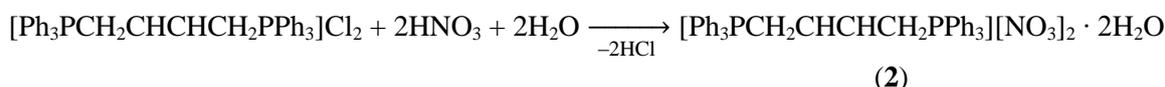
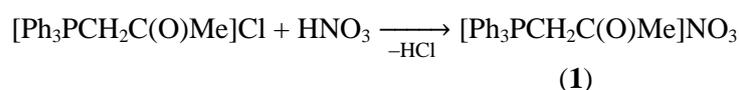
Связь d , Å		Угол ω , град	
O(3)–N(1)	1,238(3)	O(1)N(1)O(3)	120,8(2)
C(8)–C(8a)	1,312(4)	O(2)N(1)O(1)	120,6(3)
C(11)–C(16)	1,394(3)	O(2)N(1)O(3)	118,6(3)
Преобразования симметрии: $^a1-x, 2-y, 1-z$			

Полные таблицы координат атомов, длин связей и валентных углов соединения **1** и **2** депонированы в Кембриджском банке структурных данных (№ 2155176 и 2335887; 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 различных комплексов [6, 22, 23]. Интересный случай замещения галогенид-аниона на остаток более сильной кислоты описан авторами работы [24], 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 [18], где действие азотной кислоты на хлориды цианометил- и ацетонилтрифенилфосфония приводит к образованию с хорошим выходом соответствующих нитратов.

В продолжение исследований в области реакций замещения хлор-аниона в производных фосфора $[\text{Ph}_3\text{PR}]\text{Cl}$ нами получены и структурно охарактеризованы нитраты ацетонилтрифенилфосфония $[\text{Ph}_3\text{PCH}_2\text{C}(\text{O})\text{Me}]\text{NO}_3$ (**1**), о синтезе которого сообщалось ранее [18], и неизвестный ранее гидрат нитрата 2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) $[\text{Ph}_3\text{P}(\text{CH}_2\text{CHCH}_2\text{PPh}_3)]_2[\text{NO}_3]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (**2**):



Структура соединений **1** и **2** подтверждается 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: 1437, 995 см⁻¹ (**1**) и 1437, 997 см⁻¹ (**2**). ИК-спектр комплекса **1** 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 1323, 1377 см⁻¹ (**1**) и 1335, 1369 см⁻¹ (**2**), относящиеся к асимметричным валентным колебаниям N–O связи в анионах NO₃⁻. Также наблюдается слабые полосы поглощения при 827 см⁻¹ (**1**) и 830 см⁻¹ (**2**), характерные для деформационных колебаний O–N–O нитратных анионов. ИК-спектры обоих комплексов содержат полосы поглощения при 3082, 2997 (**1**), 3059, 2932 см⁻¹ (**2**), и 2907, 2839 (**1**), 2932, 2882 см⁻¹ (**2**), относящиеся к валентным колебаниям связей C–H_{Ar} и C–H_{Alk} соответственно [25, 26]. Присутствие в ИК-спектре **2** интенсивной полосы при 3462 см⁻¹ указывает на присутствие в кристалле сольватных молекул воды.

По данным РСА, комплексы **1** и **2** состоят из нитрат-анионов и органилтрифенилфосфониевых катионов с несколько искаженной тетраэдрической координацией атома фосфора (углы CPC варьируются в пределах 107,10(8)–111,56(10)° для **1** и 107,62(10)–111,99(16)° для **2**; расстояния P–C 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 sp³-гибризованного углерода (1,88 Å [27]). В плоских тригональных нитрат-анионах суммы углов ONO равны 359,6° и 360° соответственно.

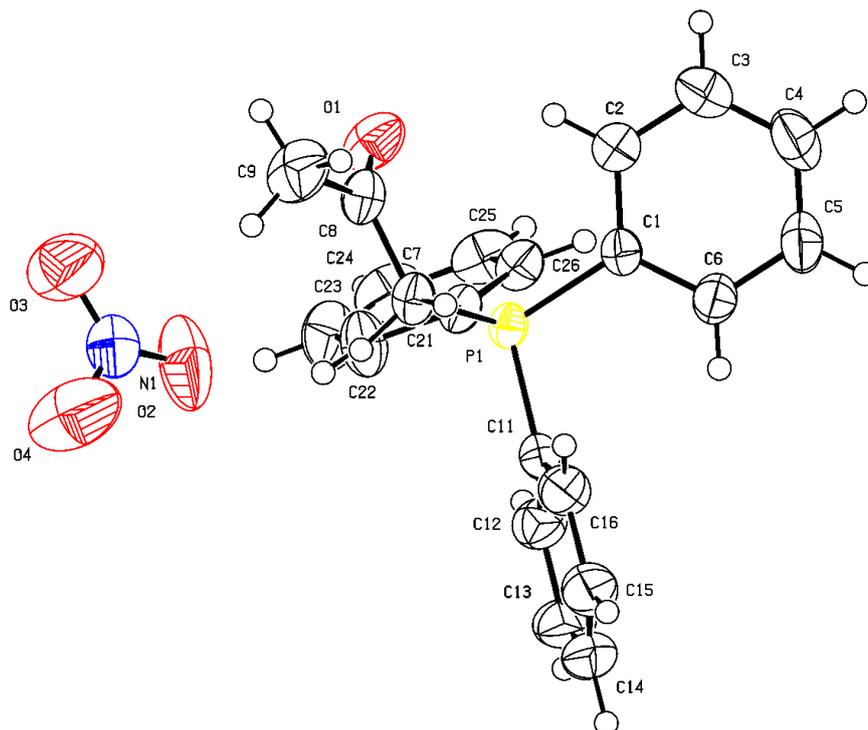


Рис. 1. Структура нитрата ацетонилтрифенилфосфония (1)

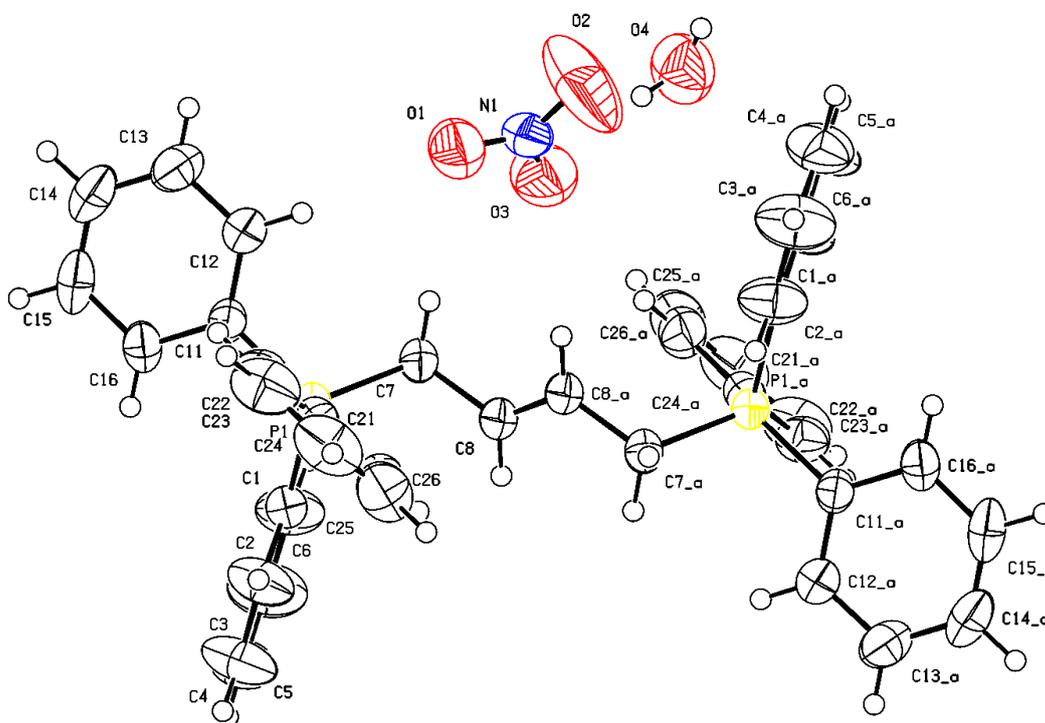


Рис. 2. Структура гидрата нитрата 2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) (2)

Кристалл **2** содержит, кроме centrosymmetricheskikh kationov s tsentrom simmetrii na seredine svyazi C(8)–C(8a) i nitrata-anionov, eshe i molekuly vody. Kristallicheskaya organizatsiya nitrats 1 i 2 v osnovnom obuslovljena vodorodnymi svyazimi C–H...O–NO₂, dliny kotorykh var'iruyutsya v intervale 2,30–2,59 Å dlya 1 i 2,42–2,59 Å dlya 2, chto ne prevyshaet summy van-

дер-ваалъсовых радиусов атомов водорода и кислорода ($\text{H}\cdots\text{O}$ 2,62 Å [28]). Кристалл **2** имеет более сложную организацию из-за участия молекул воды, которые тесно контактируют с атомами кислорода нитратных групп $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}-\text{NO}_2$ (2,1 Å).

Выводы

Таким образом, нами синтезированы и структурно охарактеризованы нитрат ацетонилтрифенилфосфония (**1**) и гидрат нитрата 2-бутен-1,4-бис(трифенилфосфония) (**2**), атомы фосфора в которых имеют слабо искаженную тетраэдрическую координацию, а нитрат-анионы – плоскую тригональную. Кристалл **2** имеет более сложную организацию из-за участия молекул воды в образовании водородных связей $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}-\text{NO}_2$ (2,1 Å).

Список источников

1. Richardson R.J., Makhaeva G.F. // Encyclopedia of Toxicology: 3rd Ed. San Diego: Academic Press Inc., 2014. P. 714. 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. et al. // J. Organomet. Chem. 1975. V. 99, No. 1. P. 93. DOI: 10.1016/S0022-328X(00)86365-2
4. The Chemistry of Organophosphorus Compounds. Volume 3: Phosphonium Salts, Ylides and Phosphoranes, ed. by F.R. Hartley. 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. и др. // 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. Шевченко Д.П., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 3. С. 62. DOI: 10.14529/chem220307
19. Bruker. SMART and SAINT-Plus. Versions 5.0. Data Collection and Processing Software for the SMART System. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1998.
20. 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.

21. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. DOI: 10.1107/S0021889808042726.
22. Попкова М.А., Шарутин В.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2021. Т. 13, № 4. С. 110. DOI: 10.14529/chem210409.
23. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Ефремов А.Н. и др. // Коорд. химия. 2020. Т. 46, № 9. С. 554. DOI: 10.31857/S0132344X20090030.
24. Шарутин В.В., Шарутина О.К., Механошина Е.С. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2022. Т. 14, № 2. С. 41. DOI: 10.14529/chem220205.
25. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффельтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных: пер. с англ. Б.Н. Тарасевича. М.: Мир, 2006. 440 с.
26. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 54 с.
27. Cordero B., Gómez V., Platero-Prats A.E. et al. // Dalton Trans. 2008. No. 21. P. 2832. DOI: 10.1039/B801115J
28. 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 управления научной и инновационной деятельности, 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 – бакалавр 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 25 июня 2024 г.

The article was submitted 25 June 2024.