

УДК 546.732:548

ПОЛИЯДЕРНЫЕ МИРТЕНАТЫ Со(II) С 2,4-ЛУТИДИНОМ

© 2019 г. Е. Н. Зорина-Тихонова^{1,*}, Г. Г. Александров¹, М. А. Кискин¹,
Л. Л. Фролова^{2, **}, А. В. Кучин², А. А. Сидоров¹, И. Л. Еременко¹

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

²Институт химии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*e-mail: kamphor@mail.ru

**e-mail: frolova-ll@chemi.komisc.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 15.05.2019 г.

Принята к публикации 20.05.2019 г.

Взаимодействие хлорида кобальта(II) с миртенатом калия (КМуг) с последующим добавлением 2,3-лутидина в этаноле приводит к образованию трехъядерного соединения $[\text{Co}_3(\text{Mug})_6(2,4\text{-Lut})_2]$ (I). Центральный атом кобальта(II) связан с каждым из двух других атомов металла тремя анионами миртеновой кислоты. Взаимодействие раствора соединения I с миртенатом лития (LiMug) приводит к формированию четырехъядерного гетерометаллического комплекса состава $[\text{Li}_2\text{Co}_2(\text{Mug})_6(2,4\text{-Lut})_2]$ (II). В соединении II можно выделить два биядерных фрагмента $\{\text{LiCo}(\text{Mug})_3(2,4\text{-Lut})\}$, в которых атомы лития(I) связаны с атомами кобальта(II) тремя мостиковыми миртенатными анионами. Атомы лития связаны двумя атомами кислорода анионов кислоты. Соединения I, II охарактеризованы данными PCA (CIF files CCDC № 1898096 (I), 1898097 (II)).

Ключевые слова: карбоксилатные комплексы кобальта(II), миртеновая кислота, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.1134/S0132344X19100098

Среди многочисленных представителей полиядерных карбоксилатов с атомами двухвалентных $3d$ -металлов, простейшими и наиболее распространенными являются биядерные соединения с металлофрагментом $\{\text{M}(\mu\text{-O}_2\text{CR})_4\text{M}\}$ [1–6] и линейные трехъядерные с металлофрагментом $\{\text{M}(\mu\text{-O}_2\text{CR})_3\text{M}(\mu\text{-O}_2\text{CR})_3\text{M}\}$ [7–16]. Эти металлофрагменты достаточно типичны для слоистых и каркасных полимеров с анионами дикарбоновых и поликарбоновых кислот [17–23]. Такие системы в зависимости от природы металлоцентров весьма активно изучаются различными исследователями из-за их катализической активности, проявляемых ими магнитных и оптических характеристик или биологической активности [1, 4, 13–15, 18]. Для получения молекулярных систем используются аддукты таких простейших би- и трехъядерных фрагментов с различными нейтральными органическими донорными молекулами, причем существуют различные подходы к управлению строением металлоострова в таких структурах в зависимости от геометрических и электронных свойств апикальных органических лигандов [1–3]. Другим способом направленного влияния на строение металлокарбоксилатного острова может быть изменение природы заместителя при карбоксилатной группе, причем в случае

производных Со(II), Fe(II), Mn(II) и Zn(II) [7, 12] оно примерно одинаково. Сложность точного прогнозирования строения комплексов при варьировании природы заместителя в карбоксилатном анионе и возможность получения для некоторых карбоксилатных анионов двух типов комплексов (с би- и трехъядерным строением металлокарбоксилатного острова) указывает на то, что, вероятно, термодинамическая устойчивость этих би- и трехъядерных комплексов часто бывает очень близка, а некоторые из соединений могут быть достаточно устойчивыми метастабильными продуктами, в том числе метастабильными изомерами. Это можно проиллюстрировать уникальным примером, когда в кристалле существуют биядерная $[\text{Zn}_2(\text{O}_2\text{CPh})_4(\text{Py})_2]$ и трехъядерная $[\text{Zn}_3(\text{O}_2\text{CPh})_6(\text{Py})_2]$ молекулы [24]. Влияние заместителя при карбоксилатной группе можно продемонстрировать примером нафтоатных комплексов: комплекс цинка(II) с α -нафтойной кислотой (**α-HNaph**) с 2,3-лутидином (**2,3-Lut**), $[\text{Zn}_2(\alpha\text{-Naph})_4(2,3\text{-Lut})_2]$ биядерный [7], а замена кислоты на β -нафтойную (**β-HNaph**) способствует формированию линейного трехъядерного комплекса $[\text{Zn}_3(\beta\text{-Naph})_6(2,3\text{-Lut})_2]$ [16].

Несомненная аналогия с бензоатными комплексами наблюдается в случае комплексов карбоновых кислот с ненасыщенным заместителем, например с анионами кротоновой кислоты. Для цинка(II), как и в случае бензоатных комплексов, с хинолином получен биядерный [25, 26] и трехъядерный комплексы [27, 28].

В настоящей работе мы дополняем исследования по влиянию заместителя при карбоновой кислоте. Так, мы изучили способность формировать металлокарбоксилатный остов при использовании мицтенатного аниона (Myg^-), интересного тем, что он имеет двойную связь $\text{C}=\text{C}$, которая может вступать в $\pi-\pi$ -сопряжение с карбоксилатной группой, как и в случае кротонатного аниона. Однако в мицтенатном анионе атомы углерода, связанные двойной связью, принадлежат объемному бициклическому фрагменту.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Анализ методом газожидкостной хроматографии (ГЖХ) проводили на хроматографе SHIMADZU GC-2010AF, колонка HP1, детектор – пламенно-ионизационный, газ-носитель – гелий. ИК-спектр мицтеновой кислоты снимали в тонком слое на приборе IR Prestige 21 фирмы Shimadzu. Спектры ЯМР регистрировали на приборе Bruker AVANCE-II-300, рабочая частота 300 МГц (^1H) и 75 МГц (^{13}C) в CDCl_3 с использованием стандартных импульсных программ фирмы Bruker для одно- и двумерных экспериментов. Оптическое вращение определяли на автоматическом поляриметре P3002RS фирмы Kruss (Германия). ИК-спектры комплексов регистрировали на приборе PerkinElmerSpectrum 65 методом НПВО в интервале частот 4000–400 см $^{-1}$. Элементный анализ выполняли на автоматическом С, Н, N, S-анализаторе EA-3000 (EuroVector).

PCA монокристаллов комплексов I и II выполнен на дифрактометре Bruker Apex II (CCD-детектор, MoK_{α} -излучение $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор) [29]. Структуры расшифрованы прямыми методами и уточнены в полноматричном анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Атомы водорода при атомах углерода органических лигандов генерированы геометрически и уточнены в модели “наездника”. Расчеты проведены по комплексу программ SHELX-97 [30]. Кристаллографические параметры I и II приведены в табл. 1.

Полный набор рентгеноструктурных данных депонирован в Кембриджском банке структурных данных (№ 1898096 (I), 1898097 (II); deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

Для колоночной хроматографии использовали силикагель 60 (70–230 меш) фирмы Alfa-Aesar.

Тонкослойную хроматографию (ТСХ) выполняли на пластинах “Сорб菲尔”, элюенты: гексан (“х. ч.”) и диэтиловый эфир (“ч. д. а.”), проявитель 10%-ный водный раствор KMnO_4 . Для синтеза мицтеновой кислоты использовали 1(*R*)(–)-мицтенол фирмы Aldrich [α]_D –47.1 (с 1.0 EtOH), пиридин (“х. ч.”), Na_2CO_3 (“х. ч.”), MgSO_4 (“х. ч.”). Диоксид хлора (ClO_2) в виде водного раствора с концентрацией 6–7 г/л предоставлен Монди Сыктывкарским лесопромышленным комплексом.

Синтез НМуг. Через раствор (–)-мицтенола (5 г, 0.033 моль) в 50 мл пиридина при перемешивании и температуре 35–40°C пропускали газообразный диоксид хлора в течение 8–10 ч. Реакцию контролировали по ТСХ и ГЖХ. Реакционную смесь охлаждали, удаляли растворитель при пониженном давлении, остаток обрабатывали 100 мл 5%-ного водного раствора Na_2CO_3 , смесь экстрагировали Et₂O для отделения нейтральных соединений. Водный слой подкисляли 10%-ным водным раствором H_2SO_4 (“х. ч.”) и тщательно экстрагировали Et₂O. Эфирный экстракт промывали насыщенным раствором NaCl и сушили над безводным MgSO_4 . После удаления растворителя выход мицтеновой кислоты в виде густого масла темного цвета составлял 2.0–2.2 г (40–44% на исходный мицтенол). После колоночной хроматографии на SiO_2 (гексан–диэтиловый эфир (10 : 1)) получили бесцветное масло, постепенно кристаллизующееся. R_f 0.56 (гексан–диэтиловый эфир (3 : 2)), [α]_D –42.4 (с 0.4 EtOH). ИК-спектр (ν , см $^{-1}$): 3100–2500 (уш., ν , OH), 1690 (C=O), 1630 (C=C), 1430, 1280 (ν , C–O), 1080, 960 (OH), 790, 760, 720. ЯМР ^{13}C (δ , м.д.): 171.8 (C10), 139.8 (C2), 139.3 (C3), 40.8 (C1), 40.2 (C5), 37.6 (C6), 32.3 (C4), 31.2 (C7), 25.8 (C8), 20.9 (C9). ЯМР ^1H (δ , м.д.): 0.80 (с., 3H, C8), 1.12 (д., 1H, $J = 9.1$, C7 β), 1.34 (с., 3H, C9), 2.13 (д. д. д., 1H, C5, $J^1 = 5.7$, $J^2 = 2.9$, $J^3 = 1.5$), 2.45 (д.д., 1H, C4 β , $J^1 = 13.5$, $J^2 = 2.9$), 2.46 (д., 1H, C4 α , $J = 13.5$) 2.48 (д., 1H, $J = 9.1$, C7 α), 2.79 (т.д., 1H, $J^1 = 1.5$, $J^2 = 5.7$, C1), 6.99 (м., 1H, $J = 1.5$, C3), 12.10 (уш., 1H, COOH).

Синтез комплексов I и II проводили на воздухе с использованием этилового спирта (96%), ацетонитрила (99%) и коммерчески доступных реагентов: $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (“ч. д. а.”), 2,4-лутидин (>99%), KOH (“ч. д. а.”), LiOH (“ч. д. а.”). Для получения координационных соединений использовали мицтеновую кислоту с разной оптической чистотой ((–37°)–(–42.4°)). Выше приведен синтез кислоты по оптимальной методике с использованием оптически чистого исходного мицтенола.

Синтез $[\text{Co}_3(\text{Myg})_6(2,4\text{-Lut})_2]$ (I). Навески KOH (0.047 г, 8.4 ммоль) и НМуг (0.1395 г, 8.4 ммоль) растворяли в этаноле (30 мл), затем добавляли

Таблица 1. Кристаллографические параметры и детали уточнения структур I и II

Параметр	Значение	
	I	II
Брутто-формула	$C_{74}H_{96}N_2O_{12}Co_3$	$C_{78}H_{102}N_4O_{12}Co_2Li_2$
M	1382.32	1419.38
T , К	184(2)	184(2)
Сингония	Триклинная	Моноклинная
Пр. гр.	$P\bar{1}$	$P2_1$
a , Å	11.619(3)	10.8075(14)
b , Å	12.325(3)	18.449(2)
c , Å	13.635(3)	18.927(3)
α , град	111.380(3)	90
β , град	100.092(4)	96.460(2)
γ , град	92.950(4)	90
V , Å ³	1775.9(7)	3749.8(8)
Z	1	2
ρ (выч.), г см ⁻³	1.293	1.257
μ , мм ⁻¹	0.753	0.504
θ_{\max} , град	29.13	28.28
T_{\min}/T_{\max}	0.929/0.956	0.942/0.951
Число измеренных рефлексов	19954	28286
Число независимых рефлексов	9493	15479
Число рефлексов с $I > 2\sigma(I)$	5756	11664
R_{int}	0.0568	0.058
Число уточняемых параметров	648	883
GOOF	1.39	1.07
R_1 ($I > 2\sigma(I)$)	0.124	0.057
wR_2 ($I > 2\sigma(I)$)	0.378	0.129
Остаточная электронная плотность (min/max), $e/\text{\AA}^3$	-3.833/1.003	-0.436/0.682

$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ (0.1 г, 4.2 ммоль) и 2,4-лутидина (0.064 мл, 6.3 ммоль). Полученную реакционную смесь фиолетового цвета перемешивали в течение 30 мин, фильтровали от выпавшего KCl и выдерживали при комнатной температуре. Образовавшиеся через 24 ч фиолетовые кристаллы, пригодные для PCA, отделяли от маточного раствора декантацией, промывали холодным EtOH и сушили на воздухе. Выход соединения I 0.110 г (57% на исходное количество кобальта(II)).

Найдено, %: C 64.45; H 7.01; N 2.75.
Для $C_{74}H_{96}N_2O_{12}Co_3$
вычислено, %: C 64.30; H 7.00; N 2.03.

ИК-спектр (НПВО; ν , cm^{-1}): 2982 сп, 2915 сп, 2881 сп, 2822 сл, 1680 сл. ш, 1631 сп, 1622 сп, 1578 сп,

1516 сп, 1494 сп, 1400 с, 1387 с, 1365 сп, 1330 с, 1321 с, 1300 сп, 1266 сп, 1238 сп, 1216 сп, 1202 сп, 1177 сп, 1150 сп, 1123 сл, 1096 сп, 1079 сп, 1055 сп, 1037 сп, 1027 сп, 966 сп, 949 сп, 926 сп, 889 сп, 847 сп, 833 сп, 807 сп, 761 с, 734 сп, 726 сп, 633 сп, 594 сп, 539 сп.

Синтез $[Li_2Co_2(My)_6(2,4-Lut)_2]$ (II). К реакционной смеси, полученной при синтезе I после фильтрации KCl приливали раствор смеси LiOH (0.010 г, 4.2 ммоль) и НМуг (0.070 г, 4.2 ммоль) в этаноле (15 мл). Полученный фиолетовый раствор концентрировали при температуре 80°C до 20 мл, после охлаждали до комнатной температуры и выдерживали 24 ч. Образовавшиеся кристаллы фиолетового цвета, пригодные для PCA, промывали холодным ацетонитрилом (-5°C) и высушивали на воздухе. Выход соединения II

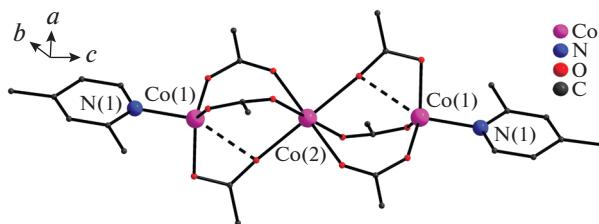


Рис. 1. Молекулярное строение комплекса I (атомы водорода и циклические фрагменты аниона мильтеновой кислоты не показаны).

0.128 г (43% на исходное количество кобальта(II)).

Найдено, %: C 65.48; H 7.16; N 4.34.

Для C₇₈H₁₀₂N₄O₁₂Li₂Co₂

вычислено, %: C 66.00; H 7.24; N 3.95.

ИК-спектр (НПВО; ν , см⁻¹): 2982 ср, 2935 ср, 2910 ср, 2883 ср, 2823 сл, 1634 ср, 1622 ср, 1590 с, 1554 с, 1491 ср, 1443 ср, 1395 с, 1366 ср, 1333 ср, 1315 с, 1297 ср, 1265 ср, 1235 сл, 1220 ср, 1200 ср, 1175 ср, 1149 сл, 1102 сл, 1091 ср, 1079 ср, 1057 ср, 1026 ср, 967 ср, 958 ср, 949 сл, 923 сл, 890 ср, 858 сл, 830 ср, 823 ср, 809 ср, 766 с, 728 ср, 632 ср, 604 ср, 592 ср, 540 ср.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мильтеновая кислота – производное широко распространенных в природе оптически активных бициклических монотерпенов α - и β -пиненов. В данной работе она получена окислением коммерчески доступного мильтенола диоксидом хлора (промышленный продукт, используемый для отбелки целлюлозы и очистки сточных вод) в среде пиридина. Выход кислоты после выделения через водорастворимую натриевую соль и очистки колоночной хроматографией на силикагеле составлял 35–37%.

Мы установили, что реакция хлорида кобальта(II) с мильтенатом калия (получен *in situ* взаимодействием мильтеновой кислоты и гидроксида калия) с последующим добавлением 2,3-лутидина (избыток не влияет на выход продукта) в этаноле приводила к образованию ярко-фиолетового раствора, из которого впоследствии были выделены фиолетовые кристаллы соединения I. При этом реакция раствора соединения I с мильтенатом лития в EtOH приводила к образованию ярко-фиолетового раствора, из которого при концентрировании выпадали фиолетовые кристаллы гетерометаллического комплекса II.

Согласно данным PCA комплекс I кристаллизуется в триклинической пр. гр. P $\bar{1}$, центр инверсии

совпадает с координатами центрального атома Co(2) (рис. 1). Между собой пары атомов металлов (Co \cdots Co 3.8192(11) Å) трехъядерной молекулы связаны тремя карбоксильными группами. Центральный атом Co(2) находится в октаэдрическом окружении шести атомов O мостиковых мильтенат-анионов (Co–O 2.295(5)–2.322(5) Å). Окружение атома Co(1) представляет собой тетраэдр, состоящий из трех атомов мильтенат-анионов (Co–O 1.927(5)–1.997(5) Å) и одного атома N молекул 2,4-лутидина (Co–N 2.085(5) Å). Также наблюдается формирование контакта атома Co(1) со вторым атомом O одной из мостиковых карбоксильных групп (Co(1) \cdots O(6) 2.560(5) Å).

Комплекс II кристаллизуется в моноклинной пространственной группе P2₁. В молекуле комплекса (рис. 2) можно выделить два биядерных фрагмента {LiCo(Mug)₃(2,4-Lut)} (Co \cdots Li 3.103(8), 3.134(8) Å), в которых атомы Li (Li \cdots Li 2.722(8) Å) связаны между собой через два атомами O мостиковых карбоксилатных групп, формируя зигзагообразный Co–Li–Li–Co металлоостов (углы Co–LiLi 122.0(3)°, 123.3(3)°). Геометрия центрального фрагмента Li₂O₂ близка к квадрату (Li–O 1.933(8)–1.976(8) Å, углы LiOLi 91.5(3)°, 92.9(3)°, OLiO 87.2(3)°, 88.3(3)°). Атомы кобальта и лития связаны друг с другом мостиковыми карбоксильными группами (Co–O 1.931(3)–1.963(3) Å; Li–O 1.868(8)–1.976(8) Å). Окружение каждого атома кобальта(II) достраивается до тетраэдра координацией атома N молекулы 2,4-лутидина (Co–N 2.067(4), 2.078(4) Å).

Комплекс I имеет строение, аналогичное ранее полученным комплексам с ароматическими кислотами и 2,3-лутидином [7, 8]. Можно было бы предположить, что существенную роль при формировании трехъядерной структуры играет π – π -сопряжение между O=C=O и C=C фрагментом заместителя при карбоксильной группе. Анализ структурных данных трехъядерных комплексов переходных металлов показал, что в случае анионов 2-нафтойной кислоты ориентация этих фрагментов может варьироваться от практически планарной до развернутой (торсионный угол OCC=C меняется от 5° до 73°) [7, 16]. В случае комплексов с анионами 9-антраценовой кислоты π – π -сопряжение не наблюдается (торсионный угол OCC=C меняется от 44° до 90°), что определяется взаимными стерическими напряжениями. Для сравнения также проанализированы торсионные углы в би- и трехъядерных комплексах с анионами стерически незатрудненных кротоновой и бензойной кислот, они лежат в интервалах 0°–15° [31–39] и 1°–24° [8, 40–43] соответственно. Значения торсионных углов OCC=C для вновь полученных соединений составляют 11.1(13)°–22.4(8)° для I и 2.61(4)°–17.57(3)° для II, что указывает на их близость с углами в биядер-

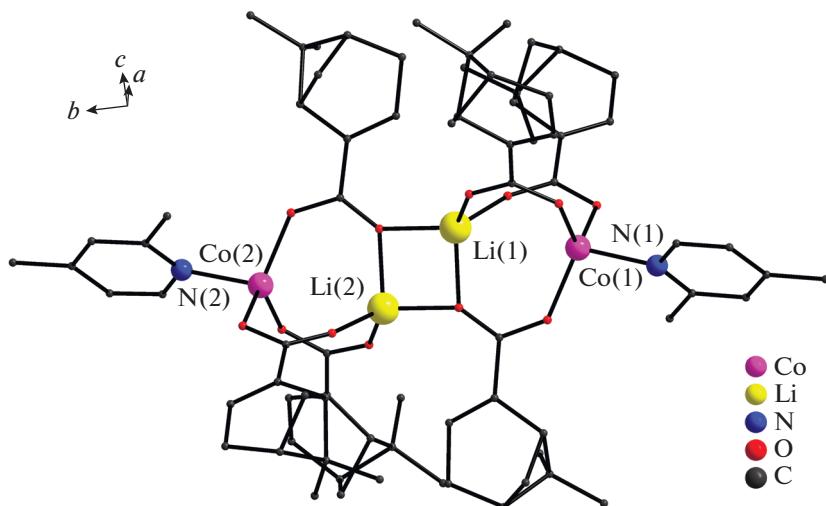


Рис. 2. Молекулярное строение комплекса II (атомы водорода не показаны).

ных комплексах с анионами кротоновой кислоты. Это показывает, что свободное вращение объемного заместителя в мицтенатном анионе не затруднено.

Образование трехъядерного комплекса I даже на фоне избытка α -замещенного пиридина показывает, что в данном случае равновесие реакции комплексообразования смешено в сторону формирования линейного трехъядерного металлокарбосилатного остова. Подобная ситуация наблюдается при переходе от бензоатных комплексов к 2-нафтоатным: в случае бензоатов Co(II) с пиридином и его монодентатными производными можно получить оба типа комплексов [8, 44, 45], а в случае 2-нафтоатов при избытке 2,3-лутидина был выделен только линейный трехъядерный комплекс [7].

Таким образом, было показано, что анион мицтеновой кислоты с кобальтом(II) в присутствии 2,3-лутидина формирует трехъядерный комплекс I и в присутствии ионов лития(I) — тетраядерный Li–Co гетерометаллический комплекс II. Анализ торсионных углов между O=C=O и C=C фрагментом заместителя при карбоксильной группе показал близость значений для вновь полученных соединений и би- и трехъядерных комплексов с анионами стерически незатрудненных кротоновой и бензойной кислот, что позволяет предположить отсутствие стericических препятствий для свободного вращения объемного заместителя в мицтенатном анионе. Это не должно препятствовать образованию как описанного трехъядерного комплекса I, так и биядерного соединения, которое выделить в виде моноцисталлов не удалось. Образование Li–Co комплекса II, аналога ранее полученных Li–M (M = Cu, Co, Ni, Zn) комплексов с анионами пивали-

новой, трет-бутилуксусной и β -нафтоной кислот [46], подтверждает слабое влияние строения и природы заместителя при карбоксилатной группе на строение металлоостова в гетерометаллических соединения 3d-металлов.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Рентгеноструктурный, спектральный и элементный анализы выполнены на оборудовании ЦКП ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомина И.Г., Доброхотова Ж.В., Кискин М.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2007. № 9. С. 1650 (Fomina I.G., Dobrokhотова Ж.В., Kiskin M.A. et al. // Russ. Chem. Bull. 2007. V. 56. № 9. P. 1712).
2. Фомина И.Г., Доброхотова Ж.В., Александров Г.Г. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2007. № 9. С. 1660 (Fomina I.G., Dobrokhотова Ж.В., Aleksandrov G.G. et al. // Russ. Chem. Bull. 2007. V. 56. № 9. P. 1722).
3. Fomina I., Dobrokhотова Zh., Aleksandrov G. // Polyhedron. 2010. V. 29. P. 1734.
4. Сидоров А.А., Фомина И.Г., Александров Г.Г. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2004. № 2. С. 446 (Sidorov A.A., Fomina I.G., Aleksandrov G.G. et al. // Russ. Chem. Bull. 2004. V. 53. № 2. P. 483).
5. Uvarova M.A., Sinelshchikova A.A., Golubnichaya M.A. et al. // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. P. 5976.

6. Пахмутова Е.В., Малков А.Е., Михайлова Т.Б. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2003. № 10. С. 2006 (*Pakhmutova E.V., Malkov A.E., Mikhailova T.B. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2003. V. 52. № 10. P. 2117).
7. Гольдберг А.Е., Кискин М.А., Николаевский С.А. и др. // Коорд. химия. 2015. Т. 41. № 3. С. 163 (*Goldberg A.E., Kiskin M.A., Nikolaevskii S.A. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2015. V. 41. № 3. P. 182). <https://doi.org/10.1134/S1070328415030021>
8. Gavrilenko K.S., Punin S.V., Cador O. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2005. V. 127. P. 12246.
9. Егоров Е.Н., Кискин М.А., Сидоров А.А., Еременко И.Л. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 8. С. 1924 (*Egorov E.N., Kiskin M.A., Sidorov A.A., Eremenko I.L.* // Russ. Chem. Bull. 2013. V. 62. № 8. P. 1924).
10. Нефедов С.Е., Денисова Т.О., Долгушин Ф.М. // Изв. АН. Сер. хим. 2002. № 12. Р. 2144 (*Nefedov S.E., Denisova T.O., Dolgushin F.M.* // Russ. Chem. Bull. 2002. V. 51. № 12. P. 2310).
11. Гольдберг А.Е., Николаевский С.А., Кискин М.А. и др. // Коорд. химия. 2015. Т. 41. № 12. С. 707 (*Goldberg A.E., Nikolaevskii S.A., Kiskin M.A. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2015. V. 41. № 12. P. 777). <https://doi.org/10.1134/S1070328415120015>
12. Bu X.-H., Tong M.-L., Xie Y.-B. et al. // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 9837.
13. Lehleh A., Beghidja A., Beghidja C. et al. // C. R. Chimie. 2015. V. 18. P. 530.
14. Bu X.-H., Tong M.-L., Xie Y.-B. et al. // Inorg. Chem. 2005. V. 44. P. 9837.
15. Smolková R., Zeleňák V., Gyepes R. et al. // Polyhedron. 2018. V. 141. P. 230.
16. Гольдберг А.Е., Кискин М.А., Сидоров А.А., Еременко И.Л. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 5. С. 829 (*Goldberg A.E., Kiskin M.A., Sidorov A.A., Eremenko I.L.* // Russ. Chem. Bull. 2011. V. 60. № 5. P. 849).
17. Xu M.-L., Zhou R., Wang G.-Y., Ng S.W. // Acta Crystallogr. E. 2008. V. 64. P. m710.
18. Wang J.-J., Zhang R.-C., Cao Y.-L. et al. // New J. Chem. 2018. V. 42. P. 3551.
19. H. Chun. // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 800.
20. Li Q., Yu P., Luo J., Qi C. et al. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2017. V. 643. P. 166.
21. Yao Q., Sun J., Li K., Su J. et al. // Dalton Trans. 2012. V. 41. P. 3953.
22. Zhang Z., Nguyen H.T.H., Miller S.A et al. // J. Am. Chem. Soc. 2016. V. 138. № 3. P. 920.
23. Chun H., Bak W., Hong K., Moon D. // Cryst. Growth Des. 2014. V. 14. № 4. P. 1998.
24. Karmakar A., Sarma R.J., Baruah J.B. // Inorg. Chem. Commun. 2006. V. 9. P. 1169.
25. Clegg W., Little I.R., Straughan B.P. // Dalton Trans. 1986. P. 1283.
26. Clegg W., Hunt P.A., Straughan B.P. // Acta Crystallogr. C. 1995. V. 51. P. 613.
27. Clegg W., Little I.R., Straughan B.P. // Chem. Commun. 1985. P. 73.
28. Clegg W., Little I.R., Straughan B.P. // Inorg. Chem. 1988. V. 27. P. 1916.
29. SMART (control) and SAINT (integration) Software. Version 5.0. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 1997.
30. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2008. V. 64. P. 112.
31. Wang Y.-Y., Shi Q., Shi Q.-Z. et al. // Polyhedron. 2000. V. 19. P. 891.
32. Demir S., Yolcu Z., Andac O. et al. // J. Mol. Model. 2010. V. 16. P. 1509.
33. Zhang X.-Y. // Acta Crystallogr. E. 2009. V. 65. P. m526.
34. Li X., Zhou B., Zhang J. et al. // Eur. J. Org. Chem. 2012. P. 1626.
35. Hamza F., Kickelbick G. // Macromolecules. 2009. V. 42. P. 7762.
36. Zhou C., Wang Y., Li D. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2006. P. 2437.
37. Jana S., Cormack P.A.G., Kennedy A.R., Sherrington D.C. // Mater. Chem J. 2009. V. 19. P. 3427.
38. Wang Y., Liu P., Shi Q. et al. // Chin. Sci. Bull. 2001. V. 46. P. 987.
39. Liu P., Wang Y.-Y., Li D.-S et al. // Chin. J. Chem. 2005. V. 23. P. 204.
40. Kwak H., Lee S.H., Kim S.H. et al. // Polyhedron. 2009. V. 28. № 3. P. 553.
41. Kwak H., Lee S.H., Kim S.H. et al. // Polyhedron. 2008. V. 27. № 17. P. 3484.
42. Hu D.-X., Chen P.-K., Luo F. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2007. V. 360. № 15. P. 4077.
43. Gavrilenko K.S., Gal Y.L., Cador O. et al. // Chem. Commun. 2007. P. 280.
44. Catterick J., Hursthouse M.B., Thornton P., Welch A.J. // Dalton Trans. 1977. P. 223.
45. Catterick J., Hursthouse M.B., New D.B., Thornton P. // Chem. Commun. 1974. P. 843.
46. Dobrokhotova Zh., Emelina A., Sidorov A. et al. // Polyhedron. 2011. V. 30. 132.