

КООРДИНАЦИОННЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ

УДК 546.271

КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НИКЕЛЯ(II)
С АЗАГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ
И 2-ГИДРОКСИ-КЛОЗО-ДЕКАБОРАТНЫМ АНИОНОМ $[2-B_{10}H_9OH]^{2-}$

© 2021 г. Е. Ю. Матвеев^{a, b, *}, И. В. Новиков^a, А. С. Кубасов^b,
В. М. Ретивов^c, К. Ю. Жижин^{a, b}, Н. Т. Кузнецов^b

^aМИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), пр-т Вернадского, 86, Москва, 119571 Россия

^bИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия

^cНИЦ “Курчатовский институт” – ИРЕА”, Богородский Вал, 3, Москва, 107076 Россия

*e-mail: cat1983@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.2020 г.

После доработки 27.06.2020 г.

Принята к публикации 01.07.2020 г.

Исследовано взаимодействие соли $(Bu_4N)_2[2-B_{10}H_9OH]$ с хлоридом никеля(II) в присутствии азот-содержащих лигандов, в частности, 1,10-фенантролина, 2,2'-бипиридиламина, 2,2'-бипиридила и 2,6-диаминопиридина. Показано, что в ходе реакций образуются комплексные соединения никеля(II), содержащие анион $[2-B_{10}H_9OH]^{2-}$ в качестве противоиона. Синтезированные вещества исследованы методами элементного анализа, ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: бороводороды, кластерные анионы бора, клозо-декаборатный анион, комплексы никеля(II)

DOI: 10.31857/S0044457X21020124

ВВЕДЕНИЕ

Полиэдрические анионы бора $[B_nH_n]^{2-}$ представляют собой класс пространственно-ароматических неорганических структур, отличающихся термической стабильностью, устойчивостью к действию окислителей и склонностью к замещению экзополіэдрических атомов водорода на различные функциональные группы [1–7]. Производные анионов $[B_{10}H_{10}]^{2-}$ и $[B_{12}H_{12}]^{2-}$ с заместителями оксониевого типа могут выступать в качестве прекурсоров для дальнейшей модификации за счет реакций раскрытия циклического заместителя [8–11], позволяя получать производные, в том числе и с пendantsными биологически активными группами [12–17]. Серосодержащие производные кластерных анионов бора способны вступать в реакции ацилирования и алкилирования, образуя обширный круг замещенных клозо-боратов [18–20].

Клозо-боратные анионы и их замещенные производные могут выступать как в роли “мягких” лигандов в синтезе комплексных соединений металлов [21–23], так и в роли противоионов [24–28]. Такие соединения могли бы представлять ценность для расширения теоретических знаний в координационной химии бороводородов и вы-

ступать в качестве исходных соединений для дальнейшей функционализации, в том числе для получения борсодержащих материалов с заданными свойствами [29].

Цель настоящей работы – синтез и исследование комплексных соединений никеля(II) с 2-гидроксопроизводным клозо-декаборатного аниона в присутствии различных азотсодержащих лигандов: фенантролина (**phen**), 2,2'-бипиридиламина (**bpa**), 2,2'-бипиридила (**bipy**), 2,6-диаминопиридина (**dap**).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы. [2-Гидрокси]нонагидро-клозо-декаборат тетрабутиламмония $(n-Bu_4N)_2[B_{10}H_9OH]$ синтезировали по разработанной ранее методике [30]. Ацетонитрил (>99.9%, Aldrich), ДМФА (>99.9%, Aldrich), $NiCl_2$ (98%, Aldrich), 1,10-фенантролин (>99.9%, Aldrich), 2,2'-бипиридил-амин (98%, Aldrich), 2,2'-бипиридил (>99.9%, Aldrich), 2,6-диаминопиридин (98%, Aldrich) использовали без дополнительной очистки.

Методы физико-химического анализа

Элементный анализ на углерод, водород и азот осуществляли на автоматическом газовом анализаторе CHNS-3 FA 1108 Elemental Analyser (Carlo Erba). Определение бора и никеля методом ICP MS выполнено на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 6300 Duo в ЦКП “Исследовательский научно-аналитический центр НИЦ “Курчатовский институт” – ИРЕА”.

ИК-спектры синтезированных соединений записывали на ИК-Фурье-спектрометре ИНФРА-ЛЮМ ФТ-02 (НПФ АП “Люмекс”) в таблетках KBr в области 4000–300 см⁻¹ с разрешением 1 см⁻¹.

Кристаллы Ia получены изотермическим упариванием соединения [Ni(phen)₃][B₁₀H₉OH] (I) в ацетонитриле, кристаллы Ib – парофазным насыщением раствора I в смеси DMF/MeCN водой. Набор дифракционных отражений для кристаллов Ia, Ib получен в Центре коллективного пользования ИОНХ РАН на автоматическом дифрактометре Bruker APEX2 CCD (λMoK_α, графитовый монохроматор, ω–φ-сканирование). Структуры расшифрованы прямым методом с последующим расчетом разностных синтезов Фурье. Все неводородные атомы катионов 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 $U_{\text{изо}} = 1.2U_{\text{экр}} (U_{\text{изо}})$ соответствующего неводородного атома (1.5 $U_{\text{изо}}$ для CH₃-групп).

В структуре Ib была рассчитана “маска растворителя” (solvent mask) и найдено 1476 электронов в объеме 6024 Å³ в трех пустотах на элементарную ячейку, что соответствует двум молекулам DMF и четырем молекулам MeCN на кристаллографической независимую часть элементарной ячейки.

При сборе и обработке массива отражений использовали программы APEX2, SAINT и SADABS [31]. Структура расшифрована и уточнена с помощью комплекса программ OLEX2 [32].

Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и характеристики уточнения структур Ia, Ib приведены в табл. 1.

Кристаллографические данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1997920, 1997921).

Синтез комплексных соединений. К 2 мл ацетонитрила добавляли 0.48 г (0.77 ммоль) (n-Bu₄N)₂[B₁₀H₉OH], 0.10 г (0.77 ммоль) NiCl₂ и перемешивали в течение 10 мин. Далее в полученную систему добавляли раствор 1.54 ммоль азот-

содержащего лиганда (0.42 г phen, 0.40 г bra, 0.36 г biru или 0.25 г dap) в 1 мл ацетонитрила и перемешивали еще 10 мин. Путем изотермического упаривания раствора получили кристаллическое вещество с окраской от желтой до оранжевой. Для получения кристаллов, пригодных для PCA, использовали метод парофазного насыщения растворов в DMF/MeCN водой, который увенчался успехом для соединения I.

(2-Гидрокси)нонагидро-κлозо-декаборат трис(1,10-фенантролин)никеля(II) [Ni(phen)₃][B₁₀H₉OH] (I). Выход 0.44 г (78%). ИК-спектр, см⁻¹: 3633 (ν(O–H)), 2438 (ν(B–H)), 1624, 1581, 1424 (ν(C=N)), 1225 (δ(C–H)), 1148 (ν(C–O–C)), 424 (ν(Ni–N)).

	C	H	B	N	Ni
Найдено, %:	58.47;	4.61;	14.62;	11.40;	7.88.
Для C ₃₆ H ₃₄ B ₁₀ N ₆ NiO					
вычислено, %:	58.94;	4.67;	14.73;	11.46;	8.00.

(2-Гидрокси)нонагидро-κлозо-декаборат трис(2,2'-бипиридиламин)никеля(II) [Ni(bra)₃][B₁₀H₉OH] (II). Выход 0.42 г (78%). ИК-спектр, см⁻¹: 3633 (ν(O–H)), 3320, 3216, 3154 (ν(N–H)), 3026 (ν(C–H)), 2436 (ν(B–H)), 1649 (δ(N–H)), 1580 (ν(C=N)), 1144 (ν(C–O–C)), 832, 775 (δ(C–H)), 438 (ν(Ni–N)).

	C	H	B	N	Ni
Найдено, %:	50.42;	5.17;	15.17;	17.73;	8.24.
Для C ₃₀ H ₃₇ B ₁₀ N ₉ NiO					
вычислено, %:	51.00;	5.28;	15.30;	17.84;	8.31.

(2-Гидрокси)нонагидро-κлозо-декаборат трис(2,2'-бипиридил)никеля(II) [Ni(biru)₃][B₁₀H₉OH] (III). Выход 0.38 г (75%). ИК-спектр, см⁻¹: 3632 (ν(O–H)), 2438 (ν(B–H)), 1610 (ν(C=N)), 1148 (ν(C–O–C)), 1115 (ν(C–N)), 672 (ρ(C–H)_{py}), 427 (ν(Ni–N)).

	C	H	B	N	Ni
Найдено, %:	54.02;	5.12;	16.25;	12.63;	8.79.
Для C ₃₀ H ₃₄ B ₁₀ N ₆ NiO					
вычислено, %:	54.48;	5.18;	16.34;	12.71;	8.87.

(2-Гидрокси)нонагидро-κлозо-декаборат трис(2,6-диаминопиридин)никеля(II) [Ni(dap)₃][B₁₀H₉OH] (IV). Выход 0.28 г (70%). ИК-спектр, см⁻¹: 3635 (ν(O–H)), 3390, 3320, 3215 (ν(N–H)), 3115 (ν(C–H)), 2435 (ν(B–H)), 1645, 1590 (ν(C=C)), 1474

Таблица 1. Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур Ia и Ib

Соединение	Ia	Ib
Брутто-формула	$C_{37.5}H_{36.25}B_{10}N_{6.75}NiO_{1.5}$	$C_{110}H_{102}B_{30}N_{19}Ni_3O_3$
<i>M</i>	772.29	2238.53
<i>T</i> , К	296.0	296
Сингония	Триклинная	Моноклинная
Пр. гр.	$P\bar{1}$	$C2/c$
<i>a</i> , Å	11.7405(3)	55.945(6)
<i>b</i> , Å	12.3388(3)	14.1034(13)
<i>c</i> , Å	16.2613(4)	44.019(7)
α , град	108.3530(10)	90
β , град	102.6960(10)	129.402(3)
γ , град	102.5990(10)	90
<i>V</i> , Å ³	2073.51(9)	26838(6)
<i>Z</i>	2	8
$\rho_{расч}$, г/см ³	1.237	1.108
μ , мм ⁻¹	0.508	0.468
<i>F</i> (000)	797.0	9224.0
Размеры кристалла, мм	0.9 × 0.4 × 0.4	0.4 × 0.4 × 0.2
Излучение, λ, Å	MoK α ($\lambda = 0.71073$)	MoK α ($\lambda = 0.71073$)
Интервал углов 2 θ , град	4.346–56	3.478–50
Число отражений:		
измеренных	18358	108939
независимых (<i>N</i>)	9867 [<i>R</i> _{int} = 0.0471]	22817 [<i>R</i> _{int} = 0.1220]
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ по <i>N</i> ₀	0.0697, 0.2313	0.0891, 0.2409
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ по <i>N</i>	0.0786, 0.2392	0.1361, 0.2643

($\delta(N-H)$), 1147 ($\nu(C-O-C)$), 1048 ($\nu(C=N)$), 965, 952 ($\delta(C-H)$), 426 ($\nu(Ni-N)$).

	C	H	B	N	Ni
Найдено, %:	34.14;	5.93;	20.67;	24.11;	11.14.
Для $C_{15}H_{31}B_{10}N_9NiO$					
вычислено, %:	34.62;	6.01;	20.78;	24.23;	11.28.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами были изучены реакции комплексообразования соли (*n*-Bu₄N)₂[2-B₁₀H₉OH] с хлоридом никеля(II) в присутствии азотсодержащих лигандов, в частности, 1,10-фенантролина, 2,2'-бипиридиламина, 2,2'-бипиридила и 2,6-диаминопиридина. Показано, что в ходе реакций происходит образование комплексных соединений никеля(II), содержащих анион [2-B₁₀H₉OH]²⁻ в качестве противоиона (схема 1).

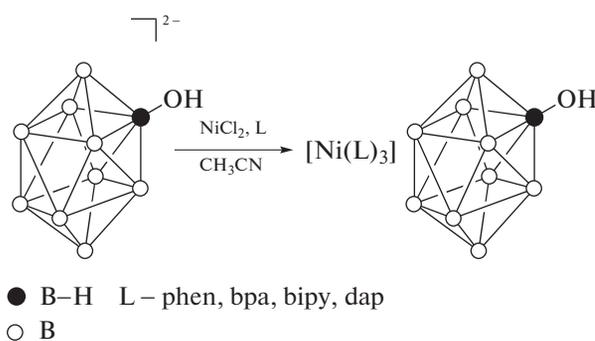


Схема 1. Взаимодействие аниона [B₁₀H₉OH]²⁻ с хлоридом никеля(II) в присутствии азотсодержащих лигандов.

Исследование строения полученных соединений проводили на основании данных ИК-спектроскопии и РСА. В ИК-спектрах продуктов реакций наблюдаются характерные изменения, позволяющие судить об образовании комплексных соединений никеля(II). Так, в спектре комплексно-

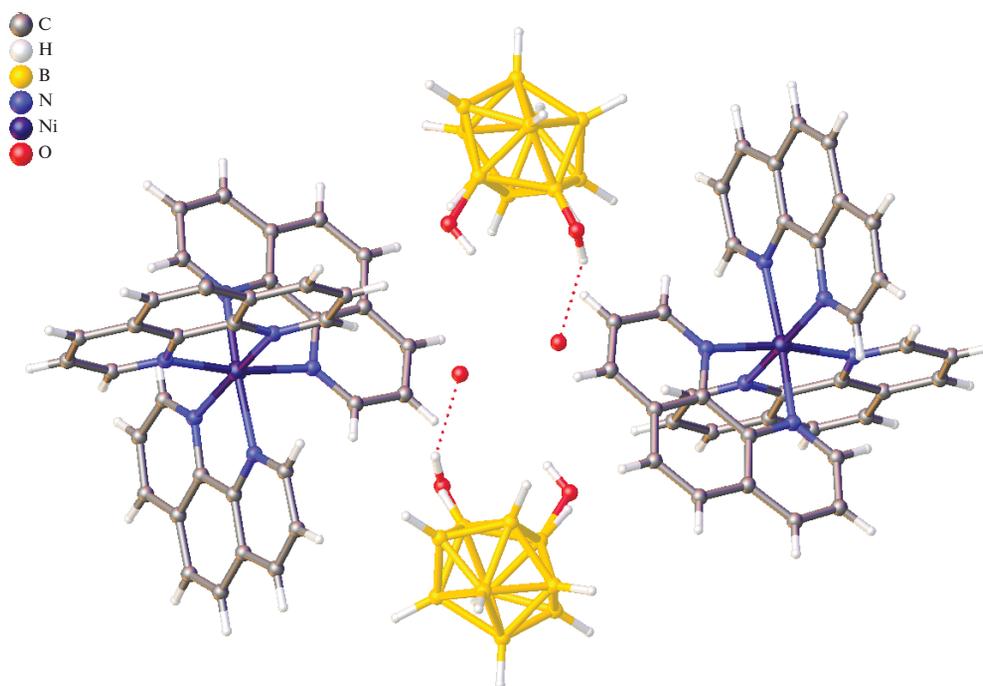


Рис. 1. Элементарная ячейка соединения Ia (молекулы ацетонитрила не показаны).

го соединения I присутствуют полосы поглощения при 1624, 1581, 1424 ($\nu(\text{C}=\text{N})$) и 1225 cm^{-1} ($\delta(\text{C}-\text{H})$), которые относятся к гетероциклическому лиганду. Они заметно смещены по сравнению с аналогичными полосами поглощения в спектре чистого 1,10-фенантролина. Кроме того, в спектре I присутствует интенсивная полоса поглощения при 424 cm^{-1} , которую можно отнести к валентным колебаниям связи Ni–N [33]. Интересные изменения происходят также в спектрах комплексов с азотсодержащими лигандами, содержащими связи N–H. Например, в спектре соединения II присутствуют полосы поглощения при 3320–3154 ($\nu(\text{N}-\text{H})$) и 1649 cm^{-1} ($\delta(\text{N}-\text{H})$), в то время как аналогичные полосы поглощения в спектре 2,2'-бипиридиламина находятся при 3258–3180 и 1610 cm^{-1} ($\delta(\text{N}-\text{H})$) соответственно. В спектрах соединений I–IV присутствуют полосы поглощения при 3385–3375 ($\nu(\text{O}-\text{H})$) и 2452–2459 cm^{-1} ($\nu(\text{B}-\text{H})$), по значениям они практически не отличаются от таковых в спектре исходного соединения $(\text{Bu}_4\text{N})_2[2-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{OH}]$. Все это позволяет полагать, что продукты I–IV представляют собой комплексные соединения никеля(II) с гетероциклическими лигандами, а *клозо*-декаборат не входит в координационную сферу и выполняет роль противоиона.

По данным ^{11}B ЯМР-спектроскопии, спектры координационных соединений практически идентичны спектрам исходного аниона $[2-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{OH}]^{2-}$ [34]. Это наряду с данными ИК-спектроскопии

дало нам основания полагать, что борный кластер непосредственно не вовлекается в протекающие реакции.

Строение комплекса I было установлено методом РСА. Кристаллографически независимая часть триклинной элементарной ячейки (рис. 1) кристалла Ia содержит комплексный катион $[\text{Ni}(\text{phen})_3]^{2+}$, анион $[\text{B}_{10}\text{H}_9\text{OH}]^{2-}$, 0.75 молекулы MeCN и половину молекулы воды (протоны молекулы воды были исключены из уточнения). Гидроксигруппа аниона разупорядочена по двум позициям с заселенностью 0.5 : 0.5. В элементарной ячейке два аниона располагаются между двумя катионами и связаны между собой водородными связями $\text{B}_{10}\text{H}_9\text{OH}\dots\text{O}(\text{H}_2)\dots\text{NOB}_{10}\text{H}_9$. Аналогично подобным комплексам с анионами $[\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$ и $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$ [28] в координационную сферу никеля входят три практически перпендикулярные молекулы фенантролина, образуя немного искаженное октаэдрическое окружение центрального атома из шести атомов азота. Длины связей Ni–N лежат в диапазоне 2.087(3)–2.105(3) Å.

В кристалле два связанных водородными связями аниона располагаются между четырьмя катионами $[\text{Ni}(\text{phen})_3]^{2+}$, образующими каналы, в которых расположены сольватные разупорядоченные молекулы растворителя. Еще одна часть молекул MeCN располагается в пустотах, расположенных между анионными парами $[\text{B}_{10}\text{H}_9\text{OH}\dots\text{O}(\text{H}_2)\dots\text{NOB}_{10}\text{H}_9]^{4-}$ (рис. 2).

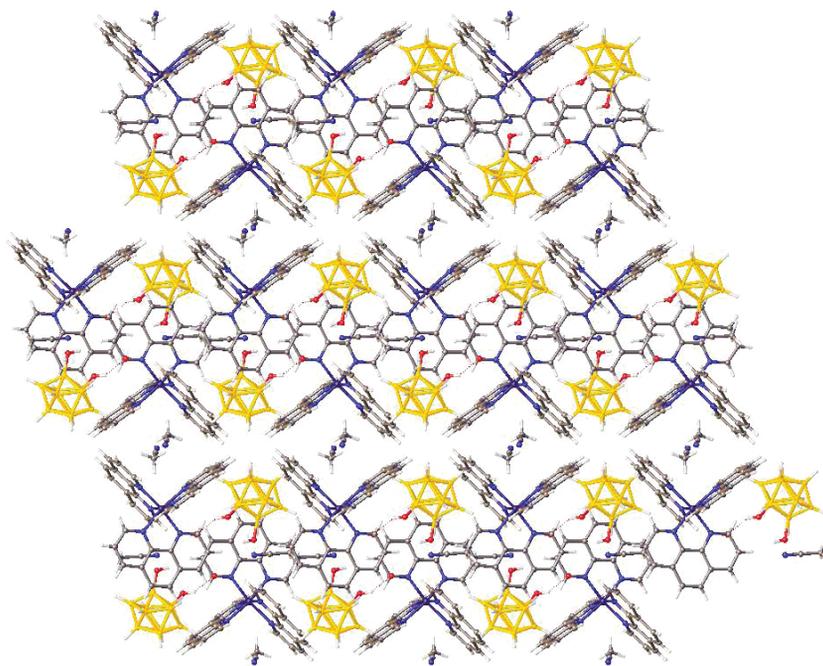


Рис. 2. Фрагмент упаковки в структуре Ia.

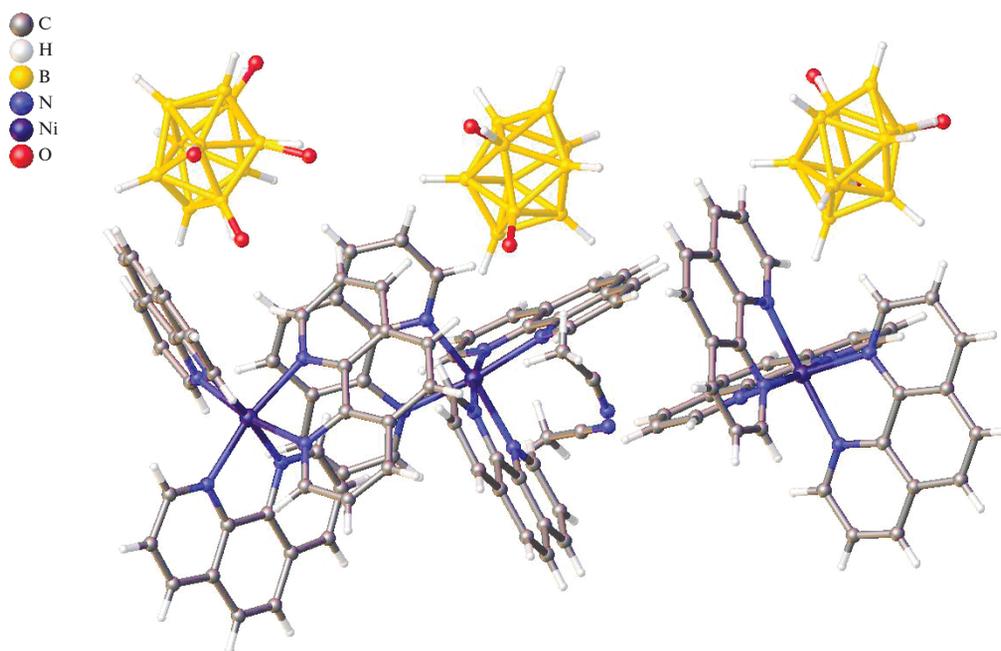


Рис. 3. Элементарная ячейка соединения Ib.

В кристаллографически независимую часть моноклинной элементарной ячейки ($C2/c$) Ib входят три комплексных катиона $[\text{Ni}(\text{phen})_3]^{2+}$, три аниона $[\text{V}_{10}\text{H}_9\text{OH}]^{2-}$ и две молекулы ацетонитрила (рис. 3). Еще две молекулы DMF и четыре молекулы MeCN были удалены из уточнения,

так как сильно разупорядочены. Гидроксогруппы анионов разупорядочены на две, три и четыре позиции в разных анионах кристаллографически независимой части ячейки.

Катионы $[\text{Ni}(\text{phen})_3]^{2+}$ и анионы $[\text{V}_{10}\text{H}_9\text{OH}]^{2-}$, упакованные в катионно-анионные слои, образу-

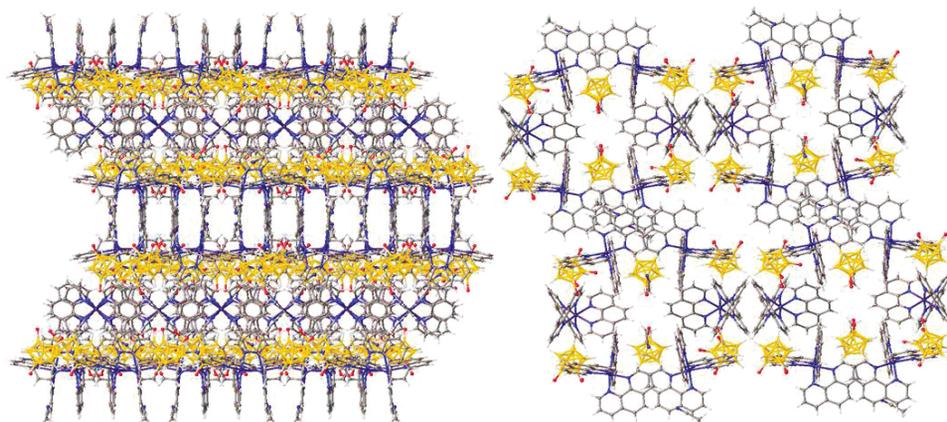


Рис. 4. Фрагмент упаковки в структуре Iб.

ют четыре слоя (рис. 4). В одном из катионных слоев образуются каналы и пустоты большого объема, в которых располагаются молекулы растворителя, удаленные из уточнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что при взаимодействии 2-гидрокси-κлозо-декаборатного аниона с катионом никеля(II) в присутствии азотсодержащих лигандов (phen, bra, bipy, dap) происходит образование комплексных соединений, в которых анион $[2-V_{10}H_9OH]^{2-}$ присутствует в качестве противоиона. Полученные продукты могут представлять интерес в качестве прекурсоров для дальнейшей модификации, в том числе для получения борсодержащих материалов с заданными свойствами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

Аналитические исследования выполнены в ЦКП ИОНХ РАН и ЦКП НИЦ “Курчатовский институт” – ИРЕА”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivaev I.B., Bregadze V.I., Sjöberg S. et al. // Collect. Czechoslov. Chem. Commun. 2020. V. 67. P. 679. <https://doi.org/10.1135/cccc20020679>
2. Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Naoufal D. et al. // Collect. Czechoslov. Chem. Commun. 2010. V. 75. P. 1149. <https://doi.org/10.1135/cccc2010054>
3. Akimov S.S., Matveev E.Y., Razgonyaeva G.A. et al. // Russ. Chem. Bull. 2010. V. 59. P. 371. [Акимов С.С., Матвеев Е.Ю., Разгоняева Г.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2010. № 2. С. 364.] <https://doi.org/10.1007/s11172-010-0088-1>
4. Klyukin I.N., Zhdanov A.P., Matveev E.Y. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2014. V. 50. P. 28. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2014.10.008>
5. Retivov V.M., Matveev E.Yu., Lisovskiy M.V. et al. // Russ. Chem. Bull. 2010. V. 59. P. 550. [Ретивов В.М., Матвеев Е.Ю., Лисовский М.В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2010. № 3. С. 538.] <https://doi.org/10.1007/s11172-010-0123-2>
6. Matveev E.Y., Kubasov A.S., Razgonyaeva G.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2015. V. 60. P. 776. [Матвеев Е.Ю., Кубасов А.С., Разгоняева Г.А. и др. // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 7. С. 858.] <https://doi.org/10.1134/S0036023615070104>
7. Klyukin I.N., Kubasov A.S., Limarev I.P. et al. // Polyhedron. 2015. V. 101. P. 215. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2015.09.025>
8. Semioshkin A.A., Sivaev I.B., Bregadze V.I. et al. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 2008. V. 11. P. 977. <https://doi.org/10.1039/b715363e>
9. Zhizhin K.Y., Zhdanov A.P., Kuznetsov N.T. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. P. 2089. <https://doi.org/10.1134/S0036023610140019>
10. Matveev E.Y., Retivov V.M., Razgonyaeva G.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. P. 1549. [Матвеев Е.Ю., Ретивов В.М., Разгоняева Г.А. и др. // Журн. неорган. химии. 2011. Т. 56. № 10. С. 1628.] <https://doi.org/10.1134/S0036023611100160>
11. Prikaznov A.V., Shmal'ko A.V., Sivaev I.B. et al. // Polyhedron. 2011. V. 30. P. 1494. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2011.02.055>
12. Matveev E.Y., Limarev I.P., Nichugovskii A.I. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. P. 977. [Матвеев Е.Ю., Лимарев И.П., Ницуговский А.И. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 8. С. 811.] <https://doi.org/10.1134/S0036023619080084>
13. Laskova J., Kozlova A., Bialek-Pietras M. et al. // J. Organomet. Chem. 2016. V. 807. P. 29. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2016.02.009>
14. Matveev E.Y., Akimov S.S., Kubasov A.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. P. 1513. [Матвеев Е.Ю., Акимов С.С., Кубасов А.С. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 12. С. 1278.] <https://doi.org/10.1134/S003602361912009X>

15. *Prikaznov A.V., Laškova Y.N., Semioshkin A.A. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2011. V. 60. P. 2550. [Приказнов А.В., Ласкова Ю.Н., Семиошкин А.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 12. С. 2501.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-011-0392-4>
16. *Laskova J., Kozlova A., Ananyev I. et al.* // J. Organomet. Chem. 2017. V. 834. P. 64.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.02.009>
17. *Matveev E.Yu., Akimov S.S., Kubasov A.S. et al.* // Fine Chemical Technologies. 2019. V. 14. № 1. P. 59. [Матвеев Е.Ю., Акимов С.С., Кубасов А.С. и др. // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 1. С. 59.]
<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2019-14-1-59-65>
18. *Kubasov A.S., Turishev E.S., Polyakova I.N. et al.* // J. Organomet. Chem. 2017. V. 828. P. 106.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2016.11.035>
19. *Gabel D., Moller D., Harfst S. et al.* // Inorg. Chem. 1993. V. 32. P. 2276.
<https://doi.org/10.1021/ic00063a014>
20. *Kubasov A.S., Matveev E.Y., Turyshev E.S. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 477. P. 277.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2018.03.013>
21. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Sivaev I.B. et al.* // Crystals. 2016. V. 6. P. 60.
<https://doi.org/10.3390/cryst6050060>
22. *Malinina E.A., Avdeeva V.V., Goeva L.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. P. 2148.
<https://doi.org/10.1134/S0036023610140032>
23. *Kubasov A.S., Matveev E.Yu., Retivov V.M. et al.* // Russ. Chem. Bull. 2014. V. 63. P. 187. [Кубасов А.С., Матвеев Е.Ю., Ретивов В.М. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 1. С. 187.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0412-2>
24. *Avdeeva V.V., Polyakova I.N., Churakov A.V. et al.* // Polyhedron. 2019. V. 162. P. 65.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.01.051>
25. *Avdeeva V.V., Vologzhanina A.V., Malinina E.A. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2019. V. 45. P. 295. [Авдеева В.В., Вологжанина А.В., Малинина Е.А. и др. // Журн. коорд. химии. 2019. Т. 45. № 4. С. 242.]
<https://doi.org/10.1134/S1070328419040018>
26. Авдеева В.В., Полякова И.Н., Гоева Л.В. и др. // Коорд. химия. 2016. № 3. С. 318.
[10.7868/S0044457X1603003X](https://doi.org/10.7868/S0044457X1603003X)
27. *Avdeeva V.V., Kravchenko E.A., Gippius A.A. et al.* // Polyhedron. 2017. P. 238.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2017.02.015>
28. *Avdeeva V.V., Polyakova I.N., Goeva L.V. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2015. V. 60. № 7. P. 817. [Авдеева В.В., Полякова И.Н., Гоева Л.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2015. Т. 60. № 7. С. 901.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023615070037>
29. *Melnikov S.A., Parshin A.P., Popov V.A. et al.* // Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems. NATO Sci. Peace Secur. Ser. C Environ. Secur. PartF2. 2008. P. 449.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8898-8_56
30. *Zhizhin K.Yu., Voyk O.O., Malinina E.A. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2001. V. 27. P. 613.
<https://doi.org/10.1023/A:1017937102647>
31. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. 2015. V. C71. P. 3.
32. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
<https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
33. *Omar M.M., Abd El-Halim H.F., Eman A.M. Khalil* // Appl. Organomet. Chem. 2017. V. 31. P. 3724.
<https://doi.org/10.1002/aoc.3724>
34. *Zhizhin K.Y., Malinina E.A., Polyakova I.N. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2002. V. 47. P. 1168.