

Авторы поздравляют
проф. В.П. Федина с 70-летием

УДК 548.3:(546.47/.49)

3,6-ДИПИРИДИЛ-1,2,4,5-ТЕТРАЗИН В СИНТЕЗЕ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КООРДИНАЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ ЦИНКА И КАДМИЯ С ЛИГАНДАМИ АНИЛАТНОГО ТИПА

© 2024 г. О. Ю. Трофимова^{1,*}, Д. С. Колеватов¹, Н. О. Дружков¹, А. В. Малеева¹,
И. А. Якушев², П. В. Дороватовский³, А. В. Пискунов¹

¹Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород, Россия

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

³Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*e-mail: olesya@iomc.ras.ru

Поступила в редакцию 06.03.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 06.06.2024 г.

Методом двуступенчатого синтеза получены новые гетеролептические металл-органические координационные полимеры (МОКП) цинка (3D-МОКП) и кадмия (2D-МОКП) состава: $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II), где pQ — дианион 2,5-дигидрокси-3,6-ди-*трет*-бутил-пара-бензохинона, DPT — 3,6-ди(пиридин-4-ил)-1,2,4,5-тетразин, DMF — N,N-диметилформамид. Структура соединений изучена методом РСА (CCDC № 2332754 (I), 2332755 (II)). Термическая стабильность МОКП изучена термогравиметрическим анализом.

Ключевые слова: анилатный лиганд, металл-органические координационные полимеры, редокс-активный лиганд, рентгеноструктурный анализ, термогравиметрический анализ

DOI: 10.31857/S0132344X24090023, **EDN:** LXRVWE

Металл-органические координационные полимеры являются объектами интенсивного изучения в последние несколько десятилетий (МОКП) [1–4]. С каждым годом количество полученных МОКП увеличивается на десятки тысяч. Высокий интерес к данной тематике обусловлен перспективами широкого применения МОКП в качестве различного рода функциональных материалов [5–9]. В частности, сами координационные полимеры и композиты на их основе могут быть использованы в качестве различного рода сорбентов [6, 10–13], гетерогенных катализаторов и фотокатализаторов [13–16], электрохимических или фотофизических сенсоров [7, 17–19], люминесцентных [20–23], электропроводных [24–26] и магнитных материалов [4, 27–31]. Природа ионов металлов и органических лигандов, участвующих в построении координационных полимеров, оказывает непосредственное влияние на структуру, топологию и свойства получаемых производных. В связи

с этим перспективным направлением развития химии МОКП является создание и изучение свойств соединений, содержащих два и более лигандов различных типов в составе одного производного.

Редокс-активные координационные полимеры вынесены в отдельный подкласс МОКП [24, 32]. Одними из популярных лигандов, применяемых для создания редокс-активных систем, являются лиганды анилатного типа — производные 2,5-дигидрокси-*пара*-бензохинона с различными заместителями в положениях 3 и 6 хинонового фрагмента [3, 33, 34]. Применение 2,5-дигидрокси-3,6-ди-*трет*-бутил-*пара*-бензохинона (H_2pQ) (схема 1) для построения координационных полимеров началось несколько лет назад [35–40], ранее на его основе были получены мооядерные производные трифенилсурьмы(V) [41] и биядерные комплексы олова, никеля, железа и кобальта [42–44]. Отличитель-

ной особенностью этого лиганда является наличие стерически затрудненной алкильной группы в положениях 3 и 6 кольца, что позволяет не только получать каркасные соединения новых топологий, но и стабилизировать продукты его окислительно-восстановительных превращений [45]. В качестве дополнительного N-донорного органического линкера в синтезе гетеролептических МОКП цинка и кадмия в настоящей работе был выбран 3,6-ди(пиридин-4-ил)-1,2,4,5-тетразин (DPT) (схема 1).

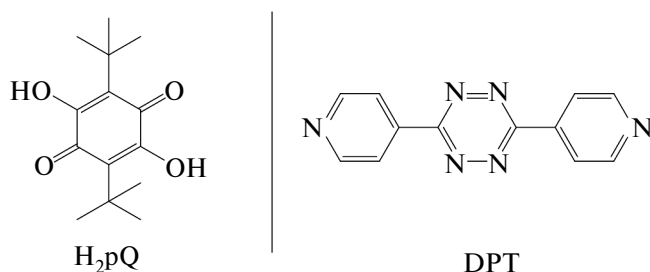


Схема 1. Органические лиганды, использованные для синтеза МОКП цинка и кадмия.

3,6-Ди(пиридин-4-ил)-1,2,4,5-тетразин является популярным редокс-активным лигандом в синтезе МОКП цинка и кадмия. На его основе получены как гомолептические координационные полимеры [46, 47], так и гетеролептические производные [48, 49], содержащие различные дикарбоксилатные линкеры в составе мономерного звена. Смешаннолигандные производные цинка и кадмия демонстрируют отличные сорбционные [50–55] и люминисцентные [56, 57] свойства, определяемые наличием в их составе DPT. Так, в работе [58] показано увеличение сорбционных свойств каркасного МОКП цинка на основе редокс-активного DPT и 2,6-нафталиндикарбоновой кислоты при его восстановлении нафтаденидами щелочных металлов. Отметим, что на данный момент в литературе нет данных по синтезу и изучению свойств гетеролептических МОКП, включающих в состав звена одновременно лиганды тетразинового и анилатного типов.

В настоящей работе сообщается о синтезе и изучении структурных особенностей новых гетеролептических металл-органических координационных полимеров цинка и кадмия на основе анилатных лигандов и 3,6-ди(пиридин-4-ил)-1,2,4,5-тетразина. Получены и охарактеризованы производные состава: $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II), где pQ — дианион 2,5-ди-

гидрокси-3,6-ди-*трет*-бутил-*пара*-бензохинона, DPT — 3,6-дипиридил-1,2,4,5-тетразин, DMF — N,N-диметилформамид.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК-спектры регистрировали на ИК Фурье-спектрометре ФСМ-1201 (суспензии в вазелиновом масле; кюветы KBr). Элементный анализ выполняли на приборе Elementar Vario El cube. Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре Tongda TD-3700. Исследование методом термогравиметрического анализа соединений проводили на приборе Mettler Toledo TGA/DSC3+ при температуре 30–700°C в атмосфере азота (тигель из поликристаллической окиси алюминия), скорость нагрева — 5°C/мин. В работе применяли коммерческие реактивы: DMF, MeOH, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. 2,5-Ди-гидрокси-3,6-ди-*трет*-бутил-*пара*-бензохинон (H_2pQ) синтезировали согласно известной методике [42]. Лиганд DPT получали по методике, описанной в работе [59].

Синтез $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II)

$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.0119 г, 0.04 ммоль) или $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.0123 г, 0.04 ммоль) приводили во взаимодействие с 3,6-дипиридил-1,2,4,5-тетразином (0.0095 г, 0.04 ммоль) при 60°C в 3 мл метанола при постоянном перемешивании. Далее к реакционной смеси добавляли раствор H_2pQ (0.0101 г, 0.04 ммоль) в 3 мл DMF и нагревали в стеклянной вials при 50°C в течение 3 сут. Полученные ярко окрашенные розовые кристаллы $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II) собирали на фильтре Шотта, промывали 2 мл DMF и сушили на воздухе. Структура полученных МОКП исследована методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Фазовая чистота производных подтверждена данными элементного анализа и рентгенофазового анализа. Согласно данным РСА, в порах соединений I и II содержится "гостевой" растворитель, который не покидает поры при высушивании образцов на воздухе.

Выход I 58%; выход II 61%.

Найдено, %: C 55.52; H 5.63; N 15.40;

Для $\text{C}_{32}\text{H}_{40}\text{N}_8\text{O}_6\text{Zn}$ (I)

вычислено, %: C 55.06; H 5.78; N 16.05.

ИК-спектр (ν , cm^{-1}): 1682 с, 1609 с, 1468 с, 1433 с, 1385 с, 1337 с, 1217 с, 1202 с, 1177 с,

1088 ср, 1057 ср, 1018 ср, 991 сл, 972 с, 916 ср, 906 ср, 839 с, 804 сл, 791 сл, 659 с, 607 с, 519 с.

Найдено, %: С 45.90; Н 4.38; N 20.21.
Для C₅₈H₆₄N₂₂O₁₆Cd₂
вычислено, %: С 45.89; Н 4.25; N 20.30.

ИК-спектр (ν, см⁻¹): 3450 ср. широкая, 1678 с, 1607 с, 1491 с, 1412 с, 1347 с, 1323 с, 1289 с, 1265 ср, 1223 ср, 1209 ср, 1117 ср, 1090 ср, 1057 с, 1032 ср, 1015 ср, 920 с, 906 ср, 887 сл, 864 сл, 845 с, 818 ср, 808 сл, 793 сл, 661 ср, 605 с, 549 сл, 505 сл, 491 сл.

РСА. МОКП I и II проведен на рентгеновском пучке станции "Белок" [60] Курчатовского центра синхротронного излучения в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт" (Москва, Россия) при 100 К (λ = 0.74500 Å). Первичное определение параметров элементарной ячейки, их уточнение, интегрирование интенсивностей экспериментальных отражений и учет поправки на поглощение выполнены с использованием программного комплекса XDS [61].

Структуры решены прямыми методами [62] и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов по *F*² [63] в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. В уточнении разупорядоченной *трет*-бутильной группы в структуре I использованы ограничения на геометрические (SADI) и тепловые смещения атомов углерода (RIGU, SIMU), а в структуре II для моделирования разупорядочения атомов углерода молекул кристаллизационного DMF также использовано ограничение на изменение тепловых параметров (EADP). Атомы водорода помещены в расчетные положения и уточнены в изотропном приближении в модели "наездника" с *U*_{изо}(H) = 1.5*U*_{экви}(C) для атомов водорода метильных групп и *U*_{изо}(H) = 1.2*U*_{экви}(C) для остальных атомов водорода. Расчеты выполнены в среде визуализации и обработки структурных данных OLEX2 [64]. Кристаллографические данные, параметры рентгеноструктурных экспериментов и уточнения структур приведены в табл. 1, значения избранных длин связей DMF — в табл. 2.

Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры рентгеноструктурного эксперимента и уточнения структур I–II

Параметр	Значение	
	I	II
Брутто формула	C ₃₂ H ₄₀ N ₈ O ₆ Zn	C ₂₉ H ₃₂ N ₁₁ O ₇ Cd
Размеры кристалла, мм	0.340 × 0.120 × 0.090	0.120 × 0.060 × 0.030
Кристаллическая система	Моноклинная	Триклинная
Пр. группа	<i>P</i> 2 ₁ /с	<i>P</i> $\bar{1}$
<i>a</i> , Å	10.4424(12)	11.4169(13)
<i>b</i> , Å	23.2270(17)	12.3656(7)
<i>c</i> , Å	13.9828(13)	13.318(2)
α , град	90	104.989(5)
β , град	94.218(7)	110.630(14)
γ , град	90	107.299(5)
<i>V</i> , Å ³	3382.3(6)	1534.8(3)
<i>Z</i>	4	2
ρ (выч.), г/см ³	1.371	0.876
μ , мм ⁻¹	0.879	1.642
$\theta_{\min}$ – $\theta_{\max}$, град	1.785–31.079	1.979–1.106
Число наблюдаемых отражений	34320	32467
Число независимых отражений (<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>))	9402	8463
<i>R</i> _{int}	0.0458	0.0277
<i>S</i> (<i>F</i> ²)	1.039	1.052
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (<i>F</i> ² > 2σ(<i>F</i> ²))	0.0486/0.1237	0.0468/0.1273
<i>R</i> ₁ / <i>wR</i> ₂ (по всем отражениям)	0.0849/0.1420	0.0523/0.1323
$\Delta\rho_{\max}$ / $\Delta\rho_{\min}$, е/Å ³	0.688/–1.002	1.037/–1.790

Таблица 2. Избранные длины связей (Å) в комплексах I–II*

Связь	d , Å	Связь	d , Å
I		II	
Zn(1)-O(1)	2.0464(16)	Cd(1)-O(1)	2.397(2)
Zn(1)-O(3)	2.0491(16)	Cd(1)-O(3)	2.608(3)
Zn(1)-O(2A)	2.0747(15)	Cd(1)-O(4)	2.289(2)
Zn(1)-O(4B)	2.0946(15)	Cd(1)-O(5A)	2.289(2)
Zn(1)-N(1)	2.1478(18)	Cd(1)-N(2)	2.317(3)
Zn(1)-N(6C)	2.169(2)	Cd(1)-N(7B)	2.337(3)
O(1)-C(1)	1.269(3)	Cd(1)-N(8)	2.472(3)
O(2A)-C(3A)	1.253(3)	O(4)-C(1)	1.258(3)
O(3)-C(8)	1.266(3)	O(5A)-C(3A)	1.271(3)
O(4B)-C(10B)	1.256(3)	C(1)-C(2)	1.413(4)
C(1)-C(2)	1.387(3)	C(1)-C(3A)	1.544(4)
C(1)-C(3A)	1.556(3)	C(2)-C(3)	1.402(4)
C(2)-C(3)	1.411(3)		
C(8)-C(9)	1.389(3)		
C(8)-C(10B)	1.553(3)		
C(9)-C(10)	1.408(3)		

*Преобразования симметрии, используемые для создания эквивалентных атомов:

(A) $-x + 2, -y + 1, -z$; (B) $-x + 2, -y + 1, -z + 1$; (C) $x + 1, -y + 3/2, z - 1/2$ (I).

(A) $-x, -y + 1, -z + 2$; (B) $x, y + 1, z + 1$ (II).

Структуры зарегистрированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2332754 (I), 2332755 (II) и доступны по адресу: ccdc.cam.ac.uk/structures).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом двуступенчатого термального синтеза получены два новых гетеролептических металл-органических координационных полимера цинка и кадмия состава: $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II) (схема 2). На первой стадии синтеза в среде метанола происходит координация нейтральных N-донорных лигандов на ион металла. Далее в реакционную смесь вводится растворенный в среде DMF анилатный лиганд H_2pQ . Нагревание полученной реакционной смеси в стеклянной виае проводили при 50°C в течение 3 суток.

Гетеролептические производные цинка и кадмия выделены из реакционной смеси в виде ярко-розовых кристаллов. Структура полученных соединений определена методом РСА монокри-

сталлических образцов. Фазовая чистота подтверждена данными элементного и рентгенофазового анализов.

МОКП I и II, полученные по одинаковой методике, существенно различаются как по составу, так и по топологии построения МОКП. Если в случае производного цинка происходит полное замещение нитрат-ионов дианионами ди-гидрокси-*пара*-хинона, то при образовании координационного полимера кадмия вытесняется лишь один из двух неорганических анионов. Молекулярное строение звеньев МОКП I и II представлено на рис. 1 и 2. Согласно данным РСА-анализа, соединение I кристаллизуется в моноклинной группе симметрии $P2_1/c$ и является каркасным производным с топологией решетки — dia. МОКП II кристаллизуется в триклинной группе симметрии $P\bar{1}$ и представляет собой сетчатый полимер с топологией сети — sql. Анализ топологии полученных МОКП произведен с использованием программного обеспечения (www.topcryst.com), разработанного группой под руководством В.А. Блатова [65–67].

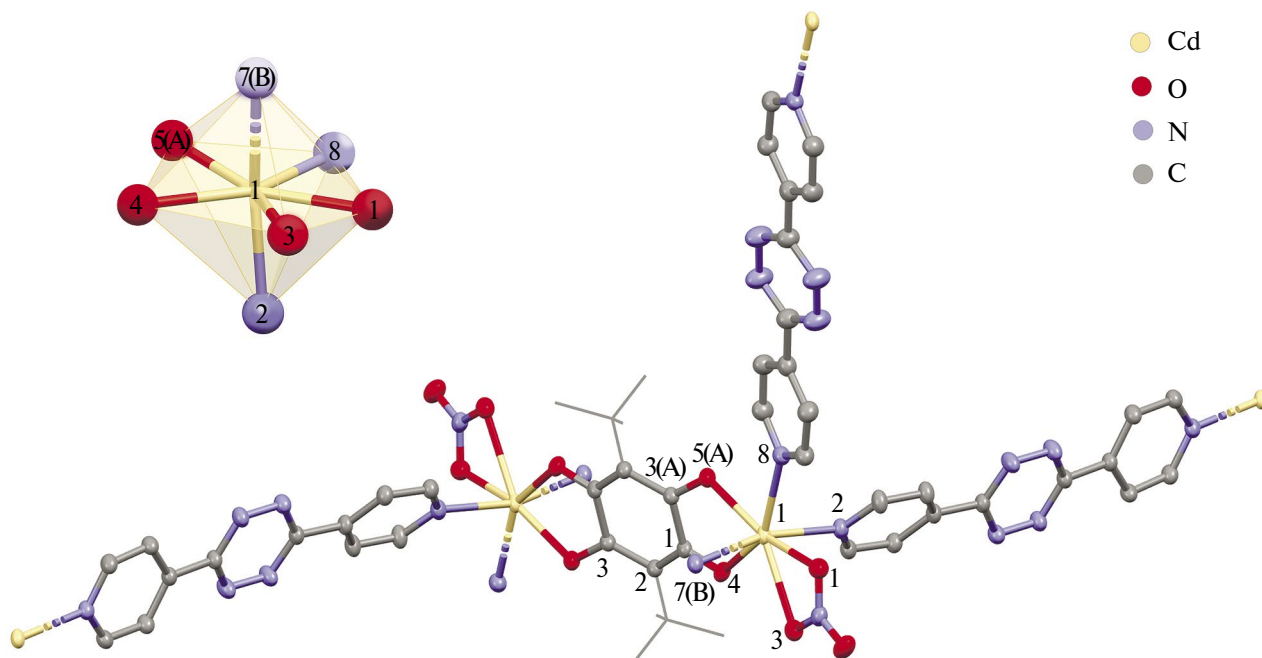


Рис. 2. Молекулярное строение звена и полиэдр МОКП II. Тепловые эллипсоиды приведены с 50%-ной вероятностью. Атомы водорода и "гостевые" молекулы DMF и MeOH не изображены.

вания двух катионов кадмия депротонированным мостиковым дигидрокси-*пара*-хиноновым лигандом. При этом на атомах металла сохраняется по одной нитратной группе, а дополняют координационную сферу металла три мостиковых бис(пиридил)тетразина. Координация дополнительного нейтрального линкера на ион кадмия хорошо согласуется с увеличением ковалентного радиуса металла в сравнении с цинком ($r(\text{Cd}) = 1.44 \text{ \AA}$, $r(\text{Zn}) = 1.22 \text{ \AA}$ [68]). Координационное окружение кадмия представляет собой искаженную пентагональную бипирамиду, экваториальную плоскость которой формируют кислородные атомы одного анилатного лиганда, два кислорода бидентатно связанного нитрат-аниона и один атом азота тетразинового лиганда. В вершинах пирамиды расположены атомы азота двух других тетразиновых линкеров.

Дианионы дигидрокси-*пара*-хинонов pQ^{2-} в МОКП цинка и кадмия состоят из двух делокализованных π -электронных систем, соединенных одиночными связями C—C. Такая делокализация электронной плотности характерна для мостиковой природы связывания анилатных лигандов. Интервал расстояний для одиночных связей C—C в анилатных дианионах для I и II составляет $1.553\text{--}1.556 \text{ \AA}$ (табл. 2). Другие

расстояния C—C шестичленных циклов анилатных линкеров лежат в узком диапазоне $1.387\text{--}1.413 \text{ \AA}$. Межатомные расстояния C—O имеют промежуточные значения между таковыми для двойных и одинарных связей кислород—углерод и находятся в интервале расстояний $1.253\text{--}1.271 \text{ \AA}$. Длины связей Zn—O в I с анилатными лигандами практически выравнены и находятся в интервале $2.04\text{--}2.09 \text{ \AA}$. Длины связей Cd—O в II также выравнены и составляют $2.289(2) \text{ \AA}$. Такое строение координационного узла характерно для большинства МОКП, построенных на основе лигандов анилатного типа и лишь в редких случаях [34, 35] наблюдается хиноидное альтернирование с неравнозначными связями углерод—кислород и металл—кислород.

Координация нейтральных N-донорных лигандов DPT на ион цинка в I характеризуется длинами связей цинк—азот, не превышающими по значению сумму ковалентных радиусов соответствующих элементов ($2.24 \text{ \AA}$) [69], что свидетельствует об образовании прочных координационных связей. В производном II наблюдается некоторое различие в длинах связей кадмий—азот. Так, длины связей Cd(1)—N(2) и Cd(1)—N(7B) составляют $2.317(3) \text{ \AA}$ и $2.337(3) \text{ \AA}$ соответственно, а длина связи Cd(1)—N(8) зна-

чительно больше и равна $2.472(3)\text{\AA}$. Данное различие наблюдается из-за неравноценного расположения атомов азота в координационной сфере металла, так атомы N(2) и N(7B) занимают апикальные положения в пентагональной бипирамиде вокруг катиона кадмия, а атом N(8) лежит в ее экваториальной плоскости.

МОКП I имеет взаимопроникающий алмазный мотив — dia (рис. 3), т.е. состоит из двух взаимопроникающих каркасов (рис. 3б). Стоит отметить, что формирование взаимопроникающих каркасов происходит из-за наличия больших пустот в решетке, что позволяет второму каркасу "прорасти" сквозь первый. В сформированном кристалле полимера I имеются каналы, заполненные молекулами растворителя, объем которых составляет 27% от объема элементарной кристаллической ячейки. Объем каналов рассчитан с радиусом зонда $1.2\text{\AA}$ и шагом $0.7\text{\AA}$. Каналы заняты двумя "гостевыми" молекулами DMF в расчете на ион цинка (рис. 3в).

МОКП II представляет собой слои попарно взаимопроникающих сеток (рис. 4а), при этом вся совокупность переплетающихся сетей остается двухпериодической (рис. 4б). В МОКП II

имеются изолированные поры, заполненные молекулами растворителя, объем которых составляет 20% от объема элементарной кристаллической ячейки. Объем пор рассчитан с радиусом зонда $1.2\text{\AA}$ и шагом $0.7\text{\AA}$. Каналы заняты "гостевыми" молекулами DMF и MeOH в расчете на ион кадмия (рис. 4в).

В отличие от описанных ранее [56, 57] карбоксилатных МОКП цинка и кадмия, содержащих DPT-лиганды, полученные в данной работе кристаллические образцы координационных полимеров I и II не проявляют люминесценции.

Термическая стабильность МОКП I и II была изучена методом термогравиметрического анализа. Кривые ТГА обоих образцов представлены на рис. 5. По данным рентгеноструктурного анализа, оба соединения содержат "гостевой" растворитель. Согласно результатам элементного анализа, данный растворитель остается в составе соединений при их высушивании на воздухе, что также подтверждено данными ТГА. Для МОКП I в температурном интервале $60\text{--}175^\circ\text{C}$ потеря массы составляет 11%, что соответствует потере одной гостевой молекулы DMF (73.09 г/моль) в расчете на звено $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})]$.

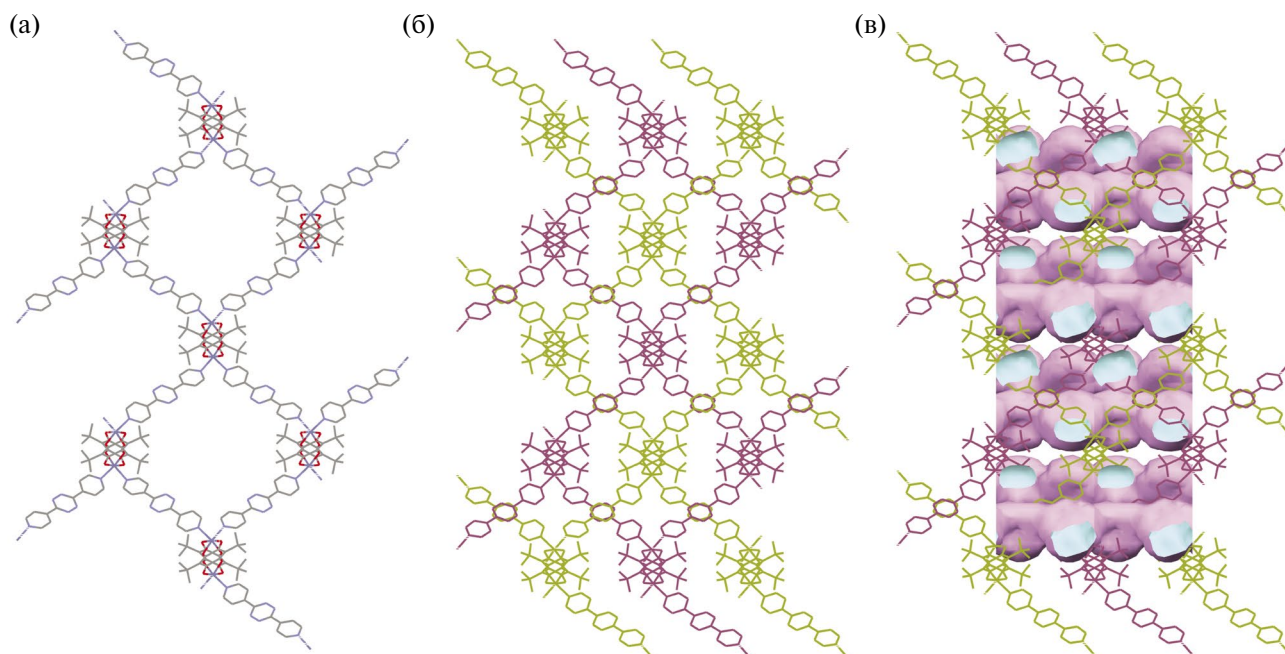


Рис. 3. Вид каркаса МОКП I вдоль вектора (001) (а); расположение взаимопроникающих каркасов МОКП I в кристалле вдоль вектора (001) (б); вид каналов в I вдоль вектора (001) (в). Внешняя сторона каналов — розовая; внутренняя сторона — голубая. "Гостевые" молекулы DMF не изображены.

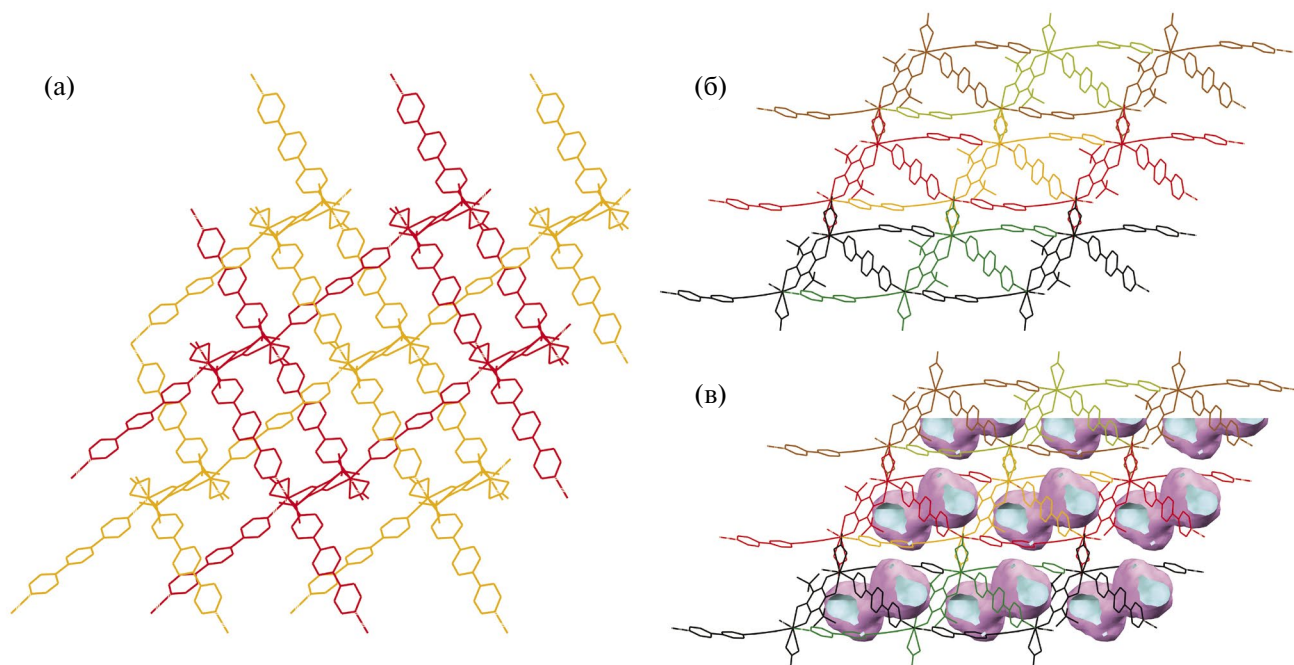


Рис. 4. Вид пары взаимопроникающих сетей МОКП II вдоль вектора (100) (а); слои, образованные попарно взаимопроникающими сетями в кристалле вдоль вектора (010) (б); вид пор в II вдоль вектора (010) (в). Внешняя сторона пор — розовая; внутренняя сторона — голубая. "Гостевые" молекулы DMF и MeOH не изображены.

· 2DMF ($M = 698.09$ г/моль). При дальнейшем нагревании в интервале температур 210–240°C наблюдается следующая ступень потери массы ($\Delta m = 12\%$), отвечающая выходу оставшегося гостевого растворителя (1 молекула DMF) из каналов координационного полимера. Последующее повышение температуры приводит к химической деструкции соединения. Для МОКП II выход всех "гостевых" молекул растворителя — две метанола ($M = 32.04$ г/моль) и две DMF ($M = 73.09$ г/моль), содержащихся в порах производного $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot 2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ ($M = 1518.10$ г/моль), происходит в температурном интервале 90–240°C, потеря массы образца при этом составляет 14%. Дальнейшее повышение температуры приводит к разрушению полимера. Таким образом, оба координационных полимера обладают системой закрытых пор и каналов, что приводит к высокой температуре освобождения полостей каркасов от "гостевых" растворителей, которое достигается, согласно данным ТГА, только при температуре 240°C при атмосферном давлении.

Таким образом, в ходе выполненной работы впервые получены гетеролептические, содержащие одновременно анилатные и тетразиновые лиганды МОКП цинка и кадмия состава $[\text{Zn}(\text{pQ})(\text{DPT})] \cdot 2\text{DMF}$ (I) и $[\text{Cd}_2(\text{NO}_3)_2(\text{pQ})(\text{DPT})_3] \cdot$

$2\text{DMF} \cdot 2\text{MeOH}$ (II). МОКП I является каркасным производным с топологией решетки — dia, МОКП II — сетчатый полимер с топологией сети sql. Оба производных содержат гостевой растворитель, который занимает свободный объем в кристаллической ячейке производных. По данным ТГА, гостевой растворитель удерживается в закрытых порах МОКП до температуры 240°C.

Изменение массы, %

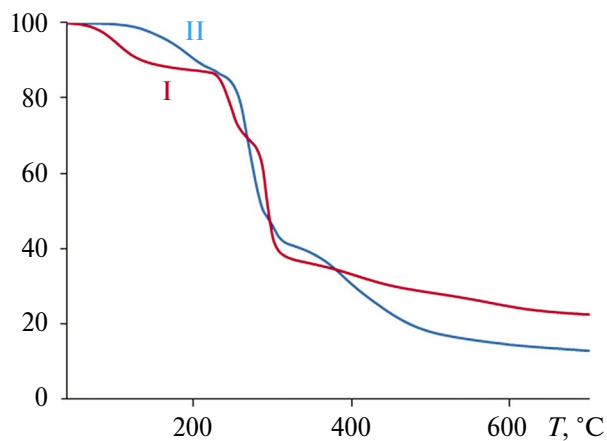


Рис. 5. Термогравиметрические кривые для МОК I (красная линия) и II (синяя линия).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования "Аналитический центр ИМХ РАН".

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМХ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко К.А., Потанов А.С., Федин В.П. // Успехи химии. 2022. Т. 91. № 4. С. RCR5026 (Kovalenko K.A., Potanov A.S., Fedin V.P. // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. P. RCR5026.) <https://doi.org/10.1070/RCR5026>
2. Агафонов М.А., Александров Е.В., Артюхова Н.А. и др. // Журн. структур. химии. 2022. Т. 63. № 5. С. 535 (Agafonov M.A., Alexandrov E.V., Artyukhova N.A. et al. // J. Struct. Chem. 2022. V. 63. P. 671), https://doi.org/10.26902/JSC_id93211
3. Monni N., Oggianu M., Sahadevan S.A. et al. // Magnetochemistry. 2021. V. 7. P. 109. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7080109>
4. Benmansour S., Gómez-García C.J. // Magnetochemistry. 2020. V. 6. P. 71. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040071>
5. Liu K.-G., Sharifzadeh Z., Rouhani F. et al. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 436. P. 213827. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213827>
6. Wang C., Liao K. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. V. 13. P. 56752. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13408>
7. Fasna F., Sasi S. // ChemistrySelect. 2021. V. 6. P. 6365. <https://doi.org/doi.org/10.1002/slct.202101533>
8. Антипин И.С., Алфимов М.В., Арсланов В.В. и др. // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 8. С. 895 (Antipin I.S., Burilov V.A., Gorbachuk V.V. et al. // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. P. 895.) <https://doi.org/10.1070/RCR5011>
9. Kitagawa S., Matsuda R. // Coord. Chem. Rev. 2007. V. 251. P. 2490. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2007.07.009>
10. Kingsbury C.J., Abrahams B.F., Auckett J.E. et al. // Chem. Eur. J. 2019. V. 25. P. 5222. <https://doi.org/10.1002/chem.201805600>
11. Abrahams B.F., Dharma A.D., Dyett B. et al. // Dalton Trans. 2016. V. 45. P. 1339. <https://doi.org/10.1039/c5dt04095g>
12. Adil K., Belmabkhout Y., Pillai R.S. et al. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. P. 3402. <https://doi.org/10.1039/c7cs00153c>
13. Ezugwu C.I., Liu S., Li C., et al. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 450. P. 214245. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214245>
14. Hu Z., Zhao D. // CrystEngComm. 2017. V. 19. P. 4066. <https://doi.org/10.1039/c6ce02660e>
15. Zhang X., Wang C., Wang L. Y. et al. // Appl Organomet Chem. 2022. V. e6603. P. 1. <https://doi.org/10.1002/aoc.6603>
16. Artem'ev A.V., Fedin V.P. // Russian Journal of Organic Chemistry. 2019. V. 55. P. 800. <https://doi.org/10.1134/S1070428019060101>
17. Wang Y., Liu X., Li X. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. P. 8030. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b01270>
18. Chang C.-H., Li A.-C., Popovs I. et al. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 23770. <https://doi.org/10.1039/c9ta05244e>
19. Chen H.-J., Chen L.-Q., Lin L.-R. et al. // Inorg. Chem. 2021. V. 60. P. 6986–6990. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00740>
20. Huangfu M., Wang M., Lin C. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 3429. <https://doi.org/10.1039/D0DT04276E>
21. Li P., Zhou Z., Zhao Y.S. et al. // Chem. Commun. 2021. V. 57. P. 13678. <https://doi.org/10.1039/d1cc05541k>
22. Gorai T., Schmitt W., Gunnlaugsson T. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 770. <https://doi.org/10.1039/d0dt03684f>
23. Rogovoy M.I., Frolova T.S., Samsonenko D.G. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2020. V. 2020. P. 1635. <https://doi.org/10.1002/ejic.202000109>
24. Calbo J., Golomb M.J., Walsh A. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 16571. <https://doi.org/10.1039/c9ta04680a>
25. Wang M., Dong R. and Feng X. // Chem. Soc. Rev. 2021. V. 50. P. 2764. <https://doi.org/10.1039/d0cs01160f>
26. Dong R., Feng X. // Nature Materials. 2021. V. 20. P. 122. <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00912-1>
27. Benmansour S., Gómez-García C.J. // Gen. Chem. 2020. V. 6. P. 190033. <https://doi.org/10.21127/yaoyigc20190033>
28. Espallargas G.M., Coronado E. // Chem. Soc. Rev. 2018. V. 47. P. 533. <https://doi.org/10.1039/c7cs00653e>
29. Gou X., Wu Y., Wang M. et al. // Dalton Trans. 2024. V. 53. P. 148. <https://doi.org/10.1039/D3DT02714G>

30. Monni N., Baldoví J.J., García-López V. et al. // Chemical Science. 2022. V. 13. P. 7419. <https://doi.org/10.1039/D2SC00769J>
31. Ovcharenko V., Fursova E., Letyagin G. et al. // CrystEngComm. 2023. V. 25. P. 6194. <https://doi.org/10.1039/D3CE00912B>
32. Huang Z., Yu H., Wang L. et al. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 430. P. 213737. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213737>
33. Monni N., Angotzi M.S., Oggianu M. et al. // J. Mater. Chem. C. 2022. V. 10. P. 1548. <https://doi.org/10.1039/d1tc05335c>
34. Kitagawa S., Kawata S. // Coord. Chem. Rev. 2002. V. 224. P. 11. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(01\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(01)00369-1)
35. Kharitonov A.D., Trofimova O.Yu., Meshcheryakova N. et al. // CrystEngComm. 2020. V. 22. P. 4675. <https://doi.org/10.1039/d0ce00767f>
36. Трофимова О.Ю., Ершова И.В., Малеева А.В. и др. // Коорд. химия. 2021. Т. 47. № 9. С. 552 (Trofimova O.Yu., Ershova I.V., Maleeva A.V. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2021. V. 47. P. 610). <https://doi.org/10.1134/S1070328421090086>
37. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Ershova I.V. et al. // Molecules. 2021. V. 26. P. 2486. <https://doi.org/10.3390/molecules26092486>
38. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsenyeva K.V. et al. // Crystals. 2022. V. 12. P. 370. <https://doi.org/10.3390/cryst12030370>
39. Трофимова О.Ю., Малеева А.В., Арсеньева К.В. et al. // Журн. структур. химии. 2023. Т. 64. С. 112229 (Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsenyeva K.V., et al. // J. Struct. Chem. 2023. Vol. 64. P. 1070). <https://doi.org/10.1134/S0022476623060100>
40. Трофимова О.Ю., Малеева А.В., Арсеньева К.В. et al. // Коорд. химия. 2023. Т. 49. P. 278 (Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsen'eva K.V., et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2023. V. 49. P. 276). <https://doi.org/10.1134/S1070328423600183>
41. Охлопкова Л.С., Поддельский А.И., Смолянинов И.В. и др. // Коорд. химия. Т. 46. № 6. С. 340 (Okhlopko L.S., Poddelsky A.I., Fukin G.K., et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. P. 386). <https://doi.org/10.31857/S0132344X20050059>
42. Хамалетдинова Н.М., Мещерякова И.Н., Пискунов А.В. и др. // Журн. структур. химии. 2015. Т. 56. № 2. С. 249 (Khamaletdinova N.M., Meshcheryakova I.N., Piskunov A.V., et al. // J. Struct. Chem. 2015. V. 56. P. 233). <https://doi.org/10.1134/S0022476615020055>
43. Min K.S., DiPasquale A.G., Rheingold A.L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 6229. <https://doi.org/10.1021/ja900909u>
44. Min K.S., DiPasquale A., Rheingold A.L. et al. // Inorg. Chem. Com. 2007. V. 46. P. 1048. <https://doi.org/10.1021/ic062400e>
45. Trofimova O.Y., Ershova I.V., Maleeva A.V. et al. // J. Inorg. Organomet. Polym. Materials. 2024. V.P. <https://doi.org/10.1007/s10904-024-03013-7>
46. Withersby M.A., Blake A.J., Champness N.R. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2000. V. 122. P. 4044. <https://doi.org/10.1021/ja991698n>
47. Liu K., Han X., Zou Y. et al. // Inorg. Chem. Comm. 2014. V. 39. P. 131. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2013.11.011>
48. Cepeda J., Pérez-Yáñez S., García J.Á. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 9269. <https://doi.org/10.1039/D1DT01204E>
49. Li J., Peng Y., Liang H. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2011. V. 2011. P. 2712. <https://doi.org/10.1002/jeic.201100227>
50. Xue M., Ma S., Jin Z. et al. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 6825. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ic800854y>
51. Hijikata Y., Horike S., Sugimoto M. et al. // Chem. Eur. J. 2011. V. 17. P. 5138. <https://doi.org/10.1002/chem.201003734>
52. Lee L.-W., Luo T.-T., Lo S.-H. et al. // CrystEngComm. 2015. V. 17. P. 6320. <https://doi.org/10.1039/C5CE00923E>
53. Razavi S.A.A., Masoomi M.Y., Islamoglu T. et al. // Inorg. Chem. 2017. V. 56. P. 2581. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b02758>
54. Zhang R., Huang J.-H., Meng D.-X. et al. // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 5618. <https://doi.org/10.1039/D0DT00793E>
55. Hijikata Y., Horike S., Sugimoto M. et al. // Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 3634. <https://doi.org/10.1021/ic302006x>
56. Fernández B., Seco J.M., Cepeda J. et al. // CrystEngComm. 2015. V. 17. P. 7636. <https://doi.org/10.1039/C5CE01521A>
57. Seco J.M., Pérez-Yáñez S., Briones D., et al. // Cryst. Growth Des. 2017. V. 17. P. 3893. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b00522>
58. Mulfort K.L., Wilson T.M., Wasielewski M.R. et al. // Langmuir. 2009. V. 25. P. 503. <https://doi.org/10.1021/la803014k>
59. Dinolfo P.H., Williams M.E., Stern C.L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. P. 12989. <https://doi.org/10.1021/ja0473182>
60. Svetogorov R.D., Dorovatovskii P.V., Lazarenko V.A. // Cryst. Res. Technol. 2020. V. 55. P. 1900184. <https://doi.org/10.1002/crat.201900184>
61. Kabsch W. // Acta Crystallogr. D. 2010. V. 66. P. 125. <https://doi.org/10.1107/S0907444909047337>

62. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>
63. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
64. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339. <https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
65. *Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M.* // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. P. 3576. <https://doi.org/10.1021/cg500498k>
66. *Alexandrov E.V., Blatov V.A., Kochetkov A.V. et al.* // CrystEngComm. 2011. V. 13. P. 3947. <https://doi.org/10.1039/c0ce00636j>
67. *Александров Е.В., Шевченко А.П., Некрасова Н.А. et al.* // Успехи химии. 2022. V. 91. RCR5032 (Aleksandrov E.V., Shevchenko A.P., Nekrasova N.A. et al. // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. P. Art. RCR5032). <https://doi.org/10.1070/RCR5032>
68. *Cordero B., Gomez V., Platero-Prats A.E. et al.* // Dalton Trans. 2008. V.P. 2832. <https://doi.org/10.1039/b801115j>
69. *Batsanov S.S.* // Russ. J. Inorg. Chem. 1991. V. 36. P. 1694.

3,6-Dipyridyl-1,2,4,5-tetrazine in the Synthesis of Zinc and Cadmium Metal-Organic Frameworks with Anilate-Type Ligands

O. Yu. Trofimova^{a, *}, D. S. Kolevatov^a, N. O. Druzhkov^a, A. V. Maleeva^a, I. A. Yakushev^b, P. V. Dorovatovskii^c, and A. V. Piskunov^a

^a Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

^b Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^c National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

*e-mail: olesya@iomc.ras.ru

New heteroleptic metal-organic frameworks (MOF) of zinc (3D MOF) and cadmium (2D MOF) are prepared by the two-stage synthesis: [Zn(pQ)(DPT)]·2DMF (I) and Cd₂(NO₃)₂·(pQ)(DPT)₃·2DMF·2MeOH (II), where pQ is the 2,5-dihydroxy-3,6-di-*tert*-butyl-*para*-benzoquinone dianion, DPT is 3,6-di(pyridin-4-yl)-1,2,4,5-tetrazine, and DMF is *N,N*-dimethylformamide (DMF). The structures of the compounds are studied by XRD (CIF files CCDC nos. 2332754 (I) and 2332755 (II)). The thermal stability of the MOF is studied by thermogravimetry.

Keywords: anilate ligand, metal-organic frameworks, redox-active ligands, XRD, thermogravimetry

REFERENCES

1. *Kovalenko K.A., Potapov A.S., Fedin V.P.* // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. P. RCR5026. <https://doi.org/10.1070/RCR5026>
2. *Agafonov M.A., Alexandrov E.V., Artyukhova N.A. et al.* // J. Struct. Chem. 2022. V. 63. P. 671. https://doi.org/10.26902/JSC_id93211
3. *Monni N., Oggianu M., Sahadevan S.A. et al.* // Magnetochemistry. 2021. V. 7. P. 109. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7080109>
4. *Benmansour S., Gómez-García C.J.* // Magnetochemistry. 2020. V. 6. P. 71. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry6040071>
5. *Liu K.-G., Sharifzadeh Z., Rouhani F. et al.* // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 436. P. 213827. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213827>
6. *Wang C., Liao K.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2021. V. 13. P. 56752. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13408>
7. *Fasna F., Sasi S.* // ChemistrySelect. 2021. V. 6. P. 6365. <https://doi.org/doi.org/10.1002/slct.202101533>
8. *Antipin I.S., Burilov V.A., Gorbachuk V.V. et al.* // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. P. 895. <https://doi.org/10.1070/RCR5011>
9. *Kitagawa S., Matsuda R.* // Coord. Chem. Rev. 2007. V. 251. P. 2490. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2007.07.009>
10. *Kingsbury C.J., Abrahams B.F., Auckett J.E. et al.* // Chem. Eur. J. 2019. V. 25. P. 5222. <https://doi.org/10.1002/chem.201805600>
11. *Abrahams B.F., Dharma A.D., Dyett B. et al.* // Dalton Trans. 2016. V. 45. P. 1339. <https://doi.org/10.1039/c5dt04095g>

12. Adil K., Belmabkhout Y., Pillai R.S. et al. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. P. 3402.
<https://doi.org/10.1039/c7cs00153c>
13. Ezugwu C.I., Liu S., Li C., et al. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 450. P. 214245.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214245>
14. Hu Z., Zhao D. // CrystEngComm. 2017. V. 19. P. 4066.
<https://doi.org/10.1039/c6ce02660e>
15. Zhang X., Wang C., Wang L.Y. et al. // Appl Organomet Chem. 2022. V. e6603. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/aoc.6603>
16. Artem'ev A.V., Fedin V.P. // Russian Journal of Organic Chemistry. 2019. V. 55. P. 800.
<https://doi.org/10.1134/S1070428019060101>
17. Wang Y., Liu X., Li X. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. P. 8030. 10.1021/jacs.9b01270
18. Chang C.-H., Li A.-C., Popovs I. et al. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 23770.
<https://doi.org/10.1039/c9ta05244e>
19. Chen H.-J., Chen L.-Q., Lin L.-R. et al. // Inorg. Chem. 2021. V. 60. P. 6986–6990.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00740>
20. Huangfu M., Wang M., Lin C. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 3429.
<https://doi.org/10.1039/D0DT04276E>
21. Li P., Zhou Z., Zhao Y.S. et al. // Chem. Commun. 2021. V. 57. P. 13678.
<https://doi.org/10.1039/d1cc05541k>
22. Gorai T., Schmitt W., Gunnlaugsson T. // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 770.
<https://doi.org/10.1039/d0dt03684f>
23. Rogovoy M.I., Frolova T.S., Samsonenko D.G. et al. // Eur. J. Inorg. Chem.. 2020. V. 2020. P. 1635.
<https://doi.org/10.1002/ejic.202000109>
24. Calbo J., Golomb M.J., Walsh A. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 16571.
<https://doi.org/10.1039/c9ta04680a>
25. Wang M., Dong R. and Feng X. // Chem. Soc. Rev. 2021. V. 50. P. 2764.
<https://doi.org/10.1039/d0cs01160f>
26. Dong R., Feng X. // Nature Materials. 2021. V. 20. P. 122.
<https://doi.org/10.1038/s41563-020-00912-1>
27. Benmansour S., Gómez-García C.J. // Gen. Chem. 2020. V. 6. P. 190033.
<https://doi.org/10.21127/yaoyigc20190033>
28. Espallargas G.M., Coronado E. // Chem. Soc. Rev. 2018. V. 47. P. 533.
<https://doi.org/10.1039/c7cs00653e>
29. Gou X., Wu Y., Wang M. et al. // Dalton Trans. 2024. V. 53. P. 148.
<https://doi.org/10.1039/D3DT02714G>
30. Monni N., Baldoví J.J., García-López V. et al. // Chemical Science. 2022. V. 13. P. 7419.
<https://doi.org/10.1039/D2SC00769J>
31. Ovcharenko V., Fursova E., Letyagin G. et al. // CrystEngComm. 2023. V. 25. P. 6194.
<https://doi.org/10.1039/D3CE00912B>
32. Huang Z., Yu H., Wang L. et al. // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 430. P. 213737.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2020.213737>
33. Monni N., Angotzi M.S., Oggianu M. et al. // J. Mater. Chem. C. 2022. V. 10. P. 1548.
<https://doi.org/10.1039/d1tc05335c>
34. Kitagawa S., Kawata S. // Coord. Chem. Rev. 2002. V. 224. P. 11.
[https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(01\)00369-1](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(01)00369-1)
35. Kharitonov A.D., Trofimova O.Y., Meshcheryakova I.N. et al. // CrystEngComm. 2020. V. 22. P. 4675.
<https://doi.org/10.1039/d0ce00767f>
36. Trofimova O.Yu., Ershova I.V., Maleeva A.V. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2021. V. 47. P. 610.
<https://doi.org/10.1134/S1070328421090086>
37. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Ershova I.V. et al. // Molecules. 2021. V. 26. P. 2486.
<https://doi.org/10.3390/molecules26092486>
38. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsenyeva K.V. et al. // Crystals. 2022. V. 12. P. 370.
<https://doi.org/10.3390/cryst12030370>
39. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsenyeva K.V., et al. // J. Struct. Chem. 2023. Vol. 64. P. 1070.
<https://doi.org/10.1134/S0022476623060100>
40. Trofimova O.Yu., Maleeva A.V., Arsenyeva K.V., et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2023. V. 49. P. 276.
<https://doi.org/10.1134/S1070328423600183>
41. Okhlopko L.S., Poddel'sky A.I., Fukin G.K., et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. P. 386.
<https://doi.org/10.31857/S0132344X20050059>
42. Khamaletdinova N.M., Meshcheryakova I.N., Piskunov A.V., et al. // J. Struct. Chem. 2015. V. 56. P. 233.
<https://doi.org/10.1134/S0022476615020055>
43. Min K.S., DiPasquale A.G., Rheingold A.L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 6229.
<https://doi.org/10.1021/ja900909u>
44. Min K.S., DiPasquale A., Rheingold A.L. et al. // Inorg. Chem. Com. 2007. V. 46. P. 1048.
<https://doi.org/10.1021/ic062400e>
45. Trofimova O.Y., Ershova I.V., Maleeva A.V. et al. // J. Inorg. Organomet. Polym. Materials. 2024. V.P.
<https://doi.org/10.1007/s10904-024-03013-7>
46. Withersby M.A., Blake A.J., Champness N.R. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2000. V. 122. P. 4044.
<https://doi.org/10.1021/ja991698n>
47. Liu K., Han X., Zou Y. et al. // Inorg. Chem. Comm. 2014. V. 39. P. 131.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2013.11.011>

48. *Cepeda J., Pérez-Yáñez S., García J.Á. et al.* // Dalton Trans. 2021. V. 50. P. 9269.
<https://doi.org/10.1039/D1DT01204E>
49. *Li J., Peng Y., Liang H. et al.* // Eur. J. Inorg. Chem. 2011. V. 2011. P. 2712.
<https://doi.org/10.1002/ejic.201100227>
50. *Xue M., Ma S., Jin Z. et al.* // Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 6825.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ic800854y>
51. *Hijikata Y., Horike S., Sugimoto M. et al.* // Chem. Eur. J. 2011. V. 17. P. 5138.
<https://doi.org/10.1002/chem.201003734>
52. *Lee L.-W., Luo T.-T., Lo S.-H. et al.* // CrystEngComm. 2015. V. 17. P. 6320.
<https://doi.org/10.1039/C5CE00923E>
53. *Razavi S.A.A., Masoomi M.Y., Islamoglu T. et al.* // Inorg. Chem. 2017. V. 56. P. 2581.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b02758>
54. *Zhang R., Huang J.-H., Meng D.-X. et al.* // Dalton Trans. 2020. V. 49. P. 5618.
<https://doi.org/10.1039/D0DT00793E>
55. *Hijikata Y., Horike S., Sugimoto M. et al.* // Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 3634.
<https://doi.org/10.1021/ic302006x>
56. *Fernández B., Seco J.M., Cepeda J. et al.* // CrystEngComm. 2015. V. 17. P. 7636.
<https://doi.org/10.1039/C5CE01521A>
57. *Seco J.M., Pérez-Yáñez S., Briones D., et al.* // Cryst. Growth Des. 2017. V. 17. P. 3893.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.7b00522>
58. *Mulfort K.L., Wilson T.M., Wasielewski M.R. et al.* // Langmuir. 2009. V. 25. P. 503.
<https://doi.org/10.1021/la803014k>
59. *Dinolfo P.H., Williams M.E., Stern C.L. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. P. 12989.
<https://doi.org/10.1021/ja0473182>
60. *Svetogorov R.D., Dorovatovskii P.V., Lazarenko V.A.* // Cryst. Res. Technol. 2020. V. 55. P. 1900184.
<https://doi.org/10.1002/crat.201900184>
61. *Kabsch W.* // Acta Crystallogr. D. 2010. V. 66. P. 125.
<https://doi.org/10.1107/S0907444909047337>
62. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053273314026370>
63. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
<https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
64. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339.
<https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
65. *Blatov V.A., Shevchenko A.P., Proserpio D.M.* // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. P. 3576.
<https://doi.org/10.1021/cg500498k>
66. *Alexandrov E.V., Blatov V.A., Kochetkov A.V. et al.* // CrystEngComm. 2011. V. 13. P. 3947.
<https://doi.org/10.1039/c0ce00636j>
67. *Aleksandrov E.V., Shevchenko A.P., Nekrasova N.A. et al.* // Russ. Chem. Rev. 2022. V. 91. P. Art. RCR5032.
<https://doi.org/10.1070/RCR5032>
68. *Cordero B., Gomez V., Platero-Prats A.E. et al.* // Dalton Trans. 2008. V.P. 2832.
<https://doi.org/10.1039/b801115j>
69. *Batsanov S.S.* // Russ. J. Inorg. Chem. 1991. V. 36. P. 1694.