

Синтез трифторметансульфоната висмута

Светлана Е. Плотникова	¹	burkovasweta@ya.ru	 0000-0002-6331-554x
Елена М. Горбунова	¹	gorbunova_elena2024@mail.ru	 0000-0002-3550-0115
Сабухи И. Нифталиев	¹	niftaliev@mail.com	 0000-0001-7887-3061
Ирина В. Кузнецова	¹	kuznetsovaiv@mail.ru	 0000-0001-6666-6292
Анастасия М. Лучко	¹	am.luchko@mail.ru	 0009-0009-5197-4765

1 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Трифторметансульфонат висмута (III), называемый также трифлатом висмута, является экономичным, эффективным и экологически чистым катализатором синтеза органических продуктов. Трифлат висмута в России в настоящее время не производят, поэтому разработка технологии получения трифлата висмута является актуальной задачей. Трифлат висмута получали двумя способами - взаимодействием гидроксида висмута или оксида висмута с трифторметансульфоновой (трифликовой) кислотой. Получение трифлата висмута из гидроксида висмута является длительным процессом, который не протекает до конца и имеет выход не более 64 %. Оксид висмута, полученный термическим разложением гидроксида висмута, имеет несколько полиморфных модификаций. Нагревание проводили до 750 °C и охлаждали в течение 8 часов. Полученный таким образом γ -оксид висмута растворяется в трифликовой кислоте в течение 2 часов и образует растворы высокой концентрации. Определены значения растворимости трифлата висмута при различной кислотности раствора. Рентгенографическим исследованием установлено, что образуется ноногидраттрифлата висмута - кристаллы игольчатой формы. α -фаза оксида висмута, полученная разложением гидроксида висмута при 450 °C, не растворялась в кислоте полностью. Процесс проводили в течение 4 часов, выход продукта 92 %. Образующиеся кристаллы бипирамидальной формы исследовали методом дифференциального термического анализа, который показал, что кристаллы представляют собой пентагидрат трифлата висмута, теряющий кристаллизационную воду в интервале температур 64–130 °C. До 320 °C вещество является термически устойчивым. При температуре 327 °C происходит плавление с разложением, что сопровождается образованием оксосульфатов висмута. По данным рентгенографической дифракции установлен состав образующихся фаз - $\text{Bi}_{28}\text{O}_{32}(\text{SO}_4)_{10}$ и $\text{Bi}_{34.7}\text{O}_{100}\text{S}_{16}$. При дальнейшем нагревании до 380 °C разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$.

Ключевые слова: трифторметансульфонат висмута (III), трифликовая кислота, α -фаза оксида висмута (III), γ -фаза оксида висмута (III), оксосульфат висмута, термический анализ.

Synthesis of Bismuth Trifluoromethanesulfonate

Svetlana E. Plotnikova	¹	burkovasweta@ya.ru	 0000-0002-6331-554x
Elena M. Gorbunova	¹	gorbunova_elena2024@mail.ru	 0000-0002-3550-0115
Sabukhi I. Niftaliev	¹	niftaliev@mail.com	 0000-0001-7887-3061
Irina V. Kuznetsova	¹	kuznetsovaiv@mail.ru	 0000-0001-6666-6292
Anastasiya M. Luchko	¹	am.luchko@mail.ru	 0009-0009-5197-4765

1 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Bismuth (III) trifluoromethanesulfonate, also known as bismuth triflate, is an economical, efficient, and environmentally friendly catalyst for the synthesis of organic products. Currently, bismuth triflate is not produced in Russia, so developing a technology for producing bismuth triflate is an important task. Bismuth triflate can be obtained using two methods: by reacting bismuth hydroxide with triflic acid, and by reacting bismuth oxide with triflic acid. The production of bismuth triflate from bismuth hydroxide is a long process that does not proceed to the end and has a yield of no more than 40%. The bismuth oxide obtained by thermal decomposition of bismuth hydroxide has several polymorphic modifications. Heating was carried out to 750 °C and cooled for 8 hours. The γ -bismuth oxide obtained in this way is dissolved in triflic acid for 2 hours and forms high-concentration solutions. The solubility values of bismuth triflate were determined at different acidity levels. X-ray analysis showed that bismuth nonahydrate triflate formed needle-like crystals. The α -phase of bismuth oxide obtained by decomposition of bismuth hydroxide at 450 °C did not dissolve completely in the acid. The process was carried out for 4 hours, and the yield was 92%. The resulting crystals of a bipyramidal shape were studied by differential thermal analysis, which showed that the crystals are pentahydrate of bismuth triflate, which loses crystallization water in the temperature range of 64–130 °C. Up to 320 °C, the substance is thermally stable. At a temperature of 327 °C, it melts with decomposition, which is accompanied by the formation of bismuth oxo-sulfates. According to X-ray diffraction data, the composition of the resulting phases is $\text{Bi}_{28}\text{O}_{32}(\text{SO}_4)_{10}$ and $\text{Bi}_{34.7}\text{O}_{100}\text{S}_{16}$. Further heating to 380 °C leads to the decomposition of bismuth oxo-sulfates, resulting in the formation of the stable monoclinic modification of bismuth oxide, $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$.

Keywords: введите здесь ключевые слова на английском языке.

Для цитирования

Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И., Кузнецова И.В.,
Лучко А.М. Синтез трифторметансульфоната висмута // Вестник
ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 217–223. doi:10.20914/2310-1202-2025-3-
217-226

For citation

Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I., Kuznetsova I.V.,
Luchko A.M. Synthesis of Bismuth Trifluoromethanesulfonate. Vestnik
VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 217–223.
(in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-3-217-223

Введение

В настоящее время одной из главных проблем химической отрасли является зависимость технологических цепочек от зарубежных поставок специальной химии и катализаторов. Государством разрабатываются национальные проекты, которые направлены на развитие малотоннажной и среднетоннажной химии.

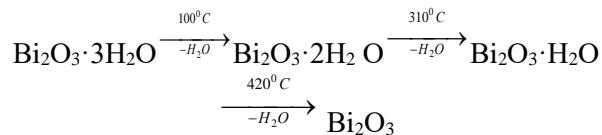
Трифторметансульфонат висмута (III), называемый также трифлатом висмута, является экономичным, эффективным и экологически чистым катализатором синтеза органических продуктов: циклических карбонатов [1], 2,3 – ненасыщенных О-гликозидов [2], гомоаллиловых эфиров и гомоаллилациетатов из альдегидов [3], ацилирования бензойного и пивалинового ангидридов [4], реакция гликозилирования производных сиаловой кислоты [5]. В условиях санкций закупка вещества сопровождается многими рисками и сложностями. Трифлат висмута в России в настоящее время не производят. Поэтому разработка технологии получения трифлата висмута является актуальной задачей.

Несмотря на большую востребованность в современной препаративной химии трифлатов, состав, строение, термическая устойчивость и другие свойства трифлатов остаются малоизученными. Между тем трифлаты представляют также интерес с точки зрения кристаллохимии и физики низких температур [6].

Из литературных источников известен способ производства солей висмута, включающий следующие стадии: окисление металлического висмута с получением оксида; растворение оксида висмута в кислоте [7, 8].

Материалы и методы

Трифлат висмута синтезировали двумя способами: взаимодействием гидроксида висмута с трифликовой кислотой и взаимодействием оксида висмута с трифликовой кислотой. Оксид висмута получали разложением гидроксида висмута. Процесс происходит по схеме:



Чистый оксид висмута имеет четыре кристаллических полиморфа, которые отличаются реакционной способностью.

При комнатной температуре оксид висмута Bi_2O_3 имеет моноклинную модификацию, обозначаемую $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$. При нагревании выше 727°C он превращается в кубическую кристаллическую структуру типа флюорита $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$, которая сохраняется до точки плавления 824°C .

Поведение $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ при охлаждении более сложное, с возможным образованием двух промежуточных метастабильных фаз: тетрагональная β -фаза или объемно-центрированная γ -кубическая фаза. γ -фаза может существовать при комнатной температуре с очень медленной скоростью охлаждения, но α -фаза всегда образуется при охлаждении β -фазы [9].

Рассчитанные количества веществ помещали в колбу с дефлектиором и перемешивали с кислотой, магнитной мешалкой 79–1 Hot Plate Magnetic Stirrer, при постоянной температуре (50°C). Реакцию проводили до установления равновесия. Условием равновесия являлась постоянная концентрация ионов висмута.

Концентрацию ионов металла определяли комплексонометрическим титрованием с индикатором ксиленовым оранжевым [10, 11]. Индикатор образует с металлом комплекс, окрашенный в красный цвет:



Свободные ионы висмута образуют бесцветный растворимый комплекс, ксиленовый оранжевый приобретает желтое окрашивание.

Для определения концентрации ионов водорода использовали кислотно-основное титрование раствором NaOH .

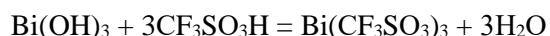
Синтезированный образец трифлата висмута исследовали методом термического анализа на измерительном комплексе синхронного термического анализа STA 449 F3 (Netzsch, Германия) в платиновом тигле, в потоке N_2 , скорость нагрева 5 K/min .

Рентгенофазовый анализ применяли для решения вопроса о фазовом составе полученного продукта. Эксперимент проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL X'tra, с длиной волны Cu ($1,5406\text{ \AA}$))

Тринокулярный микроскоп Levenhuk 740T использовали для исследования морфологии синтезированных материалов.

Результаты и обсуждения

По первому способу получение трифлата висмута из гидроксида висмута проводили согласно реакции:



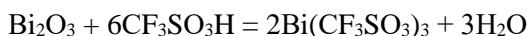
Перемешивание магнитной мешалкой проводили до установления равновесия (8 часов) при эквивалентном соотношении и при двухкратном избытке кислоте, выход продукта составил 64 и 57% соответственно. Процесс не протекает до конца, о чем говорит наличие в растворе белого осадка. Возможно этим осадком является оксигидроксид висмута (III) $\text{BiO}(\text{OH})$.

Для увеличения выхода продукта предложено получать трифлат висмута из оксида висмута (второй способ).

Гидроксид висмута нагревали до 750 °C, выдерживали в течение 1 часа. Порошок имел при 750 °C красно-коричневый цвет, характерный для δ-Bi₂O₃. Охлаждение до комнатной температуры проводили в течение 8 часов, т. к. при медленной скорости охлаждения возможно образование γ-фазы. При охлаждении цвет менялся на желтый (рисунок 1).

После охлаждения оксида приливали рассчитанный объем трифликовой кислоты, взятой с различным избытком и в эквивалентном соотношении оксида и кислоты (1:6) и перемешивали при 50 °C.

Уравнение взаимодействия оксида висмута (III) с кислотой имеет вид:



Результаты определения содержания ионов Bi³⁺ и ионов H⁺

Results of determination of Bi³⁺ and H⁺ ion content

Количество вещества Bi ₂ O ₃ , моль Amount of Bi ₂ O ₃ substance, mol	Количество вещества HOTf, моль Amount of substance HOTf, mol	Молярная концентрация ионов Bi ³⁺ , моль/дм ³ Molar concentration of Bi ³⁺ ions, mol/dm ³	Molar concentration of H ⁺ ions, mol/dm ³
0,005	0,120	0,892	5,64
0,005	0,060	1,128	4,12
0,005	0,045	1,430	3,96
0,005	0,030	2,088	0,23*

Значение концентрации ионов водорода для раствора 4 (0,23*) рассчитано с учетом гидролиза соли, поскольку кислотно-основное титрование нельзя применить из-за образования осадка гидроксида висмута (III).

После охлаждения растворов до комнатной температуры на вторые сутки наблюдается образование кристаллов при почти полном отсутствии жидкой фазы. Кристаллы, полученные при значительном избытке кислоты, при нахождении на воздухе, снова переходят в жидкую фазу – «плавятся». Содержание ионов висмута (III) в этих кристаллах, определенное комплексонометрическим титрованием составляет 25,6%, что соответствует ноногидрату трифлата висмута. Кристаллы имеют игольчатую форму.



(1)



(3)

Рисунок 2. Фотография кристаллов образцов (1) и (3)
Figure 2. Photos of crystals of samples (1) and (3)



Рисунок 1. Фотография оксида висмута после прокаливания

Figure 1. Photo of bismuth oxide after calcination

По истечении 2 часов происходило полное растворение оксида и образование прозрачного раствора, что свидетельствует о полноте протекания реакции.

Данные по количеству исходных веществ и концентрации ионов Bi³⁺ и H⁺ в полученных растворах представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Table 1.

Results of determination of Bi³⁺ and H⁺ ion content

Рентгенофазовый анализ продукта синтеза, полученного в кислой среде, показал, что образовался кристаллогидрат трифлата висмута с 9 молекулами воды.

Полученная дифрактограмма представлена на рисунке 3.

Таблица 2.
Фазовый состав продукта синтеза
(Порошковый рентгеновский дифрактометр
ARL X'tra, длина волны Cu (1,5406 Å))

Table 2.
Phase composition of the synthesis product
(ARL X'tra powder X-ray diffractometer,
Cu wavelength (1.5406 Å))

Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2θ]	Scale Factor	Chemical Formula
00-050-2218	69	Bismuth nonaqua triflate	0.090	0.760	C ₃ H ₁₈ BiF ₉ O ₁₈ S ₃

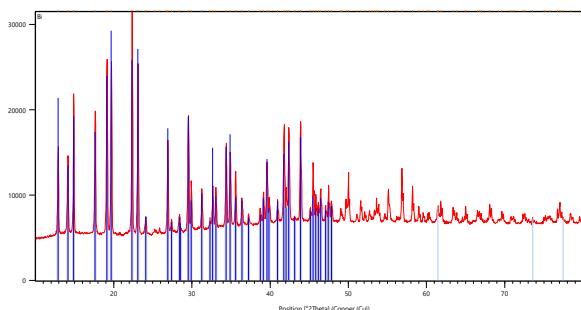


Рисунок 3. Дифрактограмма продукта синтеза, полученного при избытке кислоты

Figure 3. Diffractogram of the synthesis product obtained with an excess of acid

Опыт повторяли при прокаливании гидроксида висмута до 450 °C, в этом случае образуется α -фаза Bi_2O_3 . Оксид и кислоту брали в эквивалентных количествах. Осадок желтого цвета в результате взаимодействия с кислотой приобретал белый цвет. Процесс проводили до установления равновесия (4 часа). Несмотря на добавление воды, небольшая часть осадка не растворилась, что свидетельствует о том, что α и γ -фаза оксида висмута имеют различный механизм взаимодействия с кислотой. В полученном растворе содержание ионов Bi^{3+} составило 1,471 моль/дм³. Выход продукта 92%. При медленном выпаривании раствора получили кристаллы и высушили их в экскаторе при комнатной температуре (рисунок 4). Кристаллы имеют форму тетрагональной бипирамиды.

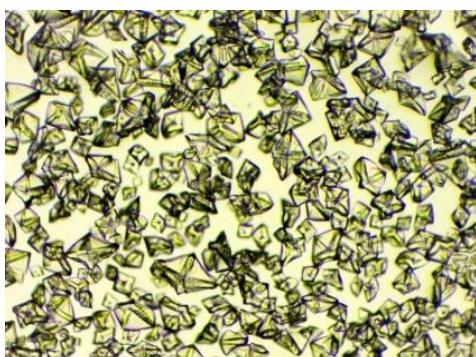


Рисунок 4. Фотография кристаллов, полученных при прокаливании гидроксида висмута до 450 °C

Figure 4. A Photograph of crystals obtained by calcination of bismuth hydroxide at 450 °C

Содержание воды в кристаллах, рассчитанное по концентрации висмута, составляет 12,31%, что близко к содержанию воды в пентагидрате трифлата висмута (12,04%).

Термический анализ соли, полученной из α -оксида висмута, представлен на рисунке 5.

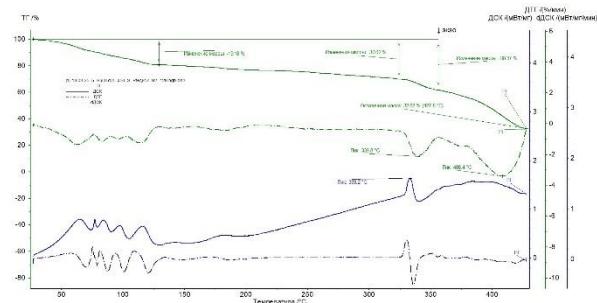


Рисунок 5. ТГ/ДСК диаграммы образца трифлата висмута, полученного из α -фазы Bi_2O_3

Figure 5. TG/DSC diagrams of a bismuth triflate sample obtained from the α -phase of Bi_2O_3

Результаты исследования приведены в таблице 3.

Таблица 3.
Результаты термического анализа
трифлата висмута

Table 3.
Results of thermal analysis of bismuth triflate

Образец Sample	Тип теплового эффекта Type of thermal effect	Темпе- ратурный интервал, °C	Потеря массы, %
$\text{Bi}(\text{SO}_3\text{CF}_3)_3\text{H}_2\text{O}$	Эндотер- мический	64–130	19,18
	Эндотер- мический	327–355	38,12
	Эндотер- мический	380–450	67,38

Изменение массы в области температур 64–130 °C связано с потерей кристаллизационной воды. На дифференциальной ТГ кривой насчитывается 5 пиков, что позволяет предположить, что исследуемое вещество определяется формулой $\text{Bi}(\text{SO}_3\text{CF}_3)_3\text{H}_2\text{O}$. Однако, потеря массы больше, чем для обезвоживания пентагидрата, она составляет 19,18%. При нагревании до 64 °C потеря массы составляет 6,66%, эффектов на этом интервале не наблюдается. Возможно, выделяется абсорбционная влага. Оставшаяся потеря массы 12,51% близка к содержанию воды в пентагидрате – 12,04%.

Дальнейшее нагревание сопровождается потерей массы при отсутствии пиков на дифференциальных кривых, что может быть связано с сублимацией соли или выделением углеродистых соединений фтора из иона трифлата. При температуре 327 °C происходит плавление с разложением, так как эндотермический эффект сопровождается уменьшением массы образца. По аналогии с термическим разложением сульфата висмута можно предположить образование оксосоли висмута.

Рентгенофазовый анализ прокаленного при 350 °C образца показал наличие в веществе трех фаз (таблица 4 и рисунок 7).

Установлено высокое содержание (суммарно более 99%) в образце двух оксосульфатов висмута, имеющих состав $\text{Bi}_{28}\text{O}_{32}(\text{SO}_4)_{10}$ и $\text{Bi}_{34.7}\text{O}_{100}\text{S}_{16}$. Ни одна из идентифицированных фаз не содержит ни фтора, ни углерода.

Фазовый состав вещества, полученного при нагревании до 350 °C
(Порошковый рентгеновский дифрактометр ARL X'tra, длина волны Cu (1,5406 Å))

Phase composition of the substance obtained by heating to 350 °C
(ARL X'tra powder X-ray diffractometer, Cu wavelength (1.5406 Å))

Ref. Code	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-077-1727	Bismuth Oxide Sulfate	-0.113	0.670	$\text{Bi}_{28}\text{O}_{32}(\text{SO}_4)_{10}$	37,4
01-075-0717	Bismuth Oxide Sulfide	0.045	0.428	$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{S}$	0,5
98-004-9900	Bismuth Oxide Sulfate *	-0.055	0.339	$\text{Bi}_{34.7}\text{O}_{100}\text{S}_{16}$	62,0

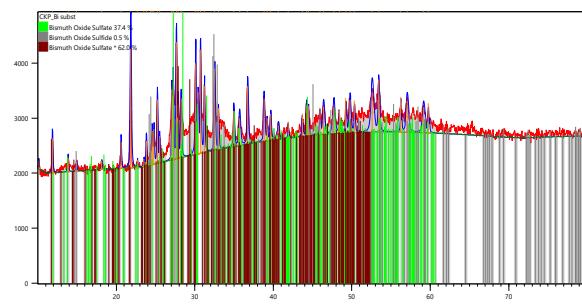


Рисунок 6. Дифрактограмма продукта вещества, полученного в результате прокаливания образца трифлата висмута при 350 °C

Figure 6. Diffractogram of the product obtained by calcination of a bismuth triflate sample at 350 °C

Заключение

Получение трифлата висмута из гидроксида висмута является длительным процессом, который не протекает до конца. О чем говорит наличие в растворе белого осадка, возможно этим осадком является оксигидроксид висмута (III) $\text{BiO}(\text{OH})$.

Для увеличения выхода продукта предложено синтезировать трифлат висмута из оксида висмута. Оксид висмута получали из гидроксида двумя различными режимами прокаливания: при нагревании до 750 °C образуется $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$, который при дальнейшем, медленном охлаждении

Это говорит о том, что происходит разложение трифлата висмута с выделением в газообразную фазу соединений фтора и углерода.

При дальнейшем нагревании до 380 °C разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$.

Таблица 4.

Table 4.

переходит в γ -фазу. Полученный таким образом оксид растворяется в трифликовой кислоте в течение 2 часов и образует растворы высокой концентрации. В присутствии избытка кислоты растворимость трифлата висмута уменьшается. Образование трифлата висмута подтверждено рентгенографическим исследованием. Установлено, что образуется ноногидрат трифлата висмута. Кристаллы имеют игольчатую форму.

При нагревании гидроксида висмута до 450 °C образуется α -фаза оксида висмута (самая устойчивая). Она растворяется в кислоте в течение 4 часов. При выпаривании раствора образуются кристаллы бипирамидальной формы. Термический анализ показал, что кристаллы представляют собой пентагидрат трифлата висмута, теряющий адсорбционную и кристаллизационную воду в интервале температур 30–130 °C. До 320 °C вещество является термически устойчивым. При температуре 327 °C происходит плавление с разложением, что сопровождается образованием оксосульфатов висмута. По данным рентгенографической дифракции установлен состав образующихся фаз – $\text{Bi}_{28}\text{O}_{32}(\text{SO}_4)_{10}$ и $\text{Bi}_{34.7}\text{O}_{100}\text{S}_{16}$. При дальнейшем нагревании до 380 °C разложение оксосульфатов висмута приводит к образованию устойчивой моноклинной модификации оксида висмута $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$.

Литература

- 1 Siddig L.A., Alzard R.H., Nguyen H.L. et al. Cyclic carbonate formation from cycloaddition of CO₂ to epoxides over bismuth subgallate photocatalyst // Inorganic Chemistry Communications. 2022. V. 142. P. 109672. doi: 10.1016/j.inoche.2022.109672
- 2 Kumar M., Singh R., Sharma P. et al. Bismuth-catalyzed stereoselective 2-deoxyglycosylation of disarmed/armed glycal donors // Organic Letters. 2022. V. 24. № 2. P. 575–580. doi: 10.1021/acs.orglett.1c04008
- 3 Nakate A.K. Lewis acid-catalysed α and π activation triggered cascade annulation reactions of alkynyl alcohols to construct heterocyclic compounds // Tetrahedron Letters. 2023. V. 114. P. 154282.
- 4 Zenebe F.C., Tadesse A.M., Sivasubramanian M. et al. Highly efficient CdS/CeO₂/Ag₃PO₄ nanocomposite as novel heterogenous catalyst for Knoevenagel condensation and acetylation reactions // Heliyon. 2024. V. 10. № 11. P. e31798. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31798

- 5 Steber H.B., Singh Y., Demchenko A.V. Bismuth(III) triflate as a novel and efficient activator for glycosyl halides // *Organic & Biomolecular Chemistry*. 2021. V. 19. № 14. P. 3220–3233. doi: 10.1039/d1ob00093d
- 6 Терещенко Д.С., Глазунова Т.Ю., Бузоверов М.Е. и др. Синтез и кристаллическое строение новых трехъядерных фторокарбоксилатных комплексов кобальта(II) и никеля(II) // *Координационная химия*. 2022. Т. 48. № 9. С. 534–542. doi: 10.31857/s0132344x22090079
- 7 Юхин Ю.М., Мищенко К.В., Даминов А.С. Получение растворов солей висмута с предварительным его окислением // *Теоретические основы химической технологии*. 2017. Т. 51. № 4. С. 470–477. doi: 10.7868/s0040357117040157
- 8 Юхин Ю.М., Найденко Е.С., Даминов А.С. и др. Получение соединений висмута для техники и медицины // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018. Т. 26. № 3. С. 345–351. doi: 10.15372/khur20180309
- 9 Weber M., Schmidt J., Wagner M. et al. Polymorphism and visible-light-driven photocatalysis of doped Bi₂O₃: M (M= S, Se, and Re) // *Inorganic Chemistry*. 2022. V. 61. № 3. P. 1571–1589. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c03330
- 10 Плотникова С.Е., Перегудов Ю.С., Горбунова Е.М. и др. Перспективы применения жидких отходов производства кальцинированной соды в качестве хладоносителя на основе тройной системы CaCl₂-K₂Cr₂O₇-H₂O // *Вестник ВГУИТ*. 2020. Т. 82. № 3. С. 233–238. doi: 10.20914/2310-1202-2020-233-238
- 11 Плотникова С.Е., Горбунова Е.М., Нифталиев С.И. и др. Исследование фазовых равновесий в водно-солевых системах, содержащих компоненты молочной сыворотки // *Вестник ВГУИТ*. 2023. Т. 85. № 4. С. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144
- 12 Leng D., Wang T., Du C. et al. Synthesis of β -Bi₂O₃ nanoparticles via the oxidation of Bi nanoparticles: Size, shape and polymorph control, anisotropic thermal expansion, and visible-light photocatalytic activity // *Ceramics International*. 2022. V. 48. № 13. P. 18270–18277. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.085
- 13 Gandhi A.C., Lai C.Y., Wu K. et al. Phase transformation and room temperature stabilization of various Bi₂O₃ nano-polymorphs: effect of oxygen-vacancy defects and reduced surface energy due to adsorbed carbon species // *Nanoscale*. 2020. V. 12. № 47. P. 24119–24137. doi: 10.1039/d0nr06552h
- 14 Zhao X.G., Malyi O.I., Zunger A. Polymorphous nature of the local structure of δ -Bi₂O₃ // *Physical Review Materials*. 2024. V. 8. № 12. P. 125403. doi: 10.1103/physrevmaterials.8.125403
- 15 Шарутин В.В., Мосунова Т.В. Синтез, строение и применение арильных соединений висмута // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. 2020. Т. 12. № 3. С. 7–66.
- 16 Икрамова З., Кадиров М., Дадаходзхаева М. и др. Висмут: характеристика элемента и его влияние на организм человека // *Современные аспекты развития фундаментальных наук и вопросы их преподавания*. 2023. Т. 1. № 1. С. 81–86.
- 17 Четверикова Д.К., Юдин А.А. Получение металлического висмута и его структурный анализ // *Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: сборник материалов X Международной школы и LXIII Международной конференции / Тольятти: 2021*.
- 18 Юхин Ю.М., Коледова Е.С., Тимакова Е.В. Комплексная переработка металлического висмута с получением оксида // *Металлургия цветных, редких и благородных металлов*. 2022. С. 231–236.
- 19 Levitskaia T.G., Chatterjee S., Pourmand A. et al. A review of bismuth (III)-Based materials for remediation of contaminated sites // *ACS Earth and Space Chemistry*. 2022. V. 6. № 4. P. 883–908. doi: 10.1021/acsearthspacechem.1c00114
- 20 Yan H., Hu J., Deng Y.X. et al. Long-life high-voltage all-solid-state batteries enabled by bismuth (III) triflate mediated polymer electrolytes // *Chemical Engineering Journal*. 2024. V. 484. P. 149516. doi: 10.1016/j.cej.2024.149516
- 21 Tian Y., Sakaki S. Theoretical study on bismuth (III) catalysts for synthesis of phenylsulfonyl fluoride: reasons of their catalysis // *ACS Catalysis*. 2024. V. 14. № 4. P. 2758–2774. doi: 10.1021/acscatal.3c04874
- 22 Planas O., Peciukenas V., Cornella J. Bismuth-catalyzed oxidative coupling of arylboronic acids with triflate and nonaflate salts // *Journal of the American Chemical Society*. 2020. V. 142. № 26. P. 11382–11387. doi: 10.1021/jacs.0c05343

References

- 1 Siddig L.A., Alzard R.H., Nguyen H.L. et al. Cyclic carbonate formation from cycloaddition of CO₂ to epoxides over bismuth subgallate photocatalyst. *Inorganic Chemistry Communications*. 2022. vol. 142. p. 109672. doi: 10.1016/j.inoche.2022.109672
- 2 Kumar M., Singh R., Sharma P. et al. Bismuth-catalyzed stereoselective 2-deoxyglycosylation of disarmed/armed glycal donors. *Organic Letters*. 2022. vol. 24. no. 2. pp. 575–580. doi: 10.1021/acs.orglett.1c04008
- 3 Nakate A.K. Lewis acid-catalysed α and π activation triggered cascade annulation reactions of alkynyl alcohols to construct heterocyclic compounds. *Tetrahedron Letters*. 2023. vol. 114. p. 154282.
- 4 Zenebe F.C., Tadesse A.M., Sivasubramanian M. et al. Highly efficient CdS/CeO₂/Ag₃PO₄ nanocomposite as novel heterogenous catalyst for Knoevenagel condensation and acetylation reactions. *Heliyon*. 2024. vol. 10. no. 11. p. e31798. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31798
- 5 Steber H.B., Singh Y., Demchenko A.V. Bismuth(III) triflate as a novel and efficient activator for glycosyl halides. *Organic & Biomolecular Chemistry*. 2021. vol. 19. no. 14. pp. 3220–3233. doi: 10.1039/d1ob00093d
- 6 Tereschenko D.S., Glazunova T.Yu., Buzoverov M.E. et al. Synthesis and crystal structure of new trinuclear fluorocarboxylate complexes of cobalt(II) and nickel(II). *Coordination Chemistry*. 2022. vol. 48. no. 9. pp. 534–542. doi: 10.31857/s0132344x22090079 (in Russian)
- 7 Yukhin Yu.M., Mishchenko K.V., Daminov A.S. Production of bismuth salt solutions with its preliminary oxidation. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2017. vol. 51. no. 4. pp. 470–477. doi: 10.7868/s0040357117040157 (in Russian)
- 8 Yukhin Yu.M., Naydenko E.S., Daminov A.S. et al. Production of bismuth compounds for technology and medicine. *Chemistry for Sustainable Development*. 2018. vol. 26. no. 3. pp. 345–351. doi: 10.15372/khur20180309 (in Russian)
- 9 Weber M., Schmidt J., Wagner M. et al. Polymorphism and visible-light-driven photocatalysis of doped Bi₂O₃: M (M= S, Se, and Re). *Inorganic Chemistry*. 2022. vol. 61. no. 3. pp. 1571–1589. doi: 10.1021/acs.inorgchem.1c03330
- 10 Plotnikova S.E., Peregudov Yu.S., Gorbunova E.M. et al. Prospects for the use of liquid waste from the production of soda ash as a refrigerant based on the CaCl₂-K₂Cr₂O₇-H₂O ternary system. *Bulletin of VSUET*. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 233–238. doi: 10.20914/2310-1202-2020-233-238 (in Russian)

- 11 Plotnikova S.E., Gorbunova E.M., Niftaliev S.I. et al. Study of phase equilibria in water-salt systems containing components of whey. Bulletin of VSUET. 2023. vol. 85. no. 4. pp. 139–144. doi: 10.20914/2310-1202-2023-4-139-144 (in Russian)
- 12 Leng D., Wang T., Du C. et al. Synthesis of β -Bi₂O₃ nanoparticles via the oxidation of Bi nanoparticles: Size, shape and polymorph control, anisotropic thermal expansion, and visible-light photocatalytic activity. Ceramics International. 2022. vol. 48. no. 13. pp. 18270–18277. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.085
- 13 Gandhi A.C., Lai C.Y., Wu K. et al. Phase transformation and room temperature stabilization of various Bi₂O₃ nano-polymorphs: effect of oxygen-vacancy defects and reduced surface energy due to adsorbed carbon species. Nanoscale. 2020. vol. 12. no. 47. pp. 24119–24137. doi: 10.1039/d0nr06552h
- 14 Zhao X.G., Malyi O.I., Zunger A. Polymorphous nature of the local structure of δ -Bi₂O₃. Physical Review Materials. 2024. vol. 8. no. 12. p. 125403. doi: 10.1103/physrevmaterials.8.125403
- 15 Sharutin V.V., Mosunova T.V. Synthesis, structure and application of aryl bismuth compounds. Bulletin of South Ural State University. Series: Chemistry. 2020. vol. 12. no. 3. pp. 7–66. (in Russian)
- 16 Ikramova Z., Kadirov M., Dadakhodzhaeva M. et al. Bismuth: element characteristics and its impact on the human body. Modern aspects of the development of fundamental sciences and issues of their teaching. 2023. vol. 1. no. 1. pp. 81–86. (in Russian)
- 17 Chetverikova D.K., Yudin A.A. Production of metallic bismuth and its structural analysis. Physical Materials Science. Actual problems of strength: collection of materials of the X International School and LXIII International Conference. Tolyatti: 2021.
- 18 Yukhin Yu.M., Koledova E.S., Timakova E.V. Complex processing of metallic bismuth to obtain oxide. Metallurgy of Non-Ferrous, Rare and Noble Metals. 2022. pp. 231–236. (in Russian)
- 19 Levitskaia T.G., Chatterjee S., Pourmand A. et al. A review of bismuth(III)-Based materials for remediation of contaminated sites. ACS Earth and Space Chemistry. 2022. vol. 6. no. 4. pp. 883–908. doi: 10.1021/acsearthspacechem.1c00114
- 20 Yan H., Hu J., Deng Y.X. et al. Long-life high-voltage all-solid-state batteries enabled by bismuth(III) triflate mediated polymer electrolytes. Chemical Engineering Journal. 2024. vol. 484. p. 149516. doi: 10.1016/j.cej.2024.149516
- 21 Tian Y., Sakaki S. Theoretical study on bismuth(III) catalysts for synthesis of phenylsulfonyl fluoride: reasons of their catalysis. ACS Catalysis. 2024. vol. 14. no. 4. pp. 2758–2774. doi: 10.1021/acscatal.3c04874
- 22 Planas O., Peciukenas V., Cornell J. Bismuth-catalyzed oxidative coupling of arylboronic acids with triflate and nonaflate salts. Journal of the American Chemical Society. 2020. vol. 142. no. 26. pp. 11382–11387. doi: 10.1021/jacs.0c05343

Сведения об авторах

Светлана Е. Плотникова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, burkovasweta@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6331-554x>

Елена М. Горбунова к.х.н., доцент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gorbunova_elena2024@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Сабухи И. Нифталиев д.х.н., профессор, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, niftaliev@mail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Ирина В. Кузнецова степень, должность, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0001-6666-6292>

Анастасия М. Лучко студент, кафедра неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, am.luchko@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5197-4765>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за plagiat

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Светлана Е. Плотникова Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, burkovasweta@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6331-554x>

Елена М. Горбунова Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gorbunova_elena2024@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3550-0115>

Сабухи И. Нифталиев Dr. Sci. (Chem.), professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, niftaliev@mail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>

Ирина В. Кузнецова Cand. Sci. (Chem.), assistant professor, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuznetsovaiv@mail.ru

 <https://orcid.org/0001-6666-6292>

Anastasiya M. Luchko student, inorganic chemistry and chemical technology department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, am.luchko@mail.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5197-4765>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/08/2025	После редакции 18/08/2025	Принята в печать 10/09/2025
Received 01/08/2025	Accepted in revised 18/08/2025	Accepted 10/09/2025