

УДК 546.73

ДВУХ- И ТРЕХМЕРНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕРЕФТАЛАТЫ Co(II) C 3,3',5,5'-ТЕТРАБРОМ-4,4'-БИПИРИДИНОМ (3,3',5,5'-BrBipy)

© 2024 г. И. Ф. Сахапов^{1,2}, А. А. Загидуллин^{2,3}, Д. Р. Исламов^{2,3}, В. В. Шарутин¹, Д. Г. Яхваров^{2,3}, Д. А. Жеребцов¹, В. А. Милоков², А. С. Загузин^{1,4}, В. П. Федин⁴, С. А. Адонин^{1,4,5,*}

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова РАН, Казань, Россия

³Химический институт им. А. М. Бутлерова, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

⁴Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН, Иркутск, Россия

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

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принята к публикации 05.05.2023 г.

Взаимодействием 3,3',5,5'-тетрабром-4,4'-бипиридина (BrBipy) с нитратом кобальта и терефталевой кислотой (H₂Bdc) получены двух- и трехмерные координационные полимеры {[Co₂(Bdc)₂(BrBipy)₂(H₂O)₄] · 4DMF} (I) и {[Co₂(Ddc)₄(BrBipy)] · 2MeOH} соответственно. Строение комплексов изучено методом РСА (CCDC № 2259216 (I) и 2259214 (II)).

Ключевые слова: кобальт, координационные полимеры, линкерные лиганды, рентгеноструктурный анализ
DOI: 10.31857/S0132344X24020062 EDN: orqjqlz

На протяжении последних лет изучение металл-органических координационных полимеров (МОКП, *англ.* “metal-organic frameworks”, MOF) остается одной из “горячих тем” современной неорганической химии [1–8]. Эти соединения исследуются с точки зрения возможности их применения в таких областях, как селективное разделение разнообразных органических субстратов [9–11], концентрирование неорганических ионов, в том числе благородных металлов [12–14], выделение органических и неорганических загрязнителей из смесей [15–17], разработка сенсоров [18–21] и др. Львиную долю МОКП составляют гомо- или гетерометаллические карбоксилаты (как правило, ароматические) [4, 22, 23]. При этом важнейшее значение имеет дизайн соответствующих линкеров, обеспечивающий разнообразие нековалентных взаимодействий с гостевыми молекулами в порах и, соответственно, селективность (сорбции, распознавания и т.д.). Как правило, главенствующую роль здесь играет водородная связь, однако в последнее время повышенный интерес вызывают МОКП со “строительными блоками”, которые способны образовывать иные супра-

молекулярные контакты, в частности, галогенную связь (ГС) [24–29]. Хотя число статей, описывающих подобные исследования, на сегодняшний день сравнительно мало [30, 31], мы полагаем, что это направление имеет большой потенциал развития.

Ранее с помощью квантово-химических расчетов нами было показано [32], что галогензамещенные производные 4,4'-бипиридина (4,4'-Bipy) способны выступать в роли доноров ГС. Несмотря на то что синтез некоторых соединений данного класса был описан ранее [33, 34], число МОКП на их основе крайне (и, по нашему мнению, незаслуженно) мало. Для бром- и иодзамещенных Bipy известно лишь несколько гомо- и гетеролигандных комплексов Ag(I) [35].

В настоящей работе нами получены и структурно охарактеризованы двух- и трехмерные МОКП на основе 3,3',5,5'-тетрабром-4,4'-бипиридина (BrBipy), а именно {[Co₂(Bdc)₂(BrBipy)₂(H₂O)₄] · 4DMF} (I) и {[Co₂(Bdc)₄(BrBipy)] · 2MeOH} (II) (Bdc²⁻ = анион терефталевой кислоты), строение которых определено методом рентгеноструктурного анализа (РСА).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные реагенты получали из коммерческих источников. 3,3',5,5'-тетрабром-4,4'-бипиридин синтезировали согласно литературной методике [36].

Синтез I. Навески 120 мг (0.65 ммоль) $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ и 31 мг (0.63 ммоль) BrViру растворяли в 25 мл смеси метанола и ДМФА (1 : 1) в ультразвуковой бане (15 мин). К раствору добавляли 110 мг (0.65 ммоль) терефталевой кислоты, перемешивали, после чего раствор помещали в тефлоновый реактор, выдерживали 48 ч при 100°C , после чего медленно охлаждали до комнатной температуры в течение 24 ч. Образуются кристаллы I, пригодные для РСА.

Синтез II выполняли по методике, аналогичной I, используя 25 мл метанола. Образуются кристаллы II, пригодные для РСА.

РСА кристаллов I проведен на четырехкружном дифрактометре Rigaku XtaLAB Synergy S с детектором HyPix и микрофокусной рентгеновской трубкой PhotonJet с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения (1.54184 \AA) при температуре 100 K . Полу-

ченные данные проиндексированы и интегрированы с помощью пакета программ CrysAlisPro. Учет поглощения проведен с использованием модуля ABSPACK: численная коррекция поглощения на основе гауссовского интегрирования по многогранной кристаллической модели и эмпирическая коррекция поглощения на основе сферических гармоник в соответствии с симметрией кристалла. Модуль GRAL использован для анализа систематических затуханий и определения пространственной группы симметрии. РСА II проведен на автоматическом трехкружном дифрактометре Bruker D8 QUEST (графитовый монохроматор, $\lambda(\text{MoK}\alpha) = 0.71073 \text{ \AA}$, ω - и φ -сканирование с шагом 1°) при температуре $100(2) \text{ K}$. Сбор и индексирование данных, определение и уточнение параметров элементарной ячейки II проведены с использованием пакета программ APEX2. Эмпирическая коррекция поглощения кристалла II проведена на основе формы кристалла, дополнительная сферическая коррекция и учет систематических ошибок проведены с использованием SADABS.

Обе структуры решены прямым методом с использованием SHELXT [37] и уточнены методом наименьших квадратов с использованием

Таблица 1. Кристаллографические данные и детали уточнения структур комплексов I, II

Параметр	Значение	
	I	II
Брутто-формула	$\text{C}_{36}\text{H}_{24}\text{N}_4\text{O}_{12}\text{Br}_8\text{Co}_2 \cdot 4(\text{C}_3\text{H}_7\text{NO})$	$\text{C}_{52}\text{H}_{24}\text{N}_4\text{O}_{16}\text{Br}_8\text{Co}_4 \cdot 4(\text{CH}_4\text{O})$
<i>M</i>	1754.11	1963.92
Сингония	Ромбическая	Monoclinic
Пространственная группа	$P2_12_12$	$C2/m$
<i>a</i> , Å	21.6736(3)	16.0645(16)
<i>b</i> , Å	11.7936(2)	14.8872(13)
<i>c</i> , Å	11.4544(2)	13.7455(13)
β , град	90	92.773 (3)
<i>V</i> , Å^3	2927.86(8)	3283.5(5)
<i>Z</i>	2	2
μ , mm^{-1}	11.46	5.94
T_{\min} , T_{\max}	0.360, 0.681	0.384, 0.862
Число рефлексов измеренных/независимых	15151, 5757	7127, 7127
Число рефлексов с $I > 2\sigma(I)$	5392	5874
R_{int}	0.053	0.0717
Область сканирования по θ , град	75.9–3.9	28.8–1.5
$(\sin \theta/\lambda)_{\max}$, Å^{-1}	0.629	0.677
Диапазоны индексов <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>	$-26 \leq h \leq 23$, $-14 \leq k \leq 13$, $-13 \leq l \leq 14$	$-21 \leq h \leq 21$, $0 \leq k \leq 20$, $0 \leq l \leq 18$
$R(F^2 > 2\sigma(F^2))$, $wR(F^2)$, <i>S</i>	0.062, 0.150, 1.04	0.062, 0.138, 1.06
Остаточная электронная плотность (max/min), e \AA^{-3}	1.29 / –1.19	1.96 / –1.46

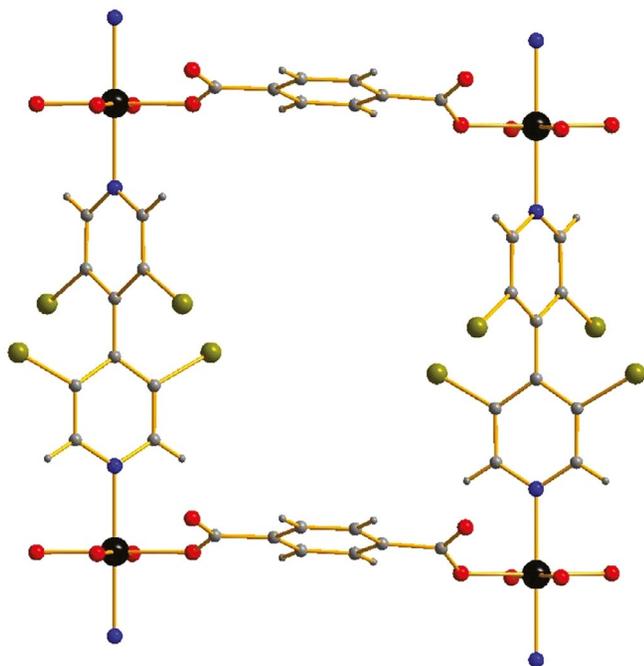


Рис. 1. Фрагмент молекулярной структуры I. Здесь и далее Co – черный, O – красный, Br – оливковый, C – серый, N – синий. Для части лигандов показаны только донорные атомы.

SHELXL [38]. Все неводородные атомы уточнены анизотропно. Атомы водорода помещены в расчетные положения и уточнены в модели наездника. Кристаллографические данные структур I и II представлены в табл. 1.

Кристаллографические параметры I и II депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2259216 (I) и 2259214 (II); deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Образцы I и II получены методом сольвентотермального синтеза, который весьма широко применяется в химии МОКП. К сожалению, несмотря на многочисленные эксперименты, нам не удалось найти экспериментальные условия, в которых I и II образовывались бы в виде однофазных образцов (это следует из данных рентгенофазового анализа). Это не позволило нам определить выход, провести полноценную характеристику посредством дополнительных физико-химических методов. Источником H₂O в I, наиболее вероятно, стал растворитель.

Комплекс I представляет собой двухмерный координационный полимер (рис. 1). Атом

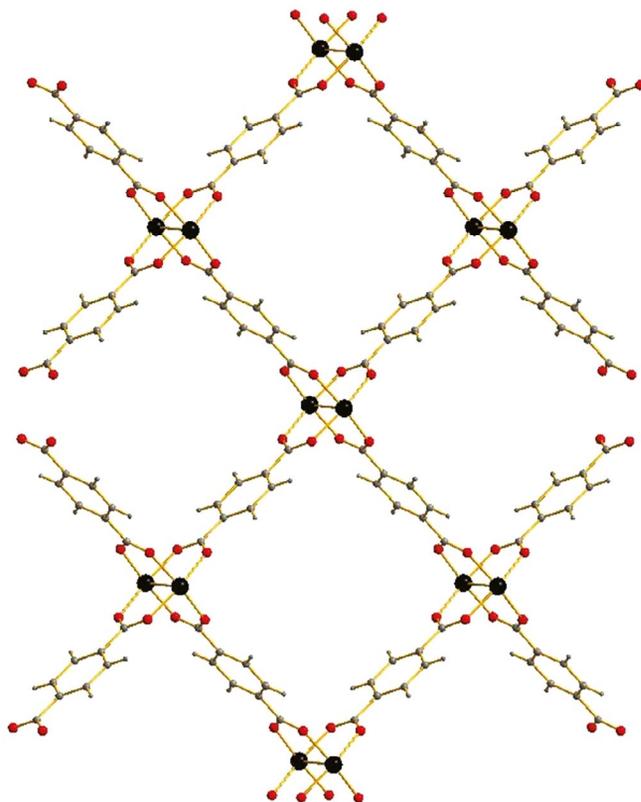


Рис. 2. Слои $\{[Co_2Vdc_4]\}$ в структуре II. Бис-пиридинные лиганды не отображены.

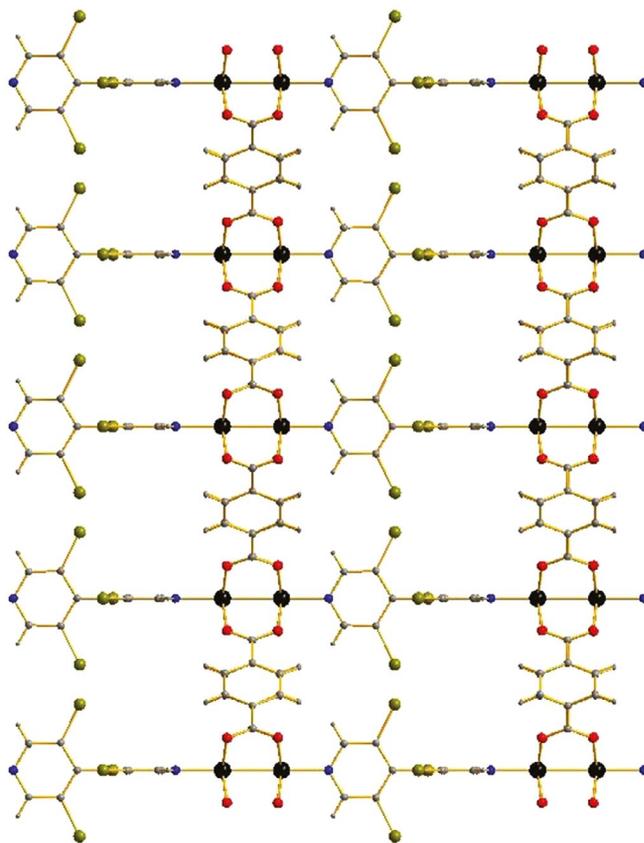


Рис. 3. Трехмерная структура II.

Со(II) не образует полиядерных фрагментов. Координационное окружение каждого атома Со(II) октаэдрическое; оно состоит из двух ВгВіру (Со–N2.158–2.190 Å), двух терефталатных фрагментов (Со–О 2.036–2.056 Å) и двух аквалигандов (Со–О 2.106–2.117 Å). Последние занимают *транс*-позиции, “блокируя”, таким образом, дальнейшую самосборку с образованием трехмерного каркаса. Исходя из анализа расстояний Вг…О и сравнения их с суммой соответствующих ван-дер-ваальсовых радиусов по Бонди (3.35 Å [39, 40]), можно предположить, что атомы Вг вступают в образование ГС с сольватными молекулами DMF (Вг…О 3.098–3.130 Å).

В отличие от I, в структуре II Со(II) образует биядерные строительные блоки типа “китайского фонарика” {Co₂Vdc₄} (Со…Со 2.578 Å). Диапазон длин связей Со–О (2.012–2.019 Å) типичен для таких фрагментов, т.е. хорошо согласуется с литературными данными [41, 42]. Наличие одновременно четырех терефталатных лигандов приводит к образованию слоев (рис. 2), которые, в свою очередь, соединяются *бис*-пиридилными линкерами (Со–N2.048–2.049 Å) в трехмерный каркас (рис. 3). Углы между ароматическими фрагментами в ВгВіру составляют 90°. В структуре присутствуют сильно разупорядоченные гостевые молекулы метанола (две на формульную единицу), занимающие полости пористого каркаса.

Таким образом, отметим, что ВгВіру действительно может выступать в роли линкерного лиганда, и с его участием могут образовываться в том числе и пористые МОКП. Более того, подтверждается способность ВгВіру к образованию ГС с гостевыми молекулами, что говорит о возможности использования таких соединений для селективного разделения органических субстратов при условии выделения целевых МОКП в чистом виде. Работы в этом направлении ведутся нашим коллективом.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Центр коллективного пользования СПбГУ за проведение дополнительных экспериментов по структурной характеристике веществ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-20019) и (частично) при поддержке Минобрнауки РФ (структурная характеристика образцов, № 121031700313-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiraev S.R., Nikolaevskii S.A., Kiskin M.A. et al. // *Inorg. Chim. Acta*. 2018. V. 477. P. 15. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2018.02.011>
2. Cheplakova A.M., Gusarov V.S., Samsonenko D.G. et al. // *J. Struct. Chem.* 2022. V. 63. № 6. P. 895. <https://doi.org/10.1134/S0022476622060063>
3. Li G.-L., Yin W.-D., Zhang J.-Y. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. № 11. P. 1745. <https://doi.org/10.1134/S003602-3622600800>
4. Yashkova K.A., Mel'nikov S.N., Nikolaevskii S.A. et al. // *J. Struct. Chem.* 2021. V. 62. № 9. P. 1378. <https://doi.org/10.1134/S0022476621090067>
5. Sidorov A.A., Gogoleva N.V., Bazhina E.S. et al. // *Pure Appl. Chem.* 2020. V. 92. № 7. P. 1093. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1212>
6. Gorbunova Y.G., Fedin V.P., Blatov V.A. // *Russ. Chem. Rev.* 2022. V. 91. № 4. <https://doi.org/10.1070/RCR5050>
7. Cui G.-H., He C.-H., Jiao C.-H. et al. // *CrystEngComm*. 2012. V. 14. № 12. P. 4210. <https://doi.org/10.1039/c2ce25264c>
8. Hu J.-M., Blatov V.A., Yu B. et al. // *Dalton Trans.* 2016. V. 45. № 6. P. 2426. <https://doi.org/10.1039/c5dt04679c>
9. Sopianik A.A., Dudko E.R., Kovalenko K.A. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. V. 13. № 12. P. 14768. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02812>
10. Sopianik A.A., Kovalenko K.A., Samsonenko D.G. et al. // *Chem. Commun.* 2020. V. 56. № 59. P. 8241. <https://doi.org/10.1039/d0cc03227a>
11. Lysova A.A., Samsonenko D.G., Kovalenko K.A. et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020. V. 59. № 46. P. 20561. <https://doi.org/10.1002/anie.202008132>
12. Maponya T.C., Modibane K.D., Somo T.R. et al. // *Sep. Purif. Technol.* 2023. V. 307. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122767>
13. Maponya T.C., Makgopa K., Somo T.R. et al. // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2023. V. 20. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100805>
14. Mansoorianfar M., Nabipour H., Pahlevani F. et al. // *Environ. Res.* 2022. V. 214. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114113>
15. Mahmoud M.E., Elsayed S.M., Mahmoud S.E.M.E. et al. // *Polyhedron*. 2022. V. 226. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116082>
16. Liu K.-G., Bigdeli F., Sharifzadeh Z. et al. // *J. Clean. Prod.* 2023. V. 404.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136709>
17. Zhou D.-D., Liu Q.-Y., Chen M. et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2023. V. 11. № 3.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109666>
 18. Norouzi F., Khavasi H. R. // New J. Chem. 2020. V. 44. № 21. P. 8937. <https://doi.org/10.1039/d0nj01149e>
 19. Zhang Y., Yuan S., Day G. et al. // Coord. Chem. Rev. 2018. V. 354. P. 28.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.06.007>
 20. Zhang H., Wang Z.-X., Luo Y.-H. et al. // Polyhedron. 2022. V. 224. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116016>
 21. Yousefi R., Asgari S., Banitalebi Dehkordi A. et al. // Environ. Res. 2023. V. 226.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115664>
 22. Zorina-Tikhonova E.N., Yambulatov D. S., Kiskin M.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 2. P. 75.
<https://doi.org/10.1134/S1070328420020104>
 23. Kolokolov F.A., Kulyasov A. N., Magomadova M.A. et al. // Russ. J. Gen. Chem. 2016. V. 86. № 5. P. 1209.
<https://doi.org/10.1134/S1070363216050418>
 24. Eliseeva A.A., Ivanov D. M., Novikov A. S. et al. // Cryst-EngComm 2019. V. 21. № 4. P. 616.
<https://doi.org/10.1039/c8ce01851k>
 25. Eliseeva A.A., Ivanov D. M., Novikov A. S. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. № 2. P. 356.
<https://doi.org/10.1039/c9dt04221k>
 26. Aliyarova I.S., Tupikina E. Y., Soldatova N. S. et al. // Inorg. Chem. 2022. V. 61. № 39. P. 15398.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01858>
 27. Soldatova N.S., Suslonov V.V., Kissler T. Y. et al. // Crystals. 2020. V. 10. № 3. <https://doi.org/10.3390/cryst10030230>
 28. Soldatova N.S., Postnikov P. S., Suslonov V.V. et al. // Org. Chem. Front. 2020. V. 7. № 16. P. 2230.
<https://doi.org/10.1039/d0qo00678e>
 29. Aliyarova I.S., Ivanov D. M., Soldatova N. S. et al. // Cryst. Growth Des. 2021. V. 21. № 2. P. 1136.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c01463>
 30. Kalaj M., Momeni M. R., Bentz K. C. et al. // Chem. Commun. 2019. V. 55. № 24. P. 3481.
<https://doi.org/10.1039/C9CC00642G>
 31. Li B., Dong M.-M., Fan H.-T. et al. // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. № 12. P. 6325.
<https://doi.org/10.1021/cg501073e>
 32. Novikov A.S., Sakhapov I. F., Zaguzin A. S. et al. // J. Struct. Chem. 2022. V. 63. № 11. P. 1880.
<https://doi.org/10.1134/S002247662211018X>
 33. Lee D.A., Peloquin D. M., Yapi E. W. et al. // Polyhedron 2017. V. 133. P. 358.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2017.05.040>
 34. Richard J., Joseph J., Wang C. et al. // J. Org. Chem. 2021. V. 86. № 4. P. 3356.
<https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c02708>
 35. Aubert E., Abboud M., Doudouh A. et al. // RSC Adv. 2017. V. 7. № 12. P. 7358.
<https://doi.org/10.1039/c6ra28197d>
 36. Abboud M., Mamane V., Aubert E. et al. // J. Org. Chem. 2010. V. 75. № 10. P. 3224.
<https://doi.org/10.1021/jo100152e>
 37. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>
 38. Sheldrick G.M., IUCr // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
 39. Bondi A. // J. Phys. Chem. 1966. V. 70. № 9. P. 3006.
<https://doi.org/10.1021/j100881a503>
 40. Mantina M., Chamberlin A. C., Valero R. et al. // J. Phys. Chem. A. 2009. V. 113. № 19. P. 5806.
<https://doi.org/10.1021/jp8111556>
 41. Gong Y., Zhang M. M., Zhang P. et al. // CrystEng-Comm 2014. V. 16. № 42. P. 9882.
<https://doi.org/10.1039/c4ce01506a>
 42. Ju Z., Yan W., Gao X. et al. // Cryst. Growth Des. 2016. V. 16. № 5. P. 2496. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b00681>

Two- and Three-Dimensional Polymeric Co(II) Terephthalates with 3,3',5,5'-Tetrabromo-4,4'-bipyridine (3,3',5,5'-BrBipy)

I. F. Sakhapov^{1,2}, A. A. Zagidullin^{2,3}, D. R. Islamov^{2,3}, V. V. Sharutin¹, D. G. Yakhvarov^{2,3}, D. A. Zherebtsov¹, V. A. Milyukov², A. S. Zaguzin^{1,4}, V. P. Fedin⁴ and S. A. Adonin^{1,4,5,*}

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

³Alexander Butlerov Institute of Chemistry, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

⁴Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁵Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

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

The reaction of 3,3',5,5'-tetrabromo-4,4'-bipyridine (BrBipy) with cobalt nitrate and terephthalic acid (H₂Bdc) gave 2D and 3D metal-organic frameworks {[Co₂(Bdc)₂(BrBipy)₂(H₂O)₄] · 4DMF} (I) and {[Co₂(Ddc)₄(BrDipy)] · 2MeOH} (II), respectively. The structure of the complexes was studied by X-ray diffraction (CCDC nos. 2259216 (I) and 2259214 (II)).

Keywords: cobalt, metal-organic frameworks, linker ligands, X-ray diffraction analysis

REFERENCES

- Kiraev S.R., Nikolaevskii S.A., Kiskin M.A. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 477. P. 15. <https://doi.org/10.1016/J.ICA.2018.02.011>
- Cheplakova A.M., Gusarov V.S., Samsonenko D.G. et al. // J. Struct. Chem. 2022. V. 63. № 6. P. 895. <https://doi.org/10.1134/S0022476622060063>
- Li G.-L., Yin W.-D., Zhang J.-Y. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 11. P. 1745. <https://doi.org/10.1134/S003602-3622600800>
- Yashkova K.A., Mel'nikov S.N., Nikolaevskii S.A. et al. // J. Struct. Chem. 2021. V. 62. № 9. P. 1378. <https://doi.org/10.1134/S0022476621090067>
- Sidorov A.A., Gogoleva N.V., Bazhina E.S. et al. // Pure Appl. Chem. 2020. V. 92. № 7. P. 1093. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1212>
- Gorbunova Y.G., Fedin V.P., Blatov V.A. // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. № 4. <https://doi.org/10.1070/RCR5050>
- Cui G.-H., He C.-H., Jiao C.-H. et al. // CrystEngComm. 2012. V. 14. № 12. P. 4210. <https://doi.org/10.1039/c2ce25264c>
- Hu J.-M., Blatov V.A., Yu B. et al. // Dalton Trans. 2016. V. 45. № 6. P. 2426. <https://doi.org/10.1039/c5dt04679c>
- Sapianik A.A., Dudko E.R., Kovalenko K.A. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. V. 13. № 12. P. 14768. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c02812>
- Sapianik A.A., Kovalenko K.A., Samsonenko D.G. et al. // Chem. Commun. 2020. V. 56. № 59. P. 8241. <https://doi.org/10.1039/d0cc03227a>
- Lysova A.A., Samsonenko D.G., Kovalenko K.A. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2020. V. 59. № 46. P. 20561. <https://doi.org/10.1002/anie.202008132>
- Maponya T.C., Modibane K.D., Somo T.R. et al. // Sep. Purif. Technol. 2023. V. 307. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122767>
- Maponya T.C., Makgopa K., Somo T.R. et al. // Environ. Nanotechnol. Monit. Manag. 2023. V. 20. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100805>
- Mansoorianfar M., Nabipour H., Pahlevani F. et al. // Environ. Res. 2022. V. 214. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114113>
- Mahmoud M.E., Elsayed S.M., Mahmoud S.E.M.E. et al. // Polyhedron. 2022. V. 226. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116082>
- Liu K.-G., Bigdeli F., Sharifzadeh Z. et al. // J. Clean. Prod. 2023. V. 404. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136709>
- Zhou D.-D., Liu Q.-Y., Chen M. et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2023. V. 11. № 3. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109666>
- Norouzi F., Khavasi H.R. // New J. Chem. 2020. V. 44. № 21. P. 8937. <https://doi.org/10.1039/d0nj01149e>
- Zhang Y., Yuan S., Day G. et al. // Coord. Chem. Rev. 2018. V. 354. P. 28. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.06.007>
- Zhang H., Wang Z.-X., Luo Y.-H. et al. // Polyhedron. 2022. V. 224. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116016>
- Yousefi R., Asgari S., Banitalebi Dehkordi A. et al. // Environ. Res. 2023. V. 226. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115664>
- Zorina-Tikhonova E.N., Yambulatov D.S., Kiskin M.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 2. P. 75. <https://doi.org/10.1134/S1070328420020104>
- Kolokolov F.A., Kulyasov A.N., Magomadova M.A. et al. // Russ. J. Gen. Chem. 2016. V. 86. № 5. P. 1209. <https://doi.org/10.1134/S1070363216050418>
- Eliseeva A.A., Ivanov D.M., Novikov A.S. et al. // CrystEngComm 2019. V. 21. № 4. P. 616. <https://doi.org/10.1039/c8ce01851k>
- Eliseeva A.A., Ivanov D.M., Novikov A.S. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. № 2. P. 356. <https://doi.org/10.1039/c9dt04221k>
- Aliyarova I.S., Tupikina E.Y., Soldatova N.S. et al. // Inorg. Chem. 2022. V. 61. № 39. P. 15398. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.2c01858>
- Soldatova N.S., Suslonov V.V., Kissler T.Y. et al. // Crystals. 2020. V. 10. № 3. <https://doi.org/10.3390/cryst10030230>
- Soldatova N.S., Postnikov P.S., Suslonov V.V. et al. // Org. Chem. Front. 2020. V. 7. № 16. P. 2230. <https://doi.org/10.1039/d0qo00678e>
- Aliyarova I.S., Ivanov D.M., Soldatova N.S. et al. // Cryst. Growth Des. 2021. V. 21. № 2. P. 1136. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c01463>
- Kalaj M., Momeni M.R., Bentz K.C. et al. // Chem. Commun. 2019. V. 55. № 24. P. 3481. <https://doi.org/10.1039/C9CC00642G>
- Li B., Dong M.-M., Fan H.-T. et al. // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. № 12. P. 6325. <https://doi.org/10.1021/cg501073e>
- Novikov A.S., Sakhapov I.F., Zaguzin A.S. et al. // J. Struct. Chem. 2022. V. 63. № 11. P. 1880. <https://doi.org/10.1134/S002247662211018X>
- Lee D.A., Peloquin D.M., Yapi E.W. et al. // Polyhedron. 2017. V. 133. P. 358. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2017.05.040>
- Richard J., Joseph J., Wang C. et al. // J. Org. Chem. 2021. V. 86. № 4. P. 3356. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.0c02708>
- Aubert E., Abboud M., Doudouh A. et al. // RSC Adv. 2017. V. 7. № 12. P. 7358. <https://doi.org/10.1039/c6ra28197d>
- Abboud M., Mamane V., Aubert E. et al. // J. Org. Chem. 2010. V. 75. № 10. P. 3224. <https://doi.org/10.1021/jo100152e>
- Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>

38. *Sheldrick G.M.*, *IUCr* // *Acta Crystallogr. C*. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
39. *Bondi A.* // *J. Phys. Chem.* 1966. V. 70. № 9. P. 3006.
<https://doi.org/10.1021/j100881a503>
40. *Mantina M., Chamberlin A. C., Valero R. et al.* // *J. Phys. Chem. A*. 2009. V. 113. № 19. P. 5806.
<https://doi.org/10.1021/jp8111556>
41. *Gong Y., Zhang M. M., Zhang P. et al.* // *CrystEngComm* 2014. V. 16. № 42. P. 9882.
<https://doi.org/10.1039/c4ce01506a>
42. *Ju Z., Yan W., Gao X. et al.* // *Cryst. Growth Des.* 2016. V. 16. № 5. P. 2496.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.5b00681>