

Синтез и структура комплексов бидентатных кислот Льюиса $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$) с пиразином.

П. И. Кудина¹, М. А. Крюкова¹, И. В. Казаков¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии
Email: i.v.kazakov@spbu.ru

Впервые получены и охарактеризованы методом рентгеноструктурного анализа монокристаллов комплексы бидентатных кислот Льюиса $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$) с пиразином (pyz). Несмотря на возможность образования полимерных соединений, наблюдается монодентатная координация молекул пиразина к каждому из атомов бора бидентатной кислоты.

ВВЕДЕНИЕ

Синтез и хелатный эффект бидентатных кислот Льюиса на основе соединений элементов 13 группы были показаны на примере $F_2BCH_2CH_2BF_2$ в 1967 году [1]. Интерес к бидентатным кислотам Льюиса на основе бора и алюминия связан с их потенциалом в качестве эффективных катализаторов реакций Дильса-Альдера с обратным электронным переносом [2, 3] и перегруппировки Кляйзена для аллилвиниловых эфиров [4]. Важной особенностью бидентатных и полидентатных кислот Льюиса является способность выступать в качестве хелатирующих агентов для галогенов и возможности образования комплексов типа гость-хозяин [5-9]. Свойства полидентатных кислот Льюиса могут быть дополнительно модифицированы путем синтеза соединений с двумя разными акцепторными центрами, например бора и металла 13 группы [10]. Группа $B(C_6F_5)_2$ позволяет совместить высокую кислотность центра с возможностью размещения на различных органических молекулах [11]. В качестве бидентатных кислот Льюиса нами выбраны $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$), включающие в свой состав кислотный центр $OB(C_6F_5)_2$ расположенный на подвижной ($R=C_2H_4$) или жесткой ($R=p-C_6H_4$) углеродной цепи. При взаимодействии $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$) с бидентатным основанием Льюиса пиразином (pyz) потенциально могут образовываться устойчивые полимерные цепи из фрагментов $\{R[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot pyz\}_\infty$ или комплексы состава $R[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$. В настоящей работе впервые приведены синтез и структуры соединений $R[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общие операции.

Поскольку большая часть используемых в работе реагентов и получаемых продуктов крайне

чувствительна к кислороду и влаге воздуха, все синтетические работы выполняли в инертной атмосфере сухого аргона с использованием перчаточного бокса Inertlab 2GB или линии Шленка. Пиразин (Sigma Aldrich, 99%) и гидрохинон (Вектон, ч) очищали пересублимацией в вакууме. Толуол (Вектон, ч) и гексан (Вектон, ч) осушали над натрием. Дихлорметан (Невареактив, ч) и CCl_4 (ЭКОС-1, ч) осушали над гидридом кальция. Растворители перегоняли в инертной атмосфере, дегазировали и выдерживали над активированными цеолитами марки 4 Å не менее суток. Этиленгликоль (Вектон, ч) осушали добавлением небольшого количества натрия с последующей перегонкой. $\text{V}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$ синтезировали по известной методике [12]. Бидентатные кислоты Льюиса $\text{R}[\text{OV}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2$ ($\text{R}=\text{C}_2\text{H}_4$, $p\text{-C}_6\text{H}_4$) синтезировали взаимодействием гидрохинона или этиленгликоля с $\text{V}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$ в растворе толуола.

Измерение спектров ЯМР проводили на ЯМР-спектрометре Bruker AVANCE 400 с использованием TMS и CFCl_3 в качестве стандартов.

Для эксперимента рентгеновской дифракции монокристаллов данные были получены с использованием дифрактометра Rigaku «XtaLAB Synergy» ($\text{Cu-K}\alpha$, $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$, детектор типа HyPix-6000) при температуре 100(1) К. Эмпирическая коррекция поглощения была применена в программном комплексе CrysAlisPro [13] с использованием сферических гармоник, реализованных в алгоритме масштабирования SCALE3 ABSPACK. Используя пакет программного обеспечения Olex2 [14], структура была решена с помощью программы решения структур ShelXT [15] с использованием внутренней фазировки и уточнена с помощью пакета уточнения ShelXL [15] с использованием минимизации методами комбинированного поиска глобальных и локальных экстремумов и уточнена методом наименьших квадратов в полноматричном анизотропно-изотропном приближении.

Полный набор кристаллографических данных депонирован в Кембриджскую базу кристаллографических данных (CCDC №2388889, 2388890) и может быть получен по ссылке www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif, по электронной почте data_request@ccdc.cam.ac.uk или путём обращения в Кембриджский центр кристаллографических данных (12 Union Road, Cambridge CB2 1EZ, UK; fax: +44 1223 336033).

Синтез комплекса $\text{C}_2\text{H}_4[\text{OV}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$

$\text{C}_2\text{H}_4[\text{OV}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2$ (66 мг, 0.088 ммоль) растворили в 10 мл гексана. К полученному раствору добавили по каплям раствор пиразина (14 мг, 0.175 ммоль) в 2 мл гексана. При полном добавлении раствора пиразина наблюдается выпадение белого осадка спустя 5-10 мин. Масса продукта составила 62 мг. ЯМР (CDCl_3): ^1H s 3.66 ppm (4H, C_2H_4), s 8.99 ppm (8H, pyz);

$^{19}\text{F}\{\text{H}\}$ dd -132.54 ppm (C_6F_5 , $J = 25.6, 10.3$ Гц), t -153.79 ppm (C_6F_5 , $J = 22.3$ Гц), td -161.96 ppm (C_6F_5 , $J = 24.7, 10.0$ Гц). Присутствие единственного уширенного сигнала в ^1H ЯМР спектре, относящемуся к пиразину, может быть объяснено протеканием быстрых обменных процессов в растворе. Путем перекристаллизации из дихлорметана удалось получить пригодные для рентгеноструктурного анализа бесцветные монокристаллы.

Синтез комплекса $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$

К раствору $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2$ (70 мг 0.088 ммоль) в 20 мл гексана по каплям добавили раствор пиразина (14 мг, 0.175 ммоль) в 2 мл гексана. При полном добавлении раствора пиразина реакционная смесь окрашивается в интенсивно-фиолетовый цвет с выпадением осадка. Масса продукта составила 43 мг. ЯМР (CDCl_3): ^1H m 6.50-6.60 ppm (4H, C_6H_4), s 9.04 ppm (4H, pyz); $^{19}\text{F}\{\text{H}\}$ m -132.21 ppm (C_6F_5 , major), m -132.52 ppm (C_6F_5 , minor), br -153.14 ppm (C_6F_5 , major), br -161.43 ppm (C_6F_5 , minor), br -161.89 ppm (C_6F_5 , minor), m -162.21 ppm (C_6F_5 , major). Согласно данным ЯМР, образец представляет собой смесь комплексов, предположительно состава 1:1 и 1:2. После растворения осадка в дихлорметане наблюдается образование бесцветного раствора. Путем перекристаллизации из дихлорметана удалось получить пригодные для рентгеноструктурного анализа бесцветные монокристаллы $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим структуры донорно-акцепторных комплексов, установленные в настоящей работе. Кристаллографические данные представлены в таблице 1. Структура соединения $\text{C}_2\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ в кристаллах представлена на рис. 1. Атомы бора в комплексе обладают искаженным тетраэдрическим окружением и монодентатной координацией пиразина. Углы O1-B1-C1, O1-B1-C7 и O1-B1-N1 составляют $111.9(4)^\circ$, $111.4(4)^\circ$ и $107.0(4)^\circ$ соответственно. Для второго атома бора углы O2-B2-C13, O2-B2-C19 и O2-B2-N3 составляют $110.3(4)^\circ$, $109.6(4)^\circ$ и $107.9(4)^\circ$ соответственно. В обоих случаях наблюдаются отклонения от тетраэдрического угла, как в большую, так и в меньшую сторону, что связано с объемным эффектом заместителей на атоме бора. Длины связей B1-N1 ($1.666(8)$ Å) и B2-N3 ($1.655(7)$ Å), а также B1-O1 ($1.424(7)$ Å) и B2-O2 ($1.431(7)$ Å) достаточно близки по величинам. Структура соединения $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ в кристаллах представлена на рис. 2. Оба атома бора бидентатной кислоты координированы к атомам азота молекул пиразина с тетраэдрическим окружением атома бора. Следует отметить, что атомы бора эквивалентны и симметричны относительно центра молекулы. Углы O1-B1-C1, O1-B1-C7 и O1-B1-N1

составляют $111.16(15)^\circ$, $114.00(15)^\circ$ и $102.82(14)^\circ$ соответственно. Как и в предыдущем соединении, наблюдаются существенные отклонения от тетраэдрического угла, как в большую, так и в меньшую сторону. Длина связи B1-N1 ($1.644(3) \text{ \AA}$) короче на $0.011\text{-}0.022 \text{ \AA}$ таковой для $\text{C}_2\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$. В то же время B1-O1 ($1.445(2) \text{ \AA}$) наоборот, на $0.014\text{-}0.021 \text{ \AA}$ длиннее таковых в $\text{C}_2\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$. Отметим, что в комплексе $\text{C}_2\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ наблюдается гош-конформация фрагмента $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, что делает невозможным выстраивание центра симметрии в молекуле (рис. 1). Кроме того, наблюдаются внутримолекулярные контакты H-F ($2.334\text{-}2.369 \text{ \AA}$) между различными фрагментами $\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2 \cdot \text{pyz}$, что, вероятно, стабилизирует гош-конформацию фрагмента $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$. Для $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ наблюдается центросимметричная структура, что может быть связано с плоским строением фрагмента $p\text{-C}_6\text{H}_4\text{O}_2$ и достаточным удалением групп $\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2 \cdot \text{pyz}$ друг от друга (рис. 2).

Для $p\text{-C}_6\text{H}_4[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ (рис. 3) в кристаллах наблюдаются $\pi\text{-}\pi$ взаимодействия между группами C_6F_5 различных молекул с межплоскостным расстоянием $3.40(2) \text{ \AA}$. Кроме того, наблюдается F- π взаимодействие атома фтора с π -системой координированного пиразина, расстояние между атомом фтора и плоскостью молекулы пиразина составляет $2.872(3) \text{ \AA}$. Схожие межмолекулярные F- π и $\pi\text{-}\pi$ взаимодействия наблюдаются в кристаллической структуре соединения $(\text{C}_6\text{F}_5)_2\text{BOC}_6\text{F}_5$ [16].

Для известного комплекса $\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_3 \cdot \text{pyz}$ с монодентатной координацией пиразина длина связи бор-азот составляет $1.637(3) \text{ \AA}$ [17], а для бидентатной координации $\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_3 \cdot \text{pyz} \cdot \text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$ длина связей увеличивается до среднего значения 1.658 \AA [17] или 1.649 \AA [18]. Значения длин связей B-N сопоставимы с представленными для $\text{R}[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ ($\text{R}=\text{C}_2\text{H}_4$, $p\text{-C}_6\text{H}_4$) длинами связей, что может указывать на близкие величины акцепторной способности кислотных центров $\text{R}[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2$ ($\text{R}=\text{C}_2\text{H}_4$, $p\text{-C}_6\text{H}_4$) в сравнении с $\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$. Формирование цепочечных полимеров с пиразином наблюдается для $\text{In}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$, GaCl_3 , AlBr_3 , а реализация молекулярного или полимерного строения комплексов определяется акцепторной способностью кислоты Льюиса и энергией перестройки в тригонально-бипирамидальное окружение [17, 19]. В случае комплексов бидентатных кислот $\text{R}[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2$ ($\text{R}=\text{C}_2\text{H}_4$, $p\text{-C}_6\text{H}_4$) с пиразином состава 1:1 ожидалось образование устойчивых полимерных цепей, но при взаимодействии с избытком пиразина наблюдается образование молекулярных комплексов. В работе [19] методом квантово-химических расчетов было показано существенное ослабление донорной способности молекулы пиразина при бидентатной координации ионами H^+ , что указывает на большую прочность связи бор-азот в $\text{R}[\text{OB}(\text{C}_6\text{F}_5)_2]_2 \cdot 2\text{pyz}$ ($\text{R}=\text{C}_2\text{H}_4$, $p\text{-C}_6\text{H}_4$) при монодентатной координации пиразина.

Таблица 1. Кристаллографические данные и экспериментальные условия получения структур для комплексов $R[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ ($R=C_2H_4$, $p-C_6H_4$).

Комплекс	$C_2H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$	$p-C_6H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$
Брутто-формула	$C_{34}H_{12}B_2F_{20}N_4O_2$	$C_{38}H_{12}B_2F_{20}N_4O_2$
Молекулярная масса	910.10	958.14
Температура, К	100(1)	100(1)
Сингония	Орторомбическая	Триклинная
Пространственная группа	$P 2_1 2_1 2_1$	$P-1$
a, Å	12.8793(3)	8.9480(3)
b, Å	14.8211(4)	9.5268(2)
c, Å	17.9449(4)	10.7993(2)
α , °	90	87.087(2)
β , °	90	83.220(2)
γ , °	90	86.766(2)
Объём ячейки, Å ³	3425.42(15)	911.80(4)
Z	4	1
Плотность, г/см ³	1.765	1.745
μ , мм ⁻¹	1.682	1.620
F(000)	1800.0	474.0
Размеры кристалла, мм	0.15×0.14×0.11	0.12 0.1×0.09
Длина волны	Cu K α ($\lambda = 1.54184$)	Cu K α ($\lambda = 1.54184$)
Интервал углов 2 θ , °	7.736 - 160.216	8.254 - 160.872
Индексы h, k, l	-12 ≤ h ≤ 16 -18 ≤ k ≤ 18 -22 ≤ l ≤ 20	-11 ≤ h ≤ 11 -10 ≤ k ≤ 11 -13 ≤ l ≤ 13
Количество отражений	14623	31637
Независимые отражения	6556 [$R_{int} = 0.0745$, $R_{sigma} = 0.0850$]	3831 [$R_{int} = 0.0951$, $R_{sigma} = 0.0450$]
GOF	1.083	1.061
R(F) для $F_o \geq 2\sigma(F_o)$	$R_1 = 0.0533$, $wR_2 = 0.1364$	$R_1 = 0.0421$, $wR_2 = 0.1092$
R(F) для всех отражений	$R_1 = 0.0649$, $wR_2 = 0.1481$	$R_1 = 0.0541$, $wR_2 = 0.1159$

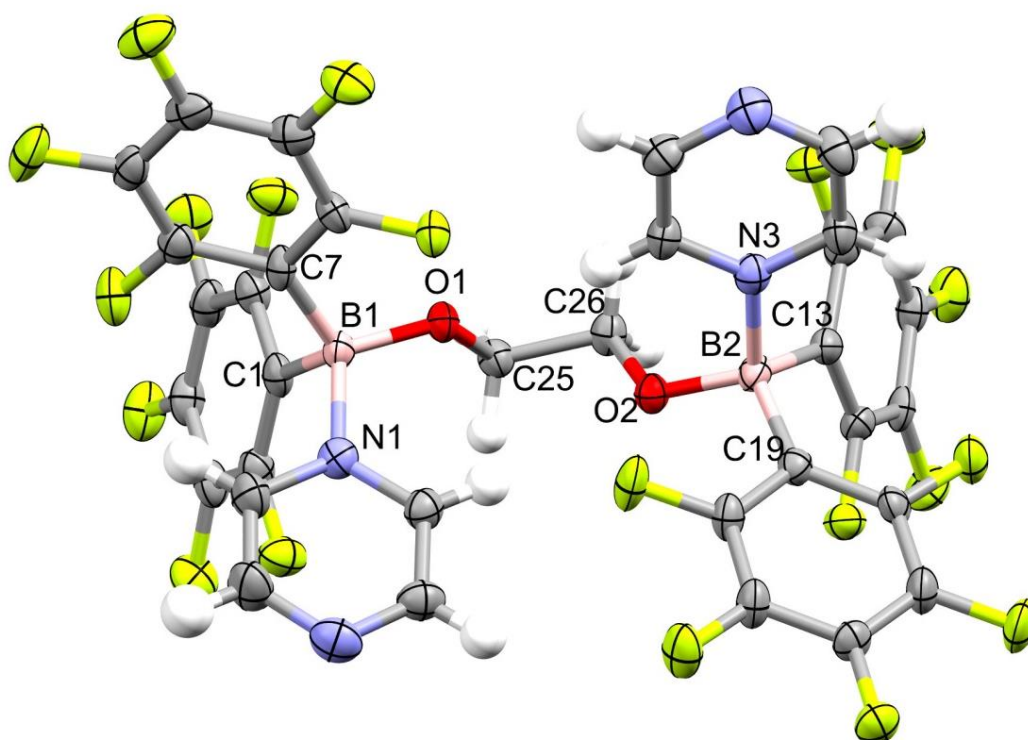


Рисунок 1. Структура соединения $C_2H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ в кристалле. Тепловые эллипсоиды соответствуют 50% вероятности нахождения атомов. Розовый эллипсоид соответствует атому бора, синие эллипсоиды – атомам азота, чёрные – углерода, жёлтые – фтора, красные – кислорода, белые – водорода.

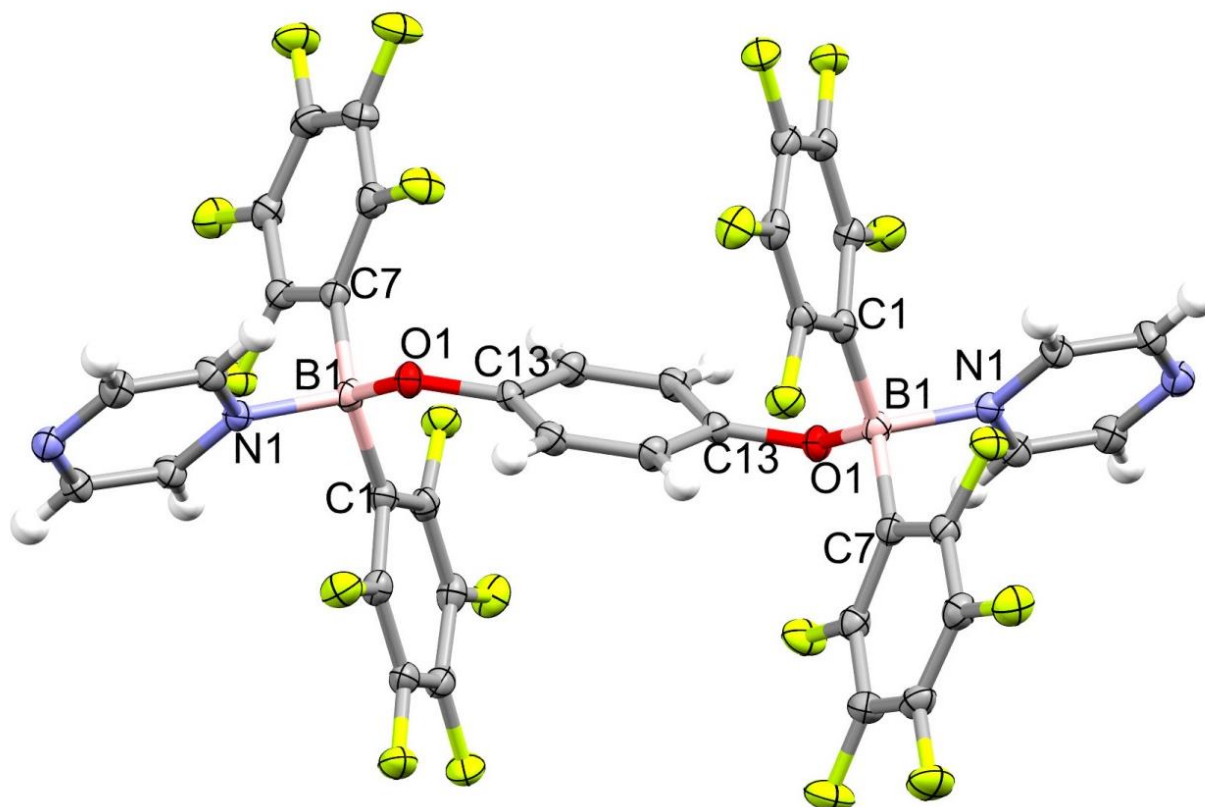


Рисунок 2. Структура соединения $p-C_6H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ в кристалле. Тепловые эллипсоиды соответствуют 50% вероятности нахождения атомов. Розовый эллипсоид соответствует атому бора, синие эллипсоиды – атомам азота, чёрные – углерода, жёлтые – фтора, красные – кислорода, белые – водорода.

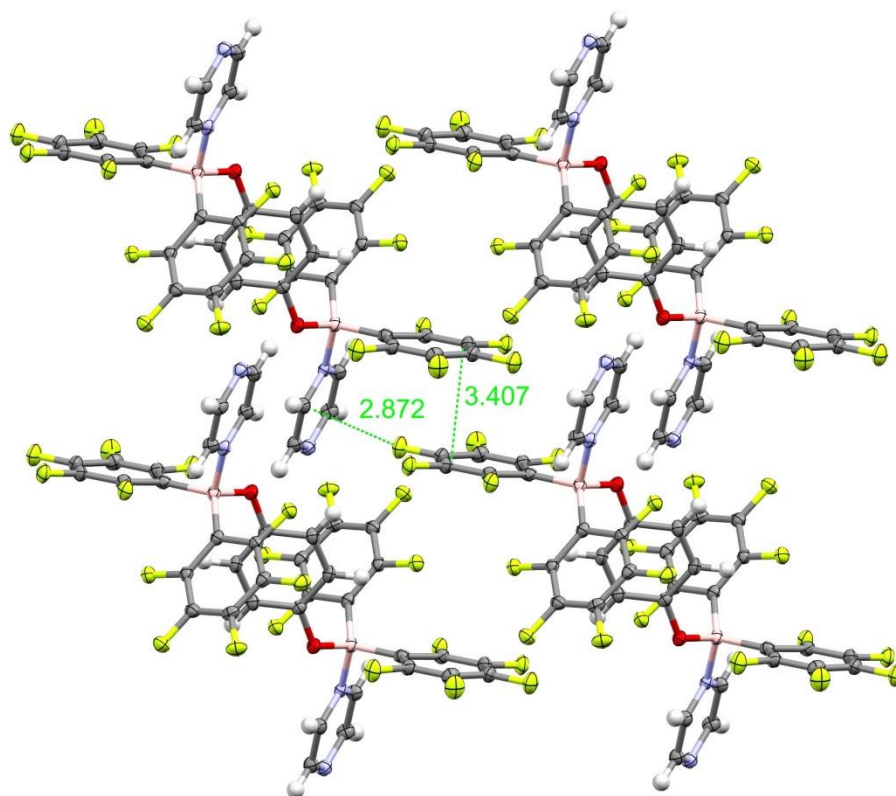


Рисунок 3. Представлены π - π взаимодействия между группами C_6F_5 различных молекул и F- π взаимодействие атома фтора с π -системой координированного пиразина для $p\text{-}C_6H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ в кристалле. Тепловые эллипсоиды соответствуют 50% вероятности нахождения атомов. Розовый эллипсоид соответствует атому бора, синие эллипсоиды – атомам азота, чёрные – углерода, жёлтые – фтора, красные – кислорода, белые – водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При взаимодействии $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p\text{-}C_6H_4$) с пиразином наблюдается образование комплексов, в которых атомы бора координированы к молекулам пиразина, выступающих в роли монодентатного лиганда. По-видимому, такой тип координации является более предпочтительным в сравнении с образованием цепочечных полимеров. В полученных комплексах атомы бора ожидаемо обладают искаженным тетраэдрическим окружением, а длины связей B-N указывают на высокую кислотность Льюисовых центров в $R[OB(C_6F_5)_2]_2$ ($R=C_2H_4$, $p\text{-}C_6H_4$), сопоставимую с таковой для $B(C_6F_5)_3$. Для $p\text{-}C_6H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ в кристаллах наблюдаются межмолекулярные π - π взаимодействия между группами C_6F_5 и F- π взаимодействие атома фтора с π -системой координированного пиразина. В целом, комплексы $C_2H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ и $p\text{-}C_6H_4[OB(C_6F_5)_2]_2 \cdot 2pyz$ представляют собой немногочисленные примеры комплексов бидентатных кислот Льюиса на основе бора с азотдонорными лигандами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00597). Авторы благодарят ресурсный парк СПбГУ за доступ к оборудованию ресурсных центров СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Магнитно-резонансные методы исследования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.F. Shriver, M.J. Biallas. Observation of the chelate effect with a bidentate Lewis acid, $F_2BCH_2CH_2BF_2$. *J. Am. Chem. Soc.*, **1967**, 89(5), 1078. <https://doi.org/10.1021/ja00981a007>
2. M. Große, H.A. Wegner, Bidentate Lewis acid-catalyzed inverse electron-demand diels-alder reaction of phthalazines and cyclooctynes. *Synlett*, **2023**, 34, A–D. <http://dx.doi.org/10.1055/a-2204-9522>
3. L. Hong, S. Ahles, A.H. Heindl, G. Tiétcha, A. Petrov, Z. Lu, C. Logemann, H.A. Wegner. An air-stable bisboron complex: a practical bidentate Lewis acid catalyst. *Beilstein J. Org. Chem*, **2018**, 14, 618. <https://doi.org/10.3762/bjoc.14.48>
4. K. Maruoka. Design of sophisticated bidentate Lewis acids and organocatalysts for fine organic synthesis. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2009**, 82(8), 917. <http://dx.doi.org/10.1246/bcsj.82.917>
5. P. Niermeier, S. Blomeyer, Y.K.J. Bejaoui, J.L. Beckmann, B. Neumann, H.-G. Stammler, N.W. Mitzel. Bidentate boron Lewis acids: selectivity in host-guest complex formation. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2019**, 58(7), 1965. <https://doi.org/10.1002/anie.201812696>
6. J.L. Beckmann, B. Neumann, H.-G. Stammler, N.W. Mitzel. Selectivity in adduct formation of a bidentate boron Lewis acid. *Chem. Eur. J.*, **2024**, 30(27), e202400081. <http://dx.doi.org/10.1002/chem.202400081>
7. E. Weisheim, C.G. Reuter, P. Heinrichs, Y.V. Vishnevskiy, A. Mix, B. Neumann, H.-G. Stammler, N.W. Mitzel. Tridentate Lewis Acids Based on 1,3,5-Trisilacyclohexane Backbones and an Example of Their Host – Guest Chemistry. *Chem. Eur. J.*, **2015**, 21, 12436.
8. J. Horstmann, M. Hyseni, A. Mix, B. Neumann, H.-G. Stammler, N.W. Mitzel. From bidentate gallium Lewis acids to supramolecular complexes. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56, 1. <https://doi.org/10.1002/anie.201701303>
9. S.M. Kilyanek, X. Fang, R.F. Jordan. Synthesis and reactivity of a tetragallium macrocycle. *Organometallics*, **2009**, 28, 300. <http://dx.doi.org/10.1021/om800902d>
10. M. Schulte, F.P. Gabbaï. Synthesis of B/Ga and B/In heteronuclear bidentate Lewis acids: formation of intramolecular π -arene-gallium(III) and -indium(III) complexes. *Chem. Eur. J.*, **2002**, 8(16), 3802. [https://doi.org/10.1002/1521-3765\(20020816\)8:16%3C3802::AID-CHEM3802%3E3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-3765(20020816)8:16%3C3802::AID-CHEM3802%3E3.0.CO;2-5)
11. W.E. Piers, G.J. Irvine, V.C. Williams. Highly Lewis acidic bifunctional organoboranes. *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2000**, 2000(1), 2131. [https://doi.org/10.1002/1099-0682\(200010\)2000:10%3C2131::AID-EJIC2131%3E3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1099-0682(200010)2000:10%3C2131::AID-EJIC2131%3E3.0.CO;2-H)
12. J.L.W. Pohlmann, F.E. Brinckmann. Preparation and characterization of Group III A derivatives. *Z. Naturforschung*, **1965**, 20b, 5. <https://doi.org/10.1515/znb-1965-0102>
13. CrysAlisPro, 1.171.41.206a (release 127-106-2012). Oxford, UK: Rigaku Oxford Diffraction, **2021**.
14. O.V. Dolomanov, L.J. Bourhis, R.J. Gildea, J.A.K. Howard, H. Puschmann. OLEX2: a complete structure solution, refinement and analysis program. *J. Appl. Crystallogr.*, **2009**, 42, 339. <https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
15. G.M. Sheldrick. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallogr. Sect. C: Struct.*

- Chem.*, **2015**, 71, 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
16. G.J.P. Britovsek, J. Ugoletti, A.J.P. White. From $B(C_6F_5)_3$ to $B(OC_6F_5)_3$: Synthesis of $(C_6F_5)_2BOC_6F_5$ and $C_6F_5B(OC_6F_5)_2$ and their relative Lewis acidity. *Organometallics*, **2005**, 24, 1685. <https://doi.org/10.1021/om049091p>
 17. N.A. Shcherbina, I.V. Kazakov, A.S. Lisovenko, M.A. Kryukova, I.S. Krasnova, M. Bodensteiner, A.Y. Timoshkin. Molecular complexes of non-chelating polydentate Lewis bases with group 13 Lewis acids: crystal structure and computed energy of stepwise donor-acceptor bond formation. *Mendeleev Communications*, **2022**, 32(4), 74. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.01.024>
 18. F. Focante, P. Mercandelli, A. Sironi, L. Resconi. Complexes of tris(pentafluorophenyl)boron with nitrogen-containing compounds: synthesis, reactivity and metallocene activation. *Coord. Chem. Rev.*, **2006**, 250, 170. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2005.05.005>
 19. T.N. Sevastianova, M. Bodensteiner, A.S. Lisovenko, E.I. Davydova, M. Scheer, T.V. Susliakova, I.S. Krasnova, A.Y. Timoshkin. Structural and thermodynamic properties of molecular complexes of aluminum and gallium trihalides with bifunctional donor pyrazine: decisive role of Lewis acidity in 1D polymer formation. *Dalton Trans.*, **2013**, 42, 11589. <https://doi.org/10.1039/C3DT50954K>