

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.271

НОВЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА ЗАМЕЩЕННЫХ 1-АМИДИН-КЛОЗО-ДЕКАБОРАТОВ $[1-B_{10}H_9NH=C(R^1)NHR^2]$ ($R^1 = Me, ^iPr, Ph$; $R^2 = ^nBu, Bn$)

© 2023 г. А. А. Бильбуляна^а, А. В. Нелюбин^б, Н. А. Селиванов^б, А. Ю. Быков^б,
И. Н. Клюкин^б, А. П. Жданов^{б, *}, К. Ю. Жижин^б, Н. Т. Кузнецов^б

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, 125047 Россия

^бИнститут 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 21.04.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

Изучен процесс нуклеофильного замещения фенилиодониевого заместителя в анионе $[1-B_{10}H_9IPh]^-$ первичными аминами в среде органических нитрилов. Показано, что реакция протекает с образованием смеси продуктов — 1-моноалкиламмоний-клозо-декабората и соответствующего амидина, который образуется при присоединении молекулы амина к нитрилу. Полученные продукты охарактеризованы методами 1H , ^{11}B , ^{13}C ЯМР-спектроскопии, ИК-спектроскопии поглощения и ESI-масс-спектроскопии высокого разрешения.

Ключевые слова: арилиодониевые производные, клозо-декаборатный анион, амидины, алкиламмоний-клозо-декабораты

DOI: 10.31857/S0044457X23600913, EDN: DKVBXTQ

ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших мест в химии соединений бора занимают кластерные анионы бора. В отличие от органических ароматических соединений, кластерные анионы бора проявляют пространственную ароматичность [1], которая обуславливает ряд их практически важных свойств. Кластерные анионы бора обладают низкой токсичностью [2, 3] и значительной реакционной активностью в реакциях экзополлиэдрического замещения [4], необходимой для получения на их основе производных с заданными свойствами. В то же время высокая химическая стабильность кластерного остова обеспечивает широкое применение этих соединений [5]. Производные кластерных анионов используют в создании каталитических систем, новых лигандов для синтеза координационных соединений [6–8], высокоэнергетических соединений [9, 10], соединений с люминесцентными свойствами и в биомедицине [11–13].

Основной подход к получению производных кластерных анионов бора заключается в модификации предварительно введенного экзополлиэдрического заместителя, которая включает различные методы классической органической, пептидной [14] и клик-химии [15]. Одним из важнейших классов соединений для дальнейшей модификации являются производные со связями бор–азот, в частности их аммониевые производные [16]. В

случае клозо-декаборатного аниона аммоний-клозо-декаборат существует в виде двух изомеров: $[1-B_{10}H_9NH_3]^-$ и $[2-B_{10}H_9NH_3]^-$ [17]. Наиболее изученным производным на сегодняшний день остается $[2-B_{10}H_9NH_3]^-$, содержащий аммониевый заместитель у одного из экваториальных атомов бора. Этот факт обусловлен простотой получения указанного производного с использованием в качестве стартового соединения нитрильных производных клозо-декаборатного аниона [18–20].

Недавно разработанные методы получения производных кластерных анионов бора по реакции *in situ*-замещения фенилиодониевого заместителя позволяют синтезировать широкий ряд замещенных клозо-декаборатов с апикальными заместителями [21–27].

Настоящая работа посвящена исследованию процесса нуклеофильного замещения фенилиодониевого заместителя в анионе $[1-B_{10}H_9IPh]^-$ аминами в среде органических нитрилов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК-спектры соединений записывали на ИК-Фурье-спектрофотометре Инфралюм ФТ-08 (НПФ АП “Люмекс”) в области $4000–600\text{ см}^{-1}$ с разрешением 1 см^{-1} . Образцы готовили в виде тонких пленок в CH_2Cl_2 .

Спектры ЯМР ^1H , ^{11}B , ^{13}C растворов исследуемых веществ в CD_3CN или CD_2Cl_2 регистрировали на импульсном Фурье-спектрометре Bruker MSL-300 (Германия) 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 ацетонитриле или метаноле снимали на спектрометре LCMS-IT-TOF (Shimadzu, Япония) в режиме прямого введения в диапазоне m/z 120–700 Да. Напряжение детектора составляло 1.55 кВ, напряжение ЭСИ – 4.50 кВ.

Органические нитрилы (ацетонитрил, изобутиронитрил, бензонитрил) и амины (*n*-бутиламин, бензиламин), $\text{PhI}(\text{OAc})_2$ марок “х. ч.” и “о. с. ч.” приобретали в коммерческих источниках (“Химмед”, Sigma-Aldrich) и использовали без дополнительной очистки.

Производное $(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{IPh}]$ (**1**) получали по методике [21].

Общая методика синтеза 1-аммонио- и 1-амидин-клозо-декаборатов. Готовили раствор $(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{IPh}]$ (0.33 ммоль) в 5 мл органического нитрила (MeCN , $^i\text{PrCN}$, PhCN), затем добавляли *n*-бутиламин или бензиламин (1.0 ммоль). Полученный раствор помещали в толстостенную пробирку для синтеза под давлением и барботировали сухим аргоном. Затем реакционную смесь нагревали до 90°C и перемешивали в течение 2 ч. После завершения реакции раствор концентрировали на ротаторном испарителе, остаток растворяли в дихлорметане и промывали последовательно водным 0.05 М раствором лимонной кислоты (2×5 мл) и дистиллированной водой (2×5 мл). Органическую фазу отделяли, сушили над безводным сульфатом натрия и упаривали на ротаторном испарителе. Образующиеся продукты разделяли колоночной хроматографией на силикагеле, в качестве элюента использовали смесь ацетонитрила и дихлорметана (1 : 5) с постепенным повышением полярности до чистого ацетонитрила.

$(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{NH}^n\text{Bu}]$ (2**).** Из 0.099 мл *n*- BuNH_2 получено 0.061 г соединения **2** (42.0%). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3273, 3216 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2499 $\nu(\text{B}-\text{H})$. $^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 8.5 (с, 1В, В–N), –1.0 (с, 1В, В(10)), –27.0 (с, 4В, В(2–5)), –28.5 (с, 4В, В(6–9)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, B_{10}H_9), 3.03 (10H, Bu_4N), 2.87 (т, 3H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 1.55 (8H, Bu_4N), 1.32 (12H, Bu_4N , $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 0.93 (12H, Bu_4N), 0.87 (т, 3H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$). ^{13}C ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 58.3 (Bu_4N), 23.3 (Bu_4N), 19.4 (Bu_4N), 12.9 (Bu_4N), 48.7 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 31.0 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 19.5 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 13.9

($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$). HRMS(ESI) m/z 190.2601 (найденно для $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{NH}_2\text{Bu}]^-$, вычислено для $\{[\text{A}]^-\}$ 190.2599).

$(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{NHBn}]$ (3**).** Из 0.109 мл BnNH_2 получено 0.065 г соединения **3** (41.7%). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3270, 3219 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2494 $\nu(\text{B}-\text{H})$, 1592 $\nu(\text{аром. C}-\text{C})$. $^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 9.5 (с, 1В, В–N), –1.5 (с, 1В, В(10)), –28.3 (с, 4В, В(2–5)), –30.3 (с, 4В, В(6–9)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, B_{10}H_9), 3.05 (10H, Bu_4N), 1.58 (8H, Bu_4N), 1.35 (8H, Bu_4N), 0.93 (12H, Bu_4N), 8.0–7.0 (м, 5H, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 5.31 (д, 2H, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$). ^{13}C ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 58.3 (Bu_4N), 23.3 (Bu_4N), 19.6 (Bu_4N), 12.9 (Bu_4N), 131.3 129.4, 128.2 127.1 (C_6H_5), 44.4 ($\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$). HRMS(ESI) m/z 224.2466 (найденно для $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{NHBn}]^-$, вычислено для $\{[\text{A}]^-\}$ 224.2442).

$(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9(\text{NHC}(\text{NH}^n\text{Bu})\text{Ph})]$ (4**).** Из 5 мл PhCN и 0.099 мл *n*- BuNH_2 получено 0.081 г соединения **4** (45.1%). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3414, 3283, 3229, 3211 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2495 $\nu(\text{B}-\text{H})$, 1634 $\nu(\text{C}=\text{N})$, 1595 $\nu(\text{аром. C}-\text{C})$. $^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 5.3 (с, 1В, В–N), 0.7 (с, 1В, В(10)), –28.1 (с, 4В, В(2–5)), –30.2 (с, 4В, В(6–9)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, B_{10}H_9), 8.82 (с, 1H, $\text{NH}=\text{C}-\text{NH}$), 8.0–7.30 (м, 5H, C_6H_5), 6.5 (с, 1H, $\text{NH}=\text{C}-\text{NH}$), 3.03 (10H, Bu_4N , $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 1.55 (8H, Bu_4N), 1.35 (12H, Bu_4N , $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 0.95 (12H, Bu_4N), 0.78 (т, 3H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$). ^{13}C ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 58.3 (Bu_4N), 23.3 (Bu_4N), 19.4 (Bu_4N), 12.9 (Bu_4N), 167.0 ($\text{NH}=\text{C}$), 131.5, 129.0, 128.1, 127.7 (C_6H_5), 44.3 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 32.0 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 19.3 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$), 12.8 ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$). HRMS(ESI) m/z 293.3048 (найденно для $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9(\text{NHC}(\text{NHBu})\text{Ph})]^-$, вычислено для $\{[\text{A}]^-\}$ 293.3021).

$(\text{Bu}_4\text{N})[1-\text{B}_{10}\text{H}_9(\text{NHC}(\text{NHBn})\text{Me})]$ (5**).** Из 5 мл MeCN и 0.109 мл BnNH_2 получено 0.073 г соединения **5** (43.1%). ИК-спектр (CH_2Cl_2 , cm^{-1}): 3452, 3271 $\nu(\text{N}-\text{H})$, 2499 $\nu(\text{B}-\text{H})$, 1637 $\nu(\text{C}=\text{N})$, 1601 $\nu(\text{аром. C}-\text{C})$. $^{11}\text{B}\{\text{H}\}$ ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 5.8 (с, 1В, В–N), 0.6 (с, 1В, В(10)), –28.3 (с, 4В, В(2–5)), –30.1 (с, 4В, В(6–9)). ^1H ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, B_{10}H_9), 8.34 (с, 1H, $\text{NH}=\text{C}-\text{NH}$), 8.0–7.0 (м, 5H, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 6.43 (с, 1H, $\text{NH}=\text{C}-\text{NH}$), 5.31 (д, 2H, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 3.05 (8H, Bu_4N), 2.57 (с, 3H, CH_3), 1.57 (8H, Bu_4N), 1.37 (Bu_4N), 0.95 (12H, Bu_4N). ^{13}C ЯМР-спектр (CD_3CN , δ , м.д.): 58.5 (Bu_4N), 23.3 (Bu_4N), 19.4 (Bu_4N), 13.0 (Bu_4N), 163.1 ($\text{NH}=\text{C}$), 131.4, 129.1, 128.5, 127.5 (C_6H_5), 42.4 ($\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$), 19.3 (CH_3). HRMS(ESI) m/z 265.2728 (найденно для

$[1-B_{10}H_9(NHC(NHBn)CH_3)]^-$, вычислено для $\{[A]^- \}$ 265.2708).

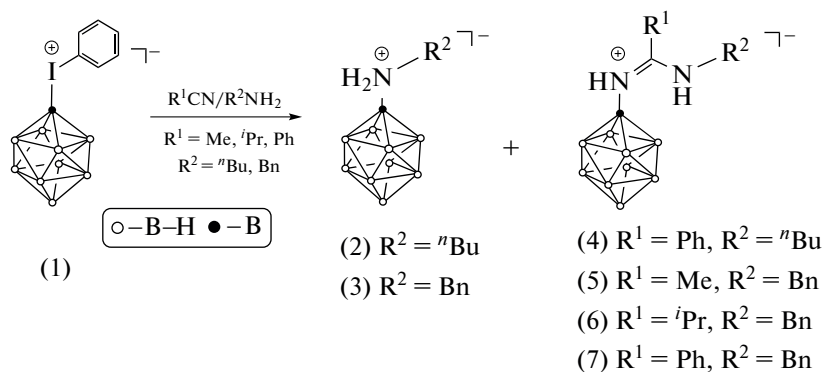
(Bu₄N)[1-B₁₀H₉(NHC(NHBn)C₃H₉)] (6). Из 5 мл *i*PrCN и 0.109 мл BnNH₂ получено 0.068 г соединения **6** (36.8%). ИК-спектр (CH₂Cl₂, см⁻¹): 3411, 3274, 3211 ν(N–H), 2495 ν(B–H), 1636 ν(C=N), 1593 ν(аром. C–C). ¹¹B{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 5.3 (с, 1В, В–N), 0.8 (с, 1В, В(10)), –28.0 (с, 4В, В(2–5)), –30.1 (с, 4В, В(6–9)). ¹H ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, В₁₀H₉), 8.42 (с, 1H, NH=C–NH), 8.0–7.0 (м, 5H, CH₂C₆H₅), 6.47 (с, 1H, NH=C–NH), 5.37 (д, 2H, CH₂C₆H₅), 3.71 (м, 1H, CH) 3.05 (8H, Bu₄N), 1.54 (8H, Bu₄N), 1.34 (Bu₄N), 1.23 (д, 6H, CH(CH₃)₂) 0.95 (12H, Bu₄N). ¹³C ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 58.4 (Bu₄N), 23.3 (Bu₄N), 19.4 (Bu₄N), 13.0 (Bu₄N), 164.2 (NH=C), 131.6, 129.1, 128.3 127.5 (C₆H₅), 42.3 (CH₂C₆H₅), 28.2 (CH(CH₃)₂), 19.2 (CH(CH₃)₂). HRMS(ESI) *m/z* 307.3156 (найдено для $[1-B_{10}H_9(NHC(NHBn)C_3H_9)]^-$, вычислено для $\{[A]^- \}$ 307.3177).

(Bu₄N)[1-B₁₀H₉(NHC(NHBn)Ph)] (7). Из 5 мл PhCN и 0.109 мл BnNH₂ получено 0.086 г соединения **7** (45.3%). ИК-спектр (CH₂Cl₂, см⁻¹): 3414, 3277, 3235, 3201 ν(N–H), 2499 ν(B–H), 1637 ν(C=N), 1598 ν(аром. C–C). ¹¹B{H} ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 5.2 (с, 1В, В–N), 0.7 (с, 1В, В(10)), –28.1 (с, 4В, В(2–5)), –30.2 (с, 4В, В(6–9)). ¹H ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 3.5–0.0 (м, 9H, В₁₀H₉), 9.08 (с, 1H, NH=C–NH), 8.0–7.0 (м, 10H, CH₂C₆H₅, C₆H₅), 6.99 (с, 1H, NH=C–NH), 5.35 (д, 2H, CH₂C₆H₅), 3.03 (8H, Bu₄N), 1.55 (8H, Bu₄N), 1.35 (Bu₄N), 0.95 (12H, Bu₄N). ¹³C ЯМР-спектр (CD₃CN, δ, м.д.): 58.4 (Bu₄N), 23.3 (Bu₄N), 19.4

(Bu₄N), 13.0 (Bu₄N), 162.9 (NH=C), 131.7 131.6, 129.1, 128.5, 128.3 127.5 (C₆H₅), 42.4 (CH₂C₆H₅). HRMS(ESI) *m/z* 327.2831 (найдено для $[1-B_{10}H_9(NHC(NHBn)Ph)]^-$, вычислено для $\{[A]^- \}$ 327.2864).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На данный момент известно несколько реакций замещения арилиодониевых заместителей в производных кластерных анионов бора на амидиновые функциональные группы [28, 29]. Однако они требуют использования дорогостоящих и гидролитически неустойчивых свободных амидинов. Реакции *unco*-замещения PhI-группы на первичные амины для производных *клозо*-декаборатного аниона неизвестны, в отличие от существенно более реакционноспособного аниона $[B_{12}H_{11}Ph]^-$ [30]. Эта работа была направлена на исследование реакции аниона $[1-B_{10}H_9Ph]^-$ с первичными алифатическими аминами и предполагала получение 1-моноалкиламмоний-*клозо*-декаборатов. Обнаружено, что данный процесс сильно зависит от растворителя, в котором проводится процесс. Так, использование простых циклических эфиров (ТГФ, 2-Ме-ТГФ, 1,4-диоксан) осложняется плохой растворимостью компонентов и продуктов реакции, а в случае дихлорметана степень конверсии исходного фенилиодониевого производного не превышает 20%. Использование в качестве растворителя органических нитрилов позволяет достичь полной конверсии исходного *клозо*-декабората, при этом образуется смесь продуктов. В соотношении, близком к 1 : 1, образуются 1-алкиламмоний-*клозо*-декаборат и 1-амидин-*клозо*-декаборат.



Амидин образуется непосредственно в реакционной смеси при взаимодействии первичного амина и соответствующего нитрила, выступающего в роли растворителя. Продукты разделяются колоночной хроматографией на силикагеле.

Образующиеся в ходе реакции продукты были исследованы методом мультитядерной ЯМР-спектроскопии. Вид ¹¹B ЯМР-спектров полученных алкиламмониевых и амидиновых продуктов указывает на апикальное расположение заместителя.

В ^{11}B ЯМР-спектре соединения **2** наблюдаются четыре сигнала: сигнал от атома бора, связанного с заместителем, при 8.5 м.д. (1В, В–N), сигнал от незамещенного апикального атома бора при –1.0 м.д. (с, 1В, В(10)) и сигналы от атомов бора двух экваториальных поясов при –27.0 м.д. (4В, В(2–5)) и –28.5 м.д. (4В, В(6–9)). Аналогичная картина наблюдается в случае соединения **4**. Сигнал от атома бора при амидиновом заместителе фиксируется при 5.3 м.д. (1В, В–N), сигнал от незамещенного апикального борного атома – при 0.7 м.д. (1В, В(10)), а сигналы от атомов бора экваториальных поясов – при –28.1 м.д. (4В, В(2–5)) и –30.2 м.д. (4В, В(6–9)).

Строение экзополлиэдрических заместителей устанавливали с помощью ^1H и ^{13}C ЯМР-спектроскопии. При этом амидиновая группа дополнительно может быть идентифицирована по данным ИК-спектроскопии поглощения. Так, в ИК-спектрах соединений **3–7** наблюдается расщепление полосы валентных колебаний связи N–H, характерное для продуктов амидинового типа [31, 32]. Кроме того, присутствует полоса поглощения валентных колебаний $\nu(\text{C}=\text{N})$ иминного фрагмента в области 1630–1640 cm^{-1} .

Образование продуктов алкиламмониевого и амидинового типа подтверждено масс-спектрометрией высокого разрешения с ионизацией элетро-распылением. Так, отрицательная часть масс-спектра соединения **3** содержит интенсивный пик при 224.2466 а.е.м. (рассчитано для $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{NH}_2\text{Bn}]^-$ 224.2442 а.е.м.), а в случае соединения **5** наблюдается пик при 265.2728 а.е.м. (найденно для $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9(\text{NHC}(\text{NHBn})\text{CH}_3)]^-$ 265.2708 а.е.м.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый способ получения замещенных производных *клозо*-декаборатного аниона амидинового и моноалкиламмониевого типа с апикальным расположением заместителя. В его основе лежит процесс нуклеофильного замещения фенилиодониевой группы аниона $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9\text{IPh}]^-$ первичными аминами (на примере *n*-бутиламина и бензиламина) в среде органических нитрилов (MeCN , $^i\text{PrCN}$, PhCN). Разработанный подход позволяет широко варьировать тип и природу заместителя и в дальнейшем может быть использован для конструирования бионеорганических систем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-73-10292).

БЛАГОДАРНОСТЬ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spokoyny A.M.* // Pure Appl. Chem. 2013. V. 85. № 5. P. 903.
<https://doi.org/10.1351/PAC-CON-13-01-13>
2. *Barth R.F., Coderre J.A., Vicente M.G.H. et al.* // Clinical Cancer Research. 2005. V. 11. № 11. P. 3987.
<https://doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-05-0035>
3. *Olid D., Núñez R., Viñas C. et al.* // Chem. Soc. Rev. 2013. V. 42. № 8. P. 3318.
<https://doi.org/10.1039/C2CS35441A>
4. *Stogniy M.Y., Erokhina S.A., Sivaev I.B. et al.* // Phosphorus Sulfur Silicon Relat Elem. 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1080/10426507.2019.1631312>
5. *Evamarie Hey-Hawkins C.V.T.* // Boron-Based Compounds: Potential and Emerging Applications in Medicine, John Wiley & Sons Ltd, 2018.
6. *Geis V., Gutsche K., Knapp C. et al.* // Dalton Trans. 2009. № 15. P. 2687.
<https://doi.org/10.1039/b821030f>
7. *Matveev E.Yu., Avdeeva V.V., Zhizhin K.Yu. et al.* // Inorganics (Basel). 2022. V. 10. № 12. P. 238.
<https://doi.org/10.3390/inorganics10120238>
8. *Avdeeva V.V., Malinina E.A., Kuznetsov N.T.* // Coord. Chem. Rev. 2022. V. 469. P. 214636.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214636>
9. *Rao M.H., Muralidharan K.* // Polyhedron. 2016. V. 115. P. 105.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2016.03.062>
10. *Derdziuk J., Malinowski P.J., Jaroń T.* // Int. J. Hydrogen. Energy. 2019. V. 44. № 49. P. 27030.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.158>
11. *Novopashina D.S., Vorobyeva M.A., Venyaminova A.* // Front. Chem. 2021. V. 9. № March. P. 1.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2021.619052>
12. *Varkhedkar R., Yang F., Dontha R. et al.* // ACS Cent. Sci. 2022. V. 8. № 3. P. 322.
<https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c01132>
13. *Michiue H., Sakurai Y., Kondo N. et al.* // Biomaterials. 2014. V. 35. № 10. P. 3396.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2013.12.055>
14. *Nelyubin A.V., Selivanov N.A., Klyukin I.N. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 9. P. 1390.
<https://doi.org/10.1134/S0036023621090096>
15. *Koganei H., Tachikawa S., El-Zaria M.E. et al.* // New J. Chem. 2015. V. 39. № 8. P. 6388.
<https://doi.org/10.1039/C5NJ00856E>
16. *Zhang Y., Sun Y., Wang T. et al.* // Molecules. 2018. V. 23. № 12. P. 3137.
<https://doi.org/10.3390/molecules23123137>

17. Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Naoufal D. // Collect. Czech. Chem. Commun. 2010. V. 75. № 11. P. 1149. <https://doi.org/10.1135/cccc2010054>
18. Sivaev I.B., Votinova N.A., Bragin V.I. et al. // J. Organomet. Chem. 2002. V. 657. № 1–2. P. 163. [https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(02\)01419-5](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(02)01419-5)
19. Zhdanov A.P., Voinova V.V., Klyukin I.N. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2019. V. 45. № 8. P. 563. <https://doi.org/10.1134/S1070328419080098>
20. Holub J., El Anwar S., Jelínek T. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2017. V. 2017. № 38. P. 4499. <https://doi.org/10.1002/ejic.201700651>
21. Kaszyński P., Ringstrand B. // Angew. Chem. Int. Ed. 2015. V. 54. № 22. P. 6576. <https://doi.org/10.1002/anie.201411858>
22. Rzeszotarska E., Novozhilova I., Kaszyński P. // Inorg. Chem. 2017. V. 56. № 22. P. 14351. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b02477>
23. Kaszynski P., Huang J., Jenkins G.S. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol., Sect. A: Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1995. V. 260. № 1. P. 315. <https://doi.org/10.1080/10587259508038705>
24. Kapuściński S., Hietsoi O., Pietrzak A. et al. // Chem. Commun. 2022. V. 58. № 6. P. 851. <https://doi.org/10.1039/D1CC06485A>
25. Jacob L., Rzeszotarska E., Koyioni M. et al. // Chem. Mater. 2022. V. 34. № 14. P. 6476. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c01165>
26. Kapuscinski S., Abdulmojeed M.B., Schafer T.E. et al. // Inorg. Chem. Front. 2021. V. 8. № 4. P. 1066. <https://doi.org/10.1039/d0qi01353f>
27. Jankowiak A., Baliński A., Harvey J.E. et al. // J. Mater. Chem. C: Mater. 2013. V. 1. № 6. P. 1144. <https://doi.org/10.1039/c2tc00547f>
28. Zurawiński R., Jakubowski R., Domagała S. et al. // Inorg. Chem. 2018. V. 57. № 16. P. 10442. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.8b01701>
29. Hietsoi O., Kapuściński S.P., Friedli A.C. et al. // J. Mol. Struct. 2023. V. 1284. P. 135324. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135324>
30. Burdenkova A.V., Zhdanov A.P., Klyukin I.N. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 11. P. 1616. <https://doi.org/10.1134/S0036023621110036>
31. Zhdanov A.P., Polyakova I.N., Razgonyaeva G.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. № 6. P. 1. <https://doi.org/10.1134/S003602361106026X>
32. Nelyubin A.V., Klyukin I.N., Novikov A.S. et al. // Mendeleev Commun. 2021. V. 31. № 2. P. 201. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2021.03.018>