

УДК 547.1+542.9

РАЗРЫВ СВЯЗЕЙ В–С И ОБРАЗОВАНИЕ АНИОНА $[\text{PhBH}_3]^-$ В РЕАКЦИИ ГИДРИДНОГО КОМПЛЕКСА Yb(II) С BPh_3

© 2019 г. Д. М. Любов¹, И. В. Басалов¹, А. С. Шавырин¹, А. В. Черкасов¹, А. А. Трифонов^{1, 2, *}

¹Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород, Россия

²Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

*e-mail: trif@iomc.ras.ru

Поступила в редакцию 28.03.2019 г.

После доработки 04.04.2019 г.

Принята к публикации 22.04.2019 г.

Реакция амидинатгидридного комплекса двухвалентного иттербия $[(\text{Amd})\text{Yb}^{\text{II}}(\mu^2\text{-H})_2]$ ($\text{Amd} = \{\text{трет-БуС}(\text{NC}_6\text{H}_3\text{-изо-Pr}_2\text{-2,6})_2\}$) с BPh_3 протекает с разрывом связей В–С и приводит к образованию комплекса $\text{Yb(II)}[(\text{Amd})\text{Yb}^{\text{II}}(\mu^2\text{-H}_3\text{BPh})_2]$, содержащего фенилтригидроборатный анион $[\text{PhBH}_3]^-$. Методом PCA (CIF file CCDC № 1902290) показано, что в комплексе анионы $[\text{PhBH}_3]^-$ мостиковые, при этом для амидинатного лиганда сохраняется “неклассический” κ^1 -амидо- η^6 -ареновый тип координации на ион Yb^{2+} .

Ключевые слова: лантаниды, гидридные комплексы, синтез, строение, реакционная способность

DOI: 10.1134/S0132344X19100025

Уникальная реакционная способность гидридных комплексов лантаноидов в стехиометрических реакциях наряду с впечатляющей каталитической активностью в целом ряде превращений ненасыщенных субстратов дали мощный толчок стремительному развитию этой области химии [1–7]. Первые сообщения о синтезе *бис*(циклопентадиенил)моногидридных производных лантаноидов появились в 1980-х гг. [8–10]. Позднее были получены их дигидридные аналоги полусэндвичевого ряда [11–15]. К настоящему времени известно большое число моногидридных [16–20], дигидридных [21–29], катионных гидридных [30–34], а также алкилгидридных [35–40] производных редкоземельных металлов, стабилизированных различными типами нециклопентадиенильных лигандов [41–43]. Однако все эти успехи в области химии гидридов относятся к производным трехвалентных лантаноидов, в то время как гидридные комплексы этих металлов в двухвалентном состоянии до сих пор остаются редкими, а их реакционная способность практически неисследованной.

К настоящему времени известно всего три гидридных комплекса лантаноидов в степени окисления +2. В [44] приведен первый пример – гидридный комплекс $[(\text{Tr-трет-Бу})\text{Yb}(\mu^2\text{-H})_2]$ ($\text{Tr-трет-Бу} = \text{HB}(\text{C}_3\text{HN}_2\text{-трет-Бу-3-Ме-5})_3$), стабилизированный объемным *трис*(пиразолил)боратным лигандом. Авторы исследовали реакционную способность полученного соединения в ряде сте-

хиометрических реакций с СН-кислотами (терминальные ацетилены, дипивалоилметан, замещенный циклопентадиен), а также продемонстрировали возможность присоединения связей Yb-H по кратным связям С–С и С–О. В [45] синтезирован гидридный комплекс $[(\text{HC}(\text{C}(\text{Me})\text{NC}_6\text{H}_3\text{-изо-Pr}_2\text{-2,6})_2)\text{Yb}(\mu^2\text{-H})_2]$ (THF)₂, содержащий объемный β -дикетиминатный лиганд, оказавшийся активным катализатором гидросилилирования олефинов. Несколько позднее были опубликованы данные о синтезе амидинатгидридного комплекса $[(\text{Amd})\text{Yb}(\mu^2\text{-H})_2]$ (I), где $\text{Amd} = \{\text{трет-БуС}(\text{NC}_6\text{H}_3\text{-изо-Pr}_2\text{-2,6})_2\}$ [46], в котором обнаружен “неклассический” κ^1 -амидо- η^6 -ареновый тип координации амидинатного лиганда на ион Yb^{2+} , отличающийся удивительно устойчивым взаимодействием $\text{Yb(II)}-\eta^6$ -арен. На примере реакций гидридного комплекса $[(\text{Amd})\text{Yb}(\mu^2\text{-H})_2]$ с одноэлектронными окислителями было показано, что гидридный лиганд – более сильный восстановитель по сравнению с ионом Yb^{2+} [46, 47]. Совсем недавно были получены первые катионные гидридные комплексы $\text{Yb(II)} [(\text{Me}_4\text{TACD})\text{Yb}(\mu\text{-H})_2]^+[\text{BAr}_4]^-$ ($\text{Me}_4\text{TACD} = 1,4,7,10$ -тетраметил-1,4,7,10-тетрааза-циклододекан) [48], оказавшиеся эффективными катализаторами гидрирования и гидросилилирования гексена-1, а также обмена между H_2 и D_2 [48].

Однако основные свойства связи Yb(II)—H остаются практически неизученными. С целью исследования способности гидридного аниона в комплексах лантаноидов к координации с кислотами Льюиса как возможного синтетического подхода к “расщеплению” их димерной структуры и образованию мономерных гидридных частиц, в настоящей работе исследована реакция димерного гидридного комплекса Yb(II) [(Amd)Yb(μ^2 -H)]₂ с кислотой Льюиса BPh₃. Оказалось, что данное взаимодействие протекает с разрывом связей C—B и приводит к образованию димерного комплекса [(Amd)Yb^{II}(μ^2 -H₃BPh)]₂, содержащего мостиковые фенилтригидроборатные анионы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез комплексов проводили в условиях, включающих контакт с кислородом и влагой воздуха, по стандартной технике Шленка. Толуол сушили над бензофенонкетилем натрия, гексан — над металлическим натрием, затем тщательно дегазировали и конденсировали в вакууме в реакционную ампулу непосредственно перед использованием. Комплекс I получали в соответствии с ранее опубликованной методикой [46].

Синтез [(Amd)Yb(μ -H₃BPh)]₂ (II). Раствор BPh₃ (0.163 г, 0.674 ммоль) в 10 мл толуола добавляли при перемешивании к I (0.400 г, 0.337 ммоль) в 20 мл толуола. Реакционную смесь перемешивали при комнатной температуре в течение 3 ч. Цвет раствора менялся с темно-фиолетового на темно-красный. Толуол удаляли в вакууме, а к твердому остатку добавляли гексан (20 мл). Нерастворимый осадок отделяли от растворимых в гексане продуктов центрифугированием и растворяли в свежей порции толуола. Медленное концентрирование полученного раствора в толуоле при комнатной температуре привело к образованию красно-коричневых кристаллов комплекса II. Маточный раствор отделяли декантацией, а кристаллы сушили в вакууме в течение 20 мин. Выход комплекса II 0.070 г (15%). Концентрирование гексанового раствора при комнатной температуре приводило к образованию изумрудно-зеленых кристаллов комплекса (Amd)₂Yb (III) с выходом 0.068 г (10% в расчете на количество металла, взятого в реакцию).

Найдено, %: C 61.88, H 7.79, N 4.01, Yb 24.87.
Для C₇₀H₁₀₂B₂N₄Yb₂ (M = 1367.32)
вычислено, %: C 61.49, H 7.52, N 4.10, Yb 25.31.

ЯМР ¹H для II (400 МГц, бензол-d₆, 293 К; δ , м.д.): 0.92 (уш. с., 18H, CH-*mpem*-Bu), 1.34 (м., 24H, CH₃-*изо*-Pr), 1.60–2.23 (уш. м., 6H, BH₃), 3.11 (м., 2H, CH-*изо*-Pr), 3.41 (м., 2H, CH-*изо*-Pr), 6.90–

7.32 (м., 22H, CHAr и BPh). ЯМР ¹³C{¹H} для II (100 МГц, бензол-d₆, 293 К; δ , м.д.): 20.4 (с., CH₃-*изо*-Pr), 23.0 (с., CH₃-*изо*-Pr), 26.0 (с., CH₃-*изо*-Pr), 28.4 (с., CH-*изо*-Pr), 29.5 (с., CH₃-*изо*-Pr), 31.5 (с., CH₃-*mpem*-Bu), 42.7 (с., C-*mpem*-Bu), 118.6 (с., CHAr), 123.0 (с., CHAr), 123.5 (с., CHAr), 124.2 (с., CHAr), 126.2 (уш. с., CHBPh), 133.0 (уш. с., CHBPh), 137.7 (уш. с., CHBPh), 142.5 (с., CAr), 143.4 (с., CAr), 144.2 (с., CAr), 145.7 (уш. с., CBPh), 147.6 (с., CAr), 169.8 (с., NCN). ЯМР ¹¹B{¹H} для II (128.4 МГц, бензол-d₆, 293 К; δ , м.д.): –21.0.

Спектры ЯМР ¹H и ¹³C{¹H} регистрировали на приборах Bruker DPX 200 MHz и BrukerAvance III 400 MHz. Химические сдвиги приведены в миллионных долях по отношению к известным сдвигам остаточных протонов дейтерированных растворителей. Двумерные ¹¹B–¹H корреляционные эксперименты проводили с использованием стандартной *ge*-HSQC последовательности (*hsqcetgp*) с параметрами, оптимизированными для проведения ¹¹B–¹H эксперимента. Элементный анализ выполняли на приборе Perkin-ElmerSeries II CHNS/O Analyser 2400. Содержание лантанида определяли методом комплексонометрического титрования (Трилон Б) с использованием ксиленолового оранжевого в качестве индикатора.

РСА монокристаллического образца II (0.25 × 0.21 × 0.09 мм) проведен на дифрактометре Bruker Smart Apex (MoK α -излучение, λ = 0.71073 Å, ω -сканирование, T = 100 К, θ = 1.71°–26.04°). Измерение и интегрирование экспериментальных наборов интенсивностей, учет поглощения и уточнение структур проведены с использованием программных пакетов Smart [49], SADABS [50] и SHELX [51]. Кристаллы II (C₇₀H₁₀₂B₂N₄Yb₂, M = 1367.25) моноклинные, пр. гр. $P2_1/n$, a = 10.8191(5), b = 14.7527(7), c = 20.3110(10) Å, β = 92.7530(10)°, V = 3238.1(3) Å³, Z = 2, ρ (выч.) = 1.402 г/см³, μ = 2.913 мм^{–1}. Измерено 27388 отражений, 6383 независимых (R_{int} = 0.0351) использованы для уточнения 372 параметров структуры полноматричным МНК по F^2_{hkl} в анизотропном приближении для неводородных атомов. Атомы водорода фенилтригидроборатных групп найдены из разностного синтеза Фурье электронной плотности и уточнены с некоторыми геометрическими ограничениями (расстояния B–H и H…H выровнены между собой с помощью инструкций DFIX и SADI). Остальные атомы водорода помещены в геометрически рассчитанные положения. Все атомы H уточнены изотропно с фиксированными тепловыми параметрами $U(\text{H})_{\text{изо}} = 1.2U(\text{C})_{\text{экр}} (U(\text{H})_{\text{изо}} = 1.5U(\text{C})_{\text{экр}}$ для метильных групп). После финального уточнения wR_2 = 0.0695 и $S(F^2)$ = 1.028 для всех отражений (R_1 = 0.0274 для 5048 отражений, удовлетворяющих условию $I > 2\sigma(I)$). Оста-

точные максимум и минимум электронной плотности составили $1.51/-0.44 e/\text{\AA}^3$.

Структура II зарегистрирована в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1902290; ccdc.cam.ac.uk/getstructures).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство известных к настоящему времени гидридных производных редкоземельных металлов в степенях окисления как +3, так и +2 являются димерными или кластерными соединениями в силу легкости образования мостиковых связей $\text{Ln}-\text{H}-\text{Ln}$. Нуклеарность гидридных производных редкоземельных металлов в первую очередь определяется стерическими параметрами “вспомогательного” лигандного окружения. Более того, использование объемных циклопентадиенильных лигандов позволило получить ряд мономерных гидридных производных Cp_2LnH ($\text{Cp} = \text{C}_5\text{H}_2\text{-}i\text{mpem-Bu}_3$ [3, 52]; $\text{C}_5\text{Me}_4\text{SiMe}_3$ [53, 54]). В ряде работ также было показано, что диссоциация димерных фрагментов Ln_2H_2 может проходить под действием оснований Льюиса [55, 56]. Альтернативным методом получения мономерных гидридных соединений может быть диссоциация димерного комплекса на мономерные производные за счет координации связи $\text{Ln}-\text{H}$ с кислотой Льюиса. Ранее было показано, что мономерный гидрид-

ный комплекс церия $[\text{C}_5\text{H}_2\text{-}i\text{mpem-Bu}_3]_2\text{CeH}$ в растворе может обратимо взаимодействовать с такой кислотой Льюиса, как трифенилбор [52].

С целью получения мономерного гидридного комплекса Yb(II) , а также изучения реакционной способности связи $\text{Yb}-\text{H}$ по отношению к кислотам Льюиса была проведена реакция димерного гидридного комплекса I с двумя эквивалентами трифенилбора BPh_3 . Реакцию проводили в толуоле при комнатной температуре (схема 1). Установлено, что продуктом реакции является новый амидинатный комплекс Yb(II) II, содержащий мостиковые фенилтригидроборатные анионы $[\text{PhBH}_3]^-$. Интересно, что реакция не останавливается на взаимодействии кислоты и основания Льюиса, а протекает глубже, с разрывом связи $\text{C}-\text{B}$, переносом гидридных анионов и образованием мостикового аниона $[\text{PhBH}_3]^-$. Среди продуктов реакции также был обнаружен бис(амидинатный) комплекс Yb(II) III [46], выделенный в виде изумрудно-зеленых кристаллов с выходом 10%. Образование бис(амидинатного) производного III может являться следствием диспропорционирования смешанолигандных комплексов Yb(II) , образующихся в ходе реакции. Выделить и идентифицировать другие иттербий содержащие продукты из реакционной смеси не удалось.

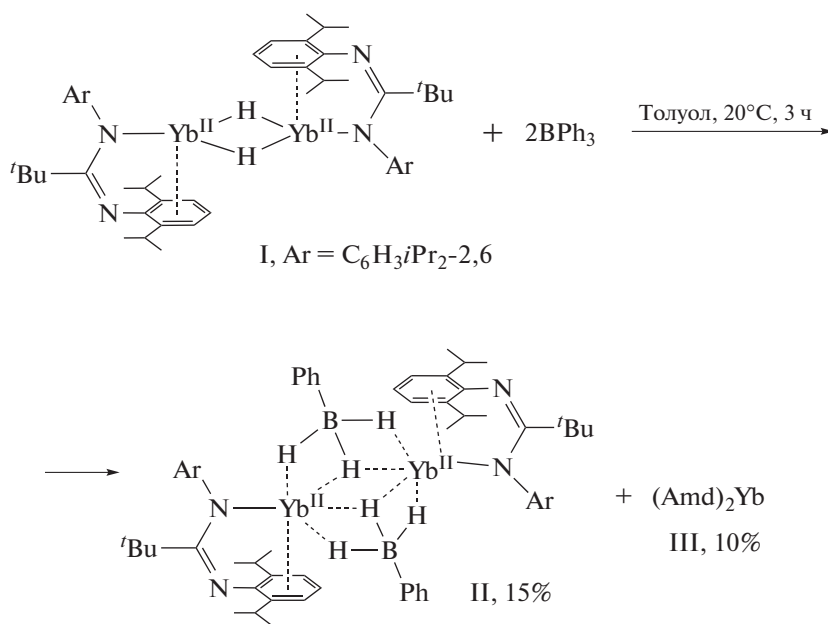


Схема 1.

Монокристаллические образцы комплекса II, пригодные для РСА, были получены путем медленного концентрирования раствора комплекса II в толуоле при комнатной температуре. Согласно дан-

ным РСА, молекула комплекса II в кристаллической ячейке находится в частном положении в центре инверсии; таким образом, кристаллическая ячейка содержит две молекулы комплекса. Ос-

Таблица 1. Основные длины связей (d) и валентные углы (ω) в комплексе II

Связь	d , Å
Yb(1)–N(1)	2.377(3)
Yb(1)–B(1)	2.749(4)
Yb(1)–B(1A)	2.898(4)
N(1)–C(1)	1.359(4)
N(2)–C(1)	1.313(4)
Yb(1)⋯Yb(1A)	4.0418(3)
Yb(1)–C(18)	2.750(3)
Yb(1)–C(19)	2.798(3)
Yb(1)–C(20)	2.853(3)
Yb(1)–C(21)	2.868(3)
Yb(1)–C(22)	2.870(3)
Yb(1)–C(23)	2.835(3)
B(1)–C(30)	1.579(5)
Угол	ω , град
Yb(1)B(1)Yb(1A)	91.4(2)
B(1)Yb(1)B(1A)	88.6(2)
N(1)C(1)N(2)	119.8(3)

Основные длины связей и углы указаны в табл. 1. Комплекс II является димером (рис. 1), в котором два амидинатиттербиевых фрагмента (Amd)Yb связа-

ны двумя мостиковыми фенилтригидроборатными анионами $[\text{PhBH}_3]^-$. В ранее известных комплексах d -переходных металлов (Ti, Zr [57–59], Ru [60], Ir [61]) фенилтригидроборатные лиганды являются терминальными и связаны с ионами переходных металлов через два или три гидридных атома, тогда как мостиковая координация анионов $[\text{PhBH}_3]^-$, приводящая к образованию димеров, ранее была обнаружена в комплексах лития [62, 63].

Расстояния Yb–B 2.749(4) и 2.898(4) Å в II существенно больше соответствующих расстояний в боргидридных производных Yb(II), содержащих терминальную боргидридную группу BH_4^- : $[(\text{DIP}_2\text{Pyr})\text{Yb}(\text{BH}_4)(\text{THF})_3]$ (Yb–B 2.595(9) Å) [64], $[(\text{Trmpem-Bu})\text{Yb}(\text{BH}_4)(\text{THF})_2]_2$ (Yb–B 2.596(5) Å) [65], $[(\text{Dipp})_2\text{NacNacYb}(\text{BH}_4)(\text{THF})_2]$ (Yb–B 2.576(8) Å) [66], $[\{\text{CH}(\text{PPh}_2=\text{NSiMe}_3)(\text{PPh}_2=\text{S})\}\text{Yb}(\text{BH}_4)(\text{THF})_2]$ (Yb–B 2.611(7) Å) [67]. Более того, расстояния Yb–B в II превышают соответствующие значения, найденные в (циклооктан-1,5-диил)дигидроборатных производных Yb(II) $\text{Yb}\{[(\mu\text{-H})_2\text{BC}_8\text{H}_{14}]_2\text{K}(\text{Solv})_n\}_2$ (Yb–B 2.703(5)–2.738(5) Å) [68], в которых (циклооктан-1,5-диил)дигидроборатные группы $[\text{C}_8\text{H}_{14}\text{BH}_2]^-$ являются мостиковыми между ионами Yb^{2+} и калия. Расстояния Yb–H в II лежат в широком интервале значений 2.22(3)–2.57(3) Å. Наличие более объемных мостиковых анионов $[\text{PhBH}_3]^-$ в II приводит к уве-

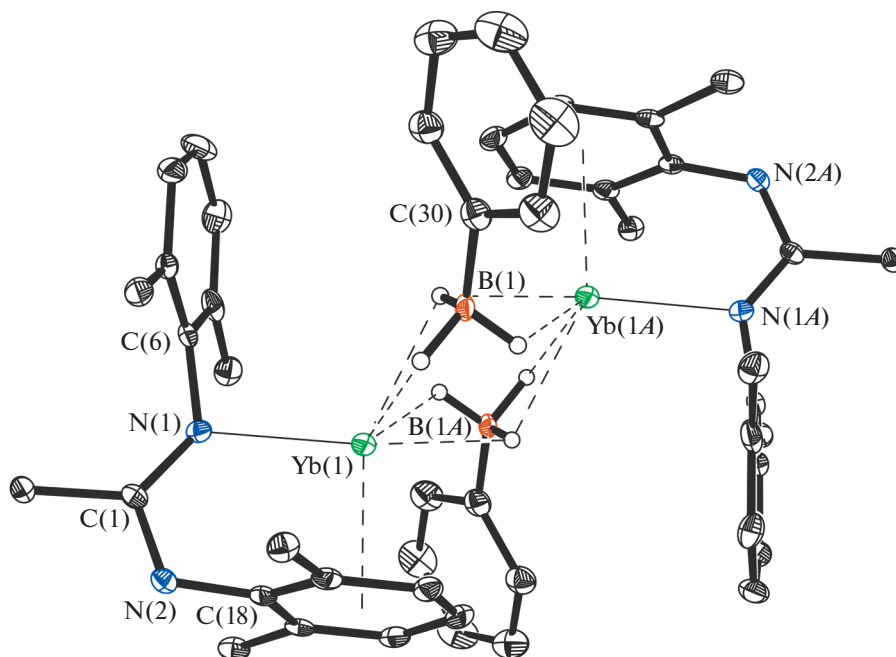


Рис. 1. Молекулярная структура комплекса II. Тепловые эллипсоиды приведены с 30%-ной вероятностью. Метильные фрагменты 2,6-диизопропилфенильных и *трет*-бутильных заместителей, а также все атомы водорода за исключением атомов водорода фенилтригидроборатных групп не изображены для ясности.

личению расстояния между катионами металла ($\text{Yb}\cdots\text{Yb}$ 4.0418(3) Å) в димере по сравнению с исходным гидридом I ($\text{Yb}\cdots\text{Yb}$ 3.3553(4) Å), однако при этом сохраняется “неклассический” κ^1 -амидо, η^6 -арено тип координации амидинатного лиганда. Длина связи $\text{Yb}-\text{N}$ 2.377(3) Å и расстояния $\text{Yb}-\text{C}_{\text{арил}}$ 2.750(3)–2.870(3) Å и $\text{Yb}-\text{Ar}_{\text{центр}}$ 2.458(2) Å в комплексе II несколько больше, чем в исходном гидриде I ($\text{Yb}-\text{N}$ 2.329(3) Å; $\text{Yb}-\text{C}_{\text{арил}}$ 2.696(2)–2.838(2) Å; $\text{Yb}-\text{Ar}_{\text{центр}}$ 2.410(5) Å) и сопоставимы с расстояниями в ранее известных амидинатных комплексах $\text{Yb}(\text{II})$, в которых реализуется координация амидинатных лигандов по κ^1 -амидо, η^6 -ареновому типу [46, 47, 69–71].

В спектре ЯМР ^1H комплекса II, записанном в растворе бензола- d_6 при 293 К, присутствуют сигналы, относящиеся к амидинатному лиганду и фенилтригидроборатному аниону. Гидридные атомы $[\text{PhBH}_3]^-$ лиганда проявляются в виде уширенного мультиплета, состоящего из четырех сигналов, в области 1.60–2.23 м.д. Эти химические сдвиги сопоставимы со значениями, наблюдаемыми в спектрах родственных комплексов Ti и Zr моно- и бис(циклопентадиенильных) рядов ($\delta_{\text{H}}(\text{BH}_3) = 1.39$ м.д. для $\text{Cp}_2\text{Zr}(\text{PhBH}_3)_2$; 2.28 м.д. для $\text{CpZr}(\text{PhBH}_3)_3$; 2.37 м.д. для $\text{Cp}_2\text{ZrCl}(\text{PhBH}_3)$) [57, 59]. С целью более надежной идентификации наблюдаемых в спектрах ЯМР ^1H и ^{11}B сигналов был записан двумерный спектр ЯМР $^{11}\text{B}-^1\text{Hge}$ -HSQC, в котором наблюдается кросс-пик (–21.0; 1.90). При помощи двумерного спектра ЯМР $^{11}\text{B}-^1\text{Hge}$ -HSQC без широкополосной развязки была уточнена мультиплетность гидридного сигнала. Наличие в мультиплете четырех линий хорошо согласуется с ожидаемым для расщепления трех протонов на одном ^{11}B (спин протонов: 1/2, спин основного изотопа бора: 3/2).

Таким образом, было установлено, что взаимодействие гидридного комплекса двухвалентного иттербия I, стабилизированного объемным амидинатным лигандом, с кислотой Льюиса BPh_3 сопровождается разрывом связей С–В и восстановлением последнего до фенилтригидроборатного аниона $[\text{PhBH}_3]^-$. Продуктом реакции является амидинатный комплекс $\text{Yb}(\text{II})$ II, в котором два фрагмента ($\text{Amd})\text{Yb}$ связаны между собой двумя мостиковыми фенилтригидроборатными анионами.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования “Аналитический центр ИМХ РАН”.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Рентгенодифракционные исследования проведены в рамках госзадания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ringelberg S.N., Meetsma A., Hessen B. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1999. V. 121. P. 6082.
2. Werkema E.L., Messines E., Perrin L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2005. V. 127. P. 7781.
3. Maron L., Werkema E.L., Perrin L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2005. V. 127. P. 279.
4. Jeske G., Lauke H., Mauermann H. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1985. V. 107. P. 8111.
5. Conticello V.P., Brard L., Giardello M.A. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1992. V. 114. P. 2761.
6. Molander G.A., Romero J.A.C. // Chem. Rev. 2002. V. 102. P. 2161.
7. Oyamada J., Nishiura M., Hou Z. // Angew. Chem. Int. Ed. 2011. V. 50. P. 10720.
8. Evans W.J., Meadows J.H., Wayda A.L. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1982. V. 104. P. 2008.
9. Evans W.J., Meadows J.H., Wayda A.L. // J. Am. Chem. Soc. 1982. V. 104. P. 2015.
10. Evans W.J., Bloom I., Hunter W.E. et al. // J. Am. Chem. Soc. 1983. V. 105. P. 1403.
11. Hou Z., Zhang Y., Tardif O. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2001. V. 123. P. 9216.
12. Tardif O., Nishiura M., Hou Z. // Organometallics. 2003. V. 22. P. 1171.
13. Cui D., Tardif O., Hou Z. // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. P. 1312.
14. Hou Z., Nishiura M., Shima T. // Eur. J. Inorg. Chem. 2007. P. 2535.
15. Nishiura M., Hou Z. // Nature Chem. 2010. V. 2. P. 257.
16. Hagadorn J.R., Arnold J. // Organometallics. 1996. V. 15. P. 984.
17. Duchateau R., van Wee C.T., Meetsma A. et al. // Organometallics. 1996. V. 15. P. 2279.
18. Trifonov A.A., Skvortsov G.G., Lyubov D.M. et al. // Chem. Eur. J. 2006. V. 12. P. 5320.
19. Kissel A.A., Mahrova T.V., Lyubov D.M. et al. // Dalton Trans. 2015. V. 44. P. 12137.
20. Skvortsov G.G., Tolpyguin A.O., Fukin G.K. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2010. P. 1655.
21. Rong W., He D., Wang M., et al. // Chem. Commun. 2015. V. 51. P. 5063.
22. Cheng J., Saliu K., Kiel G.Y. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2008. V. 47. P. 4910.
23. Cheng J., Ferguson M.F., Takats J. // J. Am. Chem. Soc. 2010. V. 132. P. 2.
24. Cheng J., Saliu K., Ferguson M.J. et al. // J. Organomet. Chem. 2010. V. 695. P. 2696.
25. Cheng J., Shima T., Hou Z. // Angew. Chem. Int. Ed. 2011. V. 50. P. 1857.
26. Johnson K.R.D., Kamenz B.L., Hayes P.G. // Organometallics. 2014. V. 33. P. 3005.
27. Ohashi M., Konkol M., Del Rosal I. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 6920.

28. Zhou J., Chu J., Zhang Y. et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013. V. 52. P. 4243.
29. Martin D., Kleemann J., Abinet E. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2013. P. 3987.
30. Lyubov D.M., Döring C., Ketkov S. Yu. et al. // *Chem. Eur. J.* 2011. V. 17. P. 3824.
31. Fegler W., Venugopal A., Spaniol T.P. et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2013. V. 52. P. 7976.
32. Venugopal A., Fegler W., Spaniol T.P. et al. // *J. Am. Chem. Soc.* 2011. V. 133. P. 17574.
33. Arndt S., Kramer M.U., Fegler W. et al. // *Organometallics*. 2015. V. 34. P. 3739.
34. Abinet E., Martin D., Standfuss S. et al. // *Chem. Eur. J.* 2011. V. 11. P. 15014.
35. Li X., Baldamus J., Hou Z. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. V. 44. P. 962.
36. Lyubov D.M., Döring C., Fukin G.K. et al. // *Organometallics*. 2008. V. 27. P. 2905.
37. Lyubov D.M., Fukin G.K., Cherkasov A.V. et al. // *Organometallics*. 2009. V. 28. P. 1227.
38. Luconi L., Lyubov D.M., Bianchini C. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2010. P. 608.
39. Lyubov D.M., Cherkasov A.V., Fukin G.K. et al. // *Dalton Trans.* 2014. V. 43. P. 14450.
40. Lyubov D.M., Cherkasov A.V., Fukin G.K. et al. // *Organometallics*. 2016. V. 35. P. 126.
41. Trifonov A.A. // *Russ. Chem. Rev.* 2007. V. 76. P. 1049.
42. Trifonov A.A., Lyubov D.M. // *Coord. Chem. Rev.* 2017. V. 340. P. 10.
43. Abakumov G.A. et al. // *Russ. Chem. Rev.* 2018. V. 87. P. 393.
44. Ferrence G.M., McDonald R., Takats J. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 1999. V. 38. P. 2233.
45. Ruspic C., Spielman J., Harder S. // *Inorg. Chem.* 2007. V. 46. P. 5320.
46. Basalov I.V., Lyubov D.M., Fukin G.K. et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2012. V. 52. P. 3444.
47. Basalov I.V., Lyubov D.M., Fukin G.K. et al. // *Organometallics*. 2013. V. 32. P. 1507.
48. Schuhknecht D., Truong K.-N., Spaniol T.P. et al. // *Chem. Commun.* 2018. V. 54. P. 11280.
49. Smart. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2012.
50. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M. et al. // *J. Appl. Cryst.* 2015. V. 48. P. 30.
51. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr. C*. 2015. V. 71. P. 3.
52. Werkema E.L., Andersen R.A., Yahia A. et al. // *Organometallics*. 2009. V. 28. P. 3173.
53. Summerscales O.T., Batista E.R., Scott R.L. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2016. P. 4551.
54. Takenaka Y., Hou Z. // *Organometallics*. 2009. V. 28. P. 5196.
55. Lyubov D.M., Bubnov A.M., Fukin G.K. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2008. P. 2090.
56. Cheng J., Hou Z. // *Chem. Commun.* 2012. V. 48. P. 814.
57. Liu F.-C., Chen J.-H., Chen S.-C. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2005. V. 690. P. 291.
58. Liu F.-C., Chen S.-C., Lee G.-H. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2007. V. 692. P. 2375.
59. Liu F.-C., Yang C.-C., Chen S.-C. et al. // *Dalton Trans.* 2008. № 27. P. 3599.
60. Hesp K.D., Kannemann F.O., Rankin M.A. et al. // *Inorg. Chem.* 2011. V. 50. P. 2431.
61. Arnold N., Mozo S., Paul U. et al. // *Organometallics*. 2015. V. 34. P. 5709.
62. Samigullin K., Bolte M., Lerner H.-W. et al. // *Organometallics*. 2014. V. 33. P. 3564.
63. Murosaki T., Kaneda S., Maruhashi R. et al. // *Organometallics*. 2016. V. 35. P. 3397.
64. Schmid M., Guillaume S.M., Roesky P.W. // *J. Organomet. Chem.* 2013. V. 744. P. 68.
65. Saliu K.O., Maunder G., Ferguson M.J. et al. // *Inorg. Chim. Acta*. 2009. V. 362. P. 4616.
66. Schmid M., Guillaume S.M., Roesky P.W. // *Organometallics*. 2014. V. 33. P. 5392.
67. Schmid M., Ona-Burgos P., Guillaume S.M. // *Dalton Trans.* 2015. V. 44. P. 12338.
68. Chen X., Lim S., Plečnik C.E. et al. // *Inorg. Chem.* 2005. V. 44. P. 6052.
69. Tolpygin A.O., Cherkasov A.V., Fukin G.K. et al. // *Inorg. Chem.* 2014. V. 53. P. 1537.
70. Basalov I.V., Rosca S.C., Lyubov D.M. et al. // *Inorg. Chem.* 2014. V. 53. P. 1654.
71. Trifonov A.A., Lyubov D.M., Basalov I.V. et al. // *Russ. Chem. Bull. Int. Ed.* 2018. V. 67. P. 455.