

КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

УДК 548.73:546.48:547-386

СИНТЕЗ И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КООРДИНАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ Cd(II) И ОКТАФТОРБИФЕНИЛ-4,4'-ДИКАРБОКСИЛАТА

© 2021 г. В. С. Гусаров^а, А. М. Чеплакова^б, Д. Г. Самсоненко^б, А. С. Виноградов^с, В. П. Федин^{б, *}

^аНовосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия

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

^сНовосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 9, Новосибирск, 630090 Россия

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

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 16.04.2021 г.

Принята к публикации 20.04.2021 г.

Изучено взаимодействие эквимольных количеств $\text{Cd}(\text{OH})_2$ и октафторбифенил-4,4'-дикарбоновой кислоты H_2oFBPDC при нагревании в метаноле при 40 и 70°C. Получены и охарактеризованы методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа два новых металл-органических координационных полимера: цепочечный $[\text{Cd}_3(\text{CH}_3\text{OH})_{10}(\text{oFBPDC})_3] \cdot 2\text{CH}_3\text{OH}$ и слоистый $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$. Показано, что повышение температуры синтеза приводит к образованию координационного полимера большей размерности, содержащего меньшее количество гостевых и координированных молекул растворителя.

Ключевые слова: комплексы кадмия, металл-органический координационный полимер, октафторбифенил-4,4'-дикарбоновая кислота, кристаллическая структура

DOI: 10.31857/S0044457X21090038

ВВЕДЕНИЕ

Интерес химиков к координационным соединениям с фторированными органическими лигандами вызван рядом свойств, возникающих из-за наличия атомов фтора. Атомы фтора — самого электроотрицательного элемента — способствуют перераспределению электронной плотности, приводящему к изменениям нековалентных внутри- [1] и межмолекулярных взаимодействий [2]. Использование фторированных производных позволяет получать люминесцирующие комплексы металлов с улучшенными фотофизическими характеристиками по сравнению с их нефторированными производными [3, 4]. Комплексы лантаноидов с тетрафтортерефталат-анионом также проявляют высокие характеристики фотолюминесценции [5–8]. Использование политопных органических лигандов позволяет получать координационные соединения полимерного строения, содержащие гостевые молекулы растворителя, удаление которых приводит к пористому материалу. Наличие атомов фтора в органическом лиганде может способствовать повышению стабильности пористого материала, увеличению его гидрофобности и адсорб-

ционной емкости по отношению к таким газам, как H_2 и CO_2 . Это показано на примере серии металл-органических координационных полимеров на основе никеля(II), 2,4,6-трис-(4-пиридил)-1,3,5-триазина и анионов фторзамещенной фталевой кислоты [9]. Другие примеры подробно рассмотрены в обзорах [10, 11]. Ожидается, что использование вместо тетрафтортерефталатного лиганда более “длинного”, линейного и геометрически жесткого лиганда октафторбифенил-4,4'-дикарбоксилата позволит получить перманентно пористые координационные полимеры с уникальными адсорбционными свойствами. Так, металл-органические координационные полимеры MOFF-1 и MOFF-2 на основе меди(II) и анионов октафторбифенил-4,4'-дикарбоновой кислоты oFBPDC^{2-} обладают перманентной пористостью и проявляют гидрофобные свойства [12]. Координационные возможности аниона oFBPDC^{2-} были также исследованы на примере реакции H_2oFBPDC и источника цинка(II) в различных растворителях [13–16]. Была получена серия комплексов различного строения, в том числе имеющих полимерное строение. Аналог MOFF-2 — $[\text{Zn}_2(\text{dabco})(\text{oFBPDC})_2]$ (dabco = 1,4-диазаби-

цикло[2.2.2]октан) — является перманентно пористым и проявляет селективность адсорбции в бинарных газовых смесях CO_2/N_2 , CO_2/CH_4 , бензол/циклогексан [13].

В настоящей работе нами предприняты попытки синтеза новых комплексов oFBPDC^{2-} с электронным аналогом цинка(II), а именно — кадмием(II). Нами получены и структурно исследованы монокристаллы двух новых металл-органических координационных полимеров, содержащих кадмий(II) и анионы oFBPDC^{2-} : цепочечный $[\text{Cd}_3(\text{CH}_3\text{OH})_{10}(\text{oFBPDC})_3] \cdot 2\text{CH}_3\text{OH}$ (I) и слоистый $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$ (II).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали коммерчески доступные реактивы и растворители без дополнительной очистки: тетрагидрат нитрата кадмия $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ “ч. д. а.”, гидроксид натрия “ч. д. а.”, метанол “х. ч.”. Октафторбифенил-4,4'-дикарбоновая кислота была синтезирована по опубликованной ранее методике [14]. Для получения координационных полимеров использовали свежеприготовленный гидроксид кадмия, который получали при добавлении 1.5 мл насыщенного раствора гидроксида натрия к раствору 1.3 г $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в минимальном количестве воды. Осадок тщательно промывали водой до нейтральной реакции промывных вод и высушивали в токе воздуха. ИК-спектры регистрировали в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ в таблетках KBr на фурье-спектрометре Scimitar FTS 2000. Порошковые дифрактограммы записывали на дифрактометре Shimadzu XRD 7000S (CoK_α -излучение, $\lambda = 1.78897\text{ \AA}$, CuK_α -излучение, $\lambda = 1.54178\text{ \AA}$, SSD-детектор FD1001) в диапазоне углов 2θ от 3° до 40° (шаг 0.0143°). Перед измерением образцы I и II наносили на кювету без дополнительного растирания.

Получение монокристаллов $[\text{Cd}_3(\text{CH}_3\text{OH})_{10}(\text{oFBPDC})_3] \cdot 2\text{CH}_3\text{OH}$ (I). В реакционный сосуд с завинчивающейся крышкой объемом 4.5 мл помещали 4 мг $\text{Cd}(\text{OH})_2$ (0.027 ммоль) и 10.5 мг октафторбифенил-4,4'-дикарбоновой кислоты (0.027 ммоль). Полученную смесь растворяли в 4.0 мл метанола и тщательно обрабатывали ультразвуком, после чего постепенно нагревали смесь при 40°C в течение 2 сут. При этом образовывались бесцветные кристаллы в форме тонких длинных прямоугольных пластинок. Состав и строение кристаллов I были определены методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа. ИК-спектр (KBr), ν , см^{-1} : 3624 (с.), 3530 (с., ш.), 2951 (сл.), 2840 (сл.), 1620 (с.), 1592 (с.), 1561 (с.), 1470 (с.), 1453 (с.), 1389 (с.), 1362 (с.), 1296 (сл.), 1264 (с.), 1087 (сл.), 1009 (с.), 977 (с.), 952 (с.),

834 (с.), 814 (сл.), 770 (с.), 720 (с.), 698 (с.), 659 (сл.), 511 (сл.), 449 (сл.), 405 (с.).

Получение монокристаллов $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$ (II). В реакционный сосуд с завинчивающейся крышкой объемом 4.5 мл помещали 4 мг $\text{Cd}(\text{OH})_2$ (0.027 ммоль) и 10.5 мг октафторбифенил-4,4'-дикарбоновой кислоты (0.027 ммоль). Полученную смесь растворяли в 1.5 мл метанола и обрабатывали ультразвуком до полного растворения, после чего смесь выдерживали при температуре 70°C в течение 2 сут. При этом образовывались бесцветные кристаллы II в форме крупных многоугольных призм. Состав и строение полученных кристаллов были определены методом монокристалльного рентгеноструктурного анализа. ИК-спектр (KBr), ν , см^{-1} : 3493 (с., ш.), 2965 (сл.), 1618 (с.), 1591 (с.), 1559 (с.), 1470 (с.), 1453 (с.), 1388 (с.), 1361 (с.), 1296 (сл.), 1262 (сл.), 1006 (с.), 977 (с.), 953 (с.), 835 (с.), 815 (сл.), 786 (с.), 772 (с.), 723 (с.), 697 (с.), 663 (сл.), 506 (сл.), 451 (сл.), 404 (с.).

Рентгеноструктурный эксперимент. Дифракционные данные для монокристаллов соединений I и II получены при 150 K на автоматическом дифрактометре Agilent Xcalibur, оснащенном двухкоординатным детектором AtlasS2 (графитовый монохроматор, $\lambda(\text{MoK}_\alpha) = 0.71073\text{ \AA}$, ω -сканирование с шагом 0.25°). Интегрирование, учет поглощения, определение параметров элементарной ячейки проводили с использованием пакета программ CrysAlisPro [17]. Структура расшифрована с использованием программы SHELXT [18] и уточнена полноматричным МНК в анизотропном приближении (за исключением атомов водорода) с использованием программы SHELXL [19]. Позиции атомов водорода рассчитаны геометрически и уточнены 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 Кембриджском банке структурных данных (CCDC 2072368, 2072369; <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Условия синтеза металл-органических координационных полимеров (МОКП) с перфторированными карбоксилатами, в том числе с октафторбифенил-4,4'-дикарбоксилат-анионом, суммированы в нашем обзоре [20]. Наиболее часто используемым растворителем для синтеза МОКП с фторированными карбоксилатными лигандами являются спирты, в частности, метанол. С другой стороны, весьма эффективным для синтеза комплексов оказалось использование гидроксидов металлов [13, 14, 21] из-за более высокой кислотности перфторированных кислот по

Таблица 1. Кристаллографические параметры и детали дифракционного эксперимента для монокристаллов I и II

Параметр	I	II
Брутто-формула	$C_{54}H_{48}Cd_3F_{24}O_{24}$	$C_{17}H_{12}CdF_8O_7$
M , г/моль	1874.12	592.67
Сингония	Моноклинная	Моноклинная
Пр. гр.	$P2_1/c$	$I2/a$
a , Å	13.8415(7)	27.0010(10)
b , Å	15.8016(5)	7.7687(3)
c , Å	30.2850(13)	20.5627(8)
β , град	94.517(4)	101.736(4)
V , Å ³	6603.3(5)	4223.1(3)
Z	4	8
$\rho_{\text{выч}}$, г/см ³	1.885	1.864
μ , мм ⁻¹	1.103	1.141
$F(000)$	3696	2320
Размер кристалла, мм	$0.32 \times 0.23 \times 0.04$	$0.38 \times 0.28 \times 0.19$
Область сканирования по θ , град	1.920–28.523	2.023–29.068
Диапазон индексов hkl	$-17 < h < 16$, $-20 < k < 15$, $-37 < l < 40$	$-28 < h < 34$, $-8 < k < 10$, $-25 < l < 18$
N_{hkl} измеренных/независимых	30 425/14407	11 107/4711
R_{int}	0.0288	0.0135
N_{hkl} с $I > 2\sigma(I)$	11089	4348
Добротность по F^2	0.998	1.041
R -факторы [$I > 2\sigma(I)$]	$R_1 = 0.0397$, $wR_2 = 0.0929$	$R_1 = 0.0208$, $wR_2 = 0.0500$
R -факторы (по всем отражениям)	$R_1 = 0.0588$, $wR_2 = 0.0994$	$R_1 = 0.0234$, $wR_2 = 0.0510$
Остаточная электронная плотность (max/min), е/Å ³	2.435/–1.050	0.587/–0.417

сравнению с нефторированными производными. В связи с этими двумя обстоятельствами для получения новых МОКП кадмия(II) мы проводили реакции между его гидроксидом и перфторированной кислотой H_2OFPDC в метаноле при различных режимах нагревания.

Монокристаллы металл-органического координационного полимера $[Cd_3(CH_3OH)_{10}(oFBPDC)_3] \cdot 2CH_3OH$ (I) были получены при выдерживании эквимольной смеси $Cd(OH)_2$ и H_2OFPDC в метаноле при 40°C в течение 2 сут. По данным рентгеноструктурного анализа монокристаллов, МОКП I имеет цепочечное строение. В его кристаллической структуре присутствуют три независимых катиона $Cd(II)$, находящихся в искаженном октаэдрическом окружении, и три аниона $oFBPDC^{2-}$. Катионы $Cd1$ и $Cd2$ координируют три атома О трех молекул метанола и три атома О карбоксилатных групп. Катион $Cd3$ окружен четырьмя атомами О четырех молекул метанола и

двумя атомами О карбоксилатных групп. Расстояния $Cd-OCO$ составляют 2.223(2)–2.332(2) Å, $Cd-O(H)CH_3$ 2.279(3)–2.337(3) Å, валентные углы $OCdO$ лежат в диапазоне 76.43(8)°–102.56(8)°. Катионы $Cd1$, $Cd2$ и $Cd3$ объединены двумя мостиковыми карбоксилатными группами, формируя трехъядерный фрагмент (рис. 1). Каждый анион $oFBPDC^{2-}$ выступает как мостиковый лиганд, связывая два или три катиона кадмия в соседних трехъядерных фрагментах. Один из трех дикарбоксилат-анионов связывает два катиона $Cd1$ за счет монодентатной координации карбоксилатных групп. Остальные два дикарбоксилат-аниона соединяют по три катиона кадмия за счет того, что одна карбоксилатная группа координирована монодентатно, а вторая – по мостиковому типу. Такое связывание формирует тройные цепи (“ленты”), причем все катионы $Cd1$ располагаются на одной стороне этой ленты (рис. 1). Ленты укладываются вдоль кристаллографической оси b ,

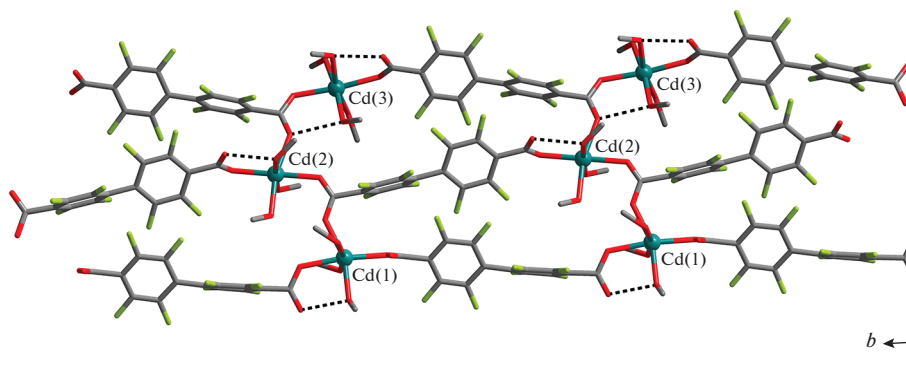


Рис. 1. Координационное окружение катионов Cd(II) в структуре I. Расстояния O...O, соответствующие водородным связям внутри “ленты”, показаны пунктирными линиями. Атомы водорода не показаны. Здесь и на следующих рисунках атомы кадмия изображены в виде шаров сине-зеленого цвета, атомы углерода показаны серым, кислорода — красным, фтора — зеленым цветом.

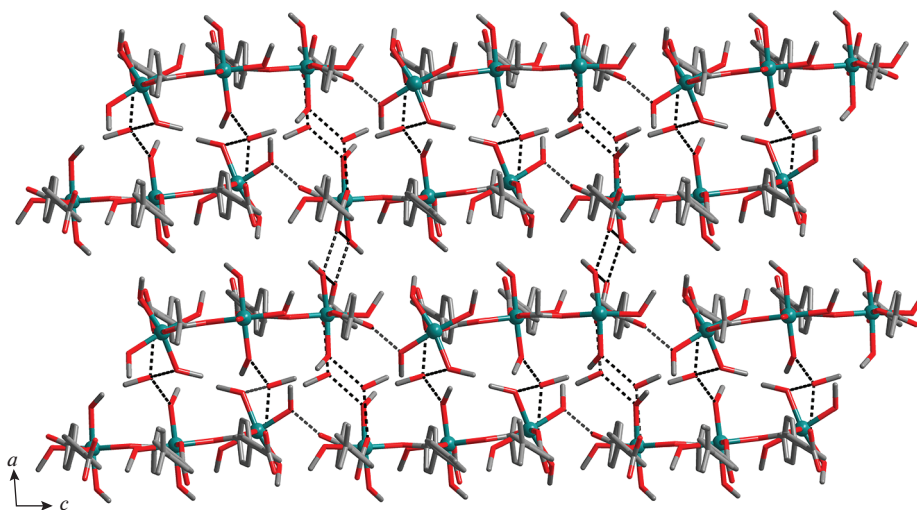


Рис. 2. Фрагмент упаковки полимерных цепей в структуре I (вид вдоль оси *b*). Водородные связи с участием сольватных молекул метанола, а также водородные связи, отвечающие за связывание полимерных цепей с образованием супрамолекулярного слоя, показаны пунктирной линией. Атомы фтора и водорода не показаны.

упаковываясь в слои, параллельные плоскости *bc*, между которыми располагаются сольватные молекулы метанола. Сольватные молекулы метанола удерживаются за счет водородных связей с атомами кислорода координированных молекул метанола и анионов oFBPDC^{2-} (рис. 2). Водородные связи наблюдаются также между атомами O координированного метанола и некоординированным атомом O аниона oFBPDC^{2-} как внутри одной ленты (рис. 1), так и между двумя соседними лентами, причем последние отвечают за формирование супрамолекулярного слоя (рис. 2). Расстояния O...O составляют 2.647–3.027 Å.

Монокристаллы металл-органического координационного полимера II были получены нагреванием эквимольной смеси $\text{Cd}(\text{OH})_2$ и H_2oFBPDC в метаноле при 70°C в течение 2 сут.

В отличие от МОКП I, этот координационный полимер имеет слоистое строение (состав $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$) и не содержит сольватные молекулы растворителя. В его кристаллической структуре содержатся катионы кадмия только одного типа. Каждый катион Cd(II) находится в искаженном октаэдрическом окружении из трех атомов кислорода карбоксилатных групп и трех атомов O координированных молекул метанола. Расстояния Cd—OCO составляют 2.2582(12)–2.3014(13) Å, Cd—O(H)CH₃ 2.2692(14)–2.3247(14) Å, валентные углы OCdO лежат в диапазоне 84.63(5)°–108.43(5)°. Все лиганды oFBPDC^{2-} являются мостиковыми, в которых одна карбоксилатная группа связана монодентатно, а другая — по мостиковому типу, связывая два катиона Cd(II). Сочетание такого способа связывания

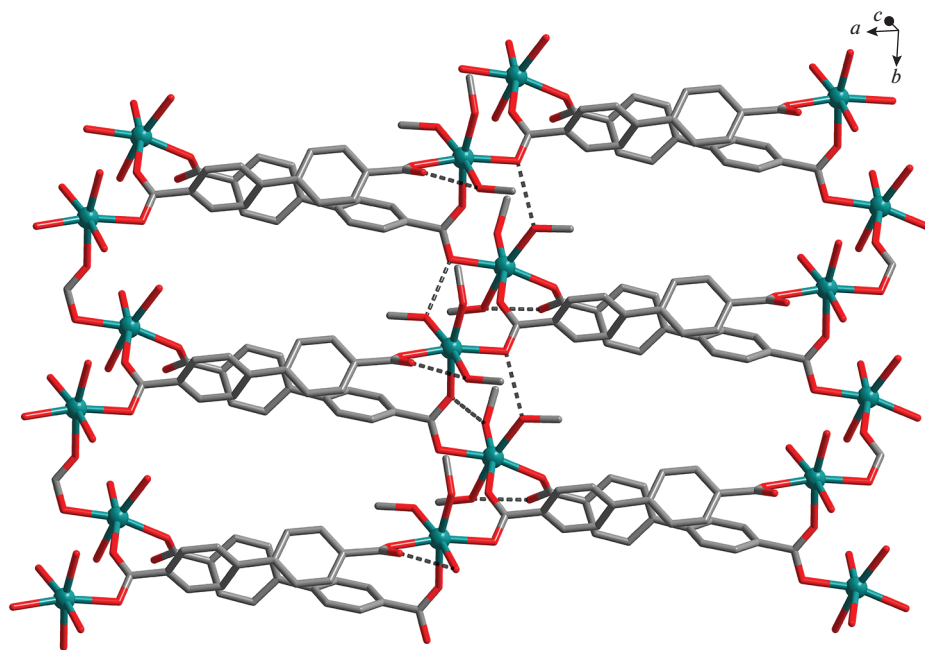


Рис. 3. Координационное окружение катионов Cd(II) в структуре II. Расстояния O...O, соответствующие водородным связям внутри полимерного слоя, показаны пунктирными линиями. Атомы водорода и фтора не показаны.

оFBPDC²⁻ и искаженного октаэдрического координационного окружения металла приводит к образованию полимерного слоя (рис. 3). Этот слой также можно представить как бесконечные кадмий-карбоксилатные цепи, которые соединены перфторированными бифенильными фрагментами. Внутри полимерного слоя наблюдаются водородные связи двух типов: между атомом O координированного метанола и координированным и свободным атомом O карбоксилатной группы лиганда оFBPDC²⁻ с расстояниями O...O 2.824 и 2.661 Å соответственно (рис. 3). Слои чередуются вдоль направления [10–1], образуя четырехслойную упаковку. Соседние слои связываются друг с другом посредством водородных связей между атомами O координированных молекул метанола и некоординированных атомов O лигандов оFBPDC²⁻, принадлежащих соседним слоям (рис. 4). Расстояние O...O составляет 2.680 Å. В кристаллической упаковке II отсутствуют сольватные молекулы метанола.

Интересно отметить, что соединение II является полным структурным аналогом ранее описанного цинкового комплекса [Zn(CH₃OH)₃(оFBPDC)] [13], который получали при взаимодействии свежеосажденного гидроксида цинка с H₂оFBPDC в метаноле в диапазоне температур 40–60°C, в то время как для I цинковый аналог не получен. Варьирование условий синтеза, а именно количества растворителя и/или температуры синтеза, приводит к получению смеси МОКП I и II, о чем можно судить по характерной форме образу-

ющихся кристаллов. Слоистый координационный полимер II в чистом виде образуется при более высокой температуре и меньшем количестве растворителя, чем цепочечный координационный полимер I. Подобное влияние температуры синтеза уже описано в литературе, в том числе на примере синтеза МОКП на основе кобальта(II) и анионов янтарной кислоты [22, 23], кадмия(II) и терефталат-анионов [24], магния(II) и 2,2'-бифенил-5,5'-дикарбоксилат-анионов [25]. Предполагается, что уменьшение координированных и сольватных молекул растворителя при повышении температуры реакции и, как следствие, увеличение размерности координационного полимера обусловлены увеличением энтропии при переходе молекул растворителя из связанного состояния в раствор.

МОКП I и II были охарактеризованы с помощью ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах комплексов содержатся характеристичные полосы. Широкая полоса в области 3600–3500 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям O–H-групп координированных и сольватных молекул метанола в составе МОКП. В спектрах обоих соединений присутствуют полосы асимметричных и симметричных валентных колебаний карбоксилатной группы (~1620–1362 см⁻¹). Интенсивная полоса около ~1000 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям связей C–F в составе мостикового лиганда оFBPDC²⁻.

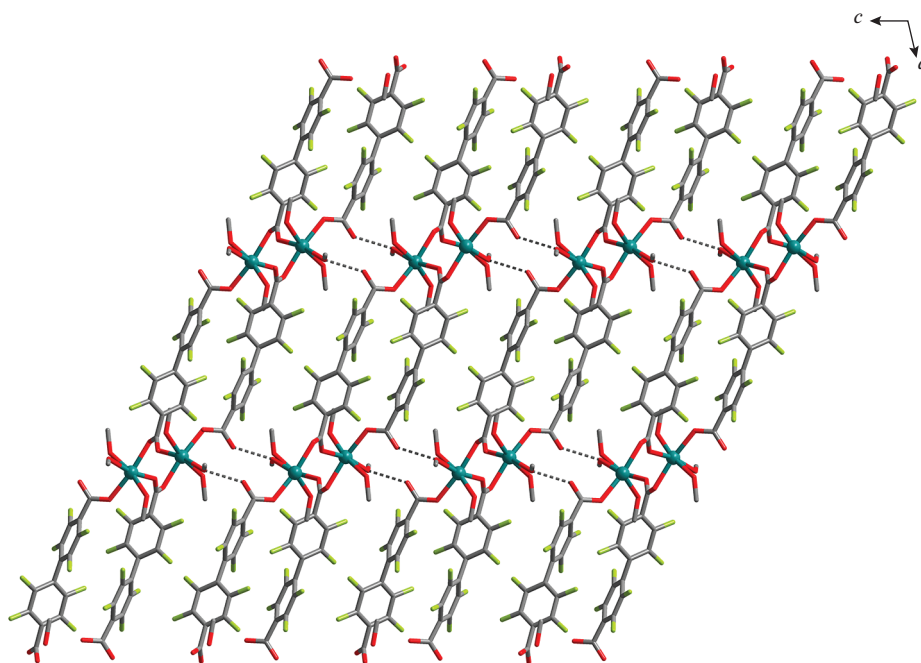


Рис. 4. Фрагмент упаковки полимерных слоев в структуре II (вид вдоль оси *b*). Водородные связи между атомами кислорода соседних полимерных слоев показаны пунктирной линией. Атомы водорода не показаны.

Важно отметить, что как и в случае описанного ранее МОКП $[\text{Zn}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$ [13], кристаллы I и II при извлечении из маточного раствора нестабильны и претерпевают быстрые изменения. Визуально кристаллы I (тонкие длинные прямоугольные пластинки) и II (крупные многоугольные призмы) на воздухе трескаются, становятся мутными и непрозрачными. Экспериментальные порошковые дифрактограммы доказывают быструю аморфизацию кристаллических образцов I и II в отсутствие маточного раствора. Причиной таких изменений может быть быстрая потеря координированных и сольватных молекул метанола.

Таким образом, в настоящей работе изучено взаимодействие эквимольных количеств $\text{Cd}(\text{OH})_2$ и H_2oFBPDC в метаноле при 40 и 70°C. При выдерживании реакционной смеси при 40°C образуются монокристаллы цепочечного координационного полимера $[\text{Cd}_3(\text{CH}_3\text{OH})_{10}(\text{oFBPDC})_3] \cdot 2\text{CH}_3\text{OH}$, а в случае выдерживания более концентрированной смеси при 70°C образуются монокристаллы слоистого координационного полимера $[\text{Cd}(\text{CH}_3\text{OH})_3(\text{oFBPDC})]$, не содержащего сольватных молекул метанола. Как правило, потенциально пористый МОКП является двух- или трехмерными и содержит большое количество гостевых молекул растворителя. На примере настоящего исследования показано, что повышение температуры синтеза влияет на размерность координационного полимера и количество госте-

вых молекул растворителя противоположным образом. Найденные условия синтеза МОКП I и II будут учтены при последующем поиске оптимальных условий синтеза проявляющих перманентную пористость МОКП на основе перфторированных ди(поли)карбоксилатных лигандов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 20-43-540004.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponce-de-León J., Infante R., Pérez-Iglesias M. et al. // Inorg. Chem. 2020. V. 59. № 22. P. 16599. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c02513>
2. Pilia L., Shuku Y., Dalgleish S. et al. // J. Organomet. Chem. 2020. V. 918. P. 121277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121277>
3. Zheng Y., Lin J., Liang Y. et al. // J. Mater. Chem. 2001. V. 11. № 10. P. 2615. <https://doi.org/10.1039/B100558H>
4. Mikhailov M.A., Brylev K.A., Abramov P.A. et al. // Inorg. Chem. 2016. V. 55. № 17. P. 8437. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b01042>

5. *Chen B., Yang Y., Zapata F. et al.* // Inorg. Chem. 2006. V. 45. № 22. P. 8882.
<https://doi.org/10.1021/ic060568u>
6. *Sobieray M., Gode J., Seidel C. et al.* // Dalton Trans. 2015. V. 44. № 13. P. 6249.
<https://doi.org/10.1039/C4DT03733B>
7. *Han Y., Yan P., Sun J. et al.* // Dalton Trans. 2017. V. 46. P. 4642.
<https://doi.org/10.1039/c7dt00215g>
8. *Smith J.A., Singh-Wilmot M.A., Carter K.P. et al.* // New J. Chem. 2020. V. 44. № 28. P. 12317.
<https://doi.org/10.1039/D0NJ02604B>
9. *Zhang D.-S., Chang Z., Li Y.-F. et al.* // Sci. Rep. 2013. V. 3. P. 3312.
<https://doi.org/10.1038/srep03312>
10. *Pachfule P., Banerjee R.* // Metal-organic frameworks: fluorinated frameworks, in: Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry, John Wiley & Sons Ltd., 2014. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2199>
11. *Noro S., Nakamura T.* // Npg Asia Mater. 2017. V. 9. P. E433.
<https://doi.org/10.1038/am.2017.165>
12. *Chen T.-H., Popov I., Zenasni O. et al.* // Chem. Commun. 2013. V. 49. № 61. P. 6846.
<https://doi.org/10.1039/c3cc41564c>
13. *Cheplakova A.M., Kovalenko K.A., Samsonenko D.G. et al.* // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 3283.
<https://doi.org/10.1039/C7DT04566B>
14. *Cheplakova A.M., Kovalenko K.A., Samsonenko D.G. et al.* // CrystEngComm. 2019. V. 21. № 15. P. 2524.
<https://doi.org/10.1039/C9CE00073A>
15. *Cheplakova A.M., Samsonenko D.G., Fedin V.P.* // J. Struct. Chem. 2019. V. 60. № 12. P. 1965.
<https://doi.org/10.1134/S0022476619120126> [Чеплакова А.М., Самсоненко Д.Г., Федин В.П. // Журн. структур. химии. 2019. Т. 60. № 12. С. 2050.]
<https://doi.org/10.1134/S0022476619120126>
16. *Larionov S.V., Rakhmanova M.I., Glinskaya L.A. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2019. V. 89. № 2. P. 261. [Ларионов С.В., Рахманова М.И., Глинская Л.А. и др. // Журн. общ. химии. 2019. Т. 89. № 2. С. 265.]
<https://doi.org/10.1134/S0044460X1902015X>
<https://doi.org/10.1134/S1070363219020154>
17. CrysAlisPro 1.171.40.84a. Rigaku Oxford Diffraction, Wrocław, Poland, 2020.
18. *Sheldrick G.* // Acta Crystallogr., Sect. A. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>
19. *Sheldrick G.* // Acta Crystallogr., Sect. C. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
20. *Cheplakova A.M., Samsonenko D.G., Fedin V.P.* // Pure Appl. Chem. 2020. V. 92. № 7. P. 1081.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1515/pac-2019-1210>
21. *Larionov S.V., Myachina L.I., Sheludyakova L.A. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2015. V. 85. № 7. P. 1617. [Ларионов С.В., Мячина Л.И., Шелудякова Л.А. и др. // Журн. общ. химии. 2015. Т. 85. № 7. С. 1092.]
<https://doi.org/10.1134/S1070363215070075>
22. *Forster P.M., Burbank A.R., Livage C. et al.* // Chem. Commun. 2004. № 4. P. 368.
<https://doi.org/10.1039/B311156C>
23. *Forster P.M., Stock N., Cheetham A.K.* // Angew. Chem. Int. Ed. 2005. V. 44. № 46. P. 7608.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.200501766>
24. *Burrows A.D., Cassar K., Düren T. et al.* // Dalton Trans. 2008. № 18. P. 2465.
<https://doi.org/10.1039/B718947H>
25. *Dubskikh V.A., Lysova A.A., Samsonenko D.G. et al.* // CrystEngComm. 2020. V. 22. № 38. P. 6295.
<https://doi.org/10.1039/D0CE01045F>