

КООРДИНАЦИОННЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ

УДК 546.87

ИОДИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВИСМУТА(III) С 1-ЭТИЛ-3-
МЕТИЛПИРИДИНИЕМ: СТРОЕНИЕ, ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ
И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2022 г. А. Н. Усольцев^{а, *}, И. А. Шенцева^а, В. Р. Шаяпов^а, П. Е. Плюснин^а, И. В. Корольков^а,
П. А. Абрамов^а, М. Н. Соколов^{а, b}, С. А. Адонин^{а, c}

^аИнститут неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, пр-т Академика Лаврентьева, 3
Новосибирск, 630090 Россия

^бКазанский (Приволжский) федеральный университет, Институт химии им. А. Бутлерова,
ул. Клемлевская, 29/1, Казань, 420000 Россия

^сЮжно-уральский государственный университет, ул. Ленина, 76, Челябинск, 454080 Россия

*e-mail: usoltsev@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 28.06.2022 г.

После доработки 28.07.2022 г.

Принята к публикации 30.07.2022 г.

Галогенидные комплексные соединения висмута(III) с 1-этил-3-метилпиридинием (1-Et-3-MePy)₃[Bi₂I₉] (**1**) и (1-Et-3-MePy)₃[Bi₃I₁₂] (**2**) синтезированы в ходе реакций BiI₃ с иодидом 1-этил-3-метилпиридиния в органических растворителях и охарактеризованы методом РСА, чистота образцов подтверждена методом РФА. Записаны спектры диффузного отражения и оценена ширина запрещенной зоны по классической формуле Кобелки–Мунка; изучена термическая стабильность методом ТГА. По результатам полученных данных можно сделать следующие выводы: на структуру и состав продукта влияет не только соотношение реагентов, но и выбор растворителя для проведения реакции; полученные комплексные соединения обладают высокой термической стабильностью (потеря массы начинается только при температуре >250°C), значение ширины запрещенной зоны составляет 2.11 и 1.96 эВ для **1** и **2** соединения соответственно.

Ключевые слова: галогенидные комплексы, полиядерные комплексы, кристаллическая структура, оптические свойства

DOI: 10.31857/S0044457X2260102X

ВВЕДЕНИЕ

Галогенидные комплексы постпереходных элементов привлекают большое внимание из-за большого структурного разнообразия, наибольшим количеством разных структурных типов выделяются комплексные соединения висмута [1, 2]. На данный момент известны комплексы с анионами дискретного строения разной ядерности от 1 до 8 [3–12]; не меньше известно комплексов с анионами полимерного строения [13–20], обычно они имеют одномерное строение, однако известен один пример с анионом двухмерного строения [21]. Известны представители гетерометаллических комплексов висмута, например с золотом [22]. Некоторые галогенидные комплексные соединения обладают термо- [23–29] и фотохромизмом [5, 30]. Для других активно изучается возможность использования их в качестве компонентов солнечных батарей и фотодетекторов [31–34]. Возможность использования галогенидных комплексных соединений в современном мате-

риаловедении повышает интерес к поиску новых соединений с разной ядерностью и размерностью. Несмотря на большое количество структурных данных, на данный момент нет теории, которая могла бы предсказать структуру и состав продукта в зависимости от начальных условий реакции. По настоящее время основным инструментом исследователей является перебор условий проведения реакции, которые значительно влияют на структуру и состав продукта. Наибольшее влияние оказывает структура катиона, соотношение реагентов и условия в которых происходит кристаллизация продукта.

По результатам серии экспериментов выделены и охарактеризованы два иодидных комплексных соединения висмута(III) с органическим катионом 1-этил-3-метилпиридинием (1-Et-3-MePy)₃[Bi₂I₉] (**1**) и (1-Et-3-MePy)₃[Bi₃I₁₂] (**2**). В настоящей работе обсуждаются особенности строения и кристаллической упаковки полученных соединений и отлич-

чия в условиях их синтеза, а также спектры диффузного отражения и стабильность.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты, направленные на получение комплексных соединений **1** и **2**, проводили на воздухе. Использовали реагенты марки “х. ч.” из коммерчески доступных источников и вводили в реакции без дополнительной очистки. 1-Et-3-MePyI получали взаимодействием 3-метилпиридина и иодэтана (1 : 1) в ацетонитриле при нагревании; чистоту подтверждали ЯМР (^1H) и элементным анализом.

Соединение 1. (1-Et-3-MePy) $_3$ [Bi $_2$ I $_9$]. Проводили реакцию 0.1 г иодида висмута(III) (0.17 ммоль) и 0.062 г (0.25 ммоль) 1-этил-3-метилпиридиния иодистого в 10 мл ацетонитрила при температуре 70°C в течение 60 мин. После проведения реакции раствор постепенно остужали до комнатной температуры и упаривали. После того, как часть растворителя испарилась, получали пригодные для РСА кристаллы красного цвета. Выход: 53%.

	C	H	N
Найдено, %	14.7;	1.8;	2.2.
Для C $_{24}$ H $_{36}$ Bi $_2$ I $_9$ N $_3$			
вычислено, %	15.0;	1.9;	2.2.

Соединение 2. (1-Et-3-MePy) $_3$ [Bi $_3$ I $_{12}$]. Проводили реакцию 0.03 г иодида висмута(III) (0.05 ммоль) и 0.0125 г (0.05 ммоль) 3-метил-1-этилпиридиния иодистого в 5 мл смеси растворителей ацетон/ацетонитрил при соотношении 1 : 1 при температуре 70°C в течение 60 мин. Когда исходные реагенты растворились, в реакционную смесь добавили 5 мл этилового спирта. После чего реакционную смесь постепенно охлаждали до комнатной температуры. Через сутки были обнаружены пригодные для РСА кристаллы красного цвета. Выход: 55%.

	C	H	N
Найдено, %	11.7;	1.5;	1.7.
Для C $_{24}$ H $_{36}$ N $_3$ Bi $_3$ I $_{12}$			
вычислено, %	11.5;	1.4;	1.7.

Рентгеноструктурное исследование. Дифракционные данные для монокристалла соединения **1** получали при 150 К на автоматическом дифрактометре Agilent Xcalibur, оснащенный двухкоординатным детектором AtlasS2 (графитовый монохроматор, $\lambda(\text{MoK}\alpha) = 0.71073 \text{ \AA}$, ω -сканирование). Интегрирование, учет поглощения, определение параметров элементарной ячейки проводили с использованием пакета программ CrysAlisPro.

Строение комплекса **2** установлено по стандартной методике на дифрактометре Bruker D8

Venture при 150 К с использованием $\text{MoK}\alpha$ ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$). Интенсивности отражений измерены методом ω и ϕ -сканирования узких (0.5°) фреймов. Поглощение учтено эмпирически с использованием SADABS [35].

Кристаллические структуры расшифровывали с использованием программы SHELXT и уточняли полноматричным методом наименьших квадратов в анизотропном (за исключением атомов водорода) приближении с использованием программы SHELXL [36]. Позиции атомов водорода рассчитывали геометрически и уточняли по модели “наездника”. Кристаллографические данные и детали дифракционных экспериментов приведены в табл. 1. Полные таблицы межатомных расстояний и валентных углов, координаты атомов и параметры атомных смещений депонированы в Кембриджский банк структурных данных (КСБД) (2176805-2176806).

Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов проводили на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, Ni фильтр, линейный детектор OneSight, диапазон $2\theta 5^\circ$ – 50° , шаг 0.0143° , накопление 2 с в точке). Образцы для исследования готовили следующим образом: поликристаллы истирали в агатовой ступке в присутствии гептана; полученную суспензию наносили на полированную сторону стандартной кварцевой кюветы; после высыхания гептана образец представлял собой тонкий ровный слой (толщина $\sim 100 \text{ мкм}$).

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на термовесах TG 209 F1 Iris (Германия). Измерения проводили в потоке гелия в интервале температур 30– 450°C при скорости нагрева 10 град/мин и открытых алюминиевых тиглях.

Элементный анализ на CHN выполняли на CHNS анализаторе Vario MICRO cube в Аналитической лаборатории ИНХ СО РАН.

Оптические свойства. Измерения спектров диффузного отражения порошков проводили с использованием спектрофотометрической системы, состоящей из спектрометра “Колибри-2” (ВМК “Оптоэлектроника”, Россия), зонда отражения/обратного рассеяния Avantes FCR-7UVIR400-2-ME-HT и дейтерий-вольфрамовой лампы AvaLight-DHS (Avantes, Нидерланды). Спектры регистрировали в интервале длин волн 400–1000 нм при комнатной температуре относительно эталона 100% отражения – порошка сульфата бария BaSO_4 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Основные факторы, которые влияют на структуру и состав галогенидных комплексов [1]: структура и размер органического катиона; соотношение исходных соединений; выбор растворителя или системы растворителей, которые ис-

Таблица 1. Детали рентгеноструктурных экспериментов для **1** и **2**

Параметр	1	2
Брутто-формула	$C_{24}H_{36}Bi_2I_9N_3$	$C_{24}H_{36}Bi_3I_{12}N_3$
M , г/моль	1926.62	2516.30
Сингония, пр. гр.	Моноклинная, $P2_1/c$	Орторомбическая, $P2_12_12_1$
a, b, c , Å	22.8580 (9), 11.5299 (4), 16.6354 (7)	10.8532 (4), 15.9816 (7), 29.7840 (12)
α, β, γ , град	90, 104.369 (4), 90	90, 90, 90
V , Å ³	4247.1 (3)	5166.1 (4)
Z	4	4
$D_{\text{выч}}$, г/см ³		
μ , мм ⁻¹	14.84	17.38
Размер кристалла, мм	$0.12 \times 0.05 \times 0.05$	$0.12 \times 0.10 \times 0.06$
Область сканирования по θ , град	$\theta_{\text{max}} = 29.0, \theta_{\text{min}} = 3.4$	$\theta_{\text{max}} = 30.6, \theta_{\text{min}} = 2.0$
Диапазон индексов hkl	$-29 \leq h \leq 29, -15 \leq k \leq 15, -15 \leq l \leq 22$	$-15 \leq h \leq 15, -22 \leq k \leq 22, -42 \leq l \leq 34$
N_{hkl} измеренных/независимых	23019/9302	91968/15784
R_{int}	0.029	0.060
N_{hkl} с $I > 2\sigma(I)$	7982	13823
$R[F^2 > 2\sigma(F^2)], wR(F^2), S$	0.025, 0.043, 1.02	0.030, 0.056, 0.89
Остаточная электронная плотность (max/min), e/Å ³	0.75, -1.01	0.93, -0.78

пользуются при кристаллизации [37]. Роль влияния системы растворителей на состав и строения продуктов изучена на данный момент слабо, хотя были описаны примеры [38, 39], демонстрирующие важность данного фактора.

Реакцию иодида висмута с иодидной солью органического катиона (в соотношении 2 : 3 соответственно) проводили в растворе ацетонитрила при нагревании. После растворения реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры и медленно упаривали. При частичном упаривании раствора был получен иодовисмутат **1** с дис-

клетным анионом биядерного строения (рис. 1). Галогенидные комплексы с анионом биядерного строения встречаются часто [40, 41]. В данном анионе 2 атома висмута связаны между собой тремя μ_2 -мостиковыми иодидными лигандами. Длины связей $Bi-I_{\text{term}}$ и $Bi-\mu_2-I$ в **1** лежат в диапазонах 2.930–2.985 и 3.199–3.323 Å. В кристаллической структуре комплекса можно обнаружить невалентные контакты между атомами I и N (рис. 2) на расстояниях 3.601 и 3.689 Å. Аналогичные взаимодействия обнаружены ранее в структурах $(\text{HTMP})_4[\text{Bi}_4\text{I}_{16}] \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot 2(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ и $(\text{HT-}$

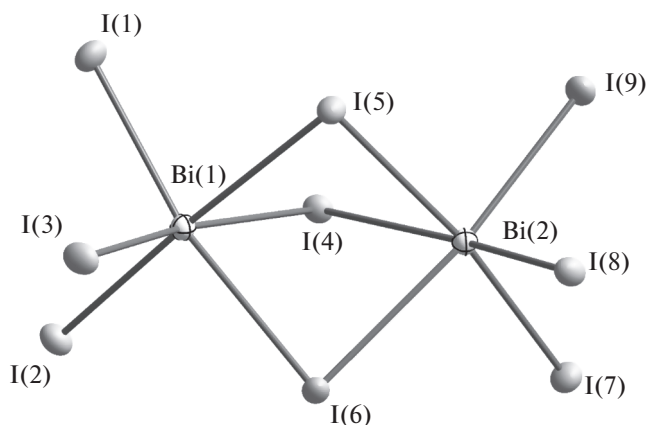


Рис. 1. Структура аниона $[\text{Bi}_2\text{I}_9]^{3-}$ в соединении **1**.

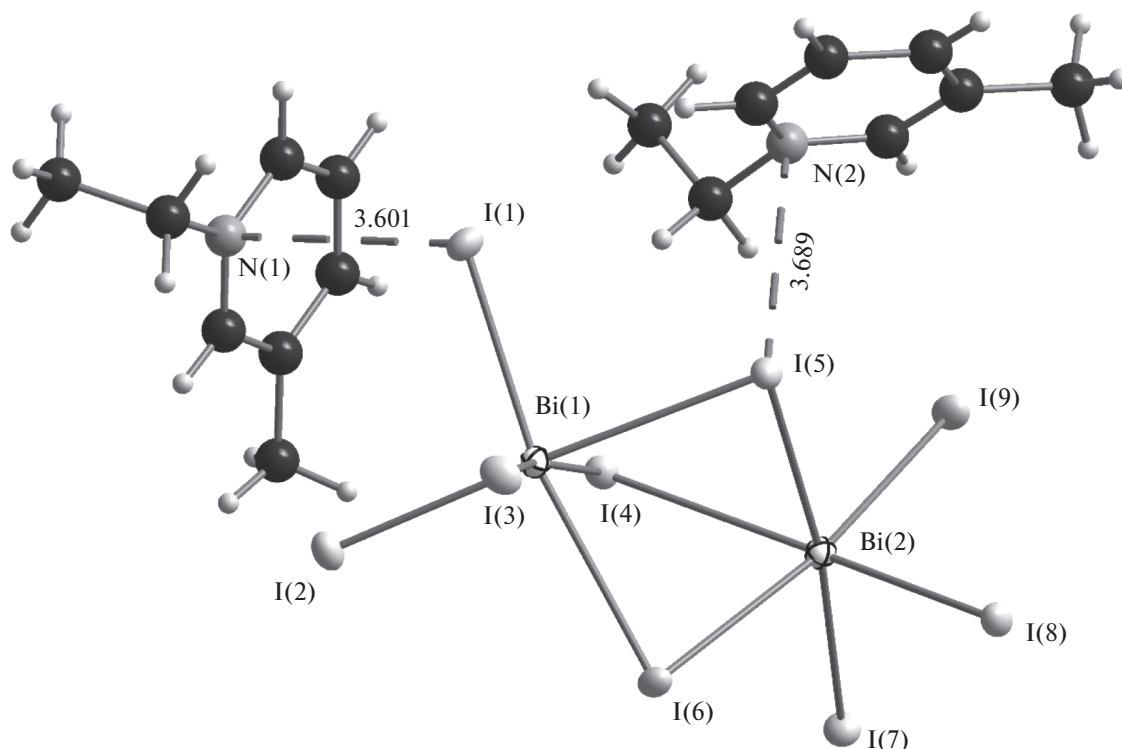


Рис. 2. Невалентные контакты N...I в кристаллической структуре комплекса **1**.

$\text{MP})_3[\text{Bi}_5\text{I}_{18}] \cdot 5\text{THF}$ ($\text{TMP} = 2,3,5,6$ -тетраметилпипразин) [42]. Кристаллическая упаковка комплекса **1** показана на рис. 3. Центры тяжести анионов $[\text{Bi}_2\text{I}_9]^{3-}$ подчиняются искаженному ОЦК (объемно-центрированная кубическая сингония) мотиву упаковки (рис. 4).

При варьировании соотношения реагентов в ацетонитриле не удалось получить кристаллы другого соединения. Было решено попробовать получить кристаллы в других растворителях или их смеси. При смене условий кристаллизации получены кристаллы соединения **2**. Анализ рентгеноструктурных данных показал, что анион в комплексе **2** имеет трехъядерное линейное строение (рис. 5). В данном случае реакцию проводили в смеси растворителей ацетон/ацетонитрил, а при кристаллизации добавляли этиловый спирт.

В структуре аниона три октаэдра $\{\text{BiI}_6\}$ связаны тремя мостиковыми атомами иода и формируют линейный трехъядерный анион $[\text{Bi}_3\text{I}_{12}]^{3-}$ (рис. 5). Этот тип анионов встречался и ранее для галогенидных комплексов висмута [43]. Длины связей $\text{Bi}-\text{I}_{\text{term}}$ и $\text{Bi}-\mu_2-\text{I}$ в **2** лежат в диапазонах 2.883–2.941 и 3.283–3.344 Å. Кристаллическая упаковка комплекса **2** показана на рис. 6. Стоит отметить, что $[\text{Bi}_3\text{I}_{12}]^{3-}$ не образует невалентных контактов N...I, как это наблюдалось в кристаллической структуре комплекса **1**. Длины связей $\text{Bi}-\text{I}$ в комплексах **1** и **2** приведены в табл. 2. Центры тяже-

сти анионов $[\text{Bi}_3\text{I}_{12}]^{3-}$ подчиняются искаженному ОЦК мотиву упаковки (рис. 7).

Чистота полученных соединений подтверждена методом рентгенофазового и элементного анализа, это позволило изучить их термическую ста-

Таблица 2. Длины связей $\text{Bi}-\text{I}$ в комплексах **1** и **2**, Å

	1		2
I(1)—Bi(1)	2.9437 (4)	Bi(1)—I(1)	3.3077 (6)
I(2)—Bi(1)	2.9520 (4)	Bi(1)—I(3)	2.8984 (7)
I(3)—Bi(1)	2.9858 (3)	Bi(1)—I(5)	2.8983 (7)
I(4)—Bi(1)	3.2083 (3)	Bi(1)—I(7)	2.9108 (7)
I(4)—Bi(2)	3.3229 (3)	Bi(1)—I(10)	3.3684 (7)
I(5)—Bi(1)	3.2100 (3)	Bi(1)—I(12)	3.3442 (7)
I(5)—Bi(2)	3.1983 (4)	Bi(2)—I(1)	3.0708 (7)
I(6)—Bi(1)	3.2134 (4)	Bi(2)—I(4)	3.0966 (7)
I(6)—Bi(2)	3.2217 (4)	Bi(2)—I(6)	3.0928 (7)
I(7)—Bi(2)	2.9475 (4)	Bi(2)—I(9)	3.0556 (7)
I(8)—Bi(2)	2.9305 (3)	Bi(2)—I(10)	3.0819 (7)
I(9)—Bi(2)	2.9525 (4)	Bi(2)—I(12)	3.0499 (7)
		Bi(3)—I(2)	2.9411 (7)
		Bi(3)—I(4)	3.3437 (7)
		Bi(3)—I(6)	3.3007 (7)
		Bi(3)—I(8)	2.8829 (7)
		Bi(3)—I(9)	3.2829 (7)
		Bi(3)—I(11)	2.9124 (7)

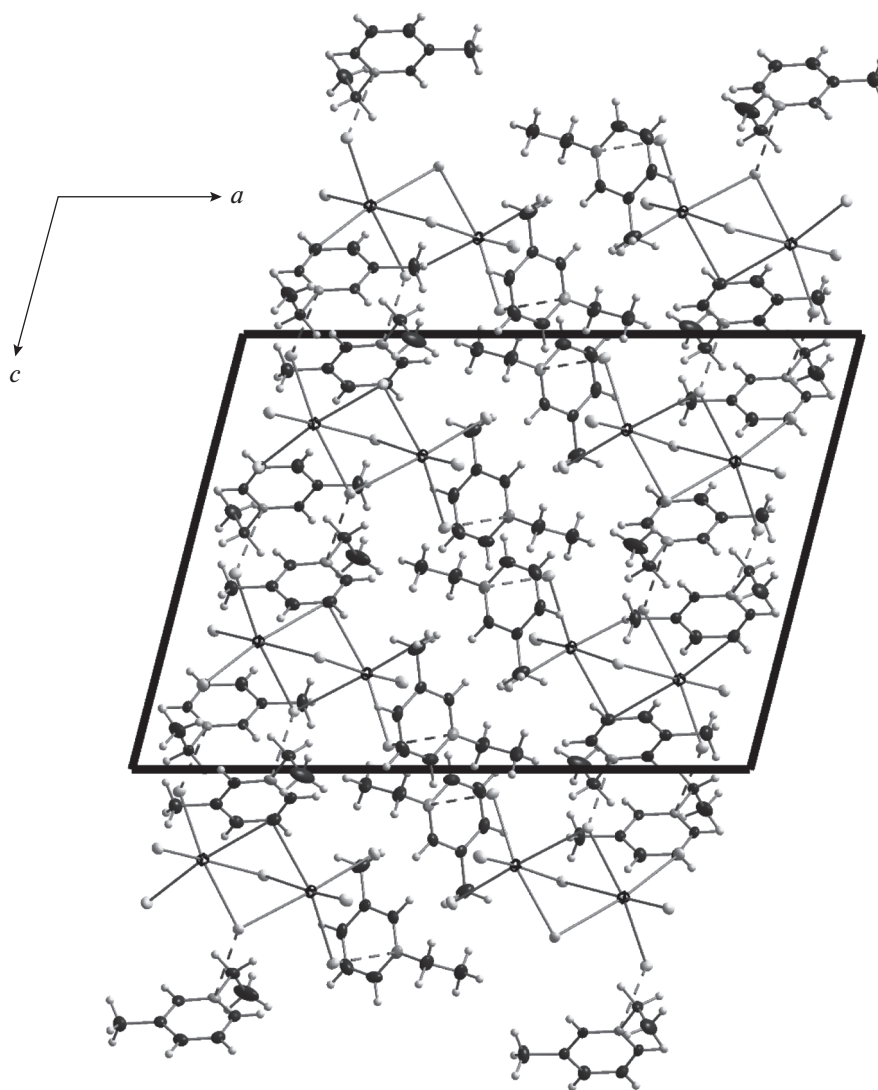


Рис. 3. Кристаллическая упаковка комплекса 1.

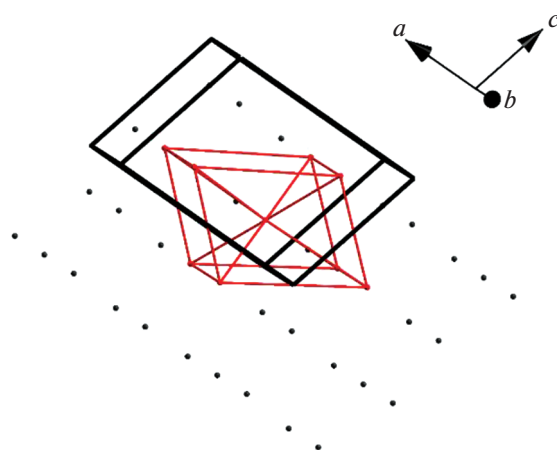


Рис. 4. ОЦК мотив упаковки анионов в кристаллической структуре комплекса 1. Показаны центры тяжести анионов $[\text{Bi}_2\text{I}_9]^{3-}$.

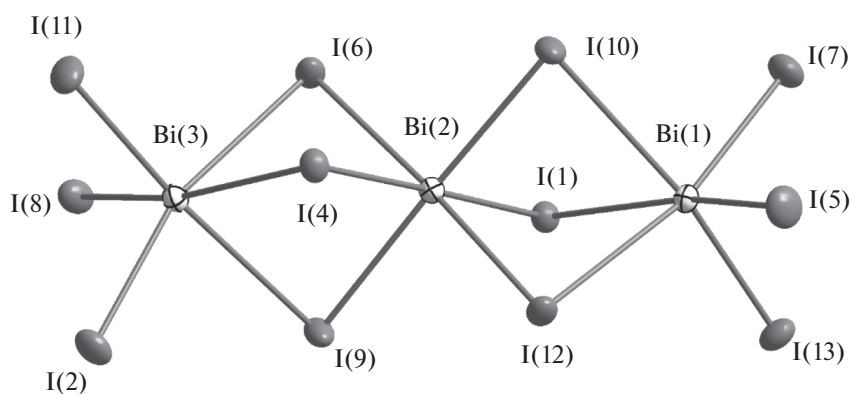


Рис. 5. Структура аниона $[\text{Bi}_3\text{I}_{12}]^{3-}$ в кристаллической структуре комплекса 2.

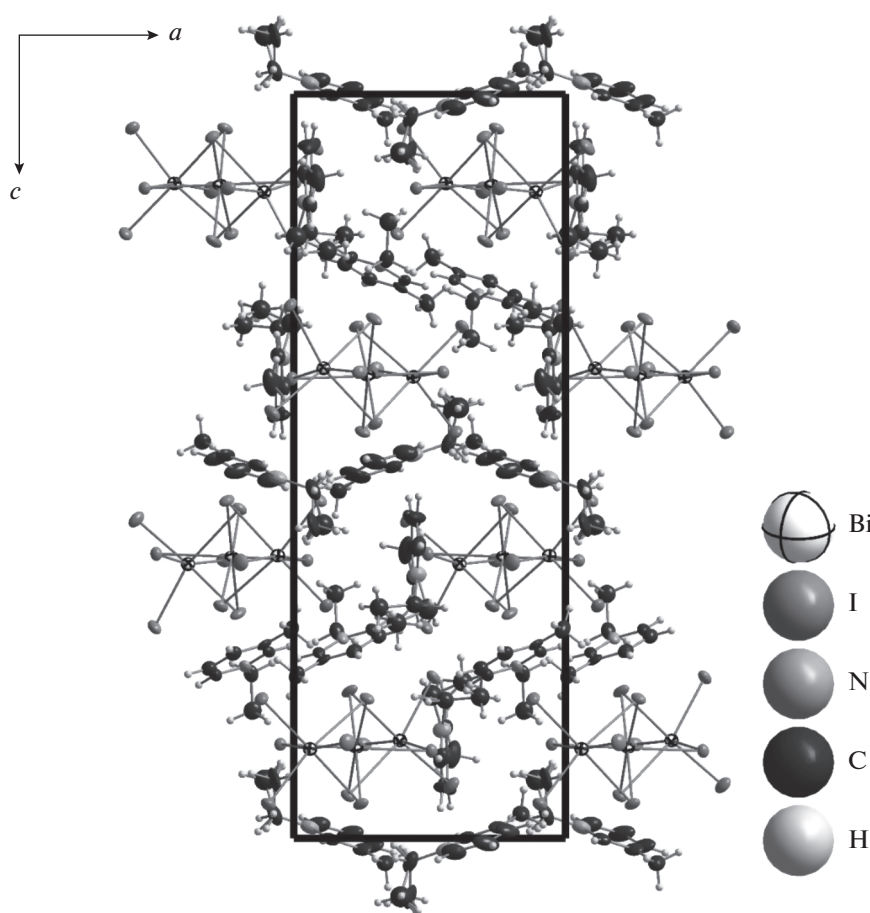


Рис. 6. Кристаллическая упаковка комплекса 2.

бильность и оценить ширину запрещенной зоны. Анализ кривых ТГА (рис. 8) показал, что оба соединения проявляют высокую стабильность и разлагаются при температуре $>250^\circ\text{C}$.

Спектры диффузного отражения образцов имеют четкий край поглощения (рис. 9). Полученные спектры диффузного отражения были пересчитаны

в спектры поглощения по классической формуле Кубелки–Мунка. Значение ширины запрещенной зоны, рассчитанное по полученным данным, составило 2.11 и 1.96 эВ для соединений **1** и **2** соответственно. Данные значения являются характерными для данных комплексов и согласуются с результатами, полученными ранее [44, 45].

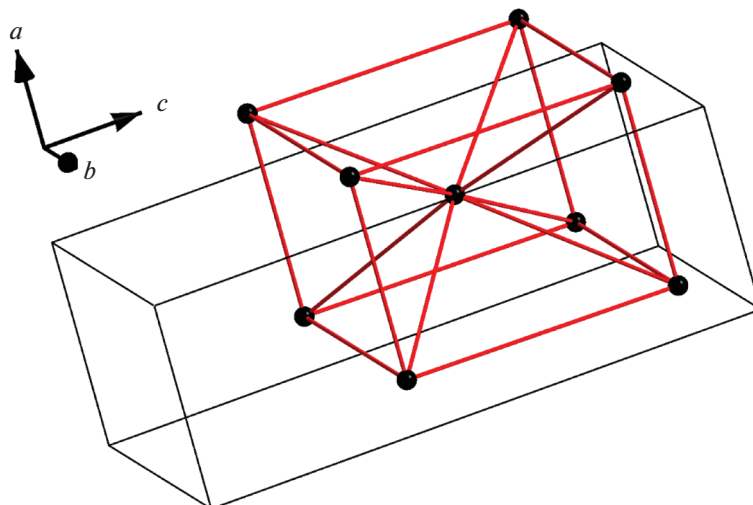


Рис. 7. ОЦК мотив упаковки анионов в кристаллической структуре комплекса **2**. Показаны центры тяжести анионов $[\text{Bi}_3\text{I}_{12}]^{3-}$.

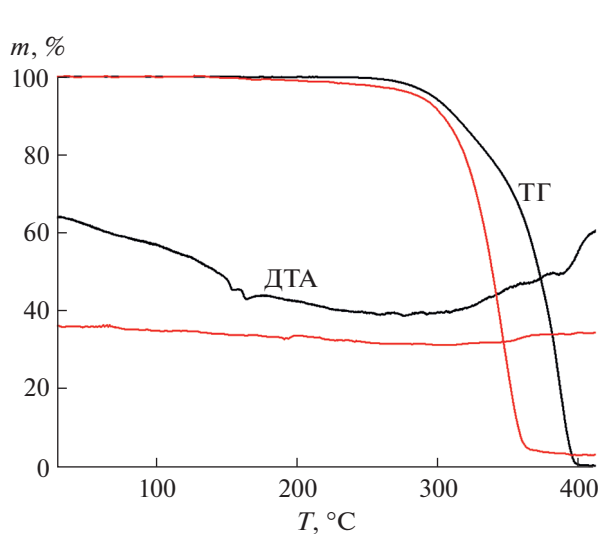


Рис. 8. Данные ТГА для веществ **1** (черный) и **2** (красный).

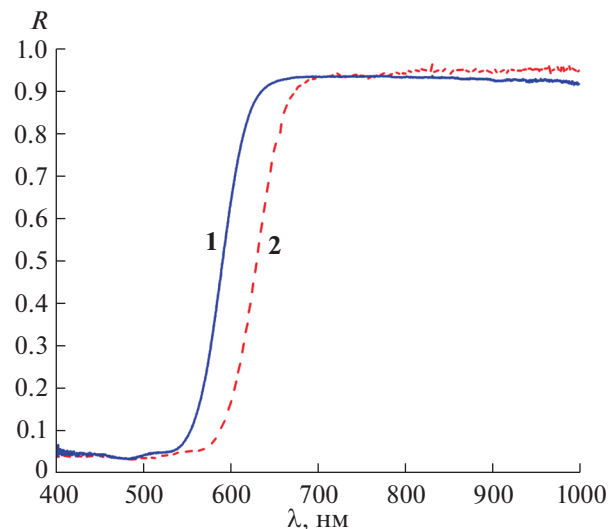


Рис. 9. Спектры диффузного отражения для веществ **1** (синий) и **2** (красный).

Получено два иодидных комплекса висмута с одним органическим противоионом и показано, что ключевое влияние на структуру и состав продуктов, в данном случае, оказывает выбор растворителя для проведения реакции и кристаллизации целевого продукта. Данный подход может быть расширен и на другие органические субстраты для синтеза новых галогенидных комплексов висмута.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 21-73-00192).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adonin S.A., Sokolov M.N., Fedin V.P. // *Coord. Chem. Rev.* 2016. V. 312. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2015.10.010>
2. Deka R., Orthaber A. // *Dalt. Trans.* 2022. V. 51. № 22. P. 8540. <https://doi.org/10.1039/D2DT00755J>
3. Eickmeier H., Jaschinski B., Hepp A. et al. // *Zeitschrift für Naturforsch. Sect. B J. Chem. Sci.* 1999. V. 54. № 3. P. 305.

4. *Tereshansy M.A., Goforth A.M., Smith M.D. et al.* // Acta Crystallogr. Sect. E. 2006. V. 62. № 12. P. 3269. <https://doi.org/10.1107/S1600536806043960>
5. *Lin R.-G., Xu G., Lu G. et al.* // Inorg. Chem. 2014. V. 53. № 11. P. 5538. <https://doi.org/10.1021/ic5002144>
6. *Sharutin V.V., Egorova I.V., Levchuk M.V. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2002. V. 28. № 9. P. 613. <https://doi.org/10.1023/A:1020082731096>
7. *Sharutin V.V., Yegorova I.V., Klepikov N.N. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2009. V. 54. № 1. P. 52. <https://doi.org/10.1134/S0036023609010124>
8. *Goforth A.M., Tereshansy M.A., Smith M.D. et al.* // Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun. 2006. V. 62. № 9. P. M381. <https://doi.org/10.1107/S0108270106025972>
9. *Goforth A.M., Peterson L.R., Smith M.D. et al.* // J. Solid State Chem. 2005. V. 178. № 11. P. 3529. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2005.09.010>
10. *Monakhov K.Y., Gourlaouen C., Pattacini R. et al.* // Inorg. Chem. 2012. V. 51. № 3. P. 1562. <https://doi.org/10.1021/ic201859c>
11. *Yelovik N.A., Shestimerova T.A., Bykov M.A. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2017. V. 66. № 7. P. 1196. <https://doi.org/10.1007/s11172-017-1872-y>
12. *Shestimerova T.A., Mironov A.V., Bykov M.A. et al.* // Cryst. Growth Des. 2020. V. 20. № 1. P. 87. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b00636>
13. *Usoltsev A.N., Elshobaki M., Adonin S.A. et al.* // J. Mater. Chem. A 2019. V. 7. № 11. P. 5957. <https://doi.org/10.1039/C8TA09204D>
14. *Pandey S., Andrews A.P., Venugopal A.* // Dalt. Trans. 2016. V. 1. P. 8705. <https://doi.org/10.1039/c6dt01032f>
15. *Xu G., Guo G.-C., Wang M.-S. et al.* // Angew. Chemie Int. Ed. 2007. V. 46. № 18. P. 3249. <https://doi.org/10.1002/anie.200700122>
16. *Heine J.* // Dalt. Trans. 2015. V. 44. № 21. P. 10069. <https://doi.org/10.1039/c5dt00813a>
17. *Shestimerova T.A., Yelavik N.A., Mironov A.V. et al.* // Inorg. Chem. 2018. V. 57. № 7. P. 4077. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b00265>
18. *Shestimerova T.A., Golubev N.A., Yelavik N.A. et al.* // Cryst. Growth Des. 2018. V. 18. № 4. P. 2572. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b00179>
19. *Shestimerova T.A., Mironov A.V., Bykov M.A. et al.* // Molecules 2020. V. 25. № 12. <https://doi.org/10.3390/molecules25122765>
20. *Yelovik N.A., Mironov A.V., Bykov M.A. et al.* // Inorg. Chem. 2016. V. 55. № 9. P. 4132. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.5b02729>
21. *Mitzi D.B.* // Inorg. Chem. 2000. V. 39. № 26. P. 6107. <https://doi.org/10.1021/ic000794i>
22. *Иванов А.В., Герасименко А.В., Егорова И.В. et al.* // Коорд. химия. 2018. V. 44. № 4. P. 266. <https://doi.org/10.1134/S0132344X18040047>
23. *Shayapov V.R., Usoltsev A.N., Adonin S.A. et al.* // New J. Chem. 2019. V. 43. № 9. P. 3927. <https://doi.org/10.1039/C9NJ00320G>
24. *Gagor A., Weclawik M., Bondzior B. et al.* // CrystEngComm. 2015. V. 17. № 17. P. 3286. <https://doi.org/10.1039/C5CE00046G>
25. *Wang D.-H., Zhao L.-M., Lin X.-Y. et al.* // Inorg. Chem. Front. 2018. V. 5. № 5. P. 1162. <https://doi.org/10.1039/C7QI00755H>
26. *Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G.* // Russ. J. Coord. Chem. 2012. V. 38. № 2. P. 106. <https://doi.org/10.1134/S1070328412020017>
27. *Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. № 2. P. 213. <https://doi.org/10.1134/S0036023611020045>
28. *Bukvetskii B.V., Sedakova T.V., Mirochnik A.G.* // Russ. J. Coord. Chem. 2010. V. 36. № 9. P. 651. <https://doi.org/10.1134/S1070328410090034>
29. *Wang P., Chen Z.R., Li H.H.* // J. Clust. Sci. 2020. V. 31. № 5. P. 943. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01699-1>
30. *Shen J.-J., Li X.-X., Yu T.-L. et al.* // Inorg. Chem. 2016. V. 55. № 17. P. 8271. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b01599>
31. *Petrov A.A., Sokolova I.P., Belich N.A. et al.* // J. Phys. Chem. C 2017. V. 121. № 38. P. 20739. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b08468>
32. *Fateev S.A., Petrov A.A., Khrustalev V.N. et al.* // Chem. Mater. 2018. V. 30. № 15. P. 5237. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b01906>
33. *Belich N.A., Tychinina A.S., Kuznetsov V.V. et al.* // Mendeleev Commun. 2018. V. 28. № 5. P. 487. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2018.09.011>
34. *Marchenko E.I., Fateev S.A., Petrov A.A. et al.* // J. Phys. Chem. C 2019. V. 123. № 42. P. 26036. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08995>
35. *Sheldrick G.M.* // SADABS Progr. scaling Correct. area Detect. data 1996. <https://www.scienceopen.com/document?vid=5cab3651-c60c-4e6d-89cc-c55396e9e2dc>
36. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. Sect. C Struct. Chem. 2015. V. 71. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
37. *Usoltsev A.N., Korobeynikov N.A., Novikov A.S. et al.* // Inorg. Chem. 2020. V. 59. № 23. P. 17320 V. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c02599>
38. *Ahmed I.A., Blachnik R., Reuter H.* // Zeitschrift für Anorg. und Allg. Chemie 2001. V. 627. № 9. P. 2057. [https://doi.org/10.1002/1521-3749\(200109\)627:9<2057::AID-ZAAC2057>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1521-3749(200109)627:9<2057::AID-ZAAC2057>3.0.CO;2-7)
39. *Pike R.D., Marshall N.E., Martucci A.L.* // J. Chem. Crystallogr. 2021. V. 52. № 2. P. 161. <https://doi.org/10.1007/s10870-021-00901-5>
40. *Jiang Y.-X., Wang Y.-Y., Song L. et al.* // J. Clust. Sci. 2019 306 2019. V. 30. № 6. P. 1443. <https://doi.org/10.1007/S10876-019-01587-8>
41. *Kotov V.Y., Ilyukhin A.B., Buikin P.A. et al.* // Dalt. Trans. 2019. V. 48. № 22. P. 7602. <https://doi.org/10.1039/C9DT01019J>
42. *Usoltsev A.N., Adonin S.A., Abramov P.A. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2018. V. 44. № 12. P. 772. <https://doi.org/10.1134/S1070328418120102>
43. *Loor M., Bendt G., Hagemann U. et al.* // Dalt. Trans. 2016. V. 45. № 39. P. 15326. <https://doi.org/10.1039/C6DT02361D>
44. *Zhang Z.-P., Feng Q.-Y., Wang Q.-L. et al.* // J. Clust. Sci. 2018. V. 29. № 2. P. 367. <https://doi.org/10.1007/s10876-018-1339-9>
45. *Zhang Z.P., Feng Q.Y., Wei Y.L. et al.* // J. Clust. Sci. 2018. V. 29. № 4. P. 725. <https://doi.org/10.1007/s10876-018-1397-z>