

КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

УДК 546.271:546.97

СИНТЕЗ НОВОГО РОДА КАРБОРАНА [3,3-(1',5'-COD)-8-PrNH=C(Et)NH-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀]

© 2022 г. М. Ю. Стогний^а, *, Е. В. Богданова^а, С. А. Ануфриев^а, И. Б. Сиваев^а^аИнститут элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, ул. Вавилова, 28, Москва, 119991 Россия

*e-mail: stogniy@ineos.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2022 г.

Установлено, что комплексообразование амидинового производного *нидо*-карборана 10-PrNHC(Et)=HN-7,8-C₂B₉H₁₁ с димером хлорида (1,5-циклооктадиен)родия(I) [(COD)RhCl]₂ в тетрагидрофуране в присутствии *трет*-бутилата калия в качестве основания приводит к новому 18-электронному комплексу родия(I) полусэндвичевого типа, в котором дикарболлидный лиганд хелатирует металл по η⁵-типу. Строение полученного комплекса подтверждено методами ЯМР-, ИК- и УФ-спектроскопии, а также масс-спектрометрии. Синтезированный комплекс представляет собой первый пример комплексов родия(I) на основе симметрично замещенного производного *нидо*-карборана со связью бор–азот.

Ключевые слова: полиэдрические гидриды бора, карбораны, *нидо*-карборан, амидины, полусэндвичевые комплексы, родий

DOI: 10.31857/S0044457X22100567

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее значимых представителей семейства полиэдрических гидридов бора, наряду с икосаэдрическими карборанами C₂B₁₀H₁₂ [1, 2], *клозо*-декаборатным [B₁₀H₁₀]²⁻ и *клозо*-додекаборатным [B₁₂H₁₂]²⁻ анионами [3–10] и их монокарборановыми аналогами [CB₉H₁₀]⁻ и [CB₁₁H₁₂]⁻ [11–13], является 7,8-дикарба-*нидо*-ундекаборатный анион (*нидо*-карборан) [7,8-C₂B₉H₁₂]⁻, образующийся при селективном деборировании 1,2-дикарба-*клозо*-додекаборана (*орто*-карборана) [14, 15]. Главной особенностью *нидо*-карборана является наличие открытой пентагональной грани с *эндо*-полиэдрическим атомом водорода, отрыв которого с помощью сильных оснований приводит к образованию дикарболлидного дианиона [7,8-C₂B₉H₁₁]²⁻, являющегося трехмерным π-лигандом, изолябальным циклопентадиенид-аниону [16]. Практически сразу с момента открытия *нидо*-карборана начались исследования по синтезу металлокомплексов на его основе, в ходе которых были получены дикарболлидные комплексы подавляющего большинства *d*- и *f*-металлов [17–19]. При этом повышенный заряд дикарболлидного лиганда может быть частично компенсирован введением заместителей ониевого типа: –O⁺R₂, –S⁺R₂, –N⁺R₃, –P⁺R₃ и т.п. Способность *нидо*-карборана к образованию заряд-компенсированных ониевых производных типа X-L-

7,8-C₂B₉H₁₁ (X = 9, 10; L = OR₂, SR₂, NR₃, PR₃) активно используется при синтезе металлокомплексов, так как позволяет уменьшить общий заряд системы, стабилизировать в ряде случаев неустойчивые степени окисления металлов, а также упростить процедуру очистки и выделения соединений [20, 21]. При этом наибольший интерес представляют симметрично замещенные заряд-компенсированные производные *нидо*-карборана с заместителем при десятом атоме бора, так как в этом случае отсутствуют энантиомерные смеси, характерные для асимметричных C- и B(9)-замещенных производных, а наличие плоскости симметрии существенно упрощает исследование продуктов методом спектроскопии ЯМР.

Ранее нами был разработан препаративный метод синтеза 10-замещенных нитрильных производных *нидо*-карборана 10-RC≡N-7,8-C₂B₉H₁₁ (R = Me, Et, CH₂CH₂Br, CH₂CH₂OCH₂CH₂CN) и показано, что посредством реакций нуклеофильного присоединения по тройной связи нитрильной группы –N⁺≡C этих соединений возможно получение заряд-компенсированных *нидо*-карборансодержащих иминов, имидазов, тииоимидатов и амидинов [22–26]. Полученные таким образом амидины оказались перспективными лигандами для синтеза металлокомплексов никеля(II) и палладия(II) полусэндвичевого строения, в которых дикарболлидный лиганд может координи-

роваться атомом металла как по η^5 -типу, так и по $\eta^5:\kappa^1\text{-N-}$ и $\eta^5:\kappa^2\text{-N,N'}$ -типам (рис. 1) [25, 27].

В данной работе описан синтез нового родакарборана [3,3-(1',5'-COD)-8-PrNH=C(Et)NH-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀] путем взаимодействия амидинового производного *нидо*-карборана 10-PrNHC(Et)=HN-7,8-C₂B₉H₁₁ с димером хлорида (1,5-циклооктадиен)родия(I) [(COD)RhCl]₂.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Амидиновое производное *нидо*-карборана **1** было синтезировано по методике [24]. Тетрагидрофуран осушали перегонкой над металлическим натрием в присутствии бензофенона, используя стандартную процедуру [28]. Ход реакции контролировали с помощью тонкослойной хроматографии на пластинках Kieselgel 60 F245 (Merck), для проявления использовали 0.5%-ный раствор PdCl₂ в метаноле с добавлением 1% HCl. Для колоночной хроматографии использовали силикагель Acros Organics 0.06–0.2 мм, 60 Å.

Спектры ЯМР ¹H, ¹¹B, ¹¹B{¹H}, ¹³C и корреляционные спектры (HN)gCOSY, (HC)HSQC, (HN)NOESY были зарегистрированы на спектрометре Varian Inova 400. Для спектров ЯМР ¹H и ¹³C химические сдвиги приведены относительно Me₄Si, для спектров ЯМР ¹¹B, ¹¹B{¹H} — относительно BF₃·Et₂O. Для спектров ЯМР использованы следующие сокращения: м.д. — миллионные доли, *J* — константа спин-спинового взаимодействия, с — синглет, уш. с — уширенный синглет, д — дублет, т — триплет, к — квартет, м — мультиплет. ИК-спектр записывали на приборе ФСМ2201 (ИНФРАСПЕК, УФ-спектр — на прибора SF-2000 (OKB SPECTR LLC). Масс-спектр высокого разрешения (ESI HRMS) получен на масс-спектрометре Bruker Daltonics microOTOF II в диапазоне масс *m/z* от 50 до *m/z* = 3000.

Синтез [3,3-(1',5'-COD)-8-PrNH=C(Et)NH-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀] (2). Синтез проводили в атмосфере аргона. В круглодонную колбу помещали 0.13 г (0.50 ммоль) 10-PrNHC(Et)=HN-7,8-C₂B₉H₁₁ (**1**), 20 мл сухого тетрагидрофурана и 0.17 г (1.50 ммоль) *t*-BuOK. Реакционную смесь перемешивали в течение ~10 мин при комнатной температуре, а затем добавляли одной порцией 0.25 г (0.50 ммоль) [(COD)RhCl]₂. Цвет реакционной смеси быстро изменялся с бледно-желтого на коричневый. Реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение ~30 мин, а затем упаривали. Для очистки вещества применяли колоночную хроматографию на силикагеле, используя хлористый метилен в качестве элюента. В результате получили 0.21 г желто-коричневого кристаллического продукта. Выход составил 92%. ¹H ЯМР-спектр (ацетон-*d*₆, м.д.): 8.12 (1H, с,

NHPr), 7.33 (1H, с, NH=C), 4.05–4.15 (4H, м, COD), 3.57 (2H, к, *J* = 6.9 Гц, NHCH₂CH₂CH₃), 2.83 (уш. с, 2H, CH_{карб}), 2.68 (2H, к, *J* = 7 Гц, CH₂CH₃), 2.25–2.40 (4H, м, COD), 2.05–2.15 (4H, м, COD), 1.77–1.80 (2H, м, NHCH₂CH₂CH₃), 1.30 (3H, т, *J* = 7 Гц, CH₂CH₃), 1.05 (3H, т, *J* = 6.9 Гц, NHCH₂CH₂CH₃), 3.0–0.6 (уш. с, 8H, BH). ¹³C ЯМР (ацетон-*d*₆, м.д.): 167.1 (NH=C), 75.0 (CH=CH от COD, д, *J* = 12 Гц), 44.8 (NHCH₂CH₂CH₃), 34.2 (CH_{карб}), 32.1 (CH₂ от COD), 24.5 (CH₂), 23.4 (NHCH₂CH₂CH₃), 11.0 (CH₃), 10.6 (NHCH₂CH₂CH₃). ¹¹B ЯМР (ацетон-*d*₆, м.д.): 4.9 (с, 1B), –12.5 (д, *J* = 135 Гц, 2B), –16.1 (д, *J* = 126 Гц, 3B), –23.7 (д, *J* = 150 Гц, 2B), –26.7 (д, *J* = 155 Гц, 1B). ИК-спектр (тонкая пленка, см^{–1}): 3380 (ν_{NH}), 3305 (ν_{NH}), 3246 (ν_{NH}), 2989, 2969, 2941, 2880 (ν_{CH}), 2832 (ν_{CH}), 2589 (ν_{BH}), 2558 (ν_{BH}), 2510 (ν_{BH}), 1641 (ν_{N=C}), 1614 (ν_{C=C}), 1555, 1476, 1459, 1329, 1243. УФ-спектр (λ, нм): 204, 316, 405. Масс-спектр высокого разрешения ESI HRMS: *m/z* для C₁₆H₃₆B₉N₂Rh, вычислено: 479.2733 [M + Na]⁺, найдено: 479.2738 [M + Na]⁺.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему моменту получено большое количество комплексов родия на основе *нидо*-карборана [29–33], представляющих интерес в качестве катализаторов целого ряда органических процессов, таких как реакции окислительного сочетания [34], аннелирования [33], гидрирования и изомеризации олефинов [31, 35] и др. [32]. Однако синтез комплексов родия с использованием в качестве лиганда симметрично замещенных заряд-компенсированных производных *нидо*-карборана ограничивается лишь несколькими примерами. Так, на основе симметрично замещенных сульфониевых производных *нидо*-карборана получены полусэндвичевые комплексы родия(I) с двумя трифенилфосфиновыми лигандами [3,3-(Ph₃P)₂-8-RR'S-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀] (R = R' = Me, Et; RR' = (CH₂)₄; R = Et, R' = Ph) [36], а также комплексы родия(I) с циклооктадиеном [1,2-R₂-3,3-(COD)-8-Me₂S-3,1,2-RhC₂B₉H₈] (R = H; Me) и показано, что комплекс [3,3-(COD)-8-Me₂S-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀] при обработке I₂ в бензоле димеризуется в [3,3-I₂-8-Me₂S-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀]₂ [36, 37]. Установлено, что комплексы родия(I) легко окисляются в растворе хлороформа или четыреххлористого углерода с образованием соответствующих комплексов родия(III) [3-Ph₃P-3,3-Cl₂-8-RR'S-3,1,2-RhC₂B₉H₁₀] (R = R' = Me, Et; RR' = (CH₂)₄; R = Et, R' = Ph) [36]. В качестве еще одного примера металлокомплексов с заряд-компенсирующей группой при десятом атоме бора можно привести комплекс родия(III) [1,2-Me₂-3-Ph₃P-3-Cl-3H-8-Ph₃P-3,1,2-RhC₂B₉H₈], который

был получен реакцией углеродзамещенного *нидо*-карборана $[7,8\text{-Me}_2\text{-}7,8\text{-C}_2\text{B}_9\text{H}_{10}]^-$ с $[(\text{Ph}_3\text{P})_3\text{RhCl}]$, сопровождающейся замещением в карборановом лиганде [38].

Синтез комплексов родия на основе заряд-компенсированных производных *нидо*-карборана со связью бор—азот представлен только асимметрично замещенными лигандами [31, 39–41]. В

связи с этим нами изучено комплексообразование *нидо*-карборансодержащего амидина 10- $\text{PrNHC(Et)=HN-}7,8\text{-C}_2\text{B}_9\text{H}_{11}$ (**1**) с комплексом родия(I) $[(\text{COD})\text{RhCl}]_2$. Реакцию проводили в сухом тетрагидрофуране в инертной атмосфере во избежание окисления металла. В качестве основания для удаления *эндо*-водорода использовали *трет*-бутилат калия (схема 1).

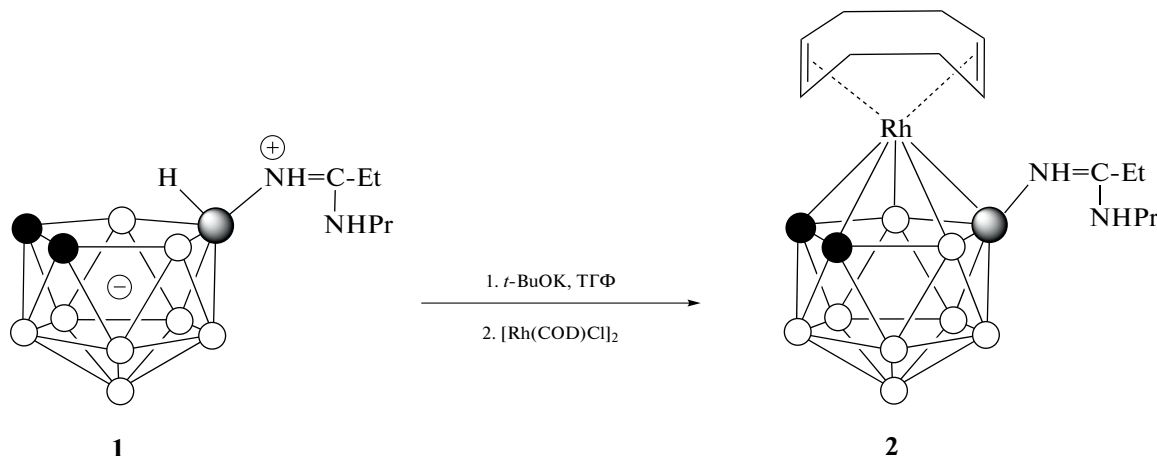


Схема 1. Синтез $[3,3\text{-(}1',5'\text{-COD)}\text{-}8\text{-PrNH=C(Et)NH-}3,1,2\text{-RhC}_2\text{B}_9\text{H}_{10}]$.

Обнаружено, что комплексообразование протекает достаточно быстро даже при комнатной температуре. Согласно данным, полученным с помощью метода тонкослойной хроматографии в хлористом метиле, полная конверсия амидина **1** в комплекс **2** проходит менее чем за 30 мин. Процесс выделения целевого продукта из реакционной смеси включал в себя колоночную хроматографию на силикагеле с использованием в качестве элюента хлористого метилена. Комплекс **2** желто-коричневого цвета был получен с высоким выходом (92%).

Полученный комплекс охарактеризован различными методами спектроскопии ЯМР. При этом наиболее значимыми являются спектры ЯМР ^{11}B и $^{11}\text{B}\{^1\text{H}\}$. Так, в спектре ЯМР ^{11}B (рис. 2) сигналы от девяти атомов бора дикарболлидного лиганда присутствуют в области примерно от 5 до -30 м.д., что соответствует типичной картине спектров комплексов полусэндвичевого типа на основе *нидо*-карборана. В спектре наблюдается всего пять сигналов, что говорит о наличии плоскости симметрии в соединении. Синглет от замещенного атома бора находится при 4.9 м.д., остальные сигналы представляют собой дублеты при -12.5 , -16.1 , -23.7 и -26.7 м.д. с общим соотношением интегральных интенсивностей 1 : 2 : 3 : 2 : 1.

В спектре ЯМР ^1H соединения **2** отсутствует характеристичный сигнал *эндо*-водорода *нидо*-карборанового остова, а синглет от *CH*-протонов

дикарболлидного лиганда наблюдается при 2.83 м.д., что подтверждает факт образования комплекса. В спектре также присутствуют сигналы циклооктадиенового лиганда и заместителя в дикарболлидном лиганде. При этом наблюдаются два сигнала NH-групп бокового заместителя при 8.12 и 7.33 м.д., что подтверждает предполагаемую структуру комплекса **2**, в которой дикарболлидный лиганд координируется атомом металла по η^5 -типу. Таким образом, боковой заместитель, как и в случае *C*-амидинкарборанильного комплекса родия(III) $[3\text{-Cr}^*\text{-}1\text{ (}2',6'\text{-}^i\text{Pr}_2\text{-C}_6\text{H}_3\text{N=C(NHC}_6\text{H}_3\text{-}2'',6''\text{-}^i\text{Pr}_2\text{)-}3,1,2\text{-RhC}_2\text{B}_9\text{H}_{10}]$ [42], не принимает непосредственного участия в комплексообразовании. Для соотношения сигналов NH-протонов был получен спектр ЯМР (NH)gCOSY (рис. 3). Из данного спектра видно, что сигнал при 8.12 м.д. имеет кросс-пик с квинтетом от $\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ и, следовательно, соответствует атому водорода группы NHPr , тогда как синглет при 7.33 м.д. не имеет кросс-пиков ни с одной из групп, что хорошо согласуется с ожидаемой спектральной картиной для атома водорода при двойной связи NH=C .

Интересной особенностью спектра ЯМР ^{13}C комплекса **2** является расщепление сигналов от атомов углерода при двойной связи в 1,5-циклооктадиене на атоме родия. Сигналы проявляются в виде дублета при 75.0 м.д. с константой спин-спинового взаимодействия, равной 12 Гц. Сигнал

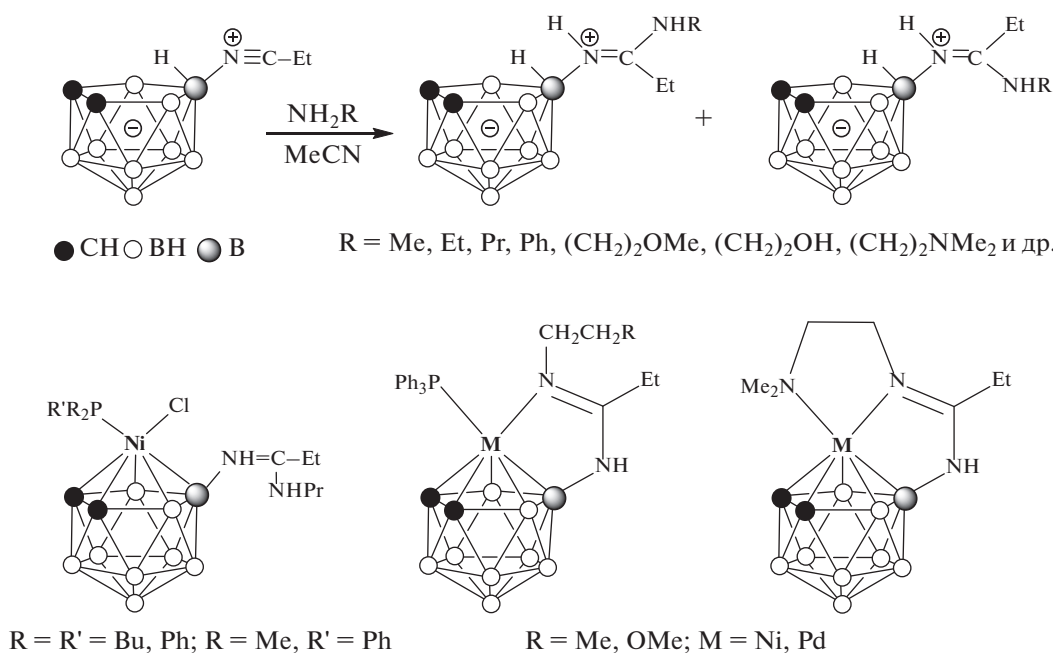


Рис. 1. Синтез *нидо*-карборансодержащих амидинов и металлокомплексов на их основе.

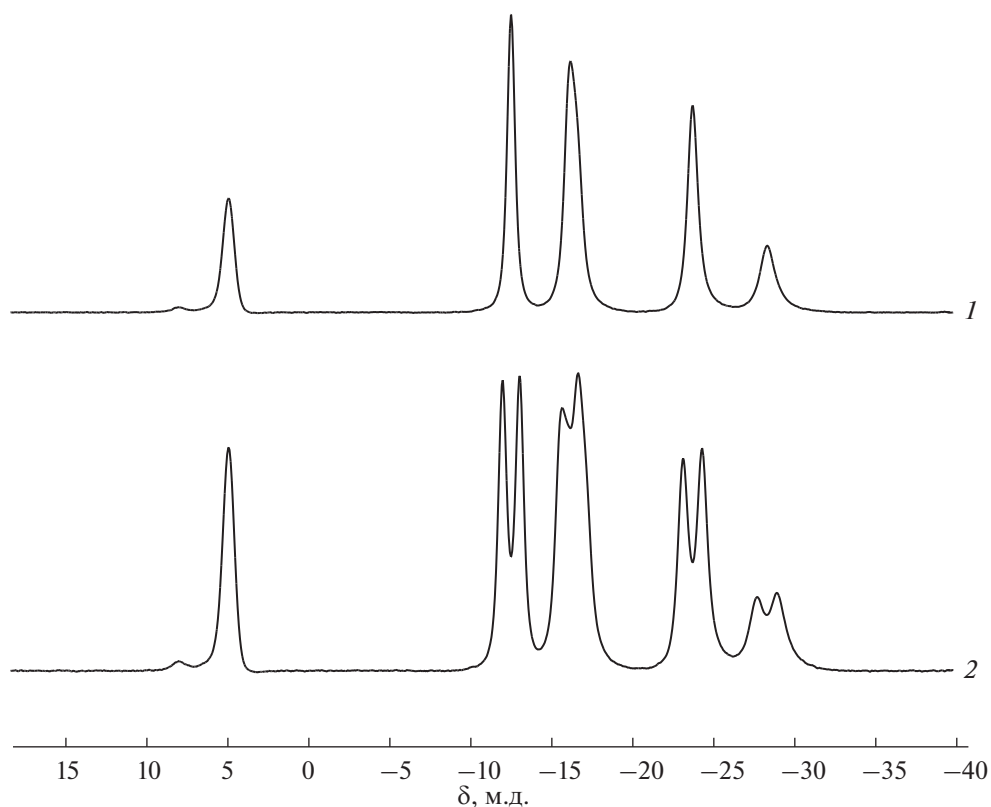


Рис. 2. Спектры ЯМР $^{11}\text{B}\{^1\text{H}\}$ (1) и ^{11}B (2) комплекса 2.

от атома углерода группы $\text{NH}=\text{C}$ наблюдается при 167.1 м.д. Метиленовые группы циклооктадиенового лиганда, проявляющиеся в спектре ЯМР ^1H в виде мультиплетов при 2.25–2.40 и 2.05–2.15 м.д., в спектре ЯМР ^{13}C наблюдаются в виде одного сигнала при 32.1 м.д. (рис. 4).

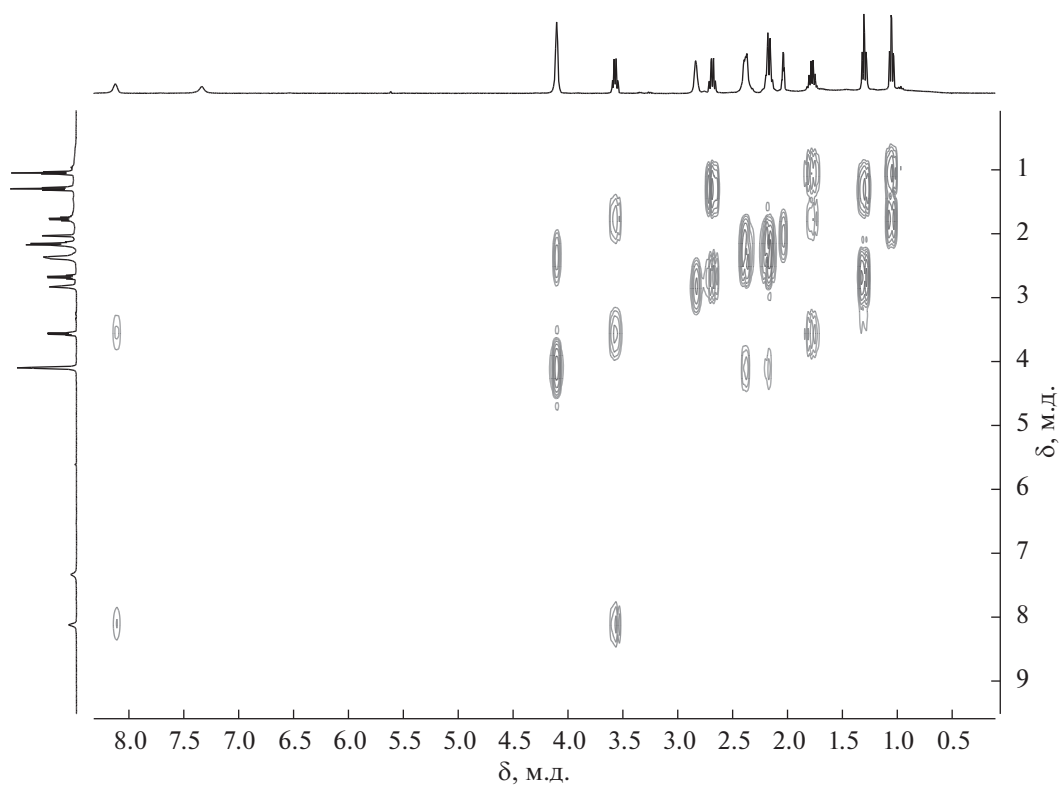


Рис. 3. Спектр ЯМР (NH)gCOSY комплекса 2.

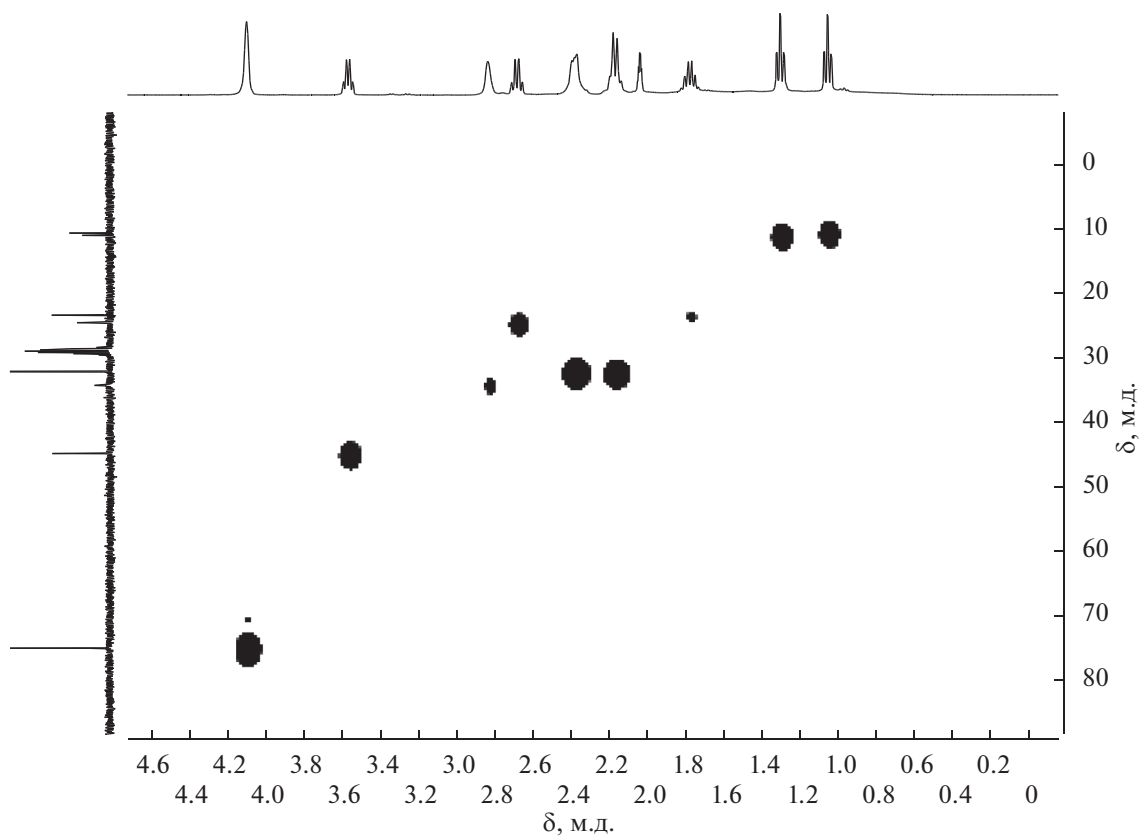
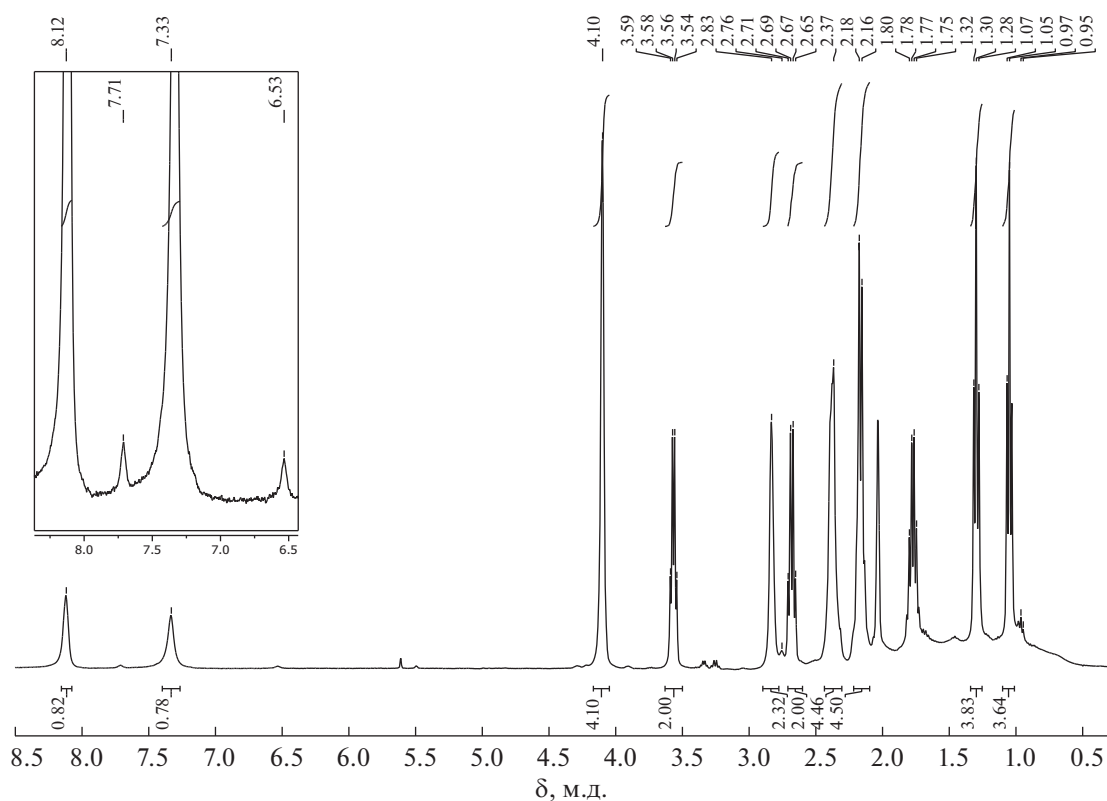
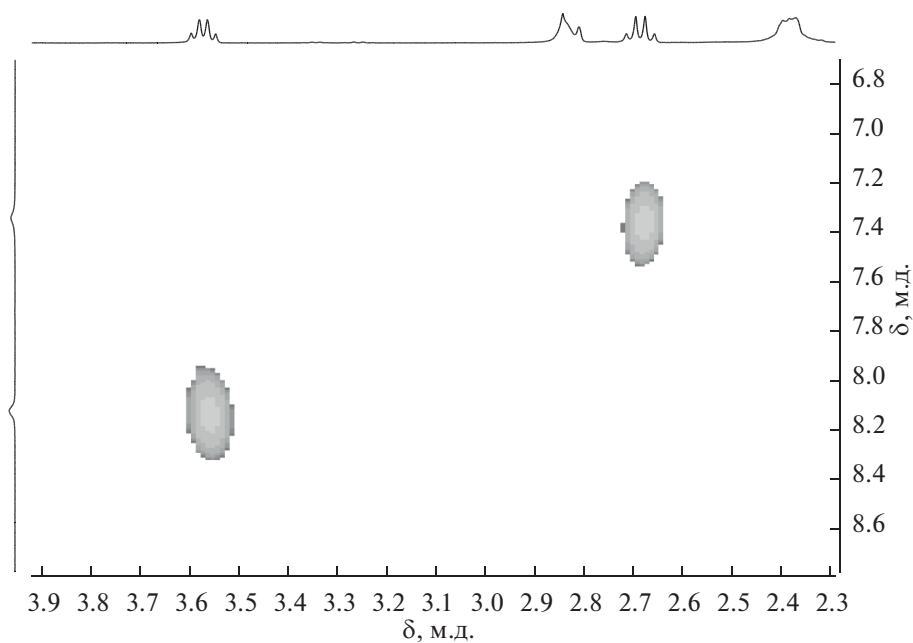


Рис. 4. Спектр ЯМР (H)HSQC комплекса 2.


 Рис. 5. Спектр ЯМР ^1H комплекса **2**.

 Рис. 6. Фрагмент спектра ЯМР (HN)NOESY комплекса **2**.

Следует отметить, что исходный амидин **1** представляет собой смесь *E*- и *Z*-изомеров в соотношении примерно 1 : 1 (рис. 1) [24]. На основе анализа спектров ЯМР ^1H и ^{11}B комплекса **2** мож-

но предположить, что полученный комплекс также представляет собой смесь стереоизомеров, один из которых является минорным. Так, в спектре ЯМР ^1H (рис. 5) помимо основных сигнала-

лов можно также наблюдать второй набор сигналов малой интенсивности. Наиболее четко выделяются сигналы при 7.71 и 6.53 м.д. от NH-протонов, синглет от СН-протона при 2.76 м.д. и триплет от метильной группы пропильного заместителя при 0.97 м.д. Остальные сигналы накладываются на сигналы основного изомера и не поддаются идентификации. В спектре ЯМР ^{11}B также четко прослеживается синглет от замещенного десятого атома бора минорного изомера при 8.0 м.д. (рис. 2). Исходя из интегральной интенсивности синглетов обоих изомеров можно сделать вывод, что содержание минорного продукта составляет ~5%.

Для определения абсолютной конфигурации основного изомера был получен спектр ЯМР (NH)NOESY. На рис. 6 приведен фрагмент этого спектра, из которого видно, что сигнал протона $\text{NH}=\text{C}$ при 7.33 м.д. имеет кросс-пик с квинтетом метиленовой группы этильного заместителя при 2.68 м.д. Это свидетельствует о том, что указанные группы находятся по одну сторону от двойной связи, что соответствует *Z*-конфигурации для основного изомера. Отсутствие кросс-пика между сигналом протона $\text{NH}=\text{C}$ и квинтетом метиленовой группы пропильного заместителя также говорит в пользу данного предположения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, обнаружено, что комплексообразование симметрично замещенного заряд-компенсированного карбораниламида 10- $\text{PrNHC}(\text{Et})=\text{HN}-7,8-\text{C}_2\text{B}_9\text{H}_{11}$ с $[(\text{COD})\text{RhCl}]_2$ приводит к полусэндвичевому комплексу родия(I) $[3,3-(1',5'-\text{COD})-8-\text{PrNH}=\text{C}(\text{Et})\text{NH}-3,1,2-\text{RhC}_2\text{B}_9\text{H}_{10}]$, в котором дикарболидный лиганд связан с атомом металла по η^5 -типу. В растворе синтезированный комплекс находится преимущественно в виде *Z*-изомера с небольшой примесью *E*-изомера, что было подтверждено методом ЯМР-спектроскопии.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят к. х. н. С.В. Тимофеева (ИНЭОС РАН) за предоставленный комплекс родия $[(\text{COD})\text{RhCl}]_2$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-10199). Спектры ЯМР получены с использованием оборудования Центра исследования строения молекул ИНЭОС РАН, работающего при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Grimes R.N.* Carboranes. London: Academic Press, 2016. P. 283.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801894-1.00009-3>
2. *Sivaev I.B.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 9. P. 1289. [*Сиваев И.Б.* // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 9. С. 1192.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090151>
3. *Sivaev I.B., Bregadze V.I., Sjöberg S.* // Collect. Czech. Chem. Commun. 2002. V. 67. № 6. P. 679.
<https://doi.org/10.1135/cccc20020679>
4. *Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Naoufal D.* // Collect. Czech. Chem. Commun. 2010. V. 75. № 11. P. 1149.
<https://doi.org/10.1135/cccc2010054>
5. *Zhizhin K.Yu., Zhdanov A.P., Kuznetsov N.T.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. № 14. P. 2089.
<https://doi.org/10.1134/S0036023610140019>
6. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Zhizhin K.Yu. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. № 4. P. 514. [*Авдеева В.В., Малинина Е.А., Жижин К.Ю. и др.* // Журн. неорганической химии. 2020. Т. 65. № 4. С. 495.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023620040026>
7. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Zhizhin K.Yu. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2021. V. 47. № 8. P. 519. [*Авдеева В.В., Малинина Е.А., Жижин К.Ю. и др.* // Координатная химия. 2021. Т. 47. № 8. С. 457.]
<https://doi.org/10.1134/S1070328421080017>
8. *Korolenko S.E., Avdeeva V.V., Malinina E.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 9. P. 1350. [*Короленко С.Е., Авдеева В.В., Малинина Е.А. и др.* // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 9. С. 1255.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090047>
9. *Avdeeva V.V., Garaev T.M., Malinina E.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. № 1. P. 28. [*Авдеева В.В., Гараев Т.М., Малинина Е.А. и др.* // Журн. неорганической химии. 2022. Т. 67. № 1. С. 33.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023622010028>
10. *Avdeeva V.V., Korolenko S.E., Malinina E.A. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 2022. V. 92. № 3. P. 393. [*Авдеева В.В., Короленко С.Е., Малинина Е.А. и др.* // Журн. общей химии. 2022. Т. 92. № 3. С. 443.]
<https://doi.org/10.1134/S1070363222030070>
11. *Körbe S., Schreiber P.J., Michl J.* // Chem. Rev. 2006. V. 106. № 12. P. 5208.
<https://doi.org/10.1021/cr050548u>
12. *Douvris C., Michl J.* // Chem. Rev. 2013. V. 113. № 10. P. R179.
<https://doi.org/10.1021/cr400059k>
13. *Shmal'ko A.V., Sivaev I.B.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 14. P. 1726.
<https://doi.org/10.1134/S0036023619140067>
14. *Hawthorne M.F., Young D.C., Garrett P.M. et al.* // J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. № 4. P. 862.
<https://doi.org/10.1021/ja01006a006>

15. Yoo J., Hwang J.-W., Do Y. // Inorg. Chem. 2001. V. 40. № 3. P. 568.
<https://doi.org/10.1021/ic000768k>
16. Hawthorne M.F., Young D.C., Andrews T.D. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1968. V. 90. № 4. P. 879.
<https://doi.org/10.1021/ja01006a008>
17. Grimes R.N. Transitional metal metallacarboranes // Comprehensive Organometallic Chemistry II. Oxford: Elsevier, 1995. V. 1. P. 373.
<https://doi.org/10.1016/B978-008046519-7.00009-5>
18. Grimes R.N. // Coord. Chem. Rev. 2000. V. 200–202. P. 773.
[https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(00\)00262-9](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(00)00262-9)
19. Hosmane N.S., Maguire J.A. Metallacarboranes of d- and f-block metals // Comprehensive Organometallic Chemistry III. Oxford: Elsevier, 2007. V. 3. P. 175.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-045047-4/00046-7>
20. Stogniy M.Yu., Sivaev I.B. // Reactions. 2022. V. 3. № 1. P. 172.
<https://doi.org/10.3390/reactions3010013>
21. Timofeev S.V., Sivaev I.B., Prikaznova E.A. et al. // J. Organomet. Chem. 2014. V. 751. № 1. P. 221.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2013.08.012>
22. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Suponitsky K.Yu. et al. // New J. Chem. 2018. V. 42. № 22. P. 17958.
<https://doi.org/10.1039/C8NJ04192J>
23. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Anisimov A.A. et al. // Polyhedron. 2019. V. 174. № 1. P. 114170.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.114170>
24. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Suponitsky K.Yu. et al. // J. Organomet. Chem. 2020. V. 909. № 1. P. 121111.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121111>
25. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Suponitsky K.Yu. et al. // Dalton Trans. 2021. V. 50. № 14. P. 4967.
<https://doi.org/10.1039/d1dt00373a>
26. Stogniy M.Yu., Anufriev S.A., Bogdanova E.V. et al. // Russ. Chem. Bull. 2022. V. 71. № 1. P. 91. [Стогний М.Ю., Ануфриев С.А., Богданова Е.В. и др. // Изв. АН, Сер. хим. 2022. № 1. С. 91.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-022-3381-x>
27. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Suponitsky K.Yu. et al. // Crystals. 2021. V. 11. № 3. P. 306.
<https://doi.org/10.3390/cryst11030306>
28. Purification of Laboratory Chemicals; Butterworth-Heinemann: Burlington, NJ, USA, 2009.
29. Grimes R.N. Carboranes. London: Academic Press, 2016. P. 711.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801894-1.00013-5>
30. Molotkov A.P., Vinogradov M.M., Moskovets A.P. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. № 38–39. P. 4635.
<https://doi.org/10.1002/ejic.201700498>
31. Chan A.P.Y., Parkinson J.A., Rosair G.M. et al. // Inorg. Chem. 2020. V. 59. № 3. P. 2011.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b03351>
32. Vinogradov M.M., Loginov D.A. // J. Organomet. Chem. 2020. V. 910. P. 121135.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121135>
33. Molotkov A.P., Timofeev S.A., Loginov D.A. // Russ. Chem. Bull. 2021. V. 70. № 10. P. 1922. [Молотков А.П., Тимофеев С.А., Логинов Д.А. // Изв. АН Сер. хим. 2021. № 10. С. 1922.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-021-3297-x>
34. Loginov D.A., Belova A.O., Kudinov A.R. // Russ. Chem. Bull. 2014. V. 63. № 4. P. 983. [Логинов Д.А., Белова А.О., Кудинов А.Р. // Изв. АН, Сер. хим. 2014. № 4. С. 983.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0537-3>
35. Alekseev L.S., Lyubimov S.E., Dolgushin F.M. et al. // Organometallics. 2011. V. 30. № 7. P. 1942.
<https://doi.org/10.1021/om101201e>
36. Núñez R., Tutusaus O., Teixidor F. et al. // Organometallics. 2004. V. 23. № 10. P. 2273.
<https://doi.org/10.1021/om030635h>
37. Vinogradov M.M., Nelyubina Y.V., Ikonnikov N.S. // J. Organomet. Chem. 2018. V. 867. P. 224.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2018.01.025>
38. Baker R.T., Delaney M.S., King III R.E. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1984. V. 106. № 10. P. 2965.
<https://doi.org/10.1021/ja00322a038>
39. Teller R.G., Wilczynski J.J., Hawthorne M.F. // J. Chem. Soc. Chem. Commun. 1979. № 11. P. 472.
<https://doi.org/10.1039/C39790000472>
40. Timofeev S.V., Zhidkova O.B., Sivaev I.B. et al. // J. Organomet. Chem. 2018. V. 867. P. 342.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.11.014>
41. Timofeev S.V., Zhidkova O.B., Suponitsky K.Yu. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2021. V. 518. P. 120243.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2020.120243>
42. Xu B., Yao Z.-Y., Jin G.-X. // Russ. Chem. Bull. 2014. V. 63. № 4. P. 963. [Сюй Б., Яо Ц.-Ц., Цзинь Г.-С. // Изв. АН Сер. хим. 2014. № 4. С. 963.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0534-6>