

УДК 546

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ КАДМИЯ(II) С N-ДОНОРНЫМИ ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ В ПРИСУТСТВИИ ОКТАДЕКАГИДРО-ЭЙКОЗАБОРАТНОГО АНИОНА

© 2023 г. В. В. Авдеева^а, *, А. С. Кубасов^а, С. Е. Никифорова^а,
Л. В. Гоева^а, Е. А. Малинина^а, Н. Т. Кузнецов^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: avdeeva.varvara@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 07.07.2023 г.

Изучен процесс комплексообразования кадмия(II) с 1-этил-2-(4-метоксифенил)азобензимидазолом (L^1), 2,2'-бипиридилем (L^2) и 1,10-фенантролином (L^3) в присутствии аниона $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-}$. Установлено, что природа органического лиганда оказывает влияние на состав и строение образующихся соединений. При проведении комплексообразования с лигандом L^1 – производным бензимидазола – получен биядерный комплекс $[CdL^1_2NO_3(\mu-NO_3)CdL^1(NO_3)_2]$ (**1**), не содержащий кластерный анион бора. В случае азаетероциклических лигандов L^2 и L^3 в зависимости от соотношения Cd : L получены гетеролептические комплексы $[CdL_2NO_3]_2[trans-B_{20}H_{18}]$ ($L = L^2$ (**2**); L^3 (**3**)) с координированными нитрат-ионами (Cd : L = 1 : 2) либо *трис*-хелатные комплексы $[CdL_3][trans-B_{20}H_{18}]$ ($L = L^2$ (**4**); L^3 (**5**)) с кластерным анионом бора в качестве противоиона (Cd : L = 1 : 3). Методом РСА установлено строение комплексов $[CdL^1_2NO_3(\mu-NO_3)CdL^1(NO_3)_2]$ (**1**) и $[Cd(L^2)_2NO_3]_2[trans-B_{20}H_{18}]$ (**2**).

Ключевые слова: кадмий(II), октадекагидроэйкозаборатный анион, азаетероциклы, производные бензимидазола

DOI: 10.31857/S0044457X23601165, EDN: YRVHUS

ВВЕДЕНИЕ

Систематическое изучение кластерных анионов бора $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 6–12$) в реакциях комплексообразования металлов [1–17] показывает, что с металлами, которые относятся к “мягким” кислотам по Пирсону (медь(I), серебро(I), свинец(II)), кластерные анионы образуют внутреннюю координационную сферу металла. В реакциях с металлами, которые относятся к “жестким” кислотам по Пирсону (железо(III), кобальт(III) и др.), *клозо*-бороводородные анионы, как правило, участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, снижая степень окисления металла. В то же время с металлами, которые относятся к промежуточным кислотам по Пирсону (железо(II), кобальт(II), никель(II) и др.), кластерные анионы бора играют роль противоионов.

Проведение реакций комплексообразования цинка(II) и кадмия(II) с кластерными анионами бора $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 10, 12$) [18–22] показывает, что данные металлы занимают “промежуточное положение” между “мягкими” кислотами и кислотами промежуточной группы. Образование комплексов с координированными кластерными анионами

обычно наблюдается в реакциях комплексообразования более мягкого кадмия(II), тогда как в соединениях цинка(II) кластерные анионы $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 10, 12$) играют в основном роль противоионов.

Известно, что *клозо*-декаборатный анион подвергается мягкому окислению в присутствии окислителей (железо(III), церий(IV)) [23–27] или при электрохимическом окислении [28] с образованием макрополиэдрического димерного кластерного аниона $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-}$. Координационная способность димерного кластера изучена в меньшей степени по сравнению с кластерами бора $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 10, 12$). Получен ряд комплексов серебра(I) и свинца(II) с органическими лигандами, которые содержат координированный макрополиэдрический кластерный анион бора [29–32]. Кроме того, известны структуры *трис*-хелатных комплексов марганца(II), железа(II), кобальта(II), никеля(II) $[MnL_3][trans-B_{20}H_{18}]$ ($L = bipy, phen$) [33–35], комплекса железа(II) $[CrFe(Cr-CH_2-NMe_2Et)_2][trans-B_{20}H_{18}]$ [36] и комплексов золота(III) $[AuLCl_2]_2[B_{20}H_{18}]$ ($L = bipy, phen$) [37]; во всех указанных соедине-

ниях кластер бора находится во внешней координационной сфере металла.

В настоящей работе впервые изучены реакции комплексообразования кадмия(II) с октадекагидроэйкозаборатным анионом в присутствии органических лигандов различной природы: 1-этил-2-(4-метоксифенил)азобензимидазола (L^1), 2,2'-бипиридила (L^2) и 1,10-фенантролина (L^3). Проанализировано влияние различных факторов (природы используемого органического лиганда и соотношения реагентов) на состав и строение полученных комплексов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все реакции проводили на воздухе. Ацетонитрил (ч. для ВЭЖХ), безводные bipy (99%) и phen (99%), гидрат $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (98%, Sigma-Aldrich) использовали без дополнительной очистки. Соединение $(Et_3NH)_2[B_{10}H_{10}]$ синтезировали из декаборана-14 по известной методике [38], $(Et_3NH)_2[B_{20}H_{18}]$ получали окислением *клозо*-декаборатного аниона водным раствором $FeCl_3$ по методике [23]. Органический лиганд 1-этил-2-(4-метоксифенил)азобензимидазол (L^1) синтезировали по методике, описанной в [18].

Синтез комплекса $[CdL_2NO_3(\mu-NO_3)CdL^1(NO_3)_2]$ (1). Первоначально смешивали растворы, содержащие $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (2.4 ммоль) и $(Et_3NH)_2[B_{20}H_{18}]$ (1.2 ммоль) в ацетонитриле (10 мл каждый). К полученному раствору добавляли раствор лиганда L^1 (4.8 ммоль) в том же объеме CH_3CN . В результате изотермического упаривания на воздухе в течение 48 ч получены красные монокристаллы комплекса **1**, подходящие для проведения рентгеноструктурного анализа, которые отфильтровывали, промывали и высушивали на воздухе. Выход ~58% по бору.

Для $C_{48}H_{48}N_{16}Cd_2O_{15}$	H	C	N	Cd
вычислено, %	3.68;	43.88;	17.06;	17.11.
Найдено, %	3.76;	43.81;	16.98;	17.19.

ИК-спектр (cm^{-1}): 1593, 1571 $\nu(CN)$; ~1451, ~1380, ~1321 $\nu(NO)$.

Синтез комплексов $[CdL_2NO_3]_2[B_{20}H_{18}]$ ($L = bipy$ (2); phen (3)). Нитрат кадмия(II) (2.4 ммоль) растворяли в ацетонитриле (15 мл). Добавляли раствор $(Et_3NH)_2[B_{20}H_{18}]$ (1.2 ммоль) в ацетонитриле (10 мл) и к полученному раствору добавляли раствор органического лиганда L (4.8 ммоль) в том же растворителе (10 мл). Полученный бесцветный реакционный раствор герметично закрывали и оставляли под тягой. Через 3–4 сут в реакционном растворе начинали образовываться кристал-

лы, которые отфильтровывали и высушивали на воздухе. Выход ~75% по бору.

Для $C_{40}H_{50}N_{10}Cd_2B_{20}O_6$ (2)	H	C	N	B	Cd
вычислено, %	3.86;	44.21;	10.74;	16.58;	17.24.
Найдено, %	3.85;	43.89;	10.91;	16.2;	17.03.

ИК-спектр (cm^{-1}): 2535, 2502 $\nu(BH)$; 1602, 1594, 1542, 1471, 1398, 1258, 1171, 1124, 1068, 1020, 968, 872, 737, 652 $\nu(bipy)$; 778 $\pi(CH)_{внеплоск.}$

Для $C_{48}H_{50}N_{10}Cd_2B_{20}O_6$ (3)	H	C	N	B	Cd
вычислено, %	4.17;	39.77;	11.60;	17.9;	18.61.
Найдено, %	4.05;	40.12;	11.52;	17.8;	18.55.

ИК-спектр (cm^{-1}): 2529, 2491 $\nu(BH)$; 1614, 1583, 1448, 1389, 1347, 1330, 1241, 1157, 1005, 870, 725, 687 $\nu(phen)$; 845, 732 $\pi(CH)_{внеплоск.}$

Синтез комплексов $[CdL_3][B_{20}H_{18}]$ ($L = bipy$ (4); phen (5)). Нитрат кадмия(II) (1.2 ммоль) растворяли в ацетонитриле (15 мл). Добавляли раствор $(Et_3NH)_2[B_{20}H_{18}]$ (1.2 ммоль) в том же растворителе (10 мл) и к полученному раствору добавляли раствор органического лиганда L (3.6 ммоль) в том же растворителе (10 мл). Полученный бесцветный реакционный раствор оставляли под тягой. Через неделю в реакционном растворе начинали образовываться кристаллы, которые отфильтровывали и высушивали на воздухе. Выход ~60%.

Для $C_{30}H_{42}N_6CdB_{20}$ (4)	H	C	N	B	Cd
вычислено, %	5.19;	44.19;	10.31;	26.52;	13.79.
Найдено, %	5.05;	43.98;	10.55;	26.1;	13.53.

ИК-спектр (cm^{-1}): 2515, 2489 $\nu(BH)$; 1608, 1590, 1542, 1471, 1398, 1260, 1168, 1124, 1068, 1020, 968, 872, 735, 675 $\nu(bipy)$; 772 $\pi(CH)_{внеплоск.}$

Для $C_{36}H_{42}N_6CdB_{20}$ (5)	H	C	N	B	Cd
вычислено, %	4.77;	48.73;	9.47;	24.37;	12.67.
Найдено, %	4.75;	48.59;	9.52;	24.3;	12.59.

ИК-спектр (cm^{-1}): 2521, 2493 $\nu(BH)$; 1614, 1582, 1447, 1390, 1346, 1330, 1242, 1157, 1007, 872, 725, 690 $\nu(phen)$; 845, 732 $\pi(CH)_{внеплоск.}$

Элементный анализ проводили на автоматическом газовом анализаторе CHNS-3 FA 1108 Elemental Analyser (Carlo Erba). Содержание бора и кадмия(II) определяли методом ICP-MS на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 Duo. Для проведения анализа образцы высушивали до постоянной массы.

Таблица 1. Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур соединений **1** и **2**

Соединение	1	2
Брутто-формула	$C_{48}H_{48}Cd_2N_{16}O_{15}$	$C_{40}H_{50}B_{20}Cd_2N_{10}O_6$
<i>M</i>	1313.82	1207.90
<i>T</i> , К	100	100.00
Сингония	Моноклинная	Триклинная
Пр. гр.	$P2_1/n$	<i>P</i>
<i>a</i> , Å	10.681(7)	8.1115(7)
<i>b</i> , Å	26.772(19)	11.8393(10)
<i>c</i> , Å	18.742(11)	13.6775(12)
β , град	90	86.194(3)
	101.423(12)	87.953(3)
	90	88.520(3)
<i>V</i> , Å ³	5253(6)	1309.4(2)
<i>Z</i>	4	1
$\rho_{расч}$, г/см ³	1.661	1.532
μ , мм ⁻¹	0.894	0.869
<i>F</i> (000)	2656.0	604.0
Излучение	MoK α ($\lambda = 0.71073$)	MoK α ($\lambda = 0.71073$)
Интервал углов 2θ , град	3.764–50	4.412–52
Отражение собрано	18429	7706
Число независимых отражений	9125	4999
	[$R_{int} = 0.0871$, $R_{sigma} = 0.1629$]	[$R_{int} = 0.0245$, $R_{sigma} = 0.0399$]
GOOF	1.072	1.033
R_1 , wR_2 по N_o	$R_1 = 0.0903$, $wR_2 = 0.1532$	$R_1 = 0.0428$, $wR_2 = 0.1115$
R_1 , wR_2 по N	$R_1 = 0.1498$, $wR_2 = 0.1735$	$R_1 = 0.0458$, $wR_2 = 0.1145$

ИК-спектры записывали на ИК-Фурье-спектрофотометре Инфралюм ФТ-02 (НПФ АП “Люмекс”, Россия); суспензия в вазелиновом масле (Aldrich), пластинки NaCl, область 4000–400 см⁻¹, разрешение 1 см⁻¹.

Анализ поверхности Хиршфельда проводили с использованием программного обеспечения Crystal Explorer 17.5 [39]. Донорно-акцепторные пары визуализировали с применением стандартного (высокого) разрешения поверхности и $d_{ном}$; поверхности отображаются в фиксированной цветовой шкале от –0.640 (красный) до 0.986 (голубой) а.е.

РСА. Наборы дифракционных отражений получены в Центре коллективного пользования ИОНХ РАН на автоматическом дифрактометре Bruker D8 Venture. Структуры расшифрованы прямым методом с последующим расчетом разностных синтезов Фурье. Все неводородные атомы ка-

тионов и атомы бора уточнены в анизотропном приближении. Неводородные атомы растворителя и экзополлиэдрического заместителя аниона уточнены в изотропном приближении. Все атомы водорода уточнены по модели наездника с тепловыми параметрами $U_{изо} = 1.2U_{экр}$ ($U_{изо}$) соответствующего неводородного атома ($1.5U_{изо}$ для СН₃-групп).

При сборе и обработке массива отражений использованы программы APEX2, SAINT и SADABS [40]. Структура расшифрована и уточнена с помощью программ комплекса OLEX2 [41].

Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и характеристики уточнения структуры приведены в табл. 1. Кристаллографические данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2268492, 2268493).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез комплексных соединений кадмия(II) проводили в ацетонитриле с использованием солей $(\text{Et}_3\text{NH})_2[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$, нитрата кадмия(II) и органических лигандов L (L^1 – 1-этил-2-(4-метоксифенил)азобензимидазол, L^2 – bipy, L^3 – phen) в качестве исходных соединений.

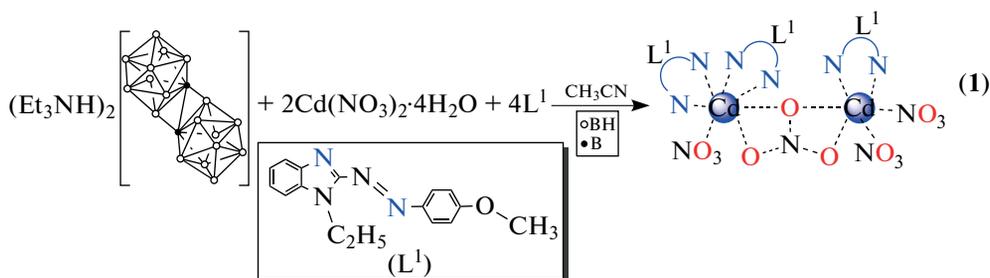


Схема 1. Синтез комплекса 1.

Кристаллографически независимая часть моноклинной элементарной ячейки комплекса **1** содержит биядерный комплекс $[\text{CdL}_2^1\text{NO}_3(\mu_2\text{-NO}_3)\text{CdL}^1(\text{NO}_3)_2]$ (рис. 1). В окружение атомов кадмия, помимо мостикового η^3 -координированного нитрат-иона, входят два лиганда L^1 и один нитрат-ион в случае Cd(1), один лиганд L^1 и два нитрат-иона в случае Cd(2). Мостиковый η^3 - μ_2 -координированный ион NO_3^- имеет крайне редко встречающийся тип координации [42–44], когда один из трех хелатирующих атомов кислорода является мостиковым для двух металлических центров.

Если принять, что нитрат-ионы занимают одно координационное место, то окружение атома Cd(1) можно представить в виде сильно искаженного октаэдра, в то время как окружение атома Cd(2) – искаженно-тетраэдрическое. Длины связей атомов кадмия с атомами азота имидазольной группы Cd–N_{imid} существенно короче, чем длины связей с атомами азота азогруппы Cd–N_{azo}, а для атома Cd(2) расстояние Cd(2)–N_{azo} составляет 3.002(8) Å (табл. 2).

Вид ИК-спектра комплекса **1** согласуется с данными рентгеноструктурного анализа. О координированном состоянии молекулы органического лиганда L^1 свидетельствует расщепление полосы валентных колебаний $\nu(\text{C}=\text{N})$ на две компоненты с максимумами при 1593 и 1571 cm^{-1} . Отметим, что в ИК-спектре некоординированного лиганда данная полоса поглощения имеет один максимум

Учитывая, что комплексы с координированным анионом $[\text{транс-}\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$, как правило, являются биядерными [29], реакцию комплексообразования кадмия(II) с L^1 в присутствии данного аниона проводили в соотношении Cd : An : L = 2 : 1 : 4. В результате получен биядерный комплекс $[\text{CdL}_2^1\text{NO}_3(\mu\text{-NO}_3)\text{CdL}^1(\text{NO}_3)_2]$ (**1**), не содержащий кластерный анион бора (схема 1).

при 1598 cm^{-1} [18]. Учитывая, что в структуре комплекса **1** нитрат-анионы координированы двумя различными способами (в качестве мостикового и концевой лиганда), в ИК-спектре наблюдается интенсивная уширенная полоса поглощения с тремя максимумами при 1451, 1380 и 1321 cm^{-1} .

Следует отметить, что при проведении аналогичной реакции комплексообразования кадмия(II) с данным органическим лигандом в присутствии *клиззо*-декаборатного аниона получен мооядерный комплекс $[\text{Cd}(L^1)_2(\text{NO}_3)_2]$, также не содержащий кластерный анион бора [18]. Вероятно, природа исходных реагентов (исходя из концепции Пирсона, кадмий(II) – “промежуточная” кислота Льюиса, органический и неорганический лиганд – “мягкие” основания Льюиса), а также стерический фактор обуславливают путь данных реакций комплексообразования. Использование объемного лиганда L^1 приводит к тому, что присутствующие в реакционном растворе нитрат-анионы становятся более предпочтительными основаниями по сравнению с объемными “мягкими” кластерными анионами бора при формировании координационного полиэдра кадмия(II).

Исходя из полученного результата, аналогичную реакцию комплексообразования кадмия(II) проводили с использованием азогетероциклических лигандов bipy (L^2) и phen (L^3). В результате реакций получены гетеролептические комплексы $[\text{CdL}_2\text{NO}_3]_2[\text{транс-}\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ (L = L^2 (**2**); L^3 (**3**)):

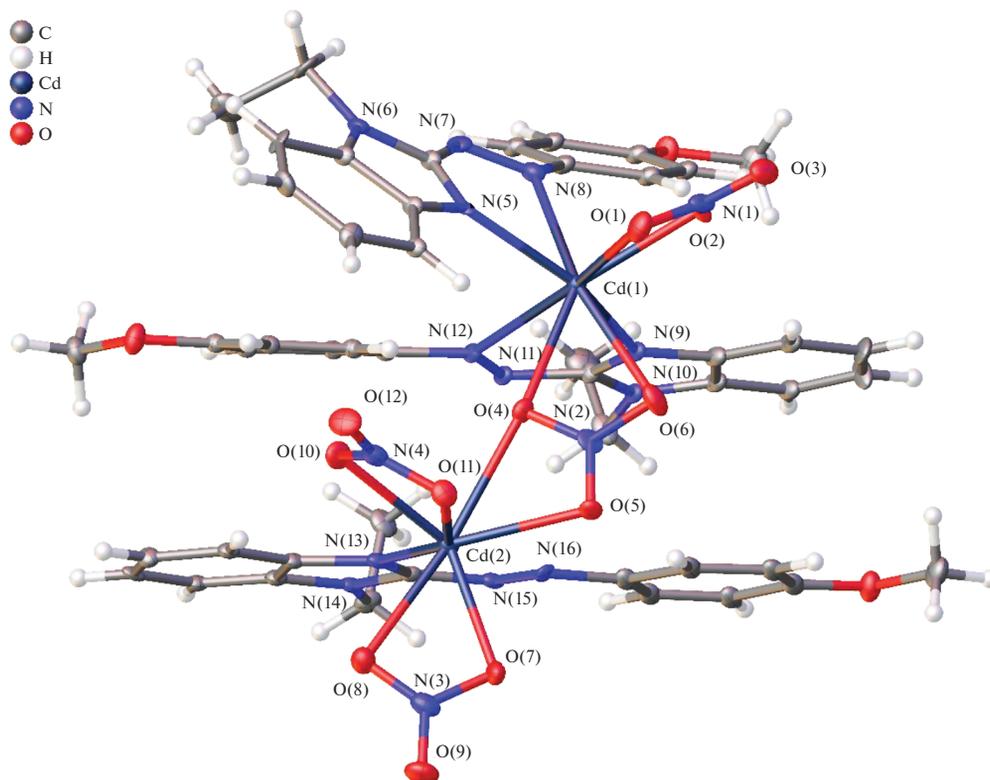


Рис. 1. Строение биядерного комплекса 1.

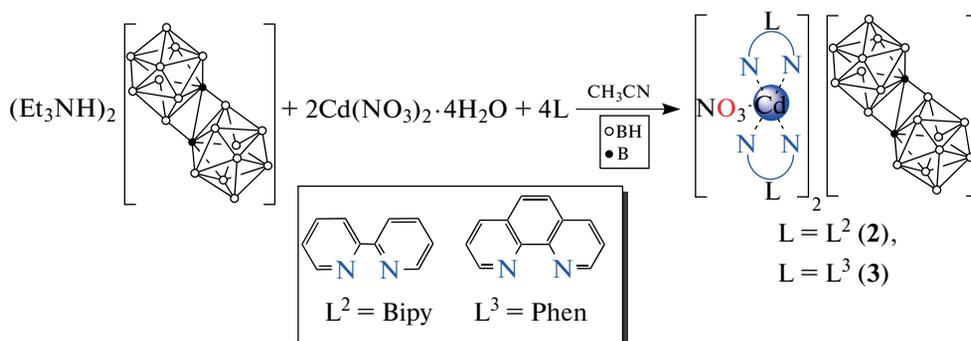
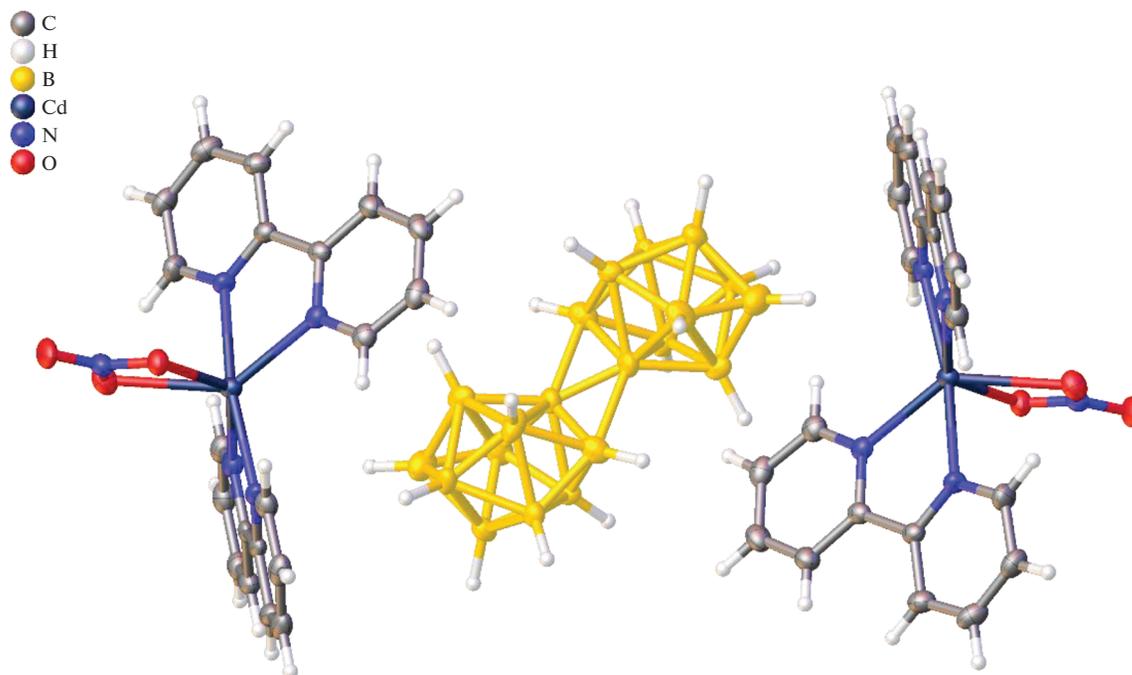


Схема 2. Синтез соединений 2 и 3.

Таблица 2. Некоторые длины связей в структуре 1

Связь	$d, \text{Å}$	Связь	$d, \text{Å}$
Cd(1)–O(1)	2.523(8)	Cd(2)–O(4)	2.495(7)
Cd(1)–O(2)	2.330(7)	Cd(2)–O(5)	2.427(7)
Cd(1)–O(4)	2.470(7)	Cd(2)–O(7)	2.325(8)
Cd(1)–O(6)	2.615(8)	Cd(2)–O(8)	2.486(8)
Cd(1)–N(5)	2.259(8)	Cd(2)–O(10)	2.502(8)
Cd(1)–N(8)	2.621(9)	Cd(2)–O(11)	2.346(7)
Cd(1)–N(9)	2.279(9)	Cd(2)–N(13)	2.223(8)
Cd(1)–N(12)	2.652(9)		

Рис. 2. Структура комплекса **2**.

Для комплекса $[\text{Cd}(\text{L}^2)_2\text{NO}_3][\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]$ (**2**) выполнено рентгеноструктурное исследование. Кристаллографически независимая часть триклинной элементарной ячейки ($P\bar{1}$) комплекса **2** (рис. 2) содержит комплексный катион $[\text{Cd}(\text{L}^2)_2\text{NO}_3]^+$ и половину аниона $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$, который расположен в центре инверсии. Окружение атома кадмия – искаженная тригональная бипирамида, если принять, что η^2 -координированный нитрат-ион занимает одно координационное место, где атомы N(2) и N(4) двух бипиридилов – апикальные вершины пирамиды (угол N(2)Cd(1)N(4) = 169.8°). Расстояния Cd–N лежат в диапазоне 2.268(3)–2.321(3) Å, а расстояния Cd–O равны 2.363(3) и 2.465(3) Å. Углы N(3)Cd(1)N(5), N(1)Cd(1)N(2) и N(1)Cd(1)N(3) составляют 129.3(1)°, 91.1(1)° и 114.8(1)° (атом N(1) взят как центр нитрат-иона).

Анализ поверхности Хиршфельда аниона $[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в комплексе **2** (рис. 3) показал, что, в отличие от аналогичного по составу комплекса $[\text{PbL}_2\text{NO}_3]_2[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ [29], в **2** отсутствуют контакты M–HB. Это, вероятно, связано с меньшим ионным радиусом кадмия по сравнению со свинцом. В комплексе **2** анион связан с катионом исключительно за счет слабых контактов CH...HB и C...B, которые представлены на поверхности Хиршфельда аниона красными пятнами.

Анализируя полученные соединения, можно провести аналогию в химическом поведении димерного кластера $[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в реакциях комплексообразования свинца(II) и кадмия(II). В реакциях комплексообразования нитрата свинца(II) в присутствии bipy в зависимости от соотношения реагентов получены комплексные соединения с координированным и некоординированным кластерными анионами бора – $[\text{PbL}_2\text{NO}_3]_2[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ и $[\text{PbL}_4][\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ соответственно (L = bipy) [29]. Полученные данные свидетельствуют о более слабой координационной способности димерного кластерного аниона по сравнению с анионом $[\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$ в реакциях комплексообразования кадмия(II) и свинца(II), так как в комплексных соединениях данных металлов *клозо*-декаборатный анион обычно образует внутреннюю сферу [5].

Учитывая, что для металлов M(II) известен ряд *трис*-хелатных комплексов $[\text{ML}_3][\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]$ (M = Fe(II), L = bipy; M = Ni(II), Co(II), L = phen) [35], реакция комплексообразования кадмия(II) с макрополиэдрическим анионом $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и азаетероциклическими лигандами L² и L³ проведена при соотношении Cd : An : L = 1 : 1 : 3. В результате реакций получены *трис*-хелатные комплексы $[\text{CdL}_3][\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]$ (L = L² (**4**), L³ (**5**)) (схема 3):

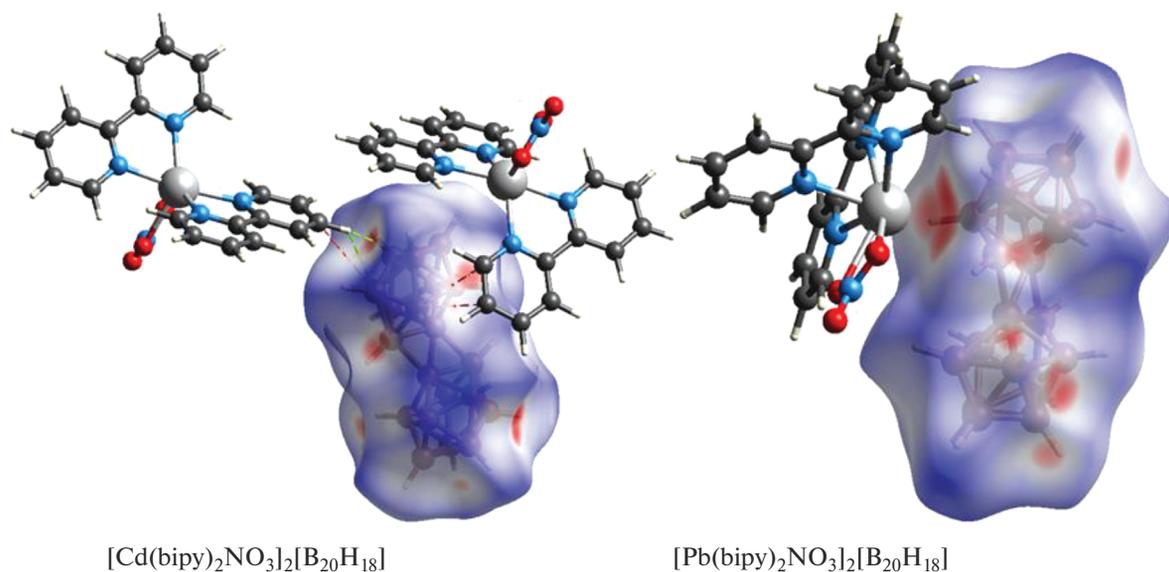


Рис. 3. Поверхности Хиршфельда аниона [B₂₀H₁₈]²⁻ в комплексах [CdL₂NO₃]₂[B₂₀H₁₈] и [PbL₂NO₃]₂[B₂₀H₁₈]. Красными пунктирными линиями изображены контакты CН...НВ, зелеными пунктирными линиями – контакты С...В.

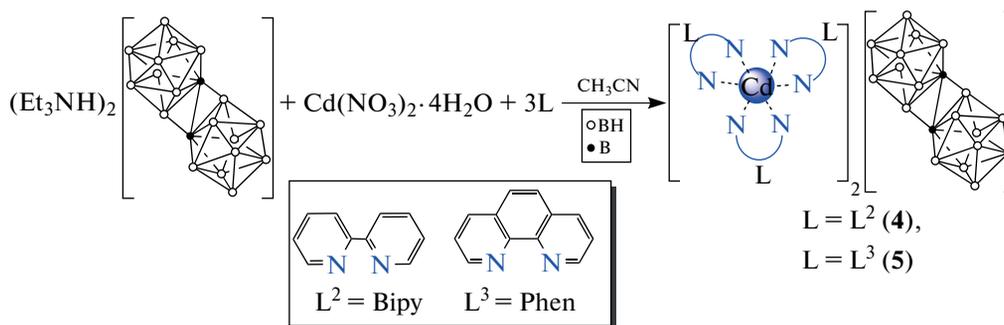


Схема 3. Синтез соединений 4 и 5.

В ИК-спектрах соединений 2–5 присутствуют полосы $\nu(\text{NH})$ в области 2500 см^{-1} , а также полный набор полос поглощения, соответствующий координированному органическому лиганду L. Кроме того, в спектре комплексов 2 и 3 имеется уширенная полоса валентных колебаний $\nu(\text{NO})$ нитрат-анионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования изучены реакции комплексообразования кадмия(II) с димерным кластерным анионом бора [*транс*-B₂₀H₁₈]²⁻ в присутствии органических лигандов L различной природы: (1-этил-2-(4-метоксифенил)азобензимидазол (L¹), bipy (L²), phen (L³)). Установлено, что природа используемого органического лиганда оказывает влияние на ход реакции комплексообразования. Показано, что в случае лиганда L¹ – производного бензимидазола – невозмож-

но получить координационное соединение, содержащее анион [*транс*-B₂₀H₁₈]²⁻. В случае азогетероциклических лигандов L² и L³ показано влияние соотношения реагентов на состав и строение полученных комплексных соединений. Так, при соотношении M : L = 1 : 2 получены гетеролептические комплексы [CdL₂NO₃]₂[*транс*-B₂₀H₁₈] (L = L² (2); L³ (3)), при трехкратном избытке лиганда – *трис*-хелатные комплексы [CdL₃][*транс*-B₂₀H₁₈] (L = L² (4); L³ (5)). Для комплексов [CdL₂NO₃(μ-NO₃)CdL¹(NO₃)₂] (1) и [Cd(L²)₂NO₃]₂[*транс*-B₂₀H₁₈] (2) проведено рентгеноструктурное исследование.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РФФ (№ 22-23-00265).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Аналитические исследования выполнены в ЦКП ФМИ ИОНХ РАН в рамках госзадания ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Boron Science: New Technologies and Applications / Ed. Hosmane N.S. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- Handbook of Boron Science: with Applications in Organometallics, Catalysis, Materials and Medicine / Eds. Hosmane N.S., Eagling R.D. Singapore: World Scientific, 2018. V. 1–4.
<https://doi.org/10.1142/q0130>
- Matveev E.Y., Avdeeva V.V., Zhizhin K.Y. et al. // *Inorganics*. 2022. V. 10. P. 238.
<https://doi.org/10.3390/inorganics10120238>
- Laila Z., Yazbeck O., Ghaida F. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2020. V. 910. P. 121132.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121132>
- Avdeeva V.V., Malinina E.A., Kuznetsov N.T. // *Coord. Chem. Rev.* 2022. V. 469. P. 214636.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214636>
- Paskevicius M., Hansen B.R.S., Jørgensen M. et al. // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. P. 15136.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15136>
- Stogniy M.Y., Bogdanova E.V., Anufriev S.A. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. P. 1537.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622600848>
- Sivaev I.B. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. P. 1854.
<https://doi.org/10.1134/S0036023620120165>
- Hu J.R., Wang J.H., Jin K.G. et al. // *Russ. J. Coord. Chem.* 2020. V. 46. P. 437.
<https://doi.org/10.1134/S1070328420060019>
- Saldin V.I., Slobodyuk A.B., Sukhovei V.V. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. P. 1012.
<https://doi.org/10.1134/S003602362207021X>
- Kubasov A.S., Matveev E.Yu., Retivov V.M. et al. // *Russ. Chem. Bull.* 2014. V. 63. P. 187.
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0412-2>
- Matveev E.Y., Novikov I.V., Kubasov A.S. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 187.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621020121>
- Fei Cheng, Frieder Jäkle // *Polym. Chem.* 2011. V. 2. P. 2122.
<https://doi.org/10.1039/C1PY00123J>
- Avdeeva V.V., Kubasov A.S., Korolenko S.E. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. P. 628.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622050023>
- Sivaev I.B. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 1289.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090151>
- Avdeeva V.V., Buzanov G.A., Goeva L.V. et al. // *Inorg. Chim. Acta.* 2019. V. 493. P. 38.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.04.055>
- Avdeeva V.V., Buzanov G.A., Malinina E.A. et al. // *Crystals*. 2020. V. 10. P. 389.
<https://doi.org/10.3390/cryst10050389>
- Korolenko S.E., Malinina E.A., Avdeeva V.V. et al. // *Polyhedron*. 2021. V. 194. P. 114902.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114902>
- Nikiforova S.E., Kubasov A.S., Goeva L.V. et al. // *Polyhedron*. 2022. V. 226. P. 116108.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.116108>
- Korolenko S.E., Avdeeva V.V., Malinina E.A., Kuznetsov N.T. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 1350.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090047>
- Korolenko S.E., Kubasov A.S., Khan N.A. et al. // *J. Clust. Sci.* 2022. V. 34. P. 933.
<https://doi.org/10.1007/s10876-022-02263-0>
- Korolenko S.E., Kubasov A.S., Goeva L.V. et al. // *Inorg. Chim. Acta.* 2021. V. 527. P. 120587.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2021.120587>
- Chamberland B.L., Muetterties E.L. // *Inorg. Chem.* 1964. V. 3. P. 1450.
<https://doi.org/10.1021/ic50020a025>
- Hawthorne M.F., Pilling R.L. // *J. Am. Chem. Soc.* 1966. V. 88. P. 3873.
<https://doi.org/10.1021/ja00968a044>
- Li F., Shelly K., Knobler C.B., Hawthorne M.F. // *Angew. Chem.* 1998. V. 37. P. 1865.
- Hawthorne M.F., Shelly K., Li F. // *Chem. Commun.* 2002. P. 547.
<https://doi.org/10.1039/B110076A>
- Curtis Z.B., Young C., Dickerson R., Kaczmarczyk A. // *Inorg. Chem.* 1974. V. 13. P. 1760.
<https://doi.org/10.1021/ic50137a046>
- Voinova V.V., Klyukin I.N., Novikov A.S. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 295.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621030190>
- Avdeeva V.V., Buzin M.I., Dmitrienko A.O. et al. // *Chem. Eur. J.* 2017. V. 23. P. 16819.
<https://doi.org/10.1002/chem.201703285>
- Avdeeva V.V., Malinina E.A., Zhizhin K.Y. et al. // *J. Struct. Chem.* 2019. V. 60. P. 692.
<https://doi.org/10.1134/S0022476619050020>
- Avdeeva V.V., Malinina E.A., Kuznetsov N.T. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. P. 335.
<https://doi.org/10.1134/S003602362003002X>
- Avdeeva V.V., Buzin M.I., Malinina E.A. et al. // *Cryst. Eng. Comm.* 2015. V. 17. P. 8870.
<https://doi.org/10.1039/C5CE00859J>
- Avdeeva V.V., Kubasov A.S., Korolenko S.E. et al. // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2022. V. 67. P. 1169.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622080022>
- Il'inchik E.A., Polyanskaya T.M., Drozdova M.K. et al. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2005. V. 75. P. 1545.
<https://doi.org/10.1007/s11176-005-0464-y>
- Avdeeva V.V., Kubasov A.S., Korolenko S.E. et al. // *Polyhedron*. 2022. V. 217. P. 115740.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2022.115740>

36. *Srivardane U., Chu S.S.C., Hosmane N.S. et al.* // Acta Crystallogr., Sect. C. 1989. V. 45. P. 333.
<https://doi.org/10.1107/S0108270188010716>
37. *Avdeeva V.V., Vologzhanina A.V., Kubasov A.S. et al.* // Inorganics. 2022. V. 10. P. 99.
<https://doi.org/10.3390/inorganics10070099>
38. *Miller H.C., Miller N.E., Muetterties E.L.* // J. Am. Chem. Soc. 1963. V. 85. P. 3885.
<https://doi.org/10.1021/ja00906a033>
39. *Spackman P.R.X., Turner M.J., McKinnon J.J. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2021. V. 54. P. 1006.
<https://doi.org/10.1107/S1600576721002910>
40. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr., Sect. C. 2015. V. 71. P. 3.
41. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
42. *Soleymani-Babadi S., Beheshti A., Bahrani-Pour M. et al.* // Cryst. Growth Des. 2019. V. 19. P. 4934.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b00038>
43. *Barnett S.A., Blake A.J., Champness M.R. et al.* // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 2001. P. 567.
<https://doi.org/10.1039/b008715g>
44. *Richards P.I., Steiner A.* // Inorg. Chem. 2004. V. 43. P. 2810.
<https://doi.org/10.1021/ic035455e>