

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.271

СИНТЕЗ ПРОИЗВОДНЫХ КЛОЗО-ДОДЕКАБОРАТНОГО АНИОНА  
НА ОСНОВЕ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ АМИНОКИСЛОТ

© 2021 г. А. В. Бурденкова<sup>а</sup>, А. П. Жданов<sup>б, \*</sup>, И. Н. Клюкин<sup>с</sup>, Н. А. Селиванов<sup>с</sup>, А. Ю. Быков<sup>с</sup>,  
К. Ю. Жижин<sup>с</sup>, Н. Т. Кузнецов<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,  
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000 Россия

<sup>б</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
пр-т Гагарина, 20, Нижний Новгород, 603022 Россия

<sup>с</sup>Институт 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 19.04.2021 г.

После доработки 03.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Предложен новый метод синтеза N-борилированных аминокислот на основе реакций нуклеофильного замещения в анионе  $[B_{12}H_{11}I\text{Ph}]^-$ . В качестве нуклеофилов были использованы эфиры глицина и L-фенилаланина. Строение продуктов определено методами мультитядерной ЯМР-спектроскопии, ИК-спектроскопии поглощения и ESI-масс-спектрометрии.

**Ключевые слова:** клозо-додекаборатный анион, сложные эфиры аминокислот, фенилиодониевое производное

DOI: 10.31857/S0044457X21110039

## ВВЕДЕНИЕ

Кластерные анионы бора находят широкое применение в качестве компонентов фотовольтаических устройств [1–6], катализаторов [7, 8], биосенсоров [9, 10], молекулярных магнитов [11, 12]. Одной из наиболее важных областей применения клозо-боратных анионов является бор-нейтронозахватная терапия злокачественных опухолей [13–18].

Основной интерес исследователей сконцентрирован на разработке методов направленной функционализации кластерных анионов бора. Так, наряду с процессами электрофильного [19–21] и нуклеофильного замещения [22, 23] атомов водорода кластера в качестве эффективного метода функционализации может рассматриваться процесс *inco*-замещения [24–26].

Одним из типов подобных групп являются ионы галония, способные вступать в реакции с рядом нуклеофильных реагентов. Подобный подход удалось распространить на иодониевые производные карборанов [27], которые вступают в реакции с различными нуклеофилами с селективным замещением арилгалониевого заместителя. Монокарбораны и кластерные анионы бора обладают отрицательным зарядом, и арилиодониевые

цвиттер-ионы на их основе отличаются от производных нейтральных карборанов по реакционной способности и селективности процессов. Получение производных гипервалентного иода через окисление иодо-клозо-боратов описано в литературе [28]. Следует отметить, что данный подход обладает рядом недостатков, так как приводит к образованию продуктов окисления кластерного фрагмента. Значительно повысить выход целевых клозо-боратов позволяет использование гипервалентных соединений иода [29, 30]. Иодониевые производные способны вступать в реакции замещения групп  $\text{PhI}$  с рядом нуклеофилов (пиридины, тиомочевины, цианид-ион, азид-ион и др.) [31–35]. В работах [36, 37] показана возможность использования фенилиодониевых производных клозо-додекаборатного аниона и замещенных аналогов для направленного введения в кластер различных функциональных групп.

Таким образом, использование иодониевых функциональных заместителей в качестве уходящих (*inco*-) групп представляет собой достаточно мощный инструмент для создания новых боросодержащих соединений с заданным набором свойств. В связи с этим целью настоящей работы стало создание новых замещенных производных клозо-додекаборатного аниона и природных ами-

нокислот на основе процессов нуклеофильного замещения в анионе  $[B_{12}H_{11}IPh]^-$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Элементный анализ** на углерод, водород и азот осуществляли на автоматическом газовом анализаторе CHNS-3 FA 1108 Elemental Analyser (Carlo Erba). Определение бора методом ICPMS проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 6300 Duo в ЦКП “Исследовательский научно-аналитический центр ФГУП “ИРЕА”.

**ИК-спектры** синтезированных соединений записывали на ИК-Фурье-спектрометре Инфралюм ФТ-08 (НПФ АП “Люмекс”) в области  $4000-400\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $1\text{ см}^{-1}$ . Образцы готовили в виде таблеток с бромидом калия.

**Спектры ЯМР ( $^1H$ ,  $^{11}B$ ,  $^{13}C$ )** растворов исследуемых веществ в  $CD_3CN$  записывали на спектрометре Bruker Avance II-300 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.

**ESI-масс-спектры** растворов исследуемых веществ в  $CH_3CN$  записывали на спектрометре Bruker MicrOTOF-Q (Bruker Daltonik, Germany). Условия ионизации: Apollo II electrospray ionization source, Ion spray voltage  $+(-)4500\text{ V}$ , температура  $200^\circ\text{C}$ , поток 3 мкл/мин.

**Фенилодододекaborат тетрафенилфосфония  $(Ph_4P)[B_{12}H_{11}IPh]$** . К  $(Ph_4P)_2[B_{12}H_{12}]$  (2.0 г, 2.4 ммоль) добавляли 15 мл ацетонитрила и 2 мл трифторуксусной кислоты. К полученному раствору прибавляли  $PhI(OAc)_2$  (0.77 г, 2.4 ммоль) и перемешивали реакционную массу в атмосфере сухого аргона при умеренном нагревании (до  $40^\circ\text{C}$ ) в течение 2 ч. После этого раствор концентрировали на роторном испарителе и перекристаллизовывали продукт из смеси ацетонитрила и диэтилового эфира. Полученный твердый продукт промывали ледяной уксусной кислотой и диэтиловым эфиром, затем сушили в вакууме масляного насоса. Выход 1.45 г (88%).

ЯМР  $^{11}B$  ( $CD_3CN$ , м.д.):  $-12.1$  (с, 1В, В-И);  $-15.5$  (м, 11В, В-Н); ЯМР  $^1H$  ( $CD_3CN$ , м.д.): 7.98, 7.74, 7.65 (20H, аром.,  $Ph_4P$ ); 7.76, 7.38, 7.15 (м, 5H, аром.,  $C_6H_5I$ ); 2.25–0.15 (уш.м, 11H, В-Н).

**Производное этилового эфира глицина  $(Ph_4P)[B_{12}H_{11}NH_2CH_2COOEt]$** . Готовили смесь  $(NH_2CH_2COOEt) \cdot HCl$  (0.47 г, 3.4 ммоль) и 4-диметиламинопиридина (0.43 г, 3.4 ммоль) в безводном тетрагидрофуране (ТГФ, 20 мл). Полученную суспензию перемешивали в атмосфере сухого аргона при комнатной температуре до полного переосаждения гидрохлорида диметиламинопири-

диния ( $\sim 0.5$  ч), затем осадок отфильтровывали, а к маточному раствору добавляли  $(Ph_4P)[B_{12}H_{11}IPh]$  (0.50 г, 0.7 ммоль). Полученную реакционную массу нагревали при  $80^\circ\text{C}$  в течение 4 ч в атмосфере сухого аргона. По окончании реакции полученный раствор упаривали на роторном испарителе, твердый остаток перекристаллизовывали из смеси метанола и диэтилового эфира. Полученный порошок растворяли в дихлорметане и промывали раствором 0.1 М  $HCl$ . Органическую фазу отделяли, промывали водой до нейтральной реакции, сушили над безводным сульфатом натрия, а затем концентрировали на роторном испарителе. Продукт сушили в вакууме. Выход 0.29 г (70%).

ИК-спектр (KBr,  $cm^{-1}$ , отдельные полосы): 3320, 3258 ( $\nu(N-H)$ ); 2485 ( $\nu(B-H)$ ); 1745 ( $\nu(C=O)$ ); 1042 ( $\delta(B-B-H)$ ). ЯМР  $^{11}B$  ( $CD_3CN$ , м.д.):  $-7.7$  (с, 1В, В-Н);  $-16.5$  (м, 11В, В-Н); ЯМР  $^1H$  ( $CD_3CN$ , м.д.): 7.96, 7.75, 7.71 (20H, аром.,  $Ph_4P$ ); 6.86 (уш.с, 2H,  $NH_2$ ); 4.28 (кв, 2H,  $COO-CH_2-CH_3$ ,  $J = 7$  Гц); 3.99 (д, 2H,  $CH_2COO$ ,  $J = 6$  Гц); 1.29 (т, 3H,  $COO-CH_2-CH_3$ ,  $J = 7$  Гц); 2.20–0.16 (уш.м, 11H, В-Н). ЯМР  $^{13}C$  ( $CD_3CN$ , м.д.): 171.0 ( $COO$ ); 135.4, 134.7, 130.3, 118.3 ( $Ph_4P$ ); 61.5 ( $COO-CH_2-CH_3$ ); 45.4 ( $CH_2-COO$ ); 14.5 ( $COO-CH_2-CH_3$ ). MS(ESI) $^-$ :  $m/z = 285.2$  ( $[B_{12}H_{11}NH_2CH_2COOEt][CH_3CN]^-$ ).

**Производное этилового эфира фенилаланина  $(Ph_4P)[B_{12}H_{11}NH_2CH(CH_2C_6H_5)COOEt]$**  получали по аналогичной методике. Готовили смесь  $PhCH_2CH(NH_2)COOEt \cdot HCl$  (0.83 г, 3.6 ммоль) и 4-диметиламинопиридина (0.44 г, 3.6 ммоль) в безводном ТГФ (20 мл). Полученную суспензию перемешивали в атмосфере сухого аргона при комнатной температуре до полного переосаждения гидрохлорида диметиламинопиридиния ( $\sim 0.5$  ч). Затем осадок отфильтровывали, а к маточному раствору добавляли  $(Ph_4P)[B_{12}H_{11}IPh]$  (0.50 г, 0.7 ммоль). Колбу продували аргоном, полученную реакционную массу нагревали при перемешивании до  $80^\circ\text{C}$  в течение 4 ч. По окончании реакции полученный раствор упаривали на роторном испарителе, а твердый остаток перекристаллизовывали из смеси метанола и диэтилового эфира. Полученный сырой продукт растворяли в дихлорметане и промывали раствором 0.1 М  $HCl$ . Органическую фазу отделяли, промывали водой до нейтральной реакции и сушили над безводным сульфатом натрия, а затем концентрировали на роторном испарителе. Продукт сушили в вакууме. Выход 0.33 г (75%).

ИК-спектр (KBr,  $cm^{-1}$ , отдельные полосы): 3301, 3240 ( $\nu(N-H)$ ); 2470 ( $\nu(B-H)$ ); 1750 ( $\nu(C=O)$ ); 1055 ( $\delta(B-B-H)$ ). ЯМР  $^{11}B$  ( $CD_3CN$ , м.д.):  $-7.2$  (с, 1В, В-Н);  $-16.8$  (сл.м, 11В, В-Н). ЯМР  $^1H$  ( $CD_3CN$ , м.д.): 7.95, 7.76, 7.69 (20H,

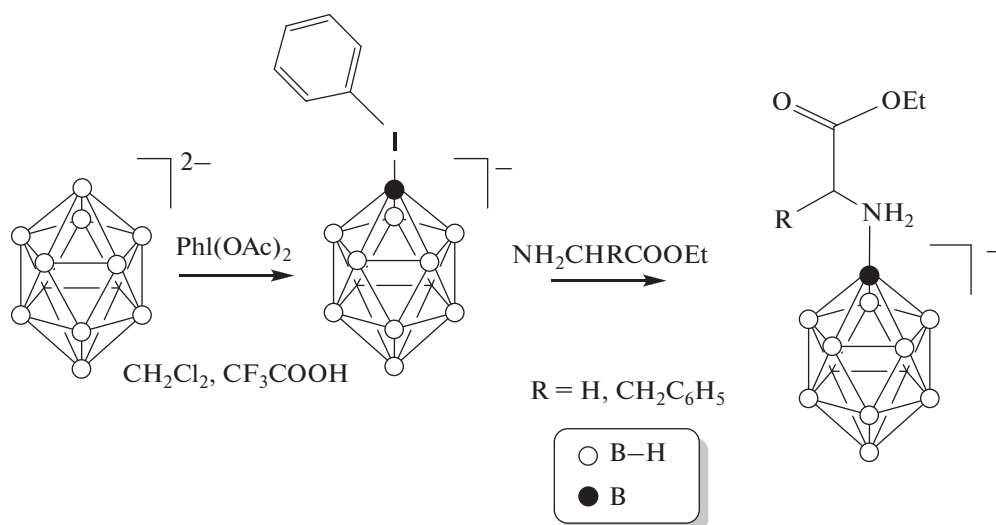


Рис. 1. Синтез замещенных аммонийно-клозо-додекаборатов на основе сложных эфиров аминокислот.

аром.,  $\text{Ph}_4\text{P}$ ); 7.45–7.25 (м, 5H,  $\text{CH}_2\text{-C}_6\text{H}_5$ ); 6.86 (уш.с, 2H,  $\text{NH}_2$ ); 4.36 (м, 1H,  $\text{NH-CH-COO}$ ), 4.28 (кв, 2H,  $\text{COO-CH}_2\text{-CH}_3$ ,  $J = 7$  Гц); 3.33 (д, 2H,  $\text{CH}_2\text{-C}_6\text{H}_5$ ,  $J = 7$  Гц), 1.28 (т, 3H,  $\text{COO-CH}_2\text{-CH}_3$ ,  $J = 7$  Гц), 1.90–0.10 (уш.м, 11H, B–H). ЯМР  $^{13}\text{C}$  ( $\text{CD}_3\text{CN}$ , м.д.): 170.9 ( $\text{COO}$ ), 135.2, 134.5, 130.0, 118.4 ( $\text{Ph}_4\text{P}$ ); 137.1, 130.9, 129.6, 128.1 ( $\text{-CH}_2\text{-Ph}$ ), 62.7 ( $\text{COO-CH}_2\text{-CH}_3$ ), 56.8 ( $\text{CH-COO}$ ), 40.1 ( $\text{CH-CH}_2\text{-Ph}$ ), 14.5 ( $\text{COO-CH}_2\text{-CH}_3$ ). MS(ESI) $^-$ :  $m/z = 334.1$  ( $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CHCH}_2\text{C}_6\text{H}_5\text{COOEt}]^-$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложен синтез фенилиодониевого производного клозо-додекаборатного аниона в безводной среде. Реакцию аниона  $[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$  с  $\text{PhI}(\text{OAc})_2$  проводили в смеси ацетонитрила и трифторуксусной кислоты (рис. 1). Контроль за ходом реакции осуществляли на основе данных  $^{11}\text{B}$  ЯМР-спектроскопии. Так, спектр  $^{11}\text{B}$  ЯМР солей аниона  $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{IPh}]^-$  представлен двумя сигналами:  $\delta_1 = -12.5$  м.д. и  $\delta_2 = -15.6$  м.д. с соотношением интегральных интенсивностей 1 : 11. Строение заместителя в производном определяли с помощью спектроскопии  $^1\text{H}$  ЯМР. Так, в спектре соединения  $(\text{RPh}_4)[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{IPh}]$  наряду с сигналами протонов от тетрабутиламмониевого катиона наблюдаются сигналы в области ароматических протонов при 7.76, 7.39, 7.16 м.д. (м, 5H, аром.,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{I}$ ), что соответствует фенильному заместителю при атоме иода. Кроме того, в спектре присутствуют сигналы от атомов водорода, связанных с борным остовом. Они проявляются в виде уширенного мультиплета в области 2.20–0.16 (ум. м, 11H, B–H).

На второй стадии получали производные на основе сложных эфиров аминокислот, которые были использованы в качестве нуклеофильных реагентов.

Поскольку сложные эфиры аминокислот в виде свободных оснований неустойчивы, нами были использованы соответствующие гидрохлориды. При этом депротонированные формы эфиров получали *in situ* под действием органических оснований в среде тетрагидрофурана (ТГФ). Использование триэтиламина в качестве основания приводило к образованию существенного количества побочного продукта хлорирования додекаборатного аниона, что, очевидно, связано с растворимостью гидрохлорида в ТГФ. Поэтому нами было принято решение использовать в качестве основания 4-диметиламинопиридин, гидрохлорид которого легко удаляется из реакционной массы фильтрованием.

Добавление к раствору сложного эфира  $(\text{Ph}_4\text{P})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{IPh}]$  приводит к замещению фенилиодониевой группы на остаток аминокислоты. Реакция протекает уже при комнатной температуре, однако скорость данного процесса невелика. Нагревание до  $80^\circ\text{C}$  реакционной массы позволяет достичь полной конверсии исходного иодониевого производного за 4 ч. Следует отметить, что изученный процесс чувствителен к наличию в системе воды и хлорид-ионов, что приводит к побочным процессам и снижает выход целевого продукта.

Контроль за ходом реакции осуществляли на основе данных  $^{11}\text{B}$  ЯМР-спектроскопии. Так, спектры  $^{11}\text{B}$  ЯМР целевых производных аммониевого типа представлены в виде двух сигналов в области  $-7.2\dots-7.7$  м.д. (с, 1B, B–N) и  $-16.5\dots-16.8$  м.д. (м, 11B, B–H). Введение более

электроотрицательной аммониевой группы приводит к смещению сигнала от замещенного атома бора в более слабое поле по сравнению со спектром исходного иодониевого производного.

Строение функциональных групп в полученных продуктах определяли с помощью  $^1\text{H}$  и  $^{13}\text{C}$  ЯМР-спектроскопии. Так, в спектре  $^1\text{H}$  ЯМР соединения  $(\text{Ph}_4\text{P})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOEt}]$  наряду с сигналами протонов катиона наблюдаются сигналы протонов аминокислотного остатка. Аммониевая группа представлена уширенным синглетом при 6.86 м.д. (2H,  $\text{NH}_2$ ), протоны метиленовой группы проявляются в виде дублета при 3.99 м.д. (2H,  $\text{CH}_2\text{COO}$ ,  $J = 6$  Гц). Такое расщепление сигнала характерно для производных аминокислот с жесткой пространственной структурой [38]. В спектре  $^{13}\text{C}$  ЯМР соединения  $(\text{Ph}_4\text{P})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{CH}_2\text{COOEt}]$  наблюдаются сигналы атомов углерода карбонильной группы при 171.0 м.д. и метиленовой группы при 45.4 м.д. В ИК-спектре данного соединения появляются полосы поглощения валентных колебаний связи N—H при 3320 и 3258  $\text{cm}^{-1}$ , полосы поглощения валентных колебаний связи C=O при 1745  $\text{cm}^{-1}$ , полосы поглощения фенилиодониевого фрагмента исчезают. Замена экзополедирического заместителя слабо сказывается на положении и форме полосы валентных колебаний связи бор—водород.

Кроме того, образование целевых соединений подтверждено методом ESI-масс-спектрометрии. Так, в анионной части масс-спектров продуктов присутствуют интенсивные пики ионов  $\{[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOEt}] \cdot \text{CH}_3\text{CN}\}^-$  при 285.2 а. е. м. для соединения  $(\text{Ph}_4\text{P})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CH}(\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5)\text{COOEt}]$  и ионов  $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CHCH}_2\text{C}_6\text{H}_5\text{COOEt}]^-$  при 334.1 а. е. м. для соединения  $(\text{Ph}_4\text{P})[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COO}^i\text{Bu}]$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод синтеза аниона  $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{Ph}]^-$  в безводной среде. На основе процессов нуклеофильного замещения фенилиодониевого заместителя под действием этиловых эфиров аминокислот получены новые замещенные клозо-додекабораты аммониевого типа  $[\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{NH}_2\text{CHRCOOEt}]^-$  ( $\text{R} = \text{H}, \text{CH}_2\text{Ph}$ ).

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Запись спектров ЯМР полученных образцов осуществляли 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 (№ 18-73-10092).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duchêne L., Kühnel R.-S., Rentsch D. et al. // Chem. Commun. 2017. V. 53. № 30. P. 4195. <https://doi.org/10.1039/C7CC00794A>
2. Fisher S.P., Tomich A.W., Lovera S.O. et al. // Chem. Rev. 2019. V. 119. № 14. P. 8262. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00551>
3. Zhdanova K.A., Zhdanov A.P., Ezhov A.V. et al. // Macromolecules. 2014. V. 7. № 4. P. 394. <https://doi.org/10.6060/mhc140494z>
4. Ezhov A.V., Vyal'ba F.Y., Kluykin I.N. et al. // Macromolecules. 2017. V. 10. № 4–5. P. 505. <https://doi.org/10.6060/mhc171254z>
5. Mukherjee S., Thilagar P. // Chem. Commun. 2016. V. 52. № 6. P. 1070. <https://doi.org/10.1039/C5CC08213G>
6. Duchêne L., Kim D.H., Song Y.B. et al. // Energy Storage Mater. 2020. V. 26. № July 2019. P. 543. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.11.027>
7. Wang Z., Liu Y., Zhang H. et al. // J. Colloid Interface Sci. 2020. V. 566. P. 135. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.01.047>
8. Wang L., Sun W., Duttwyler S. et al. // J. Solid State Chem. 2021. V. 299. № March. P. 122167. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122167>
9. Qi B., Wu C., Li X. et al. // ChemCatChem. 2018. V. 10. № 10. P. 2285. <https://doi.org/10.1002/cctc.201702011>
10. Qi B., Wu C., Xu L. et al. // Chem. Commun. 2017. V. 53. № 86. P. 11790. <https://doi.org/10.1039/C7CC06607D>
11. Shakirova O.G., Lavrenova L.G., Bogomyakov A.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2015. V. 60. № 7. P. 786. <https://doi.org/10.1134/S003602361507013X>
12. Malinina E.A., Kochneva I.K., Polyakova I.N. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2018. V. 479. P. 249. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2018.04.059>
13. Feakes D.A., Shelly K., Knobler C.B. et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. 2006. V. 91. № 8. P. 3029. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.8.3029>
14. Abi-Ghaida F., Clément S., Safa A. et al. // J. Nanomater. 2015. V. 2015. № 9. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2015/608432>
15. Satapathy R., Dash B.P., Mahanta C.S. et al. // J. Organomet. Chem. 2015. V. 798. P. 13. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2015.06.027>
16. Bogdanova E.V., Stogniy M.Y., Chekulaeva L.A. et al. // New J. Chem. 2020. V. 44. № 37. P. 15836. <https://doi.org/10.1039/d0nj03017a>

17. *Ali F., Hosmane N., Zhu Y.* // *Molecules*. 2020. V. 25. № 4. P. 1.  
<https://doi.org/10.3390/molecules25040828>
18. *Evamarie Hey-Hawkins C.V.T.* // *Boron-Based Compounds: Potential and Emerging Applications in Medicine*, John Wiley & Sons Ltd, 2018.
19. *Srebny H.-G., Preetz W., Marsmann H.C.* // *Z. Naturforsch., B: Chem. Sci.* 1984. P. 189.
20. *Knoth W.H., Miller H.C., Sauer J.C. et al.* // *Inorg. Chem.* 1964. V. 3. № 2. P. 159.  
<https://doi.org/10.1021/ic50012a002>
21. *Alam F., Soloway A.H., Barth R.F. et al.* // *J. Med. Chem.* 1989. V. 32. № 10. P. 2326.  
<https://doi.org/10.1021/jm00130a017>
22. *Bregadze V.I., Sivaev I.B., Dubey R.D. et al.* // *Chem. Eur. J.* 2020. V. 26. № 61. P. 13832.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201905083>
23. *Peymann T., Knobler C.B., Hawthorne F.M.* // *Inorg. Chem.* 2000. V. 39. № 6. P. 1163.  
<https://doi.org/10.1021/ic991105+>
24. *Peymann T., Knobler C.B., Hawthorne M.F.* // *Inorg. Chem.* 1998. V. 37. № 7. P. 1544.  
<https://doi.org/10.1021/ic9712075>
25. *Himmelspach A., Finze M., Vöge A. et al.* // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2012. V. 638. № 3–4. P. 512.  
<https://doi.org/10.1002/zaac.201100458>
26. *Naoufal D., Assi Z., Abdelhai E. et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2012. V. 383. P. 33.  
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2011.10.033>
27. *Gona K.B., Gómez-Vallejo V., Padro D. et al.* // *Chem. Commun.* 2013. V. 49. № 98. P. 11491.  
<https://doi.org/10.1039/c3cc46695g>
28. *Marshall W.J., Jr R.J.Y., Grushin V.V.* // *Organometallics*. 2001. V. 20. P. 523.  
<https://doi.org/10.1021/om0008575>
29. *Miller H.C., Hertler W.R., Muetterties E.L. et al.* // *Inorg. Chem.* 1965. V. 4. № 8. P. 1216.  
<https://doi.org/10.1021/ic50030a028>
30. *Kaszyński P., Ringstrand B.* // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54. № 22. P. 6576.  
<https://doi.org/10.1002/anie.201411858>
31. *Ringstrand B., Kaszynski P., Franken A.* // *Inorg. Chem.* 2009. V. 48. № 15. P. 7313.  
<https://doi.org/10.1021/ic9007476>
32. *Zurawiński R., Jakubowski R., Domagała S. et al.* // *Inorg. Chem.* 2018. V. 57. № 16. P. 10442.  
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01701>
33. *Ali M.O., Lasseter J.C., Żurawiński R. et al.* // *Chem. Eur. J.* 2019. V. 25. № 10. P. 2616.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201805392>
34. *Rzeszotarska E., Novozhilova I., Kaszyński P.* // *Inorg. Chem.* 2017. V. 56. № 22. P. 14351.  
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02477>
35. *Sun Y., Zhang J., Zhang Y. et al.* // *Chem. Eur. J.* 2018. V. 24. № 41. P. 10364.  
<https://doi.org/10.1002/chem.201801602>
36. *Tokarz P., Kaszyński P., Domagała S. et al.* // *J. Organomet. Chem.* 2015. V. 798. P. 70.  
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2015.07.035>
37. *Nelyubin A.V., Selivanov N.A., Bykov A.Y. et al.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. V. 65. № 6. P. 795.  
<https://doi.org/10.1134/S0036023620060133>
38. *Rattle H.W.E.* // *Annu. Rep. NMR Spectrosc.* 1981. P. 1.  
[https://doi.org/10.1016/S0066-4103\(08\)60408-1](https://doi.org/10.1016/S0066-4103(08)60408-1)