

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.271

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОЛИЗА НИТРИЛИЕВЫХ
ПРОИЗВОДНЫХ КЛОЗО-ДОДЕКАБОРАТНОГО АНИОНА
(Et₄N)[B₁₂H₁₁N≡C–R], где R = Me, Et, ⁿPr, ⁱPr

© 2023 г. А. В. Нелюбин^a, И. Н. Ключин^a, Н. А. Селиванов^a, А. Ю. Быков^a,
А. С. Кубасов^a, А. П. Жданов^a*, К. Ю. Жижин^a, Н. Т. Кузнецов^a

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

*e-mail: zhdanov@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 02.12.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 27.12.2022 г.

В результате взаимодействия нитрильных производных клозо-додекаборатного аниона (Et₄N)[B₁₂H₁₁N≡C–R] (R = Me, Et, ⁿPr, ⁱPr) с водой получен ряд иминолов состава (Et₄N)[B₁₂H₁₁NH=C(OH)–R]. Установлено, что продукты гидролиза находятся в кислотно-основном равновесии иминол–амид, которое можно контролировать путем изменения кислотности среды. Продукты реакций идентифицированы и охарактеризованы методами ¹¹B, ¹H, ¹³C ЯМР-спектроскопии, ИК-спектроскопии, ESI-масс-спектрометрии. Строение анионов [B₁₂H₁₁(Z–NH=C(OH)_nC₃H₇)][–] и [B₁₂H₁₁(E–NH–C(O)_nC₃H₇)]^{2–} установлено методом РСА.

Ключевые слова: клозо-додекабораты, нитрильные производные, иминолы, амиды

DOI: 10.31857/S0044457X22602310, **EDN:** UFEDHV

ВВЕДЕНИЕ

Клозо-додекаборатный анион является одним из наиболее изученных кластерных анионов бора. Благодаря ряду уникальных свойств, присущих данному классу соединений, они представляют интерес как исходные платформы для получения различных лигандов в координационной химии [1–6], катализаторов [2, 7], материалов для электрохимических устройств [8, 9], высокоэнергетических веществ [10–14], потенциальных медицинских препаратов [15–17]. Разнообразие применения кластерных анионов связано с возможностью получения производных, содержащих один или несколько экзополедирических заместителей. Одной из важнейших областей химии данных соединений является химия производных, содержащих связь бор–азот. Борилированные амиды на основе клозо-додекаборатного аниона и находящиеся с ними в равновесии борилированные иминолы впервые были получены как побочные продукты при попытке синтеза нитрильных производных [18]. В дальнейшем они нашли свой применение в качестве лигандов [19] и исходных соединений для синтеза полизамещенных производных, обладающих противомикробной активностью [20, 21]. Основные недостатки методов получения данных соединений – малый выход

целевых продуктов и необходимость трудоемкой очистки целевых соединений.

В настоящей работе нами предложен и оптимизирован метод получения борилированных иминолов на основе реакции гидролиза нитрильных производных клозо-додекаборатного аниона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Элементный анализ. Содержание углерода, водорода и азота в образцах определяли на элементном CHNS-анализаторе Eurovector EuroEA 3000, содержание бора – на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific).

ИК-спектры соединений записывали на ИК-фурье-спектрофотометре Инфралюм ФТ-08 (НПФ АП “Люмекс”) в области 4000–600 см^{–1} с разрешением 1 см^{–1}. Образцы готовили в виде раствора в CH₂Cl₂.

Спектры ЯМР ¹H, ¹¹B, ¹³C растворов исследуемых веществ в CD₂Cl₂ или в CD₃CN записывали на импульсном фурье-спектрометре Bruker AVANCE 300 (ФРГ) на частотах 300.3, 96.32 и 75.49 МГц соответственно с внутренней стабилизацией по дейтерию. В качестве внешних стандартов использовали тетраметилсилан или эфират трехфтористого бора.

Таблица 1. Данные элементного анализа синтезированных соединений

Соединение	С, %		Н, %		N, %		В, %	
	вычислено	найдено	вычислено	найдено	вычислено	найдено	вычислено	найдено
(Et ₄ N)(2a)	36.38	36.40	10.99	10.85	8.49	8.56	39.3	39.0
(Et ₄ N)(2b)	38.39	38.46	11.13	11.04	8.14	8.17	37.7	37.5
(Et ₄ N)(2c)	40.24	40.13	11.26	11.36	7.82	7.70	36.2	36.0
(Et ₄ N)(2d)	40.24	40.10	11.26	11.30	7.82	7.65	36.2	35.8
(Et ₄ N) ₂ (3c)	49.28	49.01	12.20	12.29	8.62	8.55	26.6	26.1

ESI-масс-спектры растворов исследуемых веществ в CH₃CN записывали на спектрометре LCMS-IT-TOF (Shimadzu, Japan). Спектры HRMS были получены в режиме прямого введения. Масс-спектры получали в диапазоне *m/z* от 120 до 700 Да. Напряжение детектора 1.55 кВ, распыляющий газ 1.50 л/мин, температура CDL 200.0°C, напряжение ЭСИ 4.50 кВ. Настройку прибора (калибровку массы и проверку чувствительности) проводили перед анализом.

Рентгеноструктурный анализ. Набор дифракционных отражений для кристалла получен в Центре коллективного пользования ИОНХ РАН на автоматическом дифрактометре Bruker Smart Apex2 (λMoK_α, графитовый монохроматор, ω-φ-сканирование). Данные были проиндексированы и интегрированы с помощью программы SAINT. Применяли поправку на поглощение, основанную на измерениях эквивалентных отражений (SADABS) [22]. Структуры расшифрованы прямым методом с последующим расчетом разностных синтезов Фурье. Все неводородные атомы уточнены в анизотропном приближении, все атомы водорода – по модели “наездника” с тепловыми параметрами $U_{\text{изо}} = 1.2U_{\text{экв}}$ ($U_{\text{изо}}$) соответствующего неводородного атома ($1.5U_{\text{изо}}$ для CH₃-групп).

Все расчеты проводили с использованием программы SHELXTL [23]. Структура расшифрована и уточнена с помощью программного комплекса OLEX2 [24].

Тетрафенилфосфониевые соли для PCA были получены добавлением эквимольного количества PPh₄Cl к соответствующим производным в минимальном количестве ацетонитрила.

Кристаллографические данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2231708, 2231709).

Синтез. Нитрильные производные *клозо*-додекаборатного аниона вида (Et₄N)[B₁₂H₁₁N≡C–R], где R = Me (Et₄N)(1a), Et (Et₄N)(1b), ⁿPr (Et₄N)(1c), ⁱPr (Et₄N)(1d), были получены по оптимизированной литературной методике [25, 26].

(Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)CH₃)] – (Et₄N)(2a). Расворяли 0.312 г (1.0 ммоль) (Et₄N)(1a) в 5 мл аце-

тонитрила и 5 мл дистиллированной воды. Реакционную смесь кипятили с обратным холодильником в течение 2 ч. После охлаждения до комнатной температуры к раствору прибавляли 1 мл 1 н раствора HCl. Полученный раствор концентрировали на роторном испарителе до объема 2 мл и отфильтровывали целевое вещество. Полученный продукт сушили в вакууме. Выход (Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)CH₃)] ((Et₄N)(2a)) 0.30 г (91%).

¹¹B{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): –8.2 (с, 1В, В–N), –15.3, –16.0 (с, ¹¹B, В–H(B2–12)). ¹H ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 2.5–0.0 (м, 11H, В–H), 3.17 (8H, Et₄N), 1.22 (12H, Et₄N), 10.7 (с, 1H, OH), 8.52 (т, 1H, NH=C), 2.18 (с, 3H, C–CH₃). ¹³C{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 53.1 (Et₄N), 7.7 (Et₄N), 176.3 (NH=C), 20.1 (NH=C–CH₃). ИК-спектр (CH₂Cl₂, см^{–1}): 3323, 3291, 3245 ν(N–H), 2492 ν(B–H), 1653 ν(C=N). MS(ESI) *m/z*: 200.2421 (найдено для [B₁₂H₁₁(NHC(OH)CH₃)][–], вычислено для {[A][–]} 200.2423). Данные элементного анализа приведены в табл. 1.

(Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)C₂H₅)] ((Et₄N)(2b)) получали по аналогичной методике. Из 0.329 г (Et₄N)(1b) получено 0.313 г (Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)C₂H₅)] ((Et₄N)(2b)). Выход 91%.

¹¹B{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): –8.1 (с, 1В, В–N), –15.1, –15.8 (с, 11В, В–H(B2–12)). ¹H ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 2.5–0.0 (м, 11H, В–H), 3.17 (8H, Et₄N), 1.22 (12H, Et₄N), 10.8 (с, 1H, OH), 8.4 (т, 1H, NH=C), 2.47 (к, 2H, CH₂CH₃, J = 7.57 Гц), 1.16 (т, 3H, CH₂CH₃, J = 7.54 Гц). ¹³C{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 53.1 (Et₄N), 7.7 (Et₄N), 179.1 (NH=C), 27.7 (CH₂CH₃), 9.84 (CH₂CH₃). ИК-спектр (CH₂Cl₂, см^{–1}): 3328, 3271 ν(N–H), 2495 ν(B–H), 1653 ν(C=N). MS(ESI) *m/z*: 214.2573 (найдено для [B₁₂H₁₁(NHC(OH)C₂H₅)][–], вычислено для {[A][–]} 214.2578).

(Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)C₃H₇)] ((Et₄N)(2c)) получали по аналогичной методике. Из 0.340 г (Et₄N)(1c) получено 0.344 г (Et₄N)[B₁₂H₁₁(NHC(OH)C₃H₇)] ((Et₄N)(2c)). Выход 96%.

$^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $-8,1$ (с, 1В, В–N), $-15,0$, $-15,8$ (с, 11В, В–Н(B2–12)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $2,5$ – $0,0$ (м, 11Н, В–Н), $3,17$ (8Н, Et_4N), $1,22$ (12Н, Et_4N), $10,8$ (с, 1Н, ОН), $8,46$ (т, 1Н, $\text{NH}=\text{C}$), $2,42$ (т, 2Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$, $J = 7,33$ Гц), $1,65$ (м, 2Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $0,92$ (т, 3Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$, $J = 7,40$). $^{13}\text{C}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $53,1$ (Et_4N), $7,7$ (Et_4N), $178,9$ ($\text{NH}=\text{C}$), $35,8$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $19,8$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $13,2$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3302 , 3279 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2496 $\nu(\text{B}-\text{H})$, 1653 $\nu(\text{C}=\text{N})$. MS(ESI) m/z : $228,2740$ (найдено для $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{OH})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^-$, вычислено для $\{[\text{A}]^-\}$ $228,2734$).

$(\text{Et}_4\text{N})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{OH})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^-$ ($(\text{Et}_4\text{N})(2\text{d})$) получали по аналогичной методике. Из $0,341$ г $(\text{Et}_4\text{N})(1\text{d})$ получено $0,330$ г $(\text{Et}_4\text{N})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{OH})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^-$ ($(\text{Et}_4\text{N})(2\text{d})$). Выход 92% .

$^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $-8,1$ (с, 1В, В–N), $-14,9$, $-15,8$ (с, 11В, В–Н(B2–12)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $2,5$ – $0,0$ (м, 11Н, В–Н), $3,17$ (8Н, Et_4N), $1,22$ (12Н, Et_4N), $10,8$ (с, 1Н, ОН), $8,33$ (т, 1Н, $\text{NH}=\text{C}$), $2,72$ (гепт., 1Н, $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$, $J = 6,89$ Гц), $1,18$ (д, 6Н, $\text{CH}(\text{CH}_3)_2$, $J = 6,97$ Гц). $^{13}\text{C}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $53,1$ (Et_4N), $7,7$ (Et_4N), $182,4$ ($\text{NH}=\text{C}$), $34,3$ ($\text{CH}(\text{CH}_3)_2$), $18,9$ ($\text{CH}(\text{CH}_3)_2$). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3311 , 3276 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2498 $\nu(\text{B}-\text{H})$, 1647 $\nu(\text{C}=\text{N})$. MS(ESI) m/z : $228,2737$ (найдено для $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{OH})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^-$, вычислено для $\{[\text{A}]^-\}$ $228,2734$).

$(\text{Et}_4\text{N})_2[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{O})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^{2-}$ ($(\text{Et}_4\text{N})_2(3\text{c})$). Навеску $0,186$ г ($0,5$ ммоль) $(\text{Et}_4\text{N})(2\text{a})$ растворяли в 5 мл CH_2Cl_2 . К полученному раствору приливали 5 мл $0,1$ н раствора NaOH и добавляли $0,09$ г ($0,55$ ммоль) $(\text{Et}_4\text{N})\text{Cl}$. Реакционную массу перемешивали в течение 2 ч, органическую часть отделяли, упаривали на ротаторном испарителе досуха. Полученный продукт перекристаллизовывали из смеси этанол/2-пропанол и сушили в вакууме.

Получено $0,245$ г $(\text{Et}_4\text{N})_2[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{NHC}(\text{O})^n\text{C}_3\text{H}_7)]^{2-}$ ($(\text{Et}_4\text{N})_2(3\text{c})$). Выход 90% .

$^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $-4,0$ (с, 1В, В–N), $-14,8$, $-16,2$, $-19,4$ (с, 11В, В–Н(B2–12)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $2,5$ – $0,0$ (м, 11Н, В–Н), $3,17$ (8Н, Et_4N), $1,22$ (12Н, Et_4N), $7,7$ (с, 1Н, $\text{NH}-\text{C}$), $2,44$ (т, 2Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$, $J = 7,33$ Гц), $1,46$ (м, 2Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $0,86$ (т, 3Н, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$, $J = 7,40$). $^{13}\text{C}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): $53,1$ (Et_4N), $7,7$ (Et_4N), $177,7$ ($\text{NH}-\text{C}=\text{O}$), $35,4$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $20,0$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), $13,3$ ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция гидролиза нитрилиевых производных *клозо*-додекаборатного аниона протекает по схеме:

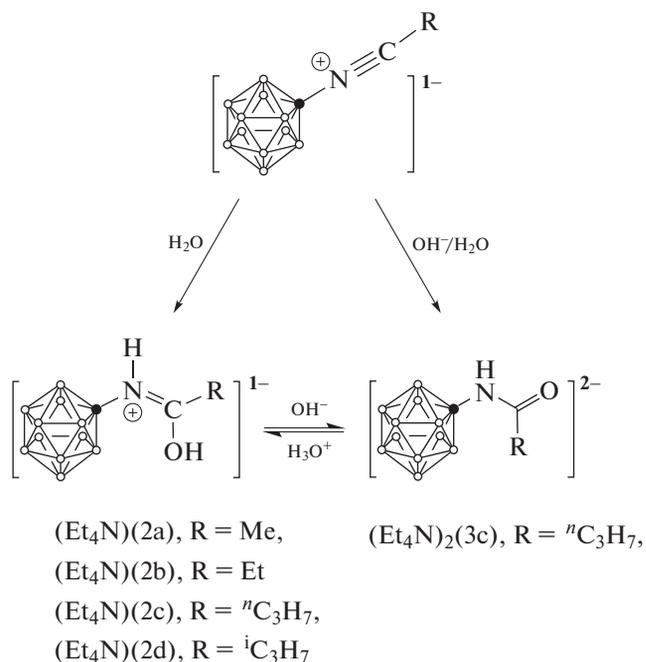


Схема 1.

В отличие от реакции нитрилиевых производных с аминами, процесс гидролиза нитрилиевых производных протекает с заметной скоростью только при повышенной температуре [25, 27, 28].

Образующийся на первой стадии реакции иминол находится в равновесии с соответствующим амидным производным *клозо*-додекаборатного аниона. При гидролизе нитрилиевых производных в водно-ацетонитрильной среде образуется смесь двух продуктов с преобладанием иминольной формы (10 : 1). Дальнейшая обработка полученной смеси продуктов кислотой или основанием позволяет получать соответственно иминольную или амидную форму производного.

Полноту протекания реакции контролировали с помощью $^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектроскопии. В спектрах полученных иминолов сигнал от замещенного атома бора наблюдается в области $-8,1$ – $-8,2$ м.д. Сигналы от незамещенных атомов бора лежат в области $-15,0$ – $-17,0$ м.д. Равновесие между иминольной и амидной формой полученных производных было изучено при титровании раствора борилированного амида трифторуксусной кислотой (шаг – $0,1$ экв. трифторуксусной кислоты). Полученные спектры соотносятся с литературными данными [29, 30]: сигналы от замещенного атома бора в амидах лежат в области $-5,1$ м.д. и при добавлении избытка кислоты смещаются в область слабого поля ($9,0$ м.д.) в продукте иминольной структуры (рис. 1).

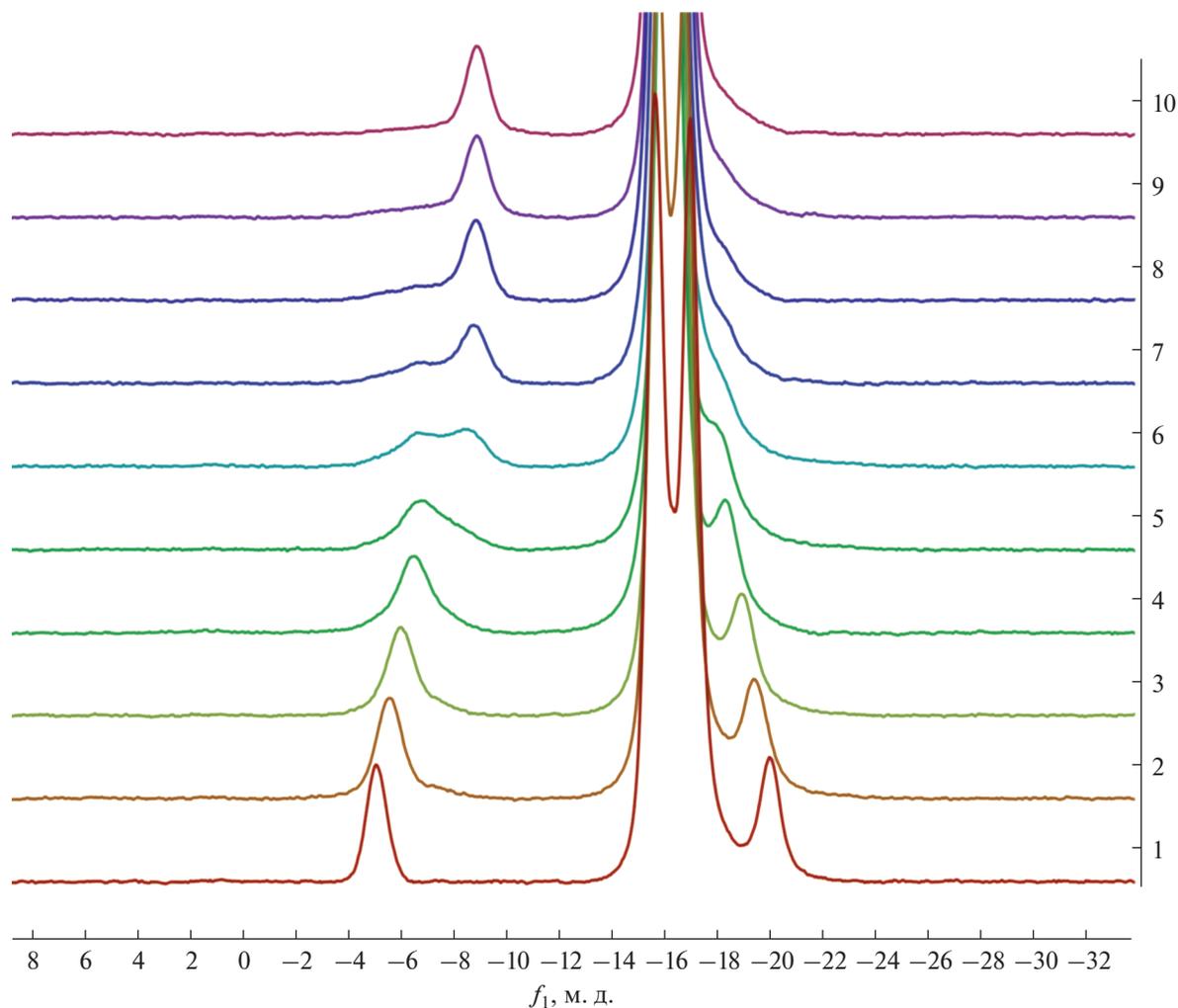


Рис. 1. Спектры $^{11}\text{B}\{^1\text{H}\}$ ЯМР перехода амида в иминол.

Полученные иминолы исследованы методами ^1H и $^{13}\text{C}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектроскопии, ИК-спектроскопии и ESI-HR масс-спектрометрии. В спектрах ^1H ЯМР наблюдается один уширенный сигнал от гидридных атомов водорода *клиззо*-додекаборатного аниона в области 2.50...0.00 м.д. Иминольный фрагмент представлен группой из двух сигналов: сигналом протонов гидроксильной группы в области 11.0...10.0 м.д. и протоном, связанным с атомом азота, в области 9.0...8.0 м.д. Сигнал протонов, связанных с α -атомом углерода нитрилевого заместителя, лежит в более сильном поле по сравнению с продуктами присоединения спиртов [31]. Положение данного сигнала аналогично сигналам в продуктах присоединения первичных аминов, что указывает на образование продуктов в *Z*-конфигурации.

Производные иминольной $(\text{NEt}_4)[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{Z-NH}=\text{C}(\text{OH})^n\text{C}_3\text{H}_7)]$ и амидной структуры

$(\text{PPh}_4)_2[\text{B}_{12}\text{H}_{11}(\text{E-NH}-\text{C}(\text{O})^n\text{C}_3\text{H}_7)]$ были изучены методами PCA (рис. 2).

Установлено, что в структуре продукта, находящегося в форме иминола, длина связи $\text{N}(1)-\text{C}(1)$ составляет 1.292 Å, а $\text{C}(1)-\text{O}(1)$ – 1.310 Å, данные значения соответствуют промежуточным порядкам связей $\text{C}-\text{N}$ и $\text{C}-\text{O}$, что указывает на наличие сопряжения в молекуле исследуемого иминола. В отличие от продуктов присоединения спиртов к нитрилевым производным *клиззо*-додекаборатного аниона, реакция присоединения воды протекает с образованием продукта в *Z*-конфигурации при двойной связи $\text{N}(1)-\text{C}(1)$. Стереоселективность процесса обусловлена возможностью образования внутримолекулярной диводородной связи между атомом водорода гидроксильной группы и одним из гидридных атомов кластера. Длина диводородной связи в полученной структуре составляет 1.849 Å, это значение меньше

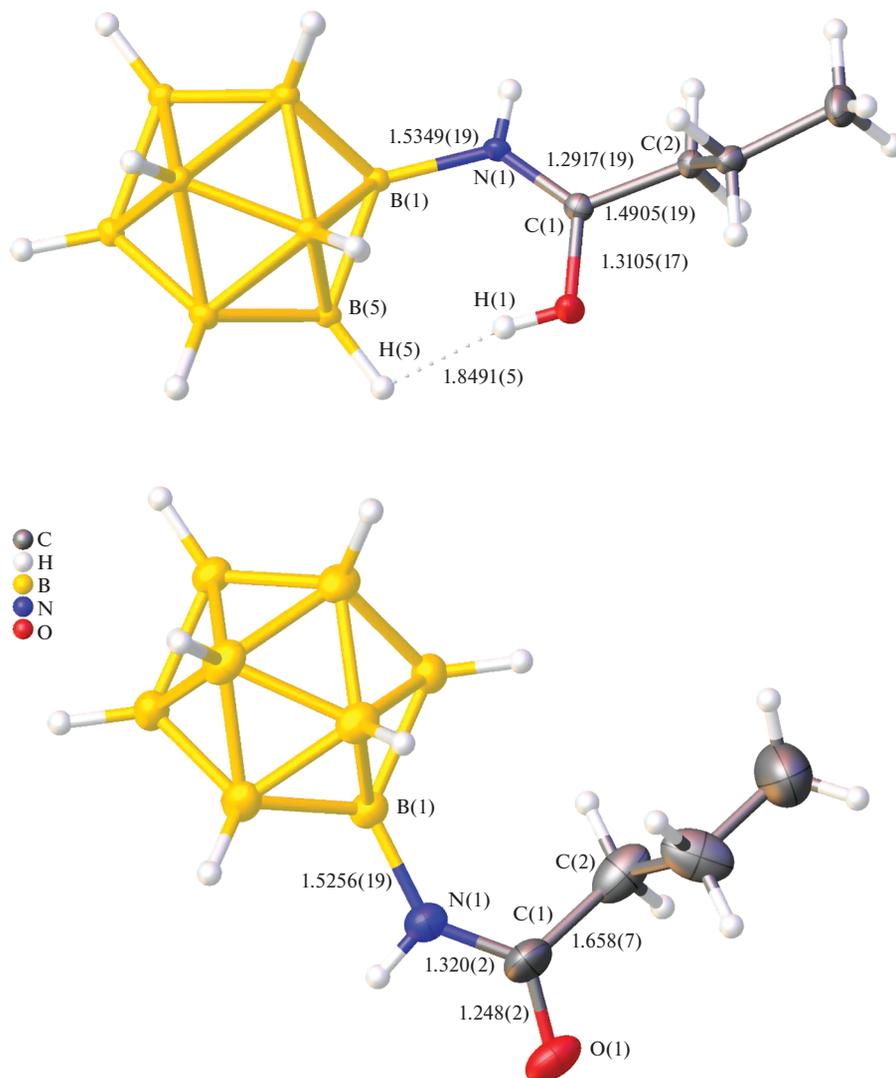


Рис. 2. Строение анионов $[B_{12}H_{11}(Z-NH=C(OH)^n C_3H_7)]^-$ и $[B_{12}H_{11}(E-NH-C(O)^n C_3H_7)]^{2-}$ по данным РСА.

средней длины диводородных связей в молекулах борилированных амидинов.

В продукте амидной структуры длина связи N(1)–C(1) составляет 1.320 Å, а C(1)–O(1) – 1.248 Å, что хорошо согласуется с литературными данными, в том числе и для органических амидов. Разница в длинах связей двух кристаллических структур объясняется более выраженной делокализацией электронов в молекуле иминола.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и оптимизирован метод получения борилированных иминолов и амидов на основе реакции гидролиза нитрильных производных *клозо*-додекаборатного аниона. Реакция характеризуется простотой синтетических операций и

выходом целевых продуктов, близким к количественным. Показано, что иминолы и амиды могут претерпевать взаимное превращение в зависимости от pH среды.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН, функционирующего при поддержке государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (21-13-00450).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geis V., Guttsche K., Knapp C. et al. // Dalton Trans. 2009. № 15. P. 2687. <https://doi.org/10.1039/b821030f>
2. Bolli C., Derendorf J., Jenne C. et al. // Chem. A Eur. J. 2014. V. 20. № 42. P. 13783. <https://doi.org/10.1002/chem.201403625>
3. Bolli C., Derendorf J., Jenne C. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. V. 2017. № 38–39. P. 4552. <https://doi.org/10.1002/ejic.201700620>
4. Zhang Y., Liu J., Duttwyler S. // Eur. J. Inorg. Chem. 2015. V. 2015. № 31. P. 5158. <https://doi.org/10.1002/ejic.201501009>
5. Kirchmann M., Wesemann L. // Dalton Trans. 2008. № 4. P. 444. <https://doi.org/10.1039/B715305H>
6. Matveev E.Y., Avdeeva V.V., Zhizhin K.Y. et al. // Inorganics. 2022. V. 10. № 12. P. 238. <https://doi.org/10.3390/inorganics10120238>
7. Messina M.S., Axtell J.C., Wang Y. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2016. V. 138. № 22. P. 6952. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b03568>
8. Gigante A., Duchêne L., Moury R. et al. // ChemSusChem. 2019. V. 12. № 21. P. 4832. <https://doi.org/10.1002/cssc.201902152>
9. Duchêne L., Lunghammer S., Burankova T. et al. // Chem. Mater. 2019. V. 31. № 9. P. 3449. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b00610>
10. Derdziuk J., Malinowski P.J., Jaroní T. // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. № 49. P. 27030. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.158>
11. Rao M.H., Muralidharan K. // Polyhedron. 2016. V. 115. P. 105. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2016.03.062>
12. Hagemann H. // Molecules. 2021. V. 26. № 24. P. 7425. <https://doi.org/10.3390/molecules26247425>
13. Sharon P., Afri M., Mitlin S. et al. // Polyhedron. 2019. V. 157. P. 71. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2018.09.055>
14. Zhilitskaya L.V., Shaiyan B.A., Yarosh N.O. // Molecules. 2021. V. 26. № 8. P. 2190. <https://doi.org/10.3390/molecules26082190>
15. Barth R.F., Zhang Z., Liu T. // Cancer. Commun. 2018. V. 38. № 1. P. 36. <https://doi.org/10.1186/s40880-018-0280-5>
16. Hattori Y., Kusaka S., Mukumoto M. et al. // J. Med. Chem. 2012. V. 55. № 15. P. 6980. <https://doi.org/10.1021/jm300749q>
17. Hatanaka H. // J. Neurol. 1975. V. 209. № 2. P. 81. <https://doi.org/10.1007/BF00314601>
18. Wiersema R.J., Middaugh R.L. // Inorg. Chem. 1969. V. 8. № 10. P. 2074. <https://doi.org/10.1021/ic50080a009>
19. Guangxian X., Jimei X., Technology S. New Frontiers in Rare Earth Science and Applications. 1985. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11730-8>
20. Varkhedkar R., Yang F., Dontha R. et al. // ACS Cent. Sci. 2022. V. 8. № 3. P. 322. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c01132>
21. Sun Y., Zhang J., Zhang Y. et al. // Chem. A Eur. J. 2018. V. 24. № 41. P. 10364. <https://doi.org/10.1002/chem.201801602>
22. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2015. V. 48. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S1600576714022985>
23. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr., Sect. C: Struct. Chem. 2015. V. 71. № 1. P. 3. <https://doi.org/10.1107/S2053229614024218>
24. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. № 2. P. 339. <https://doi.org/10.1107/S0021889808042726>
25. Nelyubin A.V., Selivanov N.A., Bykov A.Y. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. № 24. P. 13391. <https://doi.org/10.3390/ijms222413391>
26. Nelyubin A.V., Klyukin I.N., Novikov A.S. et al. // Inorganics. 2022. V. 10. № 11. P. 196. <https://doi.org/10.3390/inorganics10110196>
27. Нелюбин А.В., Соколов М.С., Селиванов Н.А. и др. // Журн. неорган. химии. 2022. Т. 67. С. 1562.
28. Нелюбин А.В., Селиванов Н.А., Клюкин И.Н. и др. // Журн. неорган. химии. 2021. Т. 66. С. 1297.
29. Zhang Y., Sun Y., Wang T. et al. // Molecules. 2018. V. 23. № 12. P. 1. <https://doi.org/10.3390/molecules23123137>
30. Bogdanova E.V., Stogniy M.Y., Suponitsky K.Y. et al. // Molecules. 2021. V. 26. № 21. P. 6544. <https://doi.org/10.3390/molecules26216544>
31. Laskova J., Ananiev I., Kosenko I. et al. // Dalton Trans. 2022. V. 51. № 8. P. 3051. <https://doi.org/10.1039/D1DT04174F>