
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
КООРДИНАЦИОННОЙ ХИМИИ**

УДК 546.271

**САМОПРОИЗВОЛЬНАЯ ИЗОМЕРИЗАЦИЯ $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-} \rightarrow [iso-B_{20}H_{18}]^{2-}$
В ХОДЕ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ КОБАЛЬТА(II)
С ФЕНАНТРОЛИНОМ**

© 2022 г. В. В. Авдеева^а, *, А. С. Кубасов^а, С. Е. Короленко^а, Л. В. Гоева^а,
Е. А. Малинина^а, Н. Т. Кузнецов^а

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

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

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 31.12.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2022 г.

В работе изучена реакция комплексообразования кобальта(II) с 1,10-фенантролином (Phen) в присутствии аниона $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-}$. При соотношении Co : Phen = 1 : 2 в ацетонитриле в течение нескольких часов образуется биядерный комплекс кобальта(II) с мостиковыми атомами хлора и кластерным анионом бора в качестве противоиона $[(Phen)_2Co(\mu-Cl)_2Co(Phen)_2][trans-B_{20}H_{18}]$. Однако при медленной кристаллизации (в течение месяца) наблюдается самопроизвольная изомеризация $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-}$ в $[iso-B_{20}H_{18}]^{2-}$. Методом РСА установлено, что в кристалле конечного соединения $[(Phen)_2Co(\mu-Cl)_2Co(Phen)_2][trans-B_{20}H_{18}]_{1/3}[iso-B_{20}H_{18}]_{2/3}$ впервые наблюдается сокристаллизация обеих изомерных форм октадекагидроэйкозаборатного аниона. Наличие *iso*-формы кластерного аниона также подтверждается данными ИК-спектроскопии: в спектре продукта появляется полоса валентных колебаний мостиковых групп BHB при 1773 см^{-1} , которые отсутствуют в *trans*-форме борного кластера.

Ключевые слова: кластерные анионы бора, УФ-облучение, изомеризация, сокристаллизация изомеров

DOI: 10.31857/S0044457X22080025

ВВЕДЕНИЕ

Координационная химия полиэдрических кластерных анионов бора $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 6-12$) [1–5] является предметом многолетних исследований. С позиции принципа “жестких” и “мягких” кислот и оснований, сформулированного Пирсоном, кластерные анионы бора можно отнести к мягким основаниям, что объясняет получение большего числа комплексов с металлами, являющимися мягкими кислотами (медь(I), серебро(I), свинец(II), кадмий(II)), в которых они входят во внутреннюю координационную сферу металла [6–10]. В то же время с металлами, которые относятся к промежуточным кислотам Пирсона (цинк(II), железо(II), кобальт(II), никель(II) и др.), кластерные анионы бора играют роль противоионов [11–13], а в случае некоторых металлов, являющихся жесткими кислотами Пирсона (железо(III), кобальт(III) и др.), *клозо*-бороводородные анионы, как правило, участвуют в окислительно-восстановительных реакциях, снижая степень окисления металла [11].

Кластерные анионы бора обладают трехмерной ароматичностью и делокализованной элект-

ронной плотностью [14, 15], что позволяет замещать концевые атомы водорода на различные функциональные группы [16–20]. Замещенные производные кластерных анионов бора также способны образовывать комплексы с атомами металлов, действуя как лиганды внутренней сферы (за счет координации B–H-групп атомом металла или за счет координации функциональной группы введенного заместителя) или как противоионы [21–24].

Макрополиэдрический димерный кластерный анион бора $[trans-B_{20}H_{18}]^{2-}$ легко образуется при мягком окислении *клозо*-декаборатного аниона в присутствии солей железа(III) или церия(IV) в водном растворе [25–28] или электрохимическом окислении [29]. Координационная способность димерного кластера менее изучена по сравнению с кластерами бора $[B_nH_n]^{2-}$ ($n = 10, 12$). Для него получен ряд смешаннолигандных комплексов серебра с Rh_3P и комплексов свинца(II) с $Viру$, которые содержат координированный кластерный анион бора [30–32]. Кроме того, известны структуры *трис*-хелатных комплексов марганца(II), железа(II), кобальта(II) и никеля(II) $[MnL_3][trans-B_{20}H_{18}]$ ($L =$

= *Vi*py, *Phen*) [33–35] и комплекса железа(II) с циклопентадиенильным лигандом $[\text{CrFe}(\text{Cr}-\text{CH}_2-\text{NMe}_2\text{Et})_2][\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ [36]; во всех указанных соединениях кластер бора находится во внешней сфере металла.

Известно, что в растворе солей аниона $[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в ацетонитриле под действием УФ-облучения кластерный анион бора переходит в *изо*-изомер $[\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$, а при нагревании раствора происходит обратный процесс [37–41]:

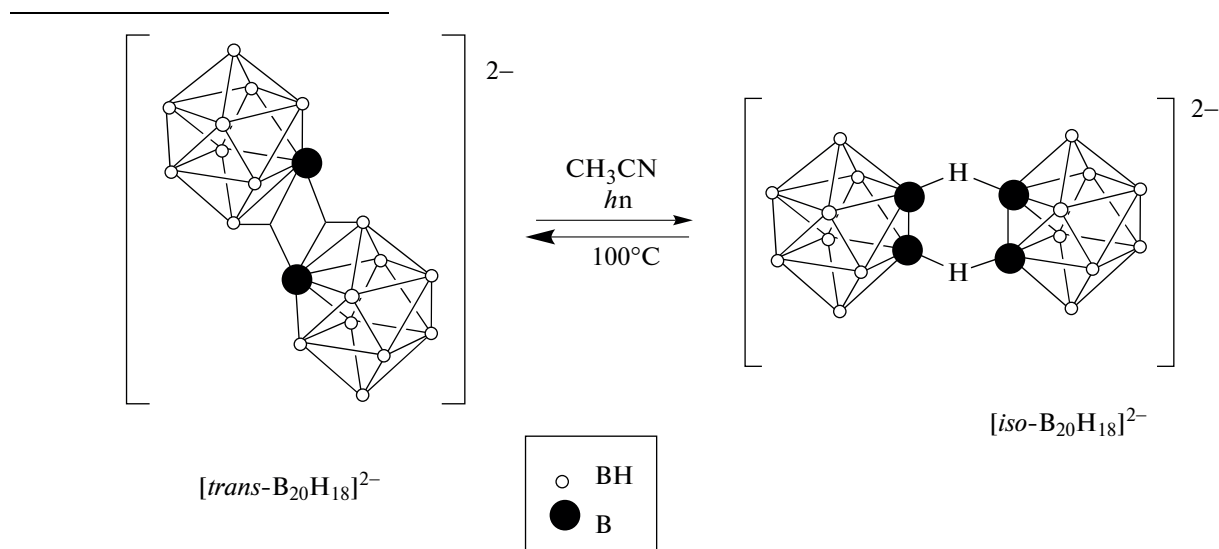


Схема 1.

В работе [42] показано, что процесс изомеризации $[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-} \rightarrow [\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ может протекать и без УФ-облучения: медленная (~1 мес.) кристаллизация комплекса $[\text{Ag}_2(\text{Ph}_3\text{P})_6][\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ из ДМФА приводит к образованию изомерного комплекса $[\text{Ag}_2(\text{Ph}_3\text{P})_6][\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$.

Твердофазная обратимая изомеризация $[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-} \leftrightarrow [\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ обнаружена в кристаллах комплексов серебра(I) с трифенилфосфином и свинца(II) с 2,2'-бипиридином [30, 31].

В настоящей работе исследована реакция комплексообразования хлорида кобальта(II) с 1,10-фенантролином в ацетонитриле в присутствии аниона $[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$, обнаружена возможность самопроизвольного протекания процесса изомеризации $[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-} \rightarrow [\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в отсутствие УФ-облучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все реакции проводили на воздухе. Ацетонитрил (чистый для ВЭЖХ), безводный CoCl_2 (98.0%) и безводный *Phen* (98%) (*Sigma-Aldrich*) использовали без дополнительной очистки. $(\text{Et}_3\text{NH})_2[\text{B}_{10}\text{H}_{10}]$ синтезировали из декаборана-14 по известной методике [43]. $(\text{Et}_3\text{NH})_2[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ получали мягким окислением *клиз*-декаборатного аниона водным раствором FeCl_3 по методике [25].

Синтез $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu\text{-Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2][\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ (1). CoCl_2 (1.2 ммоль) растворяли в ацетонитриле (15 мл), добавляли раствор $(\text{Et}_3\text{NH})_2[\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$ (1.2 ммоль) в ацетонитриле (10 мл) и к полученному раствору прибавляли двукратный избыток *Phen* (3.6 ммоль) в том же растворителе (10 мл). Реакционный раствор приобретал розовый цвет, и начинали образовываться кристаллы соответствующего цвета. Через 5 ч окрашенные кристаллы отфильтровывали и сушили на воздухе. Выход 77%.

	H	C	N	B
Найдено, %:	4.35;	50.26;	9.71;	18.2.
Для $\text{C}_{48}\text{H}_{50}\text{N}_8\text{Co}_2\text{B}_{20}\text{Cl}_2$				
вычислено, %:	4.41;	50.40;	9.80;	18.9.

ИК-спектр, cm^{-1} : $\nu(\text{BH})$ 2525, 2493; $\nu(\text{Phen})$ 1614, 1582, 1447, 1390, 1347, 1330, 1242, 1157, 1005, 872, 725, 690; $\pi(\text{CH})$ 845, 732.

Синтез $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu\text{-Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2][\text{trans}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]_{1/3}[\text{iso}-\text{B}_{20}\text{H}_{18}]_{2/3}$ (2). Реакцию проводили аналогично вышеописанной методике, но полученный раствор герметично закрывали для предотвращения улетучивания растворителя и оставляли в темноте. Кристаллы розового цвета начинали образовываться в течение 2–3 нед. Спустя месяц кристаллы отфильтровывали и высушивали

на воздухе. Выход 63%. Кристалл $2 \cdot \text{CH}_3\text{CN}$ отби-
рали непосредственно из реакционного раствора.

	H	C	N	B
Найдено, %:	4.30	0.31;	9.63;	18.7.
Для $\text{C}_{48}\text{H}_{50}\text{N}_8\text{Co}_2\text{B}_{20}\text{Cl}_2$				
вычислено, %:	4.41;	50.40;	9.80;	18.9.

ИК-спектр, cm^{-1} : $\nu(\text{BH})$ 2530, 2495, $\nu(\text{BH})_{\text{внб}}$ 1773; $\nu(\text{Phen})$ 1615, 1582, 1449, 1391, 1347, 1328, 1245, 1155, 1008, 872, 725, 691; $\pi(\text{CH})$ 845, 732.

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

ИК-спектры записывали на ИК-фурье-спектрофотометре Инфралюм ФТ-02 (НПФ АП "Люмекс" Россия); суспензия в вазелиновом масле (Aldrich), пластинки NaCl, область 4000–400 cm^{-1} , разрешение 1 cm^{-1} .

Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в ЦКП ИОНХ РАН в $\text{CuK}\alpha$ -излучении в низкофонных кюветках с подложкой из ориентированного монокристалла кремния в интервале углов 2θ 5° – 80° с шагом 0.01125°. Для получения дифрактограмм образцы тщательно истирали в агатовой ступке.

РСА. Наборы дифракционных отражений получены в Центре коллективного пользования ИОНХ РАН на автоматическом дифрактометре Bruker SMART APEX2. Структура расшифрована прямым методом с последующим расчетом разностных синтезов Фурье. Все неводородные атомы катионов и атомы бора уточнены в анизотропном приближении, неводородные атомы растворителя – 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 ($1.5U_{\text{изо}}$ для CH_3 -групп).

При сборе и обработке массива отражений использовали программы APEX2, SAINT и SADABS [44]. Структура расшифрована и уточнена с помощью программ комплекса OLEX2 [45].

Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и характеристики уточнения структуры $2 \cdot 2 \text{CH}_3\text{CN}$ приведены в табл. 1. Кристаллографические данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2127924).

Таблица 1. Основные кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры

Параметр	$2 \cdot \text{CH}_3\text{CN}$
Брутто-формула	$\text{C}_{50}\text{H}_{53}\text{B}_{20}\text{Cl}_2\text{Co}_2\text{N}_9$
<i>M</i>	1184.97
<i>T</i> , К	150.15
Пр. гр., <i>Z</i>	<i>C2/c</i>
<i>a</i> , Å	15.735(2)
<i>b</i> , Å	14.614(2)
<i>c</i> , Å	24.551(3)
α , град	90
β , град	93.866(2)
γ , град	90
<i>V</i> , Å ³	5632.7(13)
<i>Z</i>	4
<i>D_x</i> , г/см ³	1.397
μ_{Mo} , мм ⁻¹	0.731
Излучение	$\text{MoK}\alpha$ ($\lambda = 0.71073$)
<i>F</i> (000)	2416.0
Интервал углов θ , град	3.808–48.284
Число отражений: измеренных	21 135
независимых (<i>N</i>) [<i>R_{int}</i>]	4509 [0.1017]
<i>c I</i> > 2 σ (<i>I</i>) (<i>N_o</i>)	0.0807
<i>R1</i> , <i>wR2</i> по <i>N_o</i>	0.0474, 0.0896
<i>R1</i> , <i>wR2</i> по <i>N</i>	0.0978, 0.1073
GOOF	0.996
$\Delta\rho_{\text{max}}/\Delta\rho_{\text{min}}$, э/Å ³	1.097/–0.801

Анализ поверхности Хиршфельда был выполнен с использованием программы Crystal Explorer 17.5 [46]. Донорно-акцепторные пары визуализировали с использованием стандартного (высокого) разрешения поверхности и d_{norm} : поверхности отображаются в фиксированной цветовой шкале от –0.640 (красный) до 0.986 (голубой) а.е.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении реакции комплексообразования хлорида кобальта(II) с 1,10-фенантролином (Phen) было обнаружено, что при трехкратном

избытке лиганда образуется *трис*-хелатный желтый комплекс $[\text{Co}(\text{Phen})_3]\text{Cl}_2$, двукратный избыток лиганда приводит к образованию симметричного биядерного комплекса $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu-$

$\text{Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2]\text{Cl}_2$ розового цвета, а при эквимольном соотношении реагентов образуется асимметричный комплекс $[\text{Cl}_2\text{Co}(\mu-\text{Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2]$ [46] голубого цвета (схема 2).

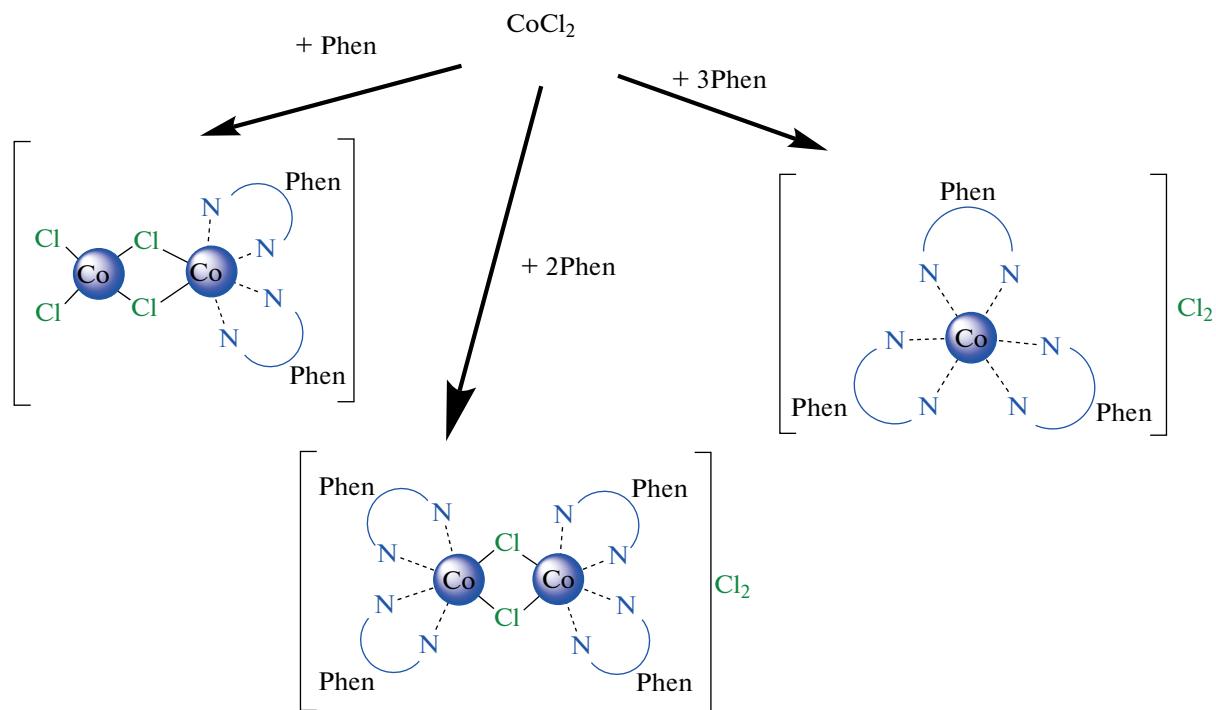
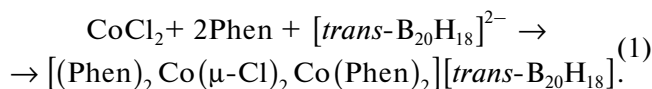


Схема 2.

При проведении реакции комплексообразования кобальта(II) в присутствии кластерных анионов бора $[\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$, $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$ и $[\text{B}_{10}\text{Cl}_{10}]^{2-}$ установлено, что симметричный биядерный комплекс образуется только в случае декахлор-κ-декаборатного аниона $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu\text{-Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2][\text{B}_{10}\text{Cl}_{10}]$, тогда как в случае двух других кластерных анионов бора из реакционного раствора выпадают *трис*-хелатные комплексы $[\text{Co}(\text{Phen})_3][\text{An}]$ ($\text{An} = [\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$ или $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$) [47].

В настоящей работе установлено, что проведение аналогичной реакции в присутствии октадекагидроэйкозаборатного аниона также приводит к стабилизации биядерного комплекса кобальта и выведению его из реакционного раствора, что может быть объяснено большим объемом аниона:



Полученное соединение **1** идентифицировано при помощи ИК-спектроскопии и элементного анализа. Кроме того, цвет соединения (розовый) соответствует окраске биядерных комплексов с противоионами Cl^- и $[\text{B}_{10}\text{Cl}_{10}]^{2-}$ [47]. В ИК-спек-

тре соединения наблюдается полоса валентных колебаний связей BH с максимумами около 2500 см^{-1} , а также полный набор колебаний координированных молекул Phen в области $1600\text{--}700 \text{ см}^{-1}$.

Ранее при изучении реакции комплексообразования серебра(I) с Ph_3P было обнаружено, что анион $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ самопроизвольно переходит в *изо*-форму с течением времени. При взаимодействии $[\text{Ag}(\text{Ph}_3\text{P})_3\text{NO}_3]$ с анионом $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в ДМФА из концентрированных растворов образуется комплекс $[\text{Ag}_2(\text{Ph}_3\text{P})_6[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]]$, а в случае медленной (~1 мес.) кристаллизации из разбавленного раствора в ДМФА конечным продуктом является комплекс $[\text{Ag}_2(\text{Ph}_3\text{P})_6[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]]$, в котором наблюдается полная конверсия *транс*-формы эйкозаборатного аниона в *изо*-форму.

В настоящей работе были созданы условия, при которых реагенты находились длительное время в растворенном виде в ацетонитриле. Для этого реакционный раствор герметично закрывали и оставляли в темном месте. Через месяц полученные кристаллы отфильтровывали и изучали

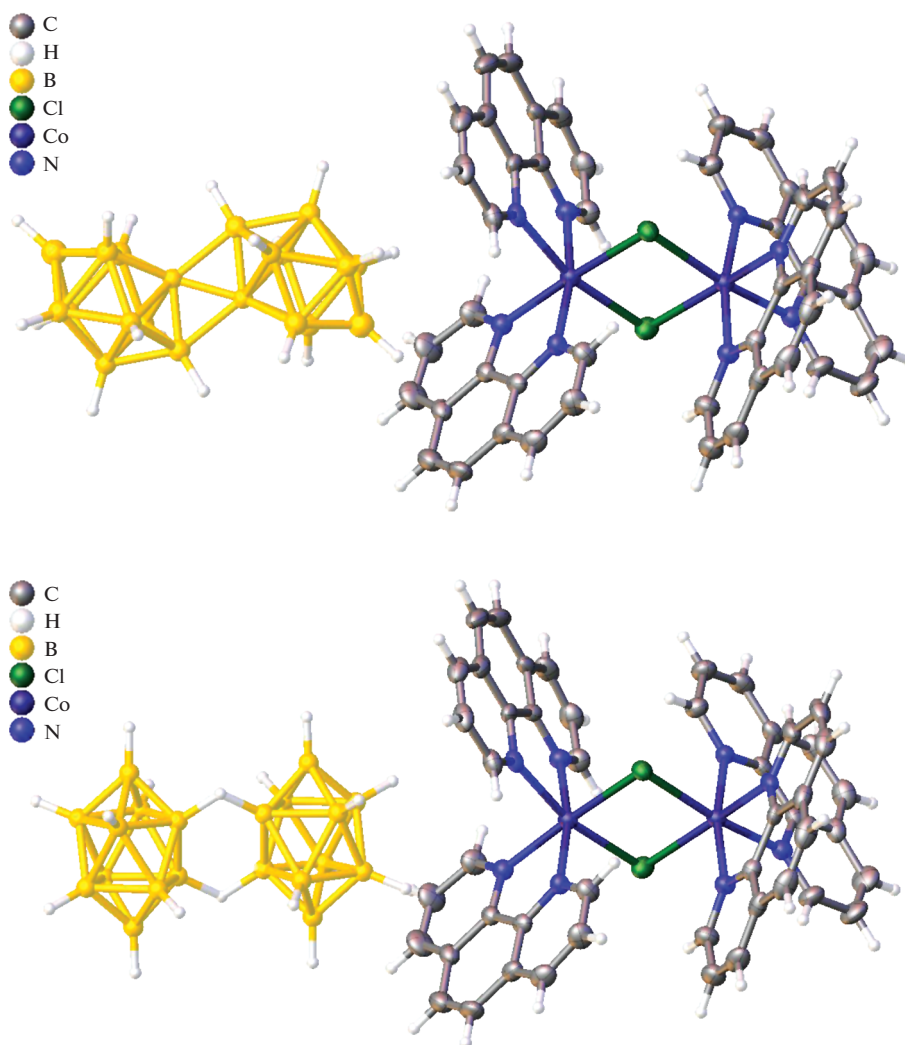


Рис. 1. Строение комплекса $2 \cdot \text{CH}_3\text{CN}$. Анионы $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ сокристаллизованы в соотношении 1 : 2.

методами элементного анализа, ИК-спектроскопии и РСА.

По данным элементного анализа, кристаллы отвечают той же формуле $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu\text{-Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2][\text{B}_{20}\text{H}_{18}]$, однако в ИК-спектре наблюдается появление новой полосы при 1773 см^{-1} , что указывает на появление связи ВНВ в составе соединения, которая наблюдается в анионе $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$. Согласно данным РФА, соединения изоструктурны.

Кристаллы соединения $2 \cdot \text{CH}_3\text{CN}$ построены из комплексных анионов $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в соотношении 1 : 2, биядерных катионов $[(\text{Phen})_2\text{Co}(\mu\text{-Cl})_2\text{Co}(\text{Phen})_2]^{2+}$ и сольватных молекул растворителя. Окружение металла искаженно-октаэдрическое. Длина связи В–В в анио-

нах согласуется с таковой в ранее описанных структурах [30] (рис. 1). В моноклинных ячейках комплекса $2 \cdot \text{CH}_3\text{CN}$ анионы расположены в центре инверсии, а катионы – на оси второго порядка. Катионы и анионы образуют катионно-анионные слои, параллельные плоскости bc (рис. 2).

Межмолекулярные взаимодействия между анионами $[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и окружающими молекулами растворителя и катионами исследованы методом анализа поверхности Хиршфельда аниона [47–50]. Данный инструмент дает хорошее визуальное представление о наличии межмолекулярных контактов в кристаллах и их длине. При этом изомерные кластерные анионы бора $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ исследовали отдельно с построени-

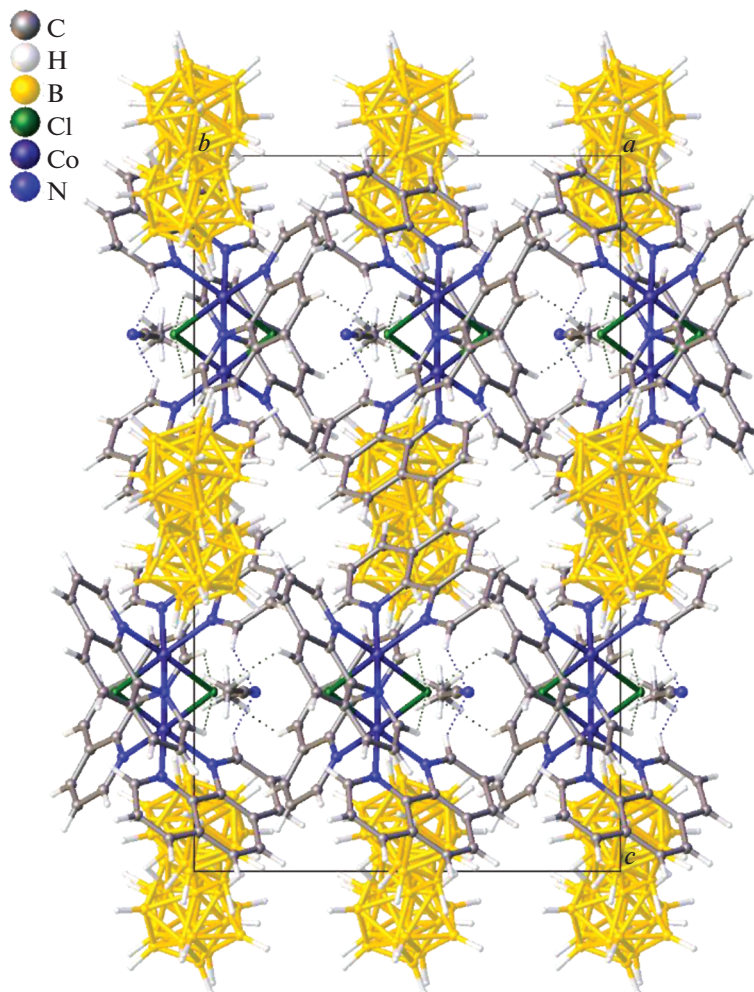


Рис. 2. Проекция структуры на плоскость bc (показаны оба аниона $[B_{20}H_{18}]^{2-}$).

ем поверхности для каждого бороводородного аниона.

Анализ поверхности Хиршфельда анионов в полученных комплексах показывает, что наиболее сильные нековалентные взаимодействия образуются между атомами водорода CH - и CH_3 -групп и ребрами или гранями *клатро*-боратного аниона (рис. 3 и 4). Красными пятнами на поверхности Хиршфельда аниона показаны контакты $CH...B$, длина которых меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов атомов (3.02 \AA для суммы $B + H$). Вероятно, это связано с тем, что электронная плотность в указанных соединениях локализована по борному остову.

Отметим, что в *клатро*-декаборатном анионе, согласно расчетным данным, отрицательные заряды (метод NBO и NPA) делокализованы по атомам бора ($\sim -0.2e$ на атоме бора), в то время как

на атомах водорода заряд чуть больше 0 ($\sim +0.05e$) [48–51].

Анализ 2D-развертки поверхности Хиршфельда анионов $[B_{20}H_{18}]^{2-}$ показывает, что на контакты $WH...HC$ анионов приходится 81.5–92.4% поверхности аниона, остальные 7.6–15.3% отвечают контактам $(B)H...C$ (рис. 3 и 4). Интересно, что соотношение контактов $WH...HC$ и $(B)H...C$ для двух изомерных форм аниона практически одинаковое в обоих случаях.

Изучение координационной химии кобальта(II) с органическими анионами расширяет представление о многообразии структур мономерных, биядерных и полимерных комплексов кобальта, что открывает новые возможности для синтеза координационных полимеров, MOF и соединений с заданными свойствами [52–56].

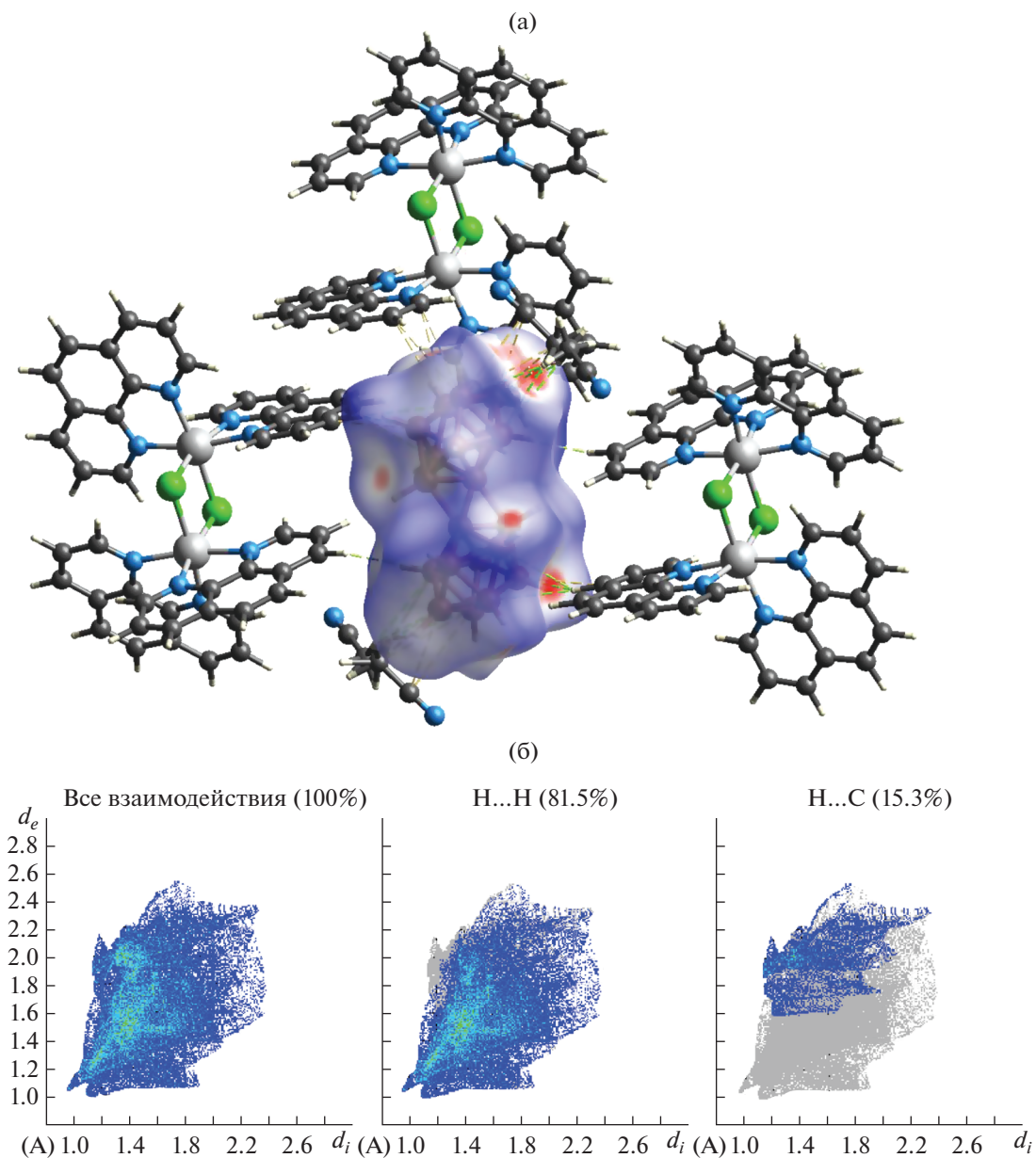


Рис. 3. d_{norm} поверхность Хиршфельда для аниона $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ (а) и 2D-развертка поверхности Хиршфельда аниона, а также границы Н...Н и Н...С/С...Н контактов (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изучено комплексообразование хлорида кобальта(II) с 1,10-фенантролином в присутствии октадекагидро-эйкозаборатного аниона $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ и обнаружена самопроизвольная изомеризация аниона $[\text{trans-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ в $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$, при этом, по данным РСА, оба изомерных кластерных аниона бора сокристаллизуются в одном кристалле.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

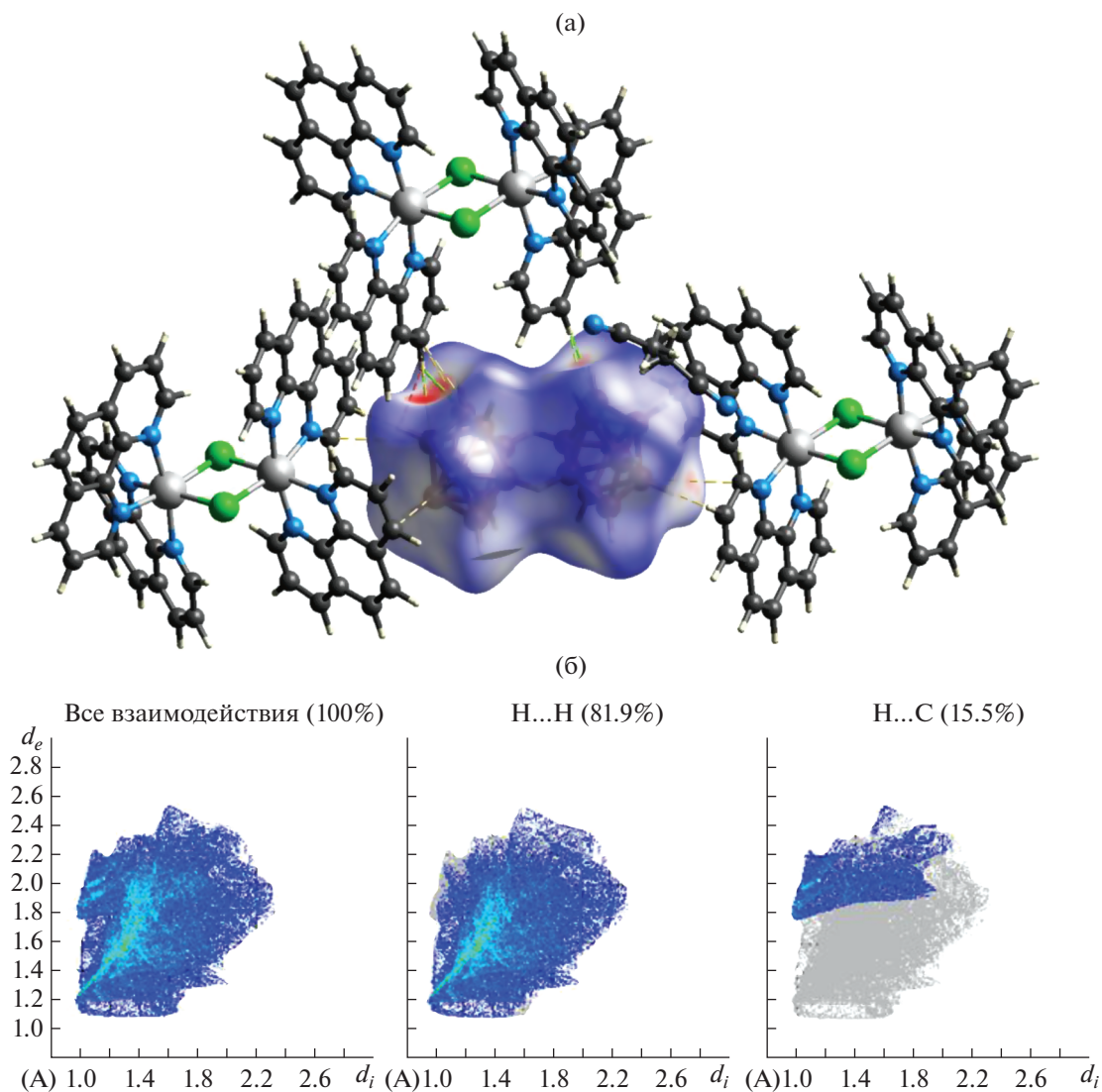


Рис. 4. d_{norm} поверхность Хиршфельда для аниона $[\text{iso-B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ (а) и 2D-развертка поверхности Хиршфельда аниона, а также границы Н...Н и Н...С/С...Н контактов (б).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Статья подготовлена по материалам XXVIII Международной Чугаевской конференции по координационной химии, с. Ольгинка, Туапсинский район, 03–08 октября 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Muetterties E.L., Knoth W.H.* Polyhedral Boranes. N.Y.: Dekker, 1968.
2. *Greenwood N.N., Earnshaw A.* Chemistry of the Elements, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 1997.
3. Boron Science: New Technologies and Applications / Ed. Hosmane N.S., CRC Press, 2012.
4. *Sivaev I.B., Bregadze V.I.* Polyhedral Boron Hydrides in Use: Current Status and Perspectives. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2009. 85 p.
5. *Sivaev I.B.* // Chem. Heterocycl. Comp. 2017. V. 53. P. 638.
<https://doi.org/10.1007/s10593-017-2106-9>
6. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Sivaev I.B. et al.* // Crystals. 2016. V. 6. P. 60.
<https://doi.org/10.3390/cryst6050060>
7. *Malinina E.A., Korolenko S.E., Kubasov A.S. et al.* // Polyhedron. 2020. V. 184. P. 114566.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114566>
8. *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>

9. Avdeeva V.V., Malinina E.A., Kuznetsov N.T. // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 335.
<https://doi.org/10.1134/S003602362003002X>
10. 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>
11. Avdeeva V.V., Malinina E.A., Zhizhin K.Yu. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 514.
<https://doi.org/10.1134/S0036023620040026>
12. Malinina E.A., Avdeeva V.V., Korolenko S.E. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 1343.
<https://doi.org/10.1134/S0036023620090119>
13. Malinina E.A., Vologzhanina A.V., Avdeeva V.V. et al. // Polyhedron. 2020. V. 183. P. 114540.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114540>
14. King B.R. // Chem. Rev. 2001. V. 101. P. 1119.
<https://doi.org/10.1021/cr000442t>
15. Chen Z., King R.B. // Chem. Rev. 2005. V. 105. P. 3613.
<https://doi.org/10.1021/cr0300892>
16. Sivaev I.B., Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 1289.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090151>
17. Nelyubin A.V., Klyukin I.N., Zhdanov A.P. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 139.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621020133>
18. Shmal'ko A.V., Sivaev I.B. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. P. 1726.
<https://doi.org/10.1134/S0036023619140067>
19. Zhizhin K.Yu., Zhdanov A.P., Kuznetsov N.T. // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. P. 2089.
<https://doi.org/10.1134/S0036023610140019>
20. Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Naoufal D. // Collect. Czech. Chem. Commun. 2010. V. 75. P. 1149.
<https://doi.org/10.1135/cccc2010054>
21. Avdeeva V.V., Buzanov G.A., Malinina E.A., Kuznetsov N.T. // Crystals. 2020. V. 10. P. 389.
<https://doi.org/10.3390/cryst10050389>
22. Avdeeva V.V., Vologzhanina A.V., Ugolkova E.A. et al. // J. Solid State Chem. 2021. V. 296. P. 121989.
<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.121989>
23. Matveev E.Yu., Novikov I.V., Kubasov A.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. P. 187.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621020121>
24. Malinina E.A., Korolenko S.E., Zhdanov A.P. et al. // J. Cluster Sci. 2020. V. 32. P. 755.
<https://doi.org/10.1007/s10876-020-01840-5>
25. Chamberland B.L., Muettterties E.L. // Inorg. Chem. 1964. V. 3. P. 1450.
<https://doi.org/10.1021/ic50020a025>
26. Hawthorne M.F., Pilling R.L. // J. Am. Chem. Soc. 1966. V. 88. P. 3873.
<https://doi.org/10.1021/ja00968a044>
27. Hawthorne M.F., Shelly K., Li F. // Chem. Commun. 2002. P. 547.
<https://doi.org/10.1039/B110076A>
28. Curtis Z.B., Young C., Dickerson R. et al. // Inorg. Chem. 1974. V. 13. P. 1760.
<https://doi.org/10.1021/ic50137a046>
29. 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>
30. 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>
31. Avdeeva V.V., Buzin M.I., Malinina E.A. et al. // Cryst-EngComm. 2015. V. 17. P. 8870.
<https://doi.org/10.1039/C5CE00859J>
32. Avdeeva V.V., Malinina E.A., Zhizhin K.Yu. et al. // J. Struct. Chem. 2019. V. 6. P. 692.
<https://doi.org/10.1134/S0022476619050020>
33. 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>
34. Avdeeva V.V., Malinina E.A., Goeva L.V., Kuznetsov N.T. // Dokl. Chem. 2017. V. 474. P. 141.
<https://doi.org/10.1134/S0012500817060052>
35. 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. Sirivardane 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. Kaczmarezyk A., Dobrott R.D., Lipscomb W.N. // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1962. V. 48. P. 729.
38. Hawthorne M.F., Pilling R.L., Stokely P.F., Garrett P.M. // J. Am. Chem. Soc. 1963. V. 85. P. 3704.
39. Curtis Z.B., Young C., Dickerson R., Kaczmarezyk A. // Inorg. Chem. 1974. V. 13. P. 1760.
40. Li F., Shelly K., Knobler C.B., Hawthorne M.F. // Angew. Chem., Int. Ed. 1998. V. 37. P. 1865.
41. Francés-Monerris A., Tuñón I., Monari A. // J. Phys. Chem. Lett. 2019. V. 10. P. 6202.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.9b02760>
42. Firsova E.O., Avdeeva V.V., Privalov V.I. et al. // Dokl. Chem. 2015. V. 465. P. 291.
<https://doi.org/10.1134/S0012500815120046>
43. Miller H.C., Miller N.E., Muettterties E.L. // J. Am. Chem. Soc. 1963. V. 85. P. 3885.
<https://doi.org/10.1021/ja00906a033>
44. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr., Sect. C. 2015. V. 71. P. 3.
45. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
46. Turner M.J., McKinnon J.J., Wolff S.K. et al. // Crystal-Explorer 17.5. University of Western Australia, Perth, Australia, 2017.
47. Avdeeva V.V., Vologzhanina A.V., Goeva L.V. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2015. V. 428. P. 154.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2014.12.029>
48. McKinnon J.J., Jayatilaka D., Spackman M.A. // Chem. Commun. 2007. P. 3814.

49. *Klyukin I.N., Novikov A.S., Zhdanov A.P. et al.* // *Polyhedron*. 2020. V. 187. P. 114682.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114682>
50. *Kubasov A.S., Turyshv E.S., Novikov I.V. et al.* // *Polyhedron*. 2021. V. 206. P. 115347.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2021.115347>
51. *Kubasov A.S., Golubev A.V., Bukov A.Yu. et al.* // *J. Mol. Struct.* 2021. V. 1241. P. 120591.
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130591>
52. *Li Y.P., Li G.L., Xin L.Y. et al.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. P. 1397.
<https://doi.org/10.1134/S1070363221070197>
53. *Dorovskikh S.I., Stabnikov P.A., Zelenina L.N. et al.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. P. 1977.
<https://doi.org/10.1134/S107036322110008X>
54. *Gubina N.V., Markarian A.A., Kolokolov D.S. et al.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. P. 2118.
<https://doi.org/10.1134/S1070363221100224>
55. *Zherebtsova M.M., Bogachev N.A., Skripkin M.Y. et al.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. P. 1794.
<https://doi.org/10.1134/S1070363221090206>
56. *Uvarova M.A., Nefedov S.E.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 1660.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621110218>