

## НОВЫЕ ГИДРИДЫ ГАЛЛИЯ С ДИАНИОННЫМИ АЦЕНАФТЕН-1,2-ДИИМИНОВЫМИ ЛИГАНДАМИ

© 2020 г. Т. С. Копцева<sup>1</sup>, \*, В. Г. Соколов<sup>1</sup>, Е. В. Баранов<sup>1</sup>, И. Л. Федюшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева РАН, Нижний Новгород, Россия

\*e-mail: koptseva@iomc.ras.ru

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.

После доработки 27.01.2020 г.

Принята к публикации 29.01.2020 г.

Нагревание раствора соединения [(Dpp-bian)GaH<sub>2</sub>] (I) (Dpp-bian = 1,2-*bis*[(2,6-диизопропилфенил)имино]аценафтен) в пиридине приводит к элиминированию атома водорода и восстановлению дииминового лиганда до дианиона с образованием комплекса [(Dpp-bian)GaH(Py)] (II). При взаимодействии I с 1,3-диизопропил-4,5-диметилимидазол-2-илиденом (*i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup>) происходит аналогичный процесс, а образующееся в результате реакции соединение представляет собой комплекс [(Dpp-bian)GaH(*i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup>)] (III). Диамагнитные производные II и III охарактеризованы спектроскопией ЯМР <sup>1</sup>H. Молекулярная структура соединения II установлена методом PCA (CIF file CCDC № 1973549).

**Ключевые слова:** галлий, гидриды, редокс-активные лиганды, дииминовые лиганды, синтез, молекулярная структура

**DOI:** 10.31857/S0132344X2006002X

Соединения со связью Ga–H широко представлены в химии гидридов металлов 13-й группы [1–4]. Эти соединения вызывают значительный интерес с точки зрения их практического применения и фундаментальных аспектов. Например, летучие соединения на основе тригидрида галлия рассматриваются в качестве потенциальных прекурсоров для создания пленок или наночастиц GaN и GaAs в процессах MOCVD [2, 5–8]. Кроме того, дихлоргаллан Cl<sub>2</sub>GaH [9–11] и диалкилгалланы R<sub>2</sub>GaH [12–14] реагируют с ненасыщенными субстратами (кетонами, нитрилами, олефинами и алкинами) с образованием продуктов гидрогаллирования [4, 10, 12, 15–29]. Достаточно подробно исследованы реакции гидрометаллирования замещенных алкинов дихлор- или диалкилгалланами, показано разнообразие путей реакций и образовавшихся галлийсодержащих продуктов [4, 17–29]. Следует отметить, что реакции гидрогаллирования в некоторых случаях протекают селективнее по сравнению с процессами гидроалюминирования [3, 4]. Важным классом гидридов галлия являются нейтральные комплексы, в которых фрагмент Ga–H хелатирован N,N-бидентатными лигандами [30–38]. Так, продемонстрирована возможность использования дикетиминатного производного [(Dpp-Nacnac)GaH(*t*-Bu)] (Dpp = 2,6-*i*-Pr<sub>2</sub>C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>) в каче-

стве катализатора восстановления CO<sub>2</sub> до HC(O)OBpin (Pin = OCM<sub>2</sub>CMe<sub>2</sub>O) или до MeOBpin, при использовании избытка HBPin (4,4,5,5-тетраметил-1,3,2-диоксаборолан) [37]. Таким образом, N,N-бидентатные лиганды способны расширить область применения гидридов галлия, позволяя создать молекулярные системы, альтернативные катализаторам на основе *d*-элементов.

Мы показали, что комплексы непереходных металлов с редокс-активными азотсодержащими N,N-хелатирующими лигандами проявляют необычную реакционную способность по отношению к различным классам соединений [39–46]. Например, дигаллан [(Dpp-bian)Ga–Ga(Dpp-bian)] (Dpp-bian = 1,2-*bis*[(2,6-диизопропилфенил)имино]аценафтен) демонстрирует дуализм переноса электрона в реакциях с рядом окислителей: в зависимости от субстрата электроны переносятся на последний либо с лигандов, либо со связи металл–металл [42, 43]. Подобно переходным металлам дигаллан способен к двухэлектронному окислительному присоединению органических галогенидов [47]. Кроме того, комплексы галлия и алюминия с дианионом Dpp-bian обратимо присоединяют алкины и еноны [39, 40, 44, 48]. В этих реакциях субстрат образует новые связи как с ато-

мом металла, так и с редокс-активным лигандом. Очевидно, что применение редокс-активных лигандов в химии гидридов металлов может привести к металлокомплексам, которые также обладают нетипичной для гидридов реакционной способностью. При этом открываются перспективы создания эффективных, доступных и малотоксичных галлийгидридных реагентов или катализаторов для реакций восстановления и изомеризации, например ненасыщенных субстратов.

Недавно мы получили и охарактеризовали новые мономерные гидридные соединения галлия [(Dpp-bian)GaH(R)] (R = Cl, H, OSi(Ph)H<sub>2</sub>), содержащие редокс-активный лиганд Dpp-bian. Несмотря на то что эти соединения оказались инертны по отношению к некоторым алкинам и алкенам, реализованный процесс гидросилилирования бензальдегида фенилсиланом в присутствии каталитических количеств дигирида [(Dpp-bian)GaH<sub>2</sub>] допускает возможность внедрения по фрагменту Ga—H субстратов с активированными кратными связями [49].

В настоящей работе мы сообщаем о синтезе, молекулярных структурах и спектральных характеристиках новых гидридов галлия с аценафтен-1,2-дииминовыми лигандами [(Dpp-bian)GaH(Py)] (II) и [(Dpp-bian)GaH(*i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup>)] (III).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединение [(Dpp-bian)GaH<sub>2</sub>] (I) [49] получено по известной методике. Соединения I—III чувствительны к кислороду и влаге, поэтому все манипуляции по их синтезу, выделению и идентификации выполняли в вакууме с использованием техники Шленка или в атмосфере азота (Glovebox M. Braun). Толуол и бензол (Aldrich) сушили и хранили над натрийбензофеноном, пиридин (Aldrich) сушили натрием и отбирали конденсацией в вакууме непосредственно перед использованием. Дейтеропиридин (Aldrich) сушили натрием, дейтеробензол (Aldrich) — над натрийбензофеноном. Растворители отбирали конденсацией в вакууме в ампулы для регистрации спектров ЯМР, содержащие образцы исследуемых соединений.

ИК-спектры получали на спектрометре ФСМ-1201 в области 3998—449 см<sup>-1</sup> (образцы в вазелиновом масле). Спектр ЯМР <sup>1</sup>H записывали на спектрометрах Bruker DPX-200 (200 МГц) и Bruker Avance III (400 МГц). Элементный анализ выполняли сжиганием образцов в кислороде по методу Прегля.

**Синтез [(Dpp-bian)GaH(Py)] (II).** Раствор 0.73 г (1.27 ммоль) соединения I в пиридине (20 мл) нагревали 4 ч при 160°C. После замены пиридина на толуол полученный синий раствор концентрировали до объема 10 мл. В течение 24 ч при 10°C об-

разуются синие кристаллы соединения II. Выход 0.73 г (77%).

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (200 МГц; C<sub>5</sub>D<sub>5</sub>N; 298 К; δ, м.д.; J, Гц): 7.42–7.22 (м., 9H), 7.22–7.10 (м., 4H), 7.00–6.88 (м., 2H), 6.23 (д., 2H, J = 6.8), 3.72 (септ., 4H, J = 6.8), 1.13 (д., 12H, J = 6.8), 0.88 (д., 12H, J = 6.8).

ИК-спектр (ν, см<sup>-1</sup>): 1933 с, 1610 ср, 1593 сл, 1574 сл, 1514 с, 1364 сл, 1332 сл, 1316 сл, 1251 ср, 1211 сл, 1178 сл, 1158 сл, 1136 сл, 1105 сл, 1081 сл, 1065 ср, 1054 сл, 1045 ср, 1015 сл, 997 сл, 997 сл, 968 сл, 925 с, 903 ср, 813 ср, 806 ср, 767 с, 734 с, 695 с, 663 ср, 636 ср, 624 ср, 544 сл, 534 сл, 522 сл, 465 ср.

Найдено, %: C 77.21; H 7.09.

Для C<sub>48</sub>H<sub>54</sub>N<sub>3</sub>Ga

вычислено, %: C 77.63; H 7.33.

## Синтез [(Dpp-bian)GaH(*i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup>)] (III).

**Метод А.** К раствору 0.40 г (0.69 ммоль) соединения I в бензоле (20 мл) добавляли 1,3-диизопротил-4,5-диметилимидазол-2-илиден (*i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup>) (0.12 г, 0.69 ммоль). Смесь перемешивали 15 мин при 50°C. После охлаждения до комнатной температуры из реакционной смеси удалили растворитель, оставшийся мелкокристаллический осадок соединения III промывали гексаном (5 мл) и высушивали в вакууме. Выход 0.39 г (75%).

**Метод Б.** В ампуле для регистрации спектров ЯМР к раствору 0.02 г (0.02 ммоль) соединения II добавляли *i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup> (0.004 г, 0.02 ммоль). Смесь перемешивали 5 мин. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H соответствует продукту, полученному методом А.

Спектр ЯМР <sup>1</sup>H (400 МГц; C<sub>6</sub>D<sub>6</sub>; 298 К; δ, м.д.; J, Гц): 7.37–7.25 (м., 6H), 7.07 (д., 2H, J = 6.7), 6.89 (т., 2H), 6.40 (д., 2H, J = 6.7), 5.42 (септ., 2H, J = 7.0), 4.23 (септ., 2H, J = 6.7), 3.67 (септ., 2H, J = 6.7), 1.48 (д., 6H, J = 6.7), 1.46 (с., 6H), 1.34 (д., 6H, J = 6.7), 1.21 (д., 6H, J = 6.7), 0.97 (д., 12H, J = 7.0), 0.88 (д., 6H, J = 6.7).

ИК-спектр (ν, см<sup>-1</sup>): 1860 с, 1614 сл, 1589 сл, 1511 с, 1335 ср, 1312 сл, 1256 ср, 1208 сл, 1179 ср, 1133 сл, 1109 ср, 1076 сл, 1056 сл, 999 сл, 936 сл, 924 ср, 893 сл, 810 с, 762 с, 722 ср, 683 сл, 634 ср, 622 сл, 608 сл, 548 ср, 517 сл, 497 с.

Найдено, %: C 75.03; H 8.15.

Для C<sub>47</sub>H<sub>61</sub>N<sub>4</sub>Ga

вычислено, %: C, 75.09; H, 8.18.

**РСА II.** Пригодные для РСА кристаллы соединения II получали кристаллизацией из толуола. Выбранный для анализа кристалл покрывали минеральным маслом (Aldrich) и фиксировали на стеклянном капилляре, затем помещали в холод-

**Таблица 1.** Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структуры II

Параметр	Значение
<i>M</i>	742.66
Сингония	Моноклинная
Пр. гр.	<i>P</i> <sub>2<sub>1</sub></sub> / <i>n</i>
Температура, К	100(2)
<i>a</i> , Å	10.5769(3)
<i>b</i> , Å	25.2796(6)
<i>c</i> , Å	15.4536(4)
β, град	104.613(1)
<i>V</i> , Å <sup>3</sup>	3998.32(18)
<i>Z</i>	4
ρ(выч.), г/см <sup>3</sup>	1.234
μ, мм <sup>-1</sup>	0.725
<i>F</i> (000)	1576
Размер кристалла, мм	0.27 × 0.17 × 0.04
Область измерений по θ, град	2.11–28.00
Индексы областей	–13 ≤ <i>h</i> ≤ 13, –33 ≤ <i>k</i> ≤ 33, –20 ≤ <i>l</i> ≤ 18
Измеренных отражений	32870
Независимых отражений ( <i>R</i> <sub>int</sub> )	9633 (0.0346)
Отражений с <i>I</i> > 2σ( <i>I</i> )	8126
Поправка на поглощение (max/min)	0.9144/0.7898
Данные/ограничения/параметры	9633/0/482
GOOF	1.023
<i>R</i> <sub>1</sub> , <i>wR</i> <sub>2</sub> ( <i>I</i> > 2σ( <i>I</i> ))	0.0322, 0.0742
<i>R</i> <sub>1</sub> , <i>wR</i> <sub>2</sub> (по всем отражениям)	0.0427, 0.0773
Δρ <sub>max</sub> /Δρ <sub>min</sub> , e Å <sup>-3</sup>	0.402/–0.427

ный поток азота дифрактометра Bruker D8 Quest. Экспериментальные наборы интенсивностей (MoK<sub>α</sub>-излучение, λ = 0.71073 Å, ω- и φ-сканирование) интегрированы по программе SAINT [50]. SADABS [51] использована для введения поправок на поглощение. Структура расшифрована методом “dual-space” по программе SHELXT [52]. Неводородные атомы уточнены полноматрич-

**Таблица 2.** Основные длины связей (Å) и валентные углы (град) в соединении II

II	
Связь	<i>d</i> , Å
Ga–N(1)	1.8930(11)
Ga–N(2)	1.9022(12)
Ga–N(3)	2.0535(12)
Ga–H(1)	1.460(19)
N(1)–C(1)	1.3850(18)
N(2)–C(2)	1.3991(17)
C(1)–C(2)	1.3750(19)
Угол	ω, град
N(1)GaN(2)	90.25(5)
N(1)GaN(3)	106.88(5)
N(1)GaH(1)	124.8(7)
N(2)GaH(1)	127.6(8)
N(3)GaH(1)	102.1(8)
N(2)GaN(3)	102.55(5)

ным МНК по *F*<sub>*hkl*</sub><sup>2</sup> в анизотропном приближении с помощью программных пакетов SHELXTL [53]. Атомы водорода помещены в геометрически рассчитанные положения и уточнены в модели наездника. Исключение составляют атомы водорода на атоме галлия, найденные из разностного синтеза Фурье электронной плотности и уточненные изотропно. В ассиметричной части кристаллической ячейки II найдена сольватная молекула толуола в общем положении. Основные кристаллографические характеристики и параметры рентгеноструктурного эксперимента для II приведены в табл. 1, избранные длины связей и валентные углы – в табл. 2.

Структура II зарегистрирована в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1973549; ccdc.cam.ac.uk/getstructures).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования, проведенные нами в области гидридов металлов 13-й группы с редокс-активными лигандами показали, что гидриды алюминия могут быть стабилизированы как дианионом Dpp-bian, так и его анион-радикалом [54–56], в то время как все полученные производные галлия стабилизированы лишь анион-радикальным лигандом [49].

Синтез гидрида алюминия с дианионом Dpp-bian обменной реакцией [(Dpp-bian)Na<sub>2</sub>] с HAlCl<sub>2</sub>

приводит к образованию комплекса  $[(Dpp-bian)AlH(THF)]$  [55], тогда как аналогичная реакция  $[(Dpp-bian)Na_2]$  с  $HGaCl_2$  дает дианионное производное  $[(Dpp-bian)Ga-Ga(Dpp-bian)]$  [57, 58]. Дигаллан также образуется в реакции смешанного галоген-гидридного комплекса  $[(Dpp-bian)Ga(H)Cl]$  с металлическим натрием, что указывает на нестабильность дианионного моногидрида галлия. Тем не менее ранее мы обнаружили, что галоген-производные галлия с дианионными дииминовыми лигандами  $[(Dpp-bian)Ga(I)Py]$  [42] и  $[(Dpp-bian)Ga(Cl)Py]$  [47] могут быть стабилизированы таким сильным основанием Льюиса, как пиридин. Известный в литературе

моногидрид галлия с диазидиеновым лигандом  $\{[(Dpp)NCH_2]_2GaH(Mes_2Im^H)\}$  ( $Mes_2Im^H = 1,3$ -мезитилимидазол-2-илиден) [32], также содержит электронодонорную молекулу карбена, что говорит о возможности получения дианионного аценафтендииминового комплекса гидроксида галлия этим же путем.

Действительно, нагревание раствора соединения I в пиридине приводит к элиминированию одного из атомов водорода и образованию комплекса  $[(Dpp-bian)GaH(Py)]$  (II) (схема 1). Соединение II выделено в виде синих кристаллов с выходом 77%.

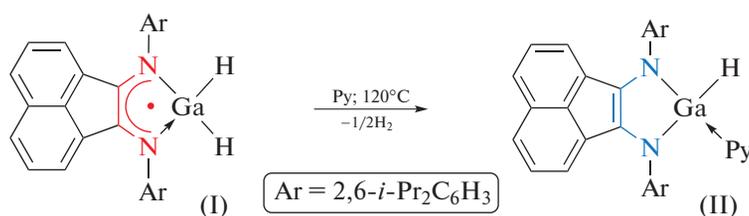


Схема 1.

В ИК-спектре комплекса II колебания связи Ga–H проявляются в виде интенсивной полосы при  $1933\text{ см}^{-1}$ . Это значение довольно близко к таковому для соединений I ( $1897$  и  $1872\text{ см}^{-1}$ ) и  $[(Dpp-bian)GaH(Cl)]$  ( $1939\text{ см}^{-1}$ ) [49], но отличается от значения для диазидиенового гидроксида  $\{[(Dpp)NCH_2]_2GaH(Mes_2Im^H)\}$  ( $1854\text{ см}^{-1}$ ) [32].

Спектр ЯМР  $^1H$  соединения II (рис. 1а) в дейтеропиридине содержит сигналы протонов метильных групп 2,6-*i*-Pr<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>-заместителей (дублеты  $0.88$  (12H) и  $1.13$  (12H) м.д.), а также септет метиновых протонов ( $3.72$  (4H) м.д.) этих заместителей. Дублет при  $6.23$  (2H) м.д., а также мультиплеты в диапазонах  $6.88$ – $7.00$  (2H),  $7.10$ – $7.22$  (4H) и  $7.22$ – $7.42$  (9H) м.д. относятся к ароматическим протонам нафтали-

нового фрагмента, фенильных заместителей при атомах азота и координированного пиридина.

Аналогичная ситуация наблюдается и в реакции соединения I с карбеном *i*-Pr<sub>2</sub>Im<sup>Me</sup> (схема 2). Реакция протекает в бензоле при  $50^\circ\text{C}$  в течение 15 мин, сопровождается изменением цвета раствора с коричневого на зеленый и приводит к образованию продукта  $[(Dpp-bian)GaH(i-Pr_2Im^Me)]$  (III). В ИК-спектре комплекса III колебания связи Ga–H проявляются в виде интенсивной полосы при  $1860\text{ см}^{-1}$ . Это значение близко к соответствующему значению для соединения  $\{[(Dpp)NCH_2]_2GaH(Mes_2Im^H)\}$  ( $1854\text{ см}^{-1}$ ) [32], однако заметно отличается от такового для соединений II ( $1933\text{ см}^{-1}$ ) и гидроксида алюминия  $[(Dpp-bian)AlH(i-Pr_2Im^Me)]$  ( $1732\text{ см}^{-1}$ ) [59].

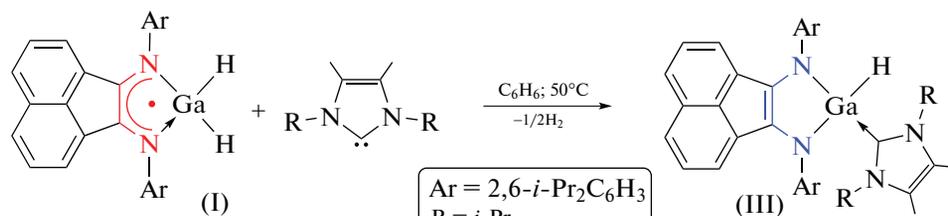
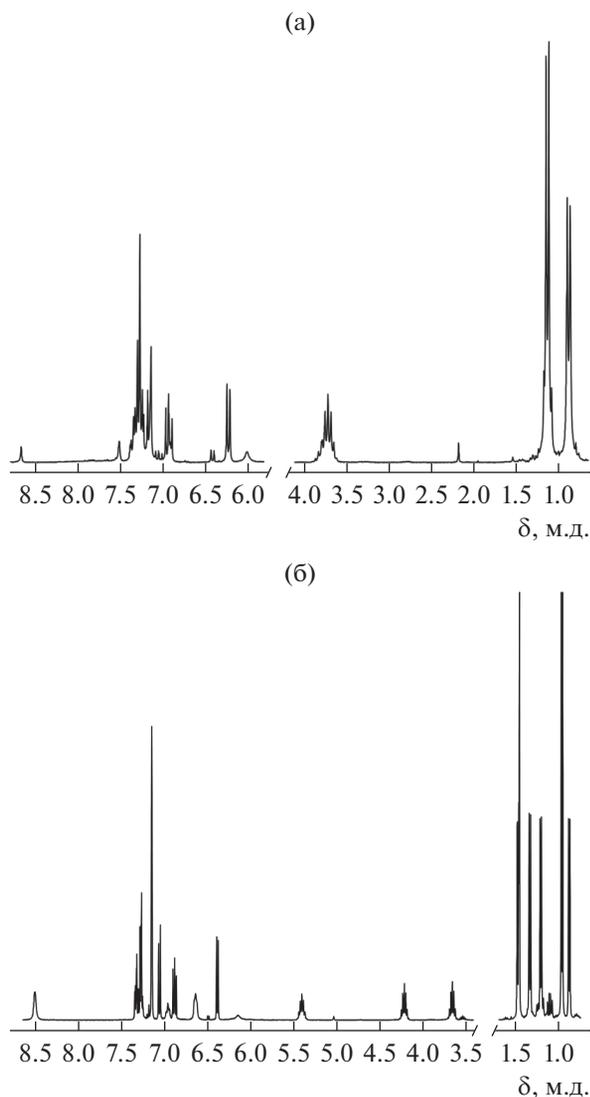


Схема 2.

Спектр ЯМР  $^1H$  соединения III (рис. 1б) содержит сигналы несимметричного лиганда Dpp-bian: четыре попарно эквивалентных метиновых протона изопропильных групп в 2,6-*i*-Pr<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>H<sub>3</sub>-заместителей проявляются в виде септетов при  $4.23$  (2H) и  $3.67$  (2H) м.д. Протоны метильных

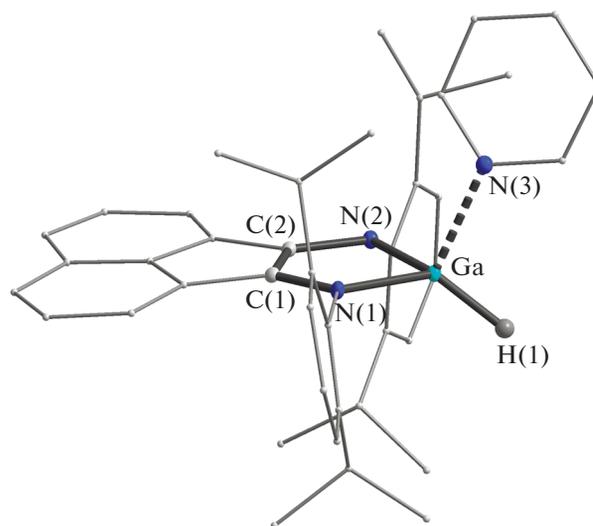
групп изопропильных заместителей дают четыре дублета при  $1.48$  (6H),  $1.34$  (6H),  $1.21$  (6H) и  $0.88$  (6H) м.д. Септет и дублет протонов *i*-Pr-заместителей, а также синглет протонов метильных групп карбенового лиганда проявляются при  $5.42$  (2H),  $0.97$  (12H) и  $1.46$  (6H) м.д. соответственно. Арома-



**Рис. 1.** Спектр ЯМР  $^1\text{H}$  соединений II (200 МГц,  $\text{C}_5\text{D}_5\text{N}$ , 298 К) (а) и III (400 МГц,  $\text{C}_6\text{D}_6$ , 298 К) (б).

тические протоны наблюдаются в виде двух дублетов (7.07 (2H), 6.40 (2H) м.д.), псевдотриплета при 6.89 (2H) и мультиплета в диапазоне  $\delta$  7.37–7.25 (6H) м.д.

Комплекс  $[(\text{Dpp-bian})\text{AlH}(i\text{-Pr}_2\text{Im}^{\text{Me}})]$ , аналогичный соединению III, мы получили реакцией соединения  $[(\text{Dpp-bian})\text{AlH}(\text{THF})]$  с имидазол-2-илиденом путем замещения молекулы координированного THF на карбен [59]. Реакция соединения II с  $i\text{-Pr}_2\text{Im}^{\text{Me}}$  в ампуле для регистрации спектров ЯМР сопровождается изменением цвета раствора с синего на зеленый, полученный спектр аналогичен описанному выше и свидетельствует о замещении молекулы пиридина на ННС-лиганд, в результате чего образуется комплекс III и свободный пиридин (8.53 (2H), 6.98 (1H), 6.66 (2H) м.д.) (рис. 1б).



**Рис. 2.** Молекулярная структура II. Тепловые эллипсоиды приведены с 30%-ной вероятностью. Атомы водорода, за исключением H(1), не показаны.

Согласно данным РСА, соединение II представляет собой мономерный четырехкоординатный комплекс галлия (рис. 2). Анализ длин связей в металлоцикле комплекса II указывает на дианионное состояние Dpp-bian лиганда в нем. Связи N(1)–C(1) 1.3850(18) и N(2)–C(2) 1.3991(17) Å удлинены по сравнению с соответствующими связями в комплексах I (N(1)–C(1) 1.3238(18), N(2)–C(2) 1.3291(18) Å) и  $[(\text{Dpp-bian})\text{Ga}(\text{H})\text{Cl}]$  (N(1)–C(1) 1.327(3), N(2)–C(2) 1.326(3) Å) с анион-радикалом Dpp-bian [49]. С другой стороны, расстояния Ga–N в комплексе II (1.8930(11) и 1.9022(12) Å) заметно меньше расстояний Ga–N в гидридах галлия (Ga–N(1) 1.9825(12), Ga–N(2) 1.9968(12) Å для I и Ga–N(1) 1.9581(17), Ga–N(2) 1.9519(17) Å для  $[(\text{Dpp-bian})\text{Ga}(\text{H})\text{Cl}]$ ), что свидетельствует о более сильном связывании галлия с дианионом Dpp-bian по сравнению с его анион-радикалом. Связь Ga–H в комплексе II (1.460(19) Å) близка к соответствующим расстояниям в гидриде I (1.53(2) и 1.47(2) Å) и соединении  $\{[(\text{Dpp})\text{NCH}]_2\}\text{GaH}(\text{Mes}_2\text{Im}_\text{H})$  (1.498(16) Å) [32].

Таким образом, получены и охарактеризованы новые мономерные гидриды галлия  $[(\text{Dpp-bian})\text{GaH}(\text{Py})]$  (II) и  $[(\text{Dpp-bian})\text{GaH}(i\text{-Pr}_2\text{Im}^{\text{Me}})]$  (III), содержащие редокс-активный лиганд Dpp-bian в дианионной форме. Полученные нами ранее гидриды галлия оказались инертными к некоторым непредельным соединениям, однако процесс восстановления элиминирования атома водорода под действием донорных молекул, таких как пиридин и имидазол-2-илиден, вероятно, может быть использован для гидрирования подобных субстратов. При этом продемонстрирована возможность стабили-

зирования дианионного моногидрида галлия молекулой сильного основания Льюиса. В ближайшее время мы планируем исследовать реакционную способность новых комплексов II и III по отношению к некоторым органическим соединениям, а также малым молекулам, в частности CO и CO<sub>2</sub>. Это позволит определить как возможность использования данных производных в катализе реакций органического синтеза, так и расширить фундаментальные представления о химии комплексов металлов с редокс-активными лигандами.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Downs A.J., Pulham C.R. // Chem. Soc. Rev. 1994. V. 23. № 3. P. 175.
- Jegier J.A., Gladfelter W.L. // Coord. Chem. Rev. 2000. V. 206–207. P. 631.
- Aldridge S., Downs A.J. // Chem. Rev. 2001. V. 101. № 11. P. 3305.
- Uhl W. // Coord. Chem. Rev. 2008. V. 252. № 15–17. P. 1540.
- Luo B., Gladfelter W.L. // Chem. Commun. 2000. № 10. P. 825.
- Luo B., Young V.G., Gladfelter W.L. // Inorg. Chem. 2000. V. 39. № 8. P. 1705.
- Cowley A.R., Downs A.J., Himmel H.J. et al. // Dalton Trans. 2005. № 9. P. 1591.
- Luo B., Kucera B.E., Gladfelter W.L. // Chem. Commun. 2005. № 27. P. 3463.
- Schmidbaur H., Findeiss W., Gast E. // Angew. Chem. Int. Ed. 1965. V. 4. № 2. P. 152.
- Ohshita J., Schmidbaur H. // J. Organomet. Chem. 1993. V. 453. № 1. P. 7.
- Nogai S., Schmidbaur H. // Inorg. Chem. 2002. V. 41. № 18. P. 4770.
- Eisch J.J. // J. Am. Chem. Soc. 1962. V. 84. № 20. P. 3830.
- Uhl W., Cuypers L., Graupner R. et al. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2001. V. 627. № 4. P. 607.
- Uhl W., Cuypers L., Geiseler G. et al. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2002. V. 628. № 5. P. 1001.
- Schmidbaur H., Klein H.F. // Angew. Chem. Int. Ed. 1966. V. 5. № 3. P. 312.
- Schumann H., Hartmann U., Wassermann W. // Polyhedron. 1990. V. 9. № 2–3. P. 353.
- Takami K., Mikami S., Yorimitsu H. et al. // J. Org. Chem. 2003. V. 68. № 17. P. 6627.
- Uhl W., Breher W., Haddadpour S. et al. // Organometallics. 2005. V. 24. № 9. P. 2210.
- Uhl W., Haddadpour S., Matar M. // Organometallics. 2006. V. 25. № 1. P. 159.
- Uhl W., Bock H.R., Breher F. et al. // Organometallics. 2007. V. 26. № 9. P. 2363.
- Uhl W., Claesener M., Haddadpour S. et al. // Dalton Trans. 2007. № 4. P. 417.
- Uhl W., Claesener M. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. № 11. P. 4463.
- Uhl W., Claesener M., Haddadpour S. et al. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2008. V. 634. № 15. P. 2889.
- Uhl W., Claesener M. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. № 2. P. 729.
- Uhl W., Claesener M., Hepp A. et al. // Dalton Trans. 2009. № 47. P. 10550.
- Uhl W., Hepp A., Westenberg H. et al. // Organometallics. 2010. V. 29. № 6. P. 1406.
- Uhl W., Claesener M., Kovert D. et al. // Organometallics. 2011. V. 30. № 11. P. 3075.
- Uhl W., Kovert D., Zemke S. et al. // Organometallics. 2011. V. 30. № 17. P. 4736.
- Uhl W., Layh M., Rhotert I. et al. // Z. Naturforsch. 2013. V. 68. № 5–6. P. 503.
- Schmidt E.S., Jockisch A., Schmidbaur H. // Dalton Trans. 2000. № 7. P. 1039.
- Cole M.L., Jones C., Junk P.C. et al. // Chem. Eur. J. 2005. V. 11. № 15. P. 4482.
- Jones C., Mills D.P., Rose R.P. // J. Organomet. Chem. 2006. V. 691. № 13. P. 3060.
- Bonello O., Jones C., Stasch A. et al. // Organometallics. 2010. V. 29. № 21. P. 4914.
- Singh S., Ahn H.J., Stasch A. et al. // Inorg. Chem. 2006. V. 45. № 4. P. 1853.
- Seifert A., Scheid D., Linti G. et al. // Chem. Eur. J. 2009. V. 15. № 44. P. 12114.
- Turner J., Abdalla J.A.B., Bates J.I. et al. // Chem. Sci. 2013. V. 4. № 11. P. 4245.
- Abdalla J.A.B., Riddlestone I.M., Tirfoin R. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 54. № 17. P. 5098.
- Herappe-Mejía E., Trujillo-Hernández K., Garduño-Jiménez J. et al. // Dalton Trans. 2015. № 44. P. 16894.
- Fedushkin I.L., Nikipelov A.S., Lyssenko K.A. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2010. V. 132. № 23. P. 7874.
- Fedushkin I.L., Moskalev M.V., Lukoyanov A.N. et al. // Chem. Eur. J. 2012. V. 18. № 36. P. 11264.
- Fedushkin I.L., Moskalev M.V., Baranov E.V. et al. // J. Organomet. Chem. 2013. V. 747. P. 235.
- Fedushkin I.L., Skatova A.A., Dodonov V.A. et al. // Inorg. Chem. 2014. V. 53. № 10. P. 5159.
- Fedushkin I.L., Nikipelov A.S., Skatova A.A. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2009. № 25. P. 3742.
- Fedushkin I.L., Kazarina O.V., Lukoyanov A.N. et al. // Organometallics. 2015. V. 34. № 8. P. 1498.

45. *Moskalev M.V., Lukoyanov A.N., Baranov E.V. et al.* // Dalton Trans. 2016. № 45. № 40. P. 15872.
46. *Dodonov V.A., Skatova A.A., Cherkasov A.V. et al.* // Russ. Chem. Bull., Int. Ed. 2016. V. 65. № 5. P. 1171.
47. *Fedushkin I.L., Dodonov V.A., Skatova A.A. et al.* // Chem. Eur. J. 2018. V. 24. № 8. P. 1877.
48. *Fedushkin I.L., Nikipelov A.S., Morozov A.G. et al.* // Chem. Eur. J. 2012. V. 18. № 1. P. 255.
49. *Sokolov V.G., Koptseva T.S., Moskalev M.V. et al.* // Inorg. Chem. 2017. V. 56. № 21. P. 13401.
50. SAINT. Version 8.38A. Data Reduction and Correction Program. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2017.
51. *Sheldrick G.M.* SADABS. Version 2016/2. Bruker/Siemens Area Detector Absorption Correction Program. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2016.
52. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
53. *Sheldrick G.M.* SHELXTL. Version 6.14. Structure Determination Software Suite. Madison (WI, USA): Bruker AXS, 2003.
54. *Sokolov V.G., Koptseva T.S., Moskalev M.V. et al.* // Russ. Chem. Bull., Int. Ed. 2017. V. 66. № 9. P. 1569.
55. *Sokolov V.G., Koptseva T.S., Dodonov V.A. et al.* // Russ. Chem. Bull., Int. Ed. 2018. V. 67. № 12. P. 2164.
56. *Sokolov V.G., Koptseva T.S., Moskalev M.V. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2019. V. 45. № 9. P. 637. <https://doi.org/10.1134/S1070328419090070>
57. *Fedushkin I.L., Lukoyanov A.N., Tishkina A.N. et al.* // Chemistry Eur. J. 2010. V. 16. № 25. P. 7563.
58. *Fedushkin I.L., Lukoyanov A.N., Ketkov S.Y. et al.* // Chem. Eur. J. 2007. V. 13. № 25. P. 7050.
59. *Sokolov V.G., Koptseva T.S., Rumyantsev R.V. et al.* // Organometallics. 2020. V. 39. № 1. P. 66.