УДК 546.46:547-316

МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРЫ МАГНИЯ НА ОСНОВЕ 2,5-ДИГИДРОКСИ-3,6-ДИ-*трет*-БУТИЛ-*пара*-БЕНЗОХИНОНА

© 2021 г. О. Ю. Трофимова¹, И. В. Ершова¹, А. В. Малеева¹, И. А. Якушев^{2, 3}, П. В. Дороватовский³, Р. Р. Айсин⁴, А. В. Пискунов^{1, *}

¹Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Huжний Новгород, Россия ²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия ³Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия ⁴Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия ^{*}e-mail: pial@iomc.ras.ru Поступила в редакцию 27.01.2021 г. После доработки 25.02.2021 г. Принята к публикации 01.03.2021 г.

Методом сольвотермального синтеза в различных растворителях (N,N-диметилформамид (DMF), N,N-диметилацетамид (DMAA) и N-метил-2-пирролидон (NMP)) получены новые одномерные металл-органические координационные полимеры магния $[Mg(pQ) \cdot 2DMF]_n$ (I), $[Mg(pQ) \cdot 2DMAA]_n$ (II) и $[Mg(pQ) \cdot 2(NMP)]_n$ (III) (pQ = дианион 2,5-дигидрокси-3,6-ди-*трет*-бутил-*пара*-бензохинона). Кристаллическая структура соединений I и III установлена методом PCA (CIF files CCDC № 2058147 (I), 2058148 (II)). Изучены спектральные характеристики полученных координационных полимеров, а также их термическая стабильность.

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

DOI: 10.31857/S0132344X21090085

Металл-органические координационные полимеры (МОКП) представляют собой новый класс микропористых материалов, построенных на основе катионов или кластеров металлов, соединенных между собой мостиковыми лигандами в одномерные цепочки, двухмерные слои или трехмерные каркасы. МОКП обладают широким спектром уникальных свойств, обеспечивающих потенциальное применение в различных сферах. Материалы на основе координационных полимеров могут быть использованы в качестве газовых адсорбентов [1, 2], люминесцентных [3, 4], электрохимических или фотофизических сенсоров [5, 6], оптических [7], электропроводных [8, 9] и магнитных материалов [10-14]. Одним из перспективных направлений синтеза МОКП с уникальными свойствами является получение редокс-активных металл-органических каркасов [8, 9, 15]. Физические, химические свойства, кристаллическая структура и топология МОКП зависят от природы ионов металлов и органических лигандов, участвующих в их построении. В качестве редоксактивных мостиковых лигандов наиболее часто используются анилатные лиганды - производные 2,5-дигидрокси-1,4-бензохинона, содержашие различные заместители в положениях 3 и 6 (H, Cl, Br, I, CN, NO₂ и т.д.) [8, 16–18]. Будучи связанными в комплекс с металлом соединения данного типа могут существовать в четырех различных окислительно-восстановительных состояниях (схема 1). При этом дианион может характеризоваться о-хиноидным распределением длин связей и, соответственно, типом связывания с комплексообразователем, в котором отрицательные заряды сосредоточены на соседних атомах кислорода.



Схема 1.

Среди группы анилатных лигандов координационная химия 2,5-дигидрокси-3,6-ди-трет-бутил-*пара*-хинона (**H**₂**pQ**) [19] исследована достаточно слабо. До недавних пор было опубликовано лишь несколько статей, в которых сообщается о получении моноядерных производных трифенилсурьмы(V) состава pQSbPh₃ · CH₃OH и Et₃NH[pQSbPh₃Br] [20], а также биядерных комплексов олова, никеля, железа и кобальта [19, 21, 22] на основе этого лиганда. Тем не менее редоксактивная природа данного дигидрокси-пара-хинона позволила продемонстрировать перспективные свойства комплексов металлов с его участием. Так, биядерные соединения железа характеризуются спин-спиновым переходом в области комнатных температур [22], а производное кобальта – явлением редокс-индуцированного переноса электрона [21]. До недавних пор не предпринималось попыток синтезировать металл-органические полимеры с этим анилатным лигандом. И лишь в 2020 г. были получены и охарактеризованы первые МОКП, содержащие дианион H₂pQ в качестве мостиковых лигандов, ковалентно связывающих ионы лантанидов в 2D-сетчатые структуры [23]. В настоящем исследовании синтезированы новые линейные координационные полимеры магния на основе $H_2pQ - [Mg(pQ) \cdot 2DMF]_n$ (I), $[Mg(pQ) \cdot 2DMAA]_n$ (II) и $[Mg(pQ) \cdot 2(NMP)]_n$ (III).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК-спектры регистрировали на ИК Фурьеспектрометре ФСМ-1201 (суспензии в вазелиновом масле; кюветы KBr). ЭСП регистрировали на спектрометре Carl Zeiss Jena Specord M400 (в вазелиновом масле). Элементный анализ выполняли на приборе Elementar Vario El сиbе. Исследования методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА) соединений проводили на приборе Mettler Toledo TGA/DSC3+ при температуре 30– 500° C в атмосфере азота (тигель из поликристаллической окиси алюминия), скорость нагрева 5°С/мин. В работе применяли коммерческие реактивы: N,N'-диметилформамид (DMF), N,N-диметилацетамид (DMAA), N-метил-2-пирролидон (NMP), MgCl₂ · 6H₂O. Лиганд H₂pQ синтезировали согласно методике [19].

Синтез комплексов I–III. Смесь $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (0.04 ммоль) и H_2pQ (0.04 ммоль) растворяли в 5 мл соответствующего растворителя (DMF для I, DMAA для II, NMP для III) и нагревали в запаянной стеклянной ампуле при 130°C в течение суток. Полученные ярко окрашенные кристаллы I–III собирали на фильтре Шотта, промывали чистым растворителем для синтеза и сушили на воздухе.

МОКП I: розовые крупные игольчатые кристаллы. Выход 82%.

Найдено, %:	C 56.96;	H 7.63;	N 6.15.
Для C ₂₀ H ₃₂ N ₂ O ₆ l	Mg		
вычислено, %:	C 57.09;	H 7.67;	N 6.66.

ИК-спектр (v, см⁻¹): 1688 с, 1668 с, 1608 сл, 1541 с, 1480 с, 1442 с, 1420 ср, 1361 сл, 1259 ср, 1198 ср, 1110 с, 1065 сл, 1049 сл, 970 ср, 927 ср, 902 с, 868 ср, 801 сл, 790 ср, 685 с, 627 ср, 525 с. ЭСП (λ , нм): 320, 340, 515. МОКП II: розовые мелкие игольчатые кристаллы. Выход 75%.

Найдено, %:	C 58.70;	H 8.13;	N 5.86.
Для C ₂₂ H ₃₆ N ₂ O ₆ M	ſg		
вычислено, %:	C 58.87;	H 8.08;	N 6.24.

ИК-спектр (v, см⁻¹): 1657 с, 1627 с, 1538 с, 1344 с, 1269 с, 1218 ср, 1192 с, 1048 ср, 1038 ср, 1026 с, 970 ср, 925 сл, 904 с, 851 сл, 803 сл, 791 сл, 748 ср, 657 с, 627 ср, 610 с, 596 ср, 523 с, 505 ср, 478 сл. ЭСП (λ , нм): 320, 345, 510.

МОКП III: бордовые мелкие игольчатые кристаллы. Выход 78%. Согласно данным элементного анализа, соединение II содержит 0.5 молекулы окклюдированного N-метил-2-пирролидона в расчете на одно звено $[Mg(pQ) \cdot 2(NMP)]_n$.

Найдено, %:	C 60.88;	Н 7.83;	N 6.58.				
Для C _{26.5} H _{40.5} N _{2.5} O _{6.5} Mg							
вычислено, %:	C 60.93;	H 7.81;	N 6.70.				

ИК-спектр (v, см⁻¹): 1699 с, 1664 с, 1540 с, 1344 с, 1309 ср, 1262 ср, 1222 сл, 1199 ср, 1176 ср, 1117 с, 12071 сл, 1052 ср, 989 ср, 972 ср, 928 ср, 902 с, 853 сл, 792 ср, 755 ср, 657 с, 629 сл, 564 сл, 526 с, 472 ср. ЭСП (λ , нм): 310, 335, 490.

Квантово-химические расчеты выполняли с использованием программного пакета Gaussian09 [24] методом теории функционала плотности (DFT) с применением функционала B3LYP [25] и стандартного базисного набора 6-311+(d,p) для всех атомов.

РСА. Данные рентгеновской дифракции для МОКП І и ІІІ получены на рентгеновском пучке станции "Белок" Курчатовского центра синхротронного излучения в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт" (Москва, Российская Федерация) в режиме ф-сканирования с использованием CCD детектора Rayonix SX165 при 100 К (λ = 0.79313 Å и 0.79312 Å для I и III соответственно) [26]. Первичное индексирование, уточнение параметров элементарной ячейки и интегрирование отражений, а также поправку на поглощение интенсивности рефлексов произведены с использованием программного пакета XDS [27]. Структуры расшифрованы прямыми методами и уточнены в анизотропном полноматричным методом наименьших квадратов по F^2 для всех неводородных атомов. Ввиду разупорядочения трет-бутильной группы по двум положениям (соотношение заселенности позиций атомов 0.882 : 0.118), а также координированного N-метил-2-пирролидона в структуре III (соотношение заселенности позиций атомов 0.749: 0.251) в уточнении модели минорных компонент разупорядоченных групп использованы геометрические ограничения SADI (в обоих случаях), FLAT (только для N-метил-2-пирролидона), и ограничения по тепловым смещениям атомов SIMU, RIGU (только для N-метил-2-пирролидона). В случае структуры I атомы водорода выявлены из карты электронной плотности и уточнены в изотропном приближении, а в случае структуры III атомы водорода помещены в рассчитанные положения и уточнены в модели "наездника" с $U_{\mu_{30}}(H) = 1.5 U_{_{3KB}}(C)$ для атомов водорода метильных групп и $1.2U_{3KB}(C)$ для остальных атомов водорода. Расчеты выполнены с помощью программного пакета SHELXTL [28] в среде визуализации и обработки структурных данных OLEX2 [29].

Кристаллографические данные для соединений I и III депонированы в Кембриджском банке структурных данных ССDС № 2058147 и № 2058148 соответственно (deposit@ccdc. cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом сольвотермального синтеза в различных растворителях (DMF, DMAA, NMP) осуществлены реакции синтеза трех линейных металл-органических координационных полимеров магния на основе H₂pQ. Реакция протекает в запаяной стеклянной ампуле при нагревании до 130°С в течение суток. В результате получены производные состава $[Mg(pQ) \cdot 2DMF]_n$ (I), $[Mg(pQ) \cdot 2DMAA]_n$ (II) и $[Mg(pQ) \cdot 2(NMP)]_n$ (III) (pQ = дианион 2,5-дигидрокси-3,6-дитрет-бутил-пара-бензохинона) (схема 2). В ходе синтеза и дальнейшего остывания в реакционной смеси формируются бордово-розовые кристаллические соединения I-III с выходами, близкими к количественным. После промывки на фильтре тем же растворителем, что был использован при синтезе, и дальнейшего высушивания на воздухе синтезированные МОКП являются аналитически чистыми. Согласно элементному анализу и данным ТГА-анализа (см. ниже), комплекс III содержит половину молекулы пирролидона на звено полимерной цепи. Полученные соединения нерастворимы в воде и органических растворителях и устойчивы к кислороду и влаге воздуха.



Схема 2.

Строение МОКП I и III определено методом РСА. Состав и химическая чистота всех соединений подтверждены методами ИК-спектроскопии, термогравиметрического и элементного анализов. Молекулярные структуры I и III приведены на рис. 1 и 2. Кристаллографические данные и параметры рентгеноструктурных экспериментов МОКП I и III представлены в табл. 1, значения избранных длин связей — в табл. 2.

По данным РСА, МОКП I и III представляют собой одномерные полимеры (рис. 1). Соединение I кристаллизуется в моноклинной группе симметрии C2/c, производное III – в моноклинной группе симметрии P21/c. Топология цепи обоих производных – 2С1. Координационное окружение каждого из катионов магния в соединениях I и III представляет собой искаженный октаэдр, по вершинам которого расположены четыре атома кислорода двух хелатирующих лигандов рО⁻² и два атома кислорода координированных молекул растворителя (рис. 2, 3). Цис-расположение лигандов в координационной сфере металла приводит к зигзагообразному строению полимерных цепей. Анализ кристаллических структур I и III путем построения поверхности Хиршвельда с применением программного пакета Crystal Explorer 17.5 [30] не выявил значимых межмолекулярных взаимодействий между этими цепями.

Дианион pQ²⁻ в обоих МОКП имеет схожее строение и демонстирует наличие двух делокализованных π -электронных анионных систем, связанных между собой одинарными связями С(1)-C(3) и C(8)-C(10) (для соединения III), через середины которых проходит элемент симетрии. В соединении I связи C(1)-C(2) и C(2)-C(3), а также С(1)-О(1) и С(3)-О(2) практически равны между собой, что указывает на очень высокую делокализацию заряда по данным фрагментам лиганда. Длины связей C(1)-C(2) и C(2)-C(3) находятся в интервале, характерном для классических ароматических связей углерод-углерод. Межатомные расстояния C(1) - O(1) и C(3) - O(2) имеют промежуточные значения между таковыми для двойных и одинарных связей кислород-углерод, в то же время они существенно короче наблюдаемых в родственных о-семихиноновых производных магния [31, 32]. Производное III характеризуется схожим распределением заряда в органическом лиганде, однако усредение связей и, следовательно, делокализация выражена в несколько меньшей степени. Так, связи O(1)–C(1) и O(6) - C(10) немного длиннее соответствующих O(2)-C(3) и O(5)-C(8), а в хиноидном кольце связи C(1)-C(2) и C(8)-C(9) немного короче, чем С(3)-С(2) и С(10)-С(9). Такая делокализация электронной плотности характерна для анилатных лигандов, выполняющих мостиковую функцию в металлокомплексах. Вышеописанное распределение длин связей в дианионном фрагменте pQ²⁻ кардинальным образом отличается от наблюдаемого для моноядерного комплекса трифенилсурьмы(V) [20], для которого обнаружен четковыраженный о-хиноидный тип альтернирования длин связей С-С и С-О в редокс-активном лиганде.

Длины связей Mg–O с анилатными лигандами практически выравнены и находятся в интервале 2.04–2.07 Å, что не превышает суммы ковалентных радиусов соответствующих элементов (2.24 Å) [33]. Характерно, что координация нейтральных донорных лигнадов (DMF в I и NMP в III) характеризуется длинами связей магний–кислород, сопоставимыми с Mg–O(pQ). Это свидетельстует об образовании прочных координационных связей, которые, как показал TГА, разрушаются при достаточно высоких температурах.

Термическая стабильность МОКП I–III была оценена методами ТГА и ДСК (рис. 4). Согласно данным этих методов для МОКП I, в температурном интервале $120-220^{\circ}$ С происходит декоординация 1.5 молекул DMF с атома металла, при этом потеря массы составляет 26%. При дальнейшем нагревании до 330°С происходит отщепление оставшегося DMF (0.5 молекулы), а также трансформация лиганда рQ^{2–} с отрывом двух молекул изобутилена за счет деструкции *трет*-бутильных заместителей, суммарная потеря массы 34%. В дальнейшем происходит окончательное разложе-



Рис. 1. Вид линейной структуры МОКП I и III вдоль оси *а*.

ние полимера. Для МОКП II наблюдается аналогичное поведение при нагревании, отличие заключается в том, что в температурном интервале 120-190°С происходит декоординация лишь одной молекулы DMAA, потеря массы – 20%. Нагревание до 350°С приводит к отщеплению еще одной молекулы DMAA с атома магния, а также к деструкции органического лиганда, аналогично соединению І. Потеря массы на второй ступени кривой ТГА для II составляет 44%. По данным ТГА, МОКП III содержит окклюдированный растворитель, который удаляется из образца в температурном интервале от 50 до 100°С (потеря массы 10% соответствует 0.5 молекулы NMP). Вторая ступень на кривой ТГА (120-200°С, потеря массы 19%) соответствует удалению одной координированной молекулы растворителя с атома магния. Дальнейшее нагревание приводит к удалению оставшейся координированной молекулы NMP, а также к деструкции органического лиганда аналогично соединениям I и II. Потеря массы на третьей ступени кривой ТГА составляет 38%.

Координационные полимеры I–III не растворимы в воде и органических растворителях. Поэтому ЭСП в УФ-видимом диапазоне исследуемых МОКП магния зарегистрированы для суспензий в минеральном масле и представлены на рис. 5. В спектрах всех соединений наблюдаются интенсивные полосы при 310–320 и 335–345 нм, а также широкие полосы поглощения в более длинноволновой области спектра при $\lambda \approx 500$ нм (515 (I), 510 (II), 490 нм (III)). Такой характер



Рис. 2. Строение повторяющегося звена координационного полимера І.

ЭСП наблюдался ранее в лантанидных 2D-МОКП на основе этого анилатного лиганда [23].

Полученные спектральные характеристики находятся в хорошем соответствии с результатами квантово-химических расчетов, которые были выполнены на уровне B3LYP/6-311+(d,p). Для расчетов было выбрано мономерное звено соединения I в экспериментальной геометрии – дважды заряженный катион [(H₂O)₂L₂(Mg-pQ)MgL₂(H₂O)₂]²⁺, в котором на позициях кислородных атомов мостиковых анилатных лигандов расположены молекулы воды. Граничные молекулярные орбитали в модельном дикатионе (рис. 6) локализованы на редокс-активном лиганде. При этом внутрилигандный перенос электрона B3MO–HCMO определяет длинноволновую полосу поглощения ($\lambda = 515$ нм) в ЭСП соединения I, а разница в энергиях граничных орбиталей (2.9 эВ) находится в хорошем соответствии с положением этой широкой полосы поглощения, наблюдаемой в экспериментальном спектре. При этом необходимо отметить, что мостиковый тип связывания анилатного лиганда pQ^{2-} с ионами магния в соединениях I—III сопровождается сближением граничных орбиталей на ~0.35 эВ по сравнению с комплексом сурьмы(V), в котором этот редокс-активный лиганд обладает о-хиноидной формой. Учитывая, что граничные орбитали не затрагивают молекулы координированных на магний растворителей, выводы, сделанные для комплекса I, будут справедливы и для соединений II и III.

Таким образом, в ходе проделанной работы впервые синтезированы одномерные металл-органические координационные полимеры магния, построенные на основе редокс-активного ани-

Таблина 1.	Кристаллог	пафические	ланные	парамет	ры экспе	римента и	уточнения	структур	ΙиΙ	m
таолица т.	reprotation	ραφητουκήο	gamme,	napamer	JDI JKCHC	primeiria ri	yro monnin	CIPYKIYP	1 11 1	

Папаматр	Значение				
Параметр	Ι	III			
<i>Т</i> , К	100 K				
Сингония	Моноклинная				
Пр. гр.	C2/c	$P2_{1}/c$			
a, Å	10.616(2)	12.8342(13)			
b, Å	16.897(3)	17.4410(10)			
c, Å	12.483(3)	12.4170(18)			
β, град	90.858(16)	114.699(10)			
V, Å ³	2238.9(8)	2525.2(5)			
Ζ		4			
ρ(выч.), г/см ³	1.248	1.244			
μ, мм ⁻¹	0.153	0.145			
θ_{\min} - θ_{\max} , град	2.690-30.720	1.949-30.962			
Число наблюдаемых отражений	12290	38665			
Число независимых отражений	2482	5748			
<i>R</i> _{int}	0.0310	0.0778			
$S(F^2)$	1.085	1.045			
$R_1/wR_2 (I \ge 2\sigma(I))$	0.0440/0.1183	0.0533/0.1399			
R_1/wR_2 (по всем параметрам)	0.0539/0.1271	0.0802/0.1569			
Коэффициент поглощения	0.022(3)	0.0077(14)			
$\Delta \rho_{\text{max}} / \Delta \rho_{\text{min}}, e \text{ Å}^{-3}$	0.255/-0.478	0.393/-0.304			

Таблица 2. Избранные длины связей (Å) в комплексах I и III

Связь $(d, Å)$	Ι	III
Mg(1)-O(1)	2.0426(11)	2.0514(14)
Mg(1)-O(2)	2.0646(12)	2.0694(15)
Mg(1)-O(3)	2.0578(12)	2.058(5)
Mg(1)-O(4)		2.072(3)
Mg(1)-O(5)		2.0458(14)
Mg(1)–O(6)		2.0749(15)
O(1)–C(1)	1.2662(18)	1.270(2)
O(2)–C(3)	1.2635(18)	1.256(2)
O(5)-C(8)		1.267(2)
O(6)-C(10)		1.261(2)
C(1)–C(2)	1.409(2)	1.392(3)
C(1)–C(3)	1.553(2)	1.555(2)
C(2)–C(3)	1.405(2)	1.411(2)
C(8)–C(9)		1.399(3)
C(8)–C(10)		1.552(2)
C(9)–C(10)		1.412(3)



Рис. 3. Строение повторяющегося звена координационного полимера III.

латного лиганда — 2,5-дигидрокси-3,6-ди-*трет*бутил-*пара*-бензохинона. Согласно данным ТГА, полученные соединения обладают высокой термической стабильностью. Данные спектрального исследования и квантово-химических расчетов указывают на то, что интенсивная окраска полученных соединений обусловлена внутрилигандным переносом заряда. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены с использованием оборудования аналитического центра Института металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН. Регистра-



Рис. 4. Кривые ТГА (сплошная линия) и ДСК (пунктирная линия) для I–III.

КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ том 47 № 9 2021



Рис. 5. Электронные спектры поглощения I-III.



Рис. 6. Вид граничных орбиталей для модельного дикатиона $(H_2O)_2L_2(MgpQ)MgL_2(H_2O)_2|^{2+}$.

ция ЭСП выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Научнотехнического центра спектроскопии комбинационного рассеяния ИНЭОС РАН. Данные рентгеновской дифракции получали на рентгеновском пучке станции "Белок" Курчатовского центра синхротронного излучения в Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт".

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-04041-мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kingsbury C.J., Abrahams B.F., Auckett J.E. et al. // Chem. Eur. J. 2019. V. 25. P. 5222.
- Abrahams B.F., Dharma A.D., Dyett B. et al. // Dalton Trans. 2016. V. 45. P. 1339.
- 3. Sahadevan S.A., Monni N., Oggianu M. et al. // ACS Appl. Nano Mater. 2020. V. 3. P. 94.
- Artizzu F., Atzori M., Liu J. et al. // J. Mater. Chem. C. 2019. V. 7. P. 11207.
- Wang Y., Liu X., Li X. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2019. V. 141. P. 8030.
- 6. Chang C.-H., Li A.-C., Popovs I. et al. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 23770.
- Bondaruk K., Hua C. // Cryst. Growth Des. 2019. V. 19. P. 3338.
- Calbo J., Golomb M.J., Walsh A. // J. Mater. Chem. A. 2019. V. 7. P. 16571.
- 9. Wang M., Dong R., Feng X. // Chem. Soc. Rev. 2021. https://doi.org/10.1039/d0cs01160f
- 10. Martínez-Hernández C., Gómez-Claramunt P., Benmansour S. et al. // Dalton Trans. 2019. V. 48. P. 13212.
- Liu L., DeGayner J. A., Sun L. et al. // Chem. Sci. 2019. V. 10. P. 4652.
- 12. Chen J., Sekine Y., Komatsumaru Y. S. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2018. V. 57. P. 12043.
- Mercuri M.L., Congiu F., Concas G. et al. // Magnetochemistry. 2017. V. 3. P. 1.
- Benmansour S., Gómez-García C.J. // Polymers. 2016. V. 8. P. 89.

- 15. *Huang Z., Yu H., Wang L. et al.* // Coord. Chem. Rev. 2021. V. 430. P. 213737.
- 16. *Kitagawa S., Kawata S. //* Coord. Chem. Rev. 2002. V. 224. P. 11.
- 17. *D'Alessandro D.M.* // Chem. Commun. 2016. V. 52. P. 8957.
- Benmansour S., Gómez-García C.J. // Magnetochemistry. 2020. V. 6. P. 71.
- 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. № 2. P. 233).
- Охлопкова Л.С., Поддельский А.И., Смолянинов И.В. и др. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 6. С. 340 (Okhlopkova I.S., Poddel'sky A.I., Fukin G.K. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. № 6. Р. 386). https://doi.org/10.31857/S0132344X20050059
- 21. *Min K.S., DiPasquale A.G., Rheingold A.L. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 131. P. 6229.
- 22. Min K.S., DiPasquale A., Rheingold A.L. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2007. V. 46. P. 1048.
- 23. Kharitonov A.D., Trofimova O.Y., Meshcheryakova I.N. et al. // CrystEngComm. 2020. V. 22. P. 4675.
- Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. Wallingford (CT, USA): Gaussian, Inc., 2013.
- 25. Becke A.D. // J. Chern. Phys. 1993. V. 93. P. 1372.
- Svetogorov R.D., Dorovatovskii P.V., Lazarenko V.A. // Cryst. Res. Technol. 2020. V. 55. P. 1900184.
- 27. Kabsch W. // Acta Crystallogr. D. 2010. V. 66. P. 125.
- 28. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
- 29. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339.
- 30. *Turner M.J., McKinnon J.J., Wolff S.K. et al.* CrystalExplorer17. The University of Western Australia, 2017.
- Пискунов А.В., Малеева А.В., Богомяков А.С. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2017. № 9. С. 1618 (*Piskunov A.V., Maleeva A.V., Bogomyakov A.S. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2017. V. 66. Р. 1618).
- Пискунов А.В., Ладо А.В., Абакумов Г.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2007. № 1. С. 92 (*Piskunov A.V., Lado A.V., Abakumov G.A. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2007. V. 56. № 1. Р. 97).
- Бацанов С.С. // Журн. неорган. химии. 1991. Т. 36. С. 3015 (*Batsanov S.S.* // Russ. J. Inorg. Chem. 1991. V. 36. P. 1694).