

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ
НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 546.271:546.88

*Сей факт с сияющим лицом
Вношу как ценный вклад в науку.
Саша Черный, “Кумысные вирши” (1909)*

О НЕКОТОРЫХ АНАЛОГИЯХ В НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ
(ПАМЯТИ А.А. ПАСЫНСКОГО)

© 2020 г. И. Б. Сиваев*

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, ул. Вавилова, 28, Москва, 119991 Россия

*e-mail: sivaev@ineos.ac.ru

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.

После доработки 30.07.2020 г.

Принята к публикации 31.07.2020 г.

На основании сравнения спектральных данных диметилсульфониевых производных полиэдрических гидридов бора и диметилсульфидных комплексов пентагалогенидов тантала и ниобия выявлена аналогия между льюисовской кислотностью квазибориниевых катионов, образующихся при отрыве гидрид-иона от полиэдрических гидридов бора, и пентагалогенидов ниобия и тантала.

Ключевые слова: полиэдрические гидриды бора, пентагалогенидные комплексы ниобия и тантала, льюисовская кислотность

DOI: 10.31857/S0044457X20120168

Одной из отличительных черт Александра Анатольевича Пасынского было его научное любопытство и желание докопаться до сути проблемы. Студенты младших курсов, как правило, боялись его вопросов при защите курсовых, а вот заполучить его в качестве оппонента хорошо сделанной диссертационной работы было большой удачей — всегда были гарантированы нестандартный взгляд на проблему и интересные вопросы, часто дающие толчок новым исследованиям. Один из вопросов, который обычно возникал при защите диссертаций, посвященных химии производных полиэдрических гидридов бора, был следующий: “Поскольку полиэдрические гидриды бора способны образовывать “комплексы” с различными донорными молекулами (аминами, сульфидами, эфирами, нитрилами), можно ли их рассматривать в качестве своеобразных аналогов переходных металлов?” И действительно, такие производные хорошо известны практически для всех типов анионных полиэдрических гидридов бора [1–11]. Более того, эти производные обычно вступают в реакции, характерные для комплексов переходных металлов с аналогичными лигандами, такие как нуклеофильное раскрытие тетрагидрофуранового цикла [12–15] или присоединение к тройной связи нитрилов [16–18]. Действительно, реакции нуклеофильного раскрытия циклических оксониевых производных [19–24] и присоеди-

нения к нитрилевым производным [25–29] полиэдрических гидридов бора хорошо известны. Как правило, ответ в таких случаях сводился к тому, что полиэдрические гидриды бора представляют собой трехмерные ароматические системы [30, 31], и поэтому их производные должны рассматриваться как аналоги известных высокорекреационных органических соединений, таких как оксониевые [32] или нитрилевые [33] соли, а их устойчивость объясняется сильным электронодонорным эффектом борного остова [34]. Следует отметить, что с точки зрения органической химии это вполне корректная формулировка, однако она не дает ответа на вопрос, заданный с точки зрения координационной химии, в рамках которой образование комплексов можно рассматривать как взаимодействие переходных металлов (кислот Льюиса) с лигандами (основаниями Льюиса). На самом деле вопрос заключается в следующем: могут ли борные кластеры выступать в качестве кислот Льюиса и какова сила этих кислот по сравнению с известными металлокомплексами? Ответ на первую часть этого вопроса вполне очевиден. После отрыва гидридного атома водородного полиэдрического гидрида бора превращаются в квазибориниевые катионы, в которых атом бора имеет незаселенную *p*-орбиталь, а его формальный положительный заряд, в отличие от классических бориниевых катионов, где он ста-

билизируется через образование таутомерных форм с переносом заряда на соседний атом азота [35, 36], “нейтрализуется” отрицательным зарядом борного кластера. Эти квазиториниевые катионы являются интермедиатами в реакциях электрофильно-индуцируемого нуклеофильного замещения и сильными кислотами Льюиса [37]. Однако на вторую часть вопроса, касающуюся относительной силы этих кислот по сравнению с известными металлокомплексами, получить ответ нет так просто.

Наиболее известным методом сравнительной оценки силы кислот Льюиса, в основе которого лежит использование данных ЯМР-спектроскопии, является метод Гутманна—Бекетта, основанный на изменении химического сдвига ЯМР ^{31}P триэтилфосфиноксида Et_3PO при его комплексообразовании с кислотами Льюиса. Первоначально этот подход был использован Гутманном для количественного описания электрофильного характера растворителей [38], а затем предложен Бекеттом для оценки льюисовской кислотности борных соединений [39]. Позже этот метод был использован для сравнительной оценки силы кислот Льюиса на основе кремния [40], иода [41] и ряда солей металлов [42]. К сожалению, этот подход нельзя использовать для сравнительной оценки льюисовской кислотности квазиториниевых катионов на основе полиэдрических гидридов бора ввиду отсутствия удобных способов получения их соответствующих производных (в настоящее время описано лишь одно такое производное с заместителем Et_3PO [43]). По этой же причине невозможно использование других основанных на данных спектроскопии ЯМР известных методов сравнительной оценки силы кислот Льюиса, таких как изменение химических сдвигов отдельных сигналов в спектрах ЯМР ^1H кротонового альдегида [44] или в спектрах ЯМР ^2H пиридина или хинолизида [45, 46] при их комплексообразовании с кислотами Льюиса. Поэтому возникает потребность в создании шкалы льюисовской кислотности, основанной на использовании легкодоступных производных полиэдрических гидридов бора.

Ранее было показано, что химический сдвиг α -атомов водорода в спектрах ЯМР ^1H “связанных” с борными кластерами оснований Льюиса (SMe_2 , $\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2)_2\text{O}$, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{Ph}$, $\text{NH}=\text{CHPh}$) зависит от электронного эффекта борного фрагмента (рис. 1) и, таким образом, может рассматриваться в качестве индикатора льюисовской кислотности фрагмента (рис. 2) [34].

Построенный на основании спектральных данных ряд льюисовской кислотности квазиториниевых катионов, производных от различных полиэдрических гидридов бора, хорошо согласуется с реакционной способностью их производ-

ных. Например, 1,4-диоксановое производное бис(дикарболлид) кобальта раскрывается под действием трифенилфосфина или диметилсульфида при комнатной температуре, в то время как для раскрытия цикла соответствующего производного *нидо*-карборана требуется кипение в ацетонитриле, а аналогичные производные *клозо*-декаборатного и *клозо*-додекаборатного анионов вообще не реагируют с такими слабыми нуклеофилами [47].

Позже подробный анализ спектров ЯМР ^1H производных 9- и 10-диметилсульфидных производных *нидо*-карборана и металлокарборанов на их основе (табл. 1) показал, что химические сдвиги метильных групп в них чувствительны как к введению экзополэдрических заместителей (рис. 3), так и к внедрению в борный остов атомов переходных металлов (при этом они отражают даже незначительную разницу в льюисовской кислотности Fe^{2+} и Ru^{2+} [61, 62], Rh^{3+} и Ir^{3+} [63]) (рис. 4), замене π -лигандов при атоме металла или модификации циклопентадиенильного лиганда, в то время как аналогичная модификация аренового лиганда практически на них не влияет.

Следует отметить, что данный подход также можно использовать и для оценки льюисовской кислотности других борных соединений, например галогенидов бора [60], где он дает результаты, сравнимые с широко используемым методом Гутманна—Бекетта [37].

Очевидно, что аналогичным образом на основе спектральных данных комплексов с подобными лигандами можно было бы оценить льюисовскую кислотность активных металлокомплексных фрагментов и сравнить ее с льюисовской кислотностью частиц, образующихся при отрыве гидрид-иона от полиэдрических гидридов бора. При кажущейся простоте этой задачи следует иметь в виду, что полиэдрические гидриды бора имеют жесткую структуру, которая сохраняется в ходе реакций замещения, в то время как координационная сфера металла может претерпевать различные изменения, такие как замена лигандов или изменение координационного числа металла. Помимо этого необходимо, чтобы ион металла мог образовывать сравнительно устойчивые комплексы с таким слабо координирующимся лигандом, как диметилсульфид, и являлся диамагнитным, что требуется для ЯМР-спектральных исследований. Поэтому решение этой задачи, достаточно далекой от химии полиэдрических гидридов бора, никогда не являлось одной из первоочередных целей нашей работы, но постоянно находилось в зоне внимания.

Наше внимание привлекли галогенидные комплексы ниобия и тантала $\text{MX}_5(\text{SMe}_2)$ ($\text{M} = \text{Nb}, \text{Ta}$; $\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}$). Оказалось, что химические сдвиги сигналов SMe_2 -группы в спектрах

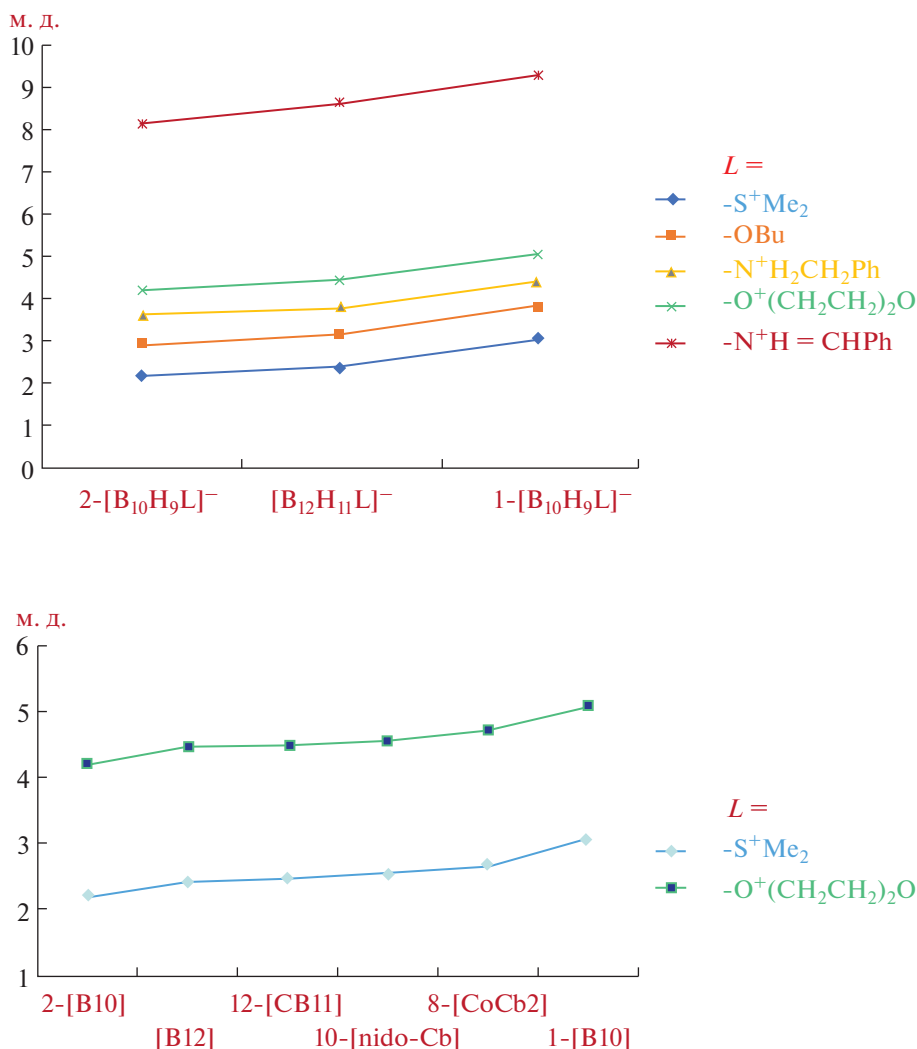


Рис. 1. Химические сдвиги α -атомов водорода в спектрах ЯМР 1H различных производных полиэдрических гидридов бора ($[B_{10}] = [B_{10}H_{10}]^{2-}$, $[B_{12}] = [B_{12}H_{12}]^{2-}$, $[CB_{11}] = [CB_{11}H_{12}]^-$, $[nido-Cb] = [7,8-C_2B_9H_{12}]^-$, $[CoCb_2] = [3,3'-Co(1,2-C_2B_9H_{11})_2]^-$).

ЯМР 1H фторидных комплексов ниобия и тантала близки к химическим сдвигам диметилсульфониновых производных *клозо*-декаборатного и *клозо*-додекаборатного анионов, а химический сдвиг SMe_2 -лиганда в комплексе $NbCl_5(SMe_2)$ — к химическому сдвигу SMe_2 -заместителя в производном *бис*(дикарболлид)кобальта [64–67] (рис. 5). Полученная корреляция также совпадает с имеющимися в литературе спектральными характеристиками комплексов $MCl_5(1,4-dioxane)$ ($M = Nb, Cl$) [68].

Еще одним индикатором подобия льюисовской кислотности квазибориниевых катионов различных полиэдрических гидридов бора и галогенидов ниобия и тантала являются спектры ЯМР ^{31}P комплекса $TaCl_5(O=PPh_3)$ (58.1 м.д.) [69] и соответствующего производного *бис*(дикарболлид)кобаль-

та $[8-Ph_3PO-8'-I-3,3'-Co(1,2-C_2B_9H_{10})_2]$ (53.2 м.д.) [70], свидетельствующие о несколько большей кислотности пентахлоридного комплекса тантала и хорошо согласующиеся с предложенной выше шкалой относительной льюисовской кислотности.

Следует также отметить подобие химического поведения комплексов ниобия и тантала и соответствующих производных полиэдрических гидридов бора. Так, фторидные комплексы $MF_5(THF)$ ($M = Nb, Cl$) представляют собой стабильные соединения [68, 71], в то время как аналогичные хлоридные комплексы неустойчивы и в присутствии избытка тетрагидрофурана реагируют с раскрытием цикла [68]. Сходная картина наблюдается и в случае тетрагидрофурановых производных *клозо*-декаборатного $[2-B_{10}H_9(THF)]^-$ [72] и *клозо*-додекаборатного $[B_{12}H_{11}(THF)]^-$ [73]

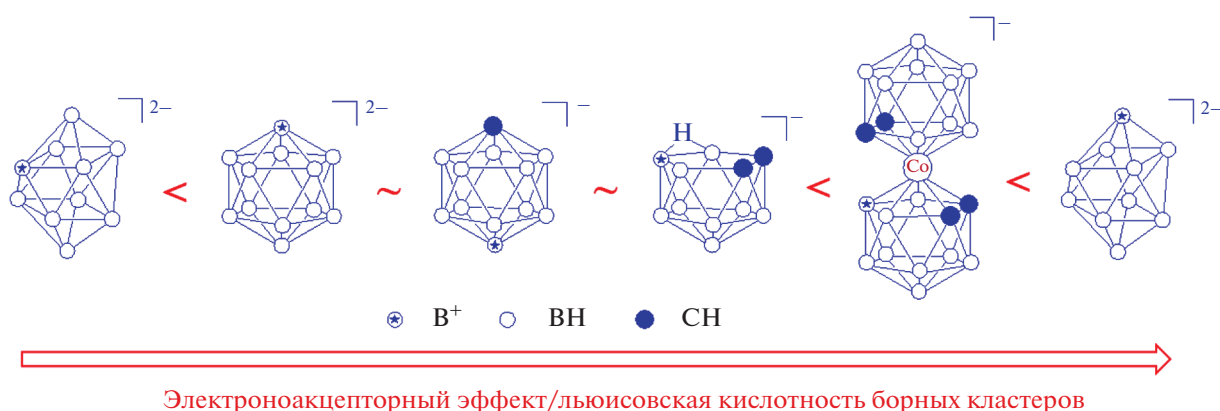


Рис. 2. Относительная кислотность Льюиса квазибориниевых катионов различных полиэдрических гидридов бора.

Таблица 1. Химические сдвиги сигналов SMe_2 -группы в спектрах ЯМР ^1H диметилсульфониевых производных нидо-карборанов и металлокарборанов, а также в некоторых комплексах $\text{X}_3\text{B} \cdot \text{SMe}_2$

Соединение	Химсдвиг SMe_2 -группы, м.д.	Растворитель	Источник
9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₁	2.62, 2.80	CDCl ₃	[48]
	2.61, 2.79	CDCl ₃	[49]
10-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₁	2.55	CDCl ₃	[48]
	2.56	CDCl ₃	[50]
7,8-Ph ₂ -9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₉	2.22, 2.61	CDCl ₃	[51]
7,8-Ph ₂ -10-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₉	2.06	CDCl ₃	[52]
CpRu(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)	2.41, 2.58	CD ₂ Cl ₂	[53]
Cp [*] Ru(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)	2.35, 2.50	CD ₂ Cl ₂	[53]
CpFe(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)	2.46, 2.73	CD ₂ Cl ₂	[54]
Cp [*] Fe(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)	2.39, 2.59	CD ₂ Cl ₂	[54]
[(C ₆ H ₆)Ru(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)]PF ₆	2.70, 2.80	Ацетон- <i>d</i> ₆	[55]
[(1,3,5-C ₆ H ₃ Me ₃)Ru(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)]PF ₆	2.73, 2.80	Ацетон- <i>d</i> ₆	[55]
[(C ₆ H ₆)Ru(10-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)]PF ₆	2.63	Ацетон- <i>d</i> ₆	[56]
[(C ₆ H ₆)Fe(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)]PF ₆	2.78, 2.95	Ацетон- <i>d</i> ₆	[57]
[(1,3,5-C ₆ H ₃ Me ₃)Fe(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)]PF ₆	2.82, 2.96	Ацетон- <i>d</i> ₆	[57]
[(C ₆ H ₆)Rh(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)](BF ₄) ₂	2.91, 2.91	Нитрометан- <i>d</i> ₃	[58]
[(1,3,5-C ₆ H ₃ Me ₃)Rh(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)](BF ₄) ₂	2.92, 2.92	Нитрометан- <i>d</i> ₃	[58]
[(C ₆ H ₆)Ir(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)](BF ₄) ₂	2.86, 2.86	Нитрометан- <i>d</i> ₃	[58]
[(1,3,5-C ₆ H ₃ Me ₃)Ir(9-Me ₂ S-7,8-C ₂ B ₉ H ₁₀)](BF ₄) ₂	2.91, 2.87	Нитрометан- <i>d</i> ₃	[58]
(C ₆ F ₅) ₃ B · SMe ₂	2.17	CDCl ₃	[59]
F ₃ B · SMe ₂	2.25	CDCl ₃	[60]
Cl ₃ B · SMe ₂	2.49	CDCl ₃	[60]
Br ₃ B · SMe ₂	2.57	CDCl ₃	[60]
I ₃ B · SMe ₂	2.56	CDCl ₃	[60]

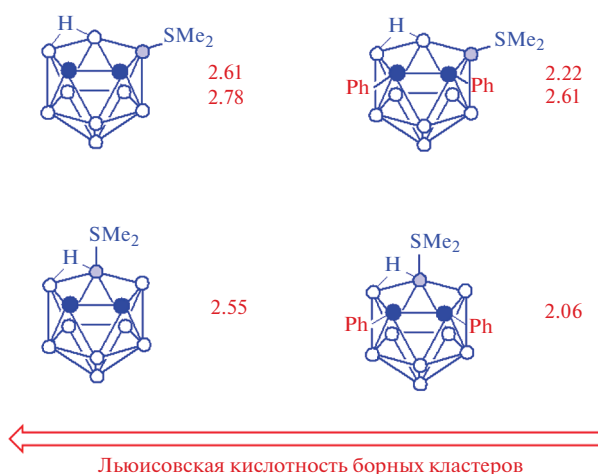


Рис. 3. Химические сдвиги Me_2S -группы в спектрах ЯМР ^1H производных *нидо*-карборана.

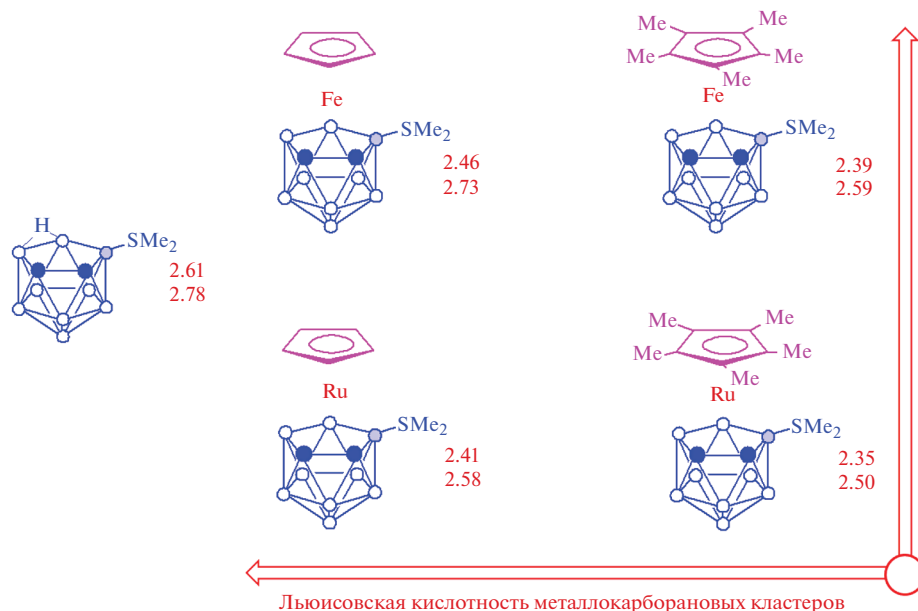


Рис. 4. Химические сдвиги Me_2S -группы в спектрах ЯМР ^1H различных металлокарборанов.

анионов, которые хорошо известны, однако аналогичный аксиально замещенный изомер *клозо*-декаборатного аниона $[1-\text{B}_{10}\text{H}_9(\text{THF})]^-$ и тетрагидрофурановое производное *бис*(дикарболлид)кобальта не могут быть получены из-за полимеризации тетрагидрофурана [74]. Еще одной чертой, свойственной и пентагалогенидам ниобия и тантала, и квазибориниевым катионам, образующимся при отрыве гидрид-иона от полиэдрических гидридов бора, является невозможность существования в силу своей высокой реакционной способности в виде дискретных молекул. Так, в пентагалогенид-

ных комплексах ниобия и тантала атом металла в действительности является гексакоординированным за счет образования галогенидных мостиков, при этом фторидные комплексы представляют собой тетрамеры, а хлоридные и бромидные — димеры [75]. Аналогичным образом при формальном отрыве гидрид-иона от *клозо*-декаборатного и *клозо*-додекаборатного аниона в отсутствие сильных нуклеофилов образуются димеры $[\text{B}_{20}\text{H}_{18}]^{2-}$ [76, 77] и $[\text{B}_{24}\text{H}_{23}]^{3-}$ [78, 79] соответственно.

И, если вернуться к началу, то непосредственным толчком, подтолкнувшим к написанию этой

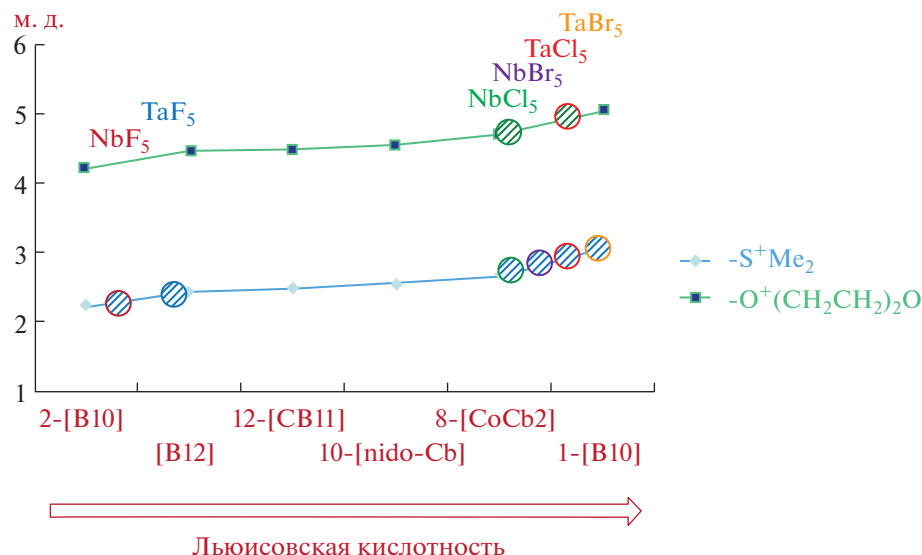


Рис. 5. Химические сдвиги Me_2S -группы в спектрах ЯМР ^1H производных полиэдрических гидридов бора и галогенидов ниобия и тантала ($[\text{B10}] = [\text{B}_{10}\text{H}_{10}]^{2-}$, $[\text{B12}] = [\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$, $[\text{CB11}] = [\text{CB}_{11}\text{H}_{12}]^-$, $[\text{nido-Cb}] = [\text{7,8-C}_2\text{B}_9\text{H}_{12}]^-$, $[\text{CoCb2}] = [\text{3,3'-Co(1,2-C}_2\text{B}_9\text{H}_{11})_2]^-$).



Рис. 6. Элементоорганическая система А.Н. Несмеянова с фотографией А.А. Пасынского (клетка № 41 – Nb).

статьи, послужила фотография на форзаце второго издания воспоминаний Александра Николаевича Несмеянова “На качелях века” [80], где фотография молодого Саши Пасынского — Александра Анатольевича Пасынского, отдавшего немало лет своей научной жизни ИНЭОСу, находится в клетке ниобия элементоорганической системы А.Н. Несмеянова (рис. 6). “Бывают странные сближенья...”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivaev I.B., Bregadze V.I., Sjöberg S. // Collect. Czech. Chem. Commun. 2002. V. 67. № 6. P. 679. <https://doi.org/10.1135/cccc20020679>
2. Sivaev I.B., Kulikova N.Yu., Nizhnik E.A. et al. // J. Organomet. Chem. 2008. V. 693. № 3. P. 519. <https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2007.11.027>
3. Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Naoufal D. // Collect. Czech. Chem. Commun. 2010. V. 75. № 11. P. 1149. <https://doi.org/10.1135/cccc2010054>

4. Zhizhin K.Yu., Zhdanov A.P., Kuznetsov N.T. // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. № 14. P. 2089.
<https://doi.org/10.1134/S0036023610140019>
5. Hamilton E.J.M., Leung H.T., Kultyshev R.G. et al. // Inorg. Chem. 2012. V. 51. № 4. P. 2374.
<https://doi.org/10.1021/ic2023709>
6. Klyukin I.N., Kubasov A.S., Limarev I.P. et al. // Polyhedron. 2015. V. 101. P. 215.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2015.09.025>
7. Kubasov A.S., Turishev E.S., Polyakova I.N. et al. // J. Organomet. Chem. 2017. V. 828. P. 106.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2016.11.035>
8. Sivaev I.B., Bregadze V.I. // Collect. Czech. Chem. Commun. 1999. V. 64. № 5. P. 783.
<https://doi.org/10.1135/cccc19990783>
9. Dash B.P., Satapathy R., Swain B.R. et al. // J. Organomet. Chem. 2017. V. 849–850. P. 170.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.04.006>
10. Bakardjiev M., El Anwar S., Baval D. et al. // Molecules. 2020. V. 25. № 4. P. 814.
<https://doi.org/10.3390/molecules25040814>
11. Брегадзе В.И., Тимофеев С.В., Сиваев И.Б., Лобанова И.А. // Успехи химии. 2004. Т. 73. № 5. С. 470. [Bregadze V.I., Timofeev S.V., Sivaev I.B., Lobanova I.A. // Russ. Chem. Rev. 2004. V. 73. № 5. P. 433.]
<https://doi.org/10.1070/RC2004v073n05ABEH000868>
12. Breen T.L., Stephan D.W. // Inorg. Chem. 1992. V. 31. № 19. P. 4019.
<https://doi.org/10.1021/ic00045a032>
13. Metters O.J., Forrest S.J.K., Sparkes H.A. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2016. V. 138. № 6. P. 1994.
<https://doi.org/10.1021/jacs.5b12536>
14. Avens L.R., Barnhart D.M., Burns C.J., McKee S.D. // Inorg. Chem. 1996. V. 35. № 2. P. 537.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ic9505211>
15. Travia N.E., Monreal M.J., Scott B.L., Kiplinger J.L. // Dalton Trans. 2012. V. 41. № 48. P. 1451.
<https://doi.org/10.1039/C2DT31676E>
16. Kukushkin V.Yu., Pompeiro A.J.L. // Chem. Rev. 2002. V. 102. № 5. P. 1771.
<https://doi.org/10.1021/cr0103266>
17. Kukushkin V.Yu., Pompeiro A.J.L. // Inorg. Chim. Acta. 2005. V. 358. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.ica.2004.04.029>
18. Бокач Н.А., Кукушкин В.Ю. // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 2. С. 164. [Bokach N.A., Kukushkin V.Yu. // Russ. Chem. Rev. 2005. V. 74. № 2. P. 153.]
<https://doi.org/10.1070/RC2005v074n02ABEH000979>
19. Semioshkin A.A., Sivaev I.B., Bregadze V.I. // Dalton Trans. 2008. № 8. P. 977.
<https://doi.org/10.1039/b715363e>
20. Sivaev I.B., Bregadze V.I. // Boron Science: New Technologies and Applications / Ed. Hosmane N.S. Boca Raton: CRC Press, 2012. P. 623.
<https://doi.org/10.1201/b11199>
21. Prikaznov A.V., Shmal'ko A.V., Sivaev I.B. et al. // Polyhedron 2011. V. 30. № 9. P. 1494.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2011.02.055>
22. Приказнов А.В., Ласькова Ю.Н., Семюшкин А.А. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 8. С. 2501. [Prikaznov A.V., Las'kova Yu.N., Semioshkin A.A. et al. // Russ. Chem. Bull. 2011. V. 60. № 8. P. 2250.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-011-0392-4>
23. Кубасов А.С., Матвеев Е.Ю., Ретивов В.М. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 1. С. 187. [Kubasov A.S., Matveev E.Yu., Retivov V.M. et al. // Russ. Chem. Bull. 2014. V. 63. № 1. P. 187.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-014-0412-2>
24. Imperio D., Muz B., Azab A.K. et al. // Eur. J. Org. Chem. 2019. № 43. P. 7228.
<https://doi.org/10.1002/ejoc.201901412>
25. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Sivaev I.B., Bregadze V.I. // Phosphorus, Sulfur Silicon Relat. Elem. 2019. V. 194. № 10. P. 983.
<https://doi.org/10.1080/10426507.2019.1631312>
26. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Anisimov A.A. et al. // Polyhedron. 2019. V. 174. P. 114170.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2019.114170>
27. Stogniy M.Yu., Erokhina S.A., Suponitsky K.Yu. et al. // J. Organomet. Chem. 2020. V. 909. P. 121111.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2020.121111>
28. Zhdanov A.P., Nelyubin A.V., Klyukin I.N. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 7. P. 841.
<https://doi.org/10.1134/S0036023619070180>
29. Нелюбин А.В., Клюкин И.Н., Жданов А.П. и др. // Журн. неорган. химии. 2019. Т. 64. № 12. С. 1263. [Nelyubin A.V., Klyukin I.N., Zhdanov A.P. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 12. P. 1499.]
<https://doi.org/10.1134/S003602361912012X>
30. King R.B. // Chem. Rev. 2001. V. 101. № 5. P. 1119.
<https://doi.org/10.1021/cr000442t>
31. Chen Z., King R.B. // Chem. Rev. 2005. V. 105. № 10. P. 3613.
<https://doi.org/10.1021/cr0300892>
32. Forsyth C.J., Murray T.J. // Science of Synthesis: Hoyben-Weyl Methods of Molecular Transformations. Vol. 37. Compounds with One Saturated Carbon-Heteroatom Bond / Ed. Forsyth S.J. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2008. P. 631.
<https://doi.org/10.1055/b-0035-118648>
33. van Dijk T., Slootweg J.C., Lammertsma K. // Org. Biomol. Chem. 2017. V. 15. № 48. P. 10134.
<https://doi.org/10.1039/C7OB02533E>
34. Sivaev I.B., Prikaznov A.V., Anufriev S.A. // J. Organomet. Chem. 2013. V. 747. P. 254.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2013.04.001>
35. Kölle P., Nöth H. // Chem. Rev. 1985. V. 85. № 5. P. 399.
<https://doi.org/10.1021/cr00069a004>
36. Piers W.E., Bourke S.C., Conroy K.D. // Angew. Chem. Int. Ed. 2005. V. 44. № 32. P. 5016.
<https://doi.org/10.1002/anie.200500402>
37. Sivaev I.B., Bregadze V.I. // Coord. Chem. Rev. 2014. V. 270–271. P. 75.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2013.10.017>
38. Gutmann V. // Coord. Chem. Rev. 1976. V. 18. № 2. P. 225.
[https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(00\)82045-7](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(00)82045-7)
39. Beckett M.A., Strickland G.C., Holland J.R., Varma K.S. // Polym. Commun. 1996. V. 37. № 20. P. 4629.
[https://doi.org/10.1016/0032-3861\(96\)00323-0](https://doi.org/10.1016/0032-3861(96)00323-0)
40. Liberman-Martin A.L., Bergman R.G., Tilley T.D. // J. Am. Chem. Soc. 2015. V. 137. № 16. P. 5328.
<https://doi.org/10.1021/jacs.5b02807>
41. Kannan R., Kumar S., Andrews A.P. et al. // Inorg. Chem. 2017. V. 56. № 16. P. 9391.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b01243>
42. Jennings J.J., Wigman B.W., Armstrong B.M., Franz A.K. // J. Org. Chem. 2019. V. 84. № 24. P. 15845.
<https://doi.org/10.1021/acs.joc.9b02107>
43. Kosenko I.D., Lobanova I.A., Godovikov I.A. et al. // J. Organomet. Chem. 2012. V. 721–722. P. 70.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2012.05.045>

44. Childs R.F., Mulholland D.L., Nixon A. // Can. J. Chem. 1982. V. 60. № 6. P. 801.
<https://doi.org/10.1139/v82-117>
45. Hilt G., Nödling A. // Eur. J. Org. Chem. 2011. № 35. P. 7071.
<https://doi.org/10.1002/ejoc.201101307>
46. Hilt G., Pünner F., Möbus J. et al. // Eur. J. Org. Chem. 2011. № 30. P. 5962.
<https://doi.org/10.1002/ejoc.201101029>
47. Shmal'ko A.V., Stogniy M.Yu., Kazakov G.S. et al. // Dalton Trans. 2015. V. 44. № 21. P. 9860.
<https://doi.org/10.1039/C5DT01293G>
48. Plešek J., Janoušek Z., Heřmánek S. // Collect. Czech. Chem. Commun. 1978. V. 43. № 11. P. 2862.
<https://doi.org/10.1135/cccc19782862>
49. Grüner B., Holub J., Plešek J. et al. // Dalton Trans. 2007. № 42. P. 4859.
<https://doi.org/10.1039/B709526K>
50. Tutusaus O., Teixidor F., Núñez R. et al. // J. Organomet. Chem. 2002. V. 657. № 1–2. P. 247.
[https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(02\)01541-3](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(02)01541-3)
51. Rosair G.M., Welch A.J., Weller A.S., Zahn S.K. // J. Organomet. Chem. 1997. V. 536–537. P. 299.
[https://doi.org/10.1016/S0022-328X\(96\)06740-X](https://doi.org/10.1016/S0022-328X(96)06740-X)
52. Dunn S., Garrioch R.M., Rosair G.M. et al. // Collect. Czech. Chem. Commun. 1999. V. 64. № 6. P. 1013.
<https://doi.org/10.1135/cccc19991013>
53. Кудинов А.Р., Петровский П.В., Мещеряков В.И., Рыбинская М.И. // Изв. АН. Сер. хим. 1999. № 7. С. 1368. [Kudinov A.R., Petrovskii P.V., Meshcheryakov V.I., Rybinskaya M.I. // Russ. Chem. Bull. 1999. V. 48. № 7. P. 1356.]
<https://doi.org/10.1007/BF02495304>
54. Кудинов А.Р., Мещеряков В.И., Петровский П.В., Рыбинская М.И. // Изв. АН. Сер. хим. 1999. № 1. С. 177. [Kudinov A.R., Meshcheryakov V.I., Petrovskii P.V., Rybinskaya M.I. // Russ. Chem. Bull. 1999. V. 48. № 1. P. 176.]
<https://doi.org/10.1007/BF02494424>
55. Кудинов А.Р., Перекалин Д.С., Петровский П.В., Гринцелев-Кутузов Г.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2002. № 10. С. 1775. [Kudinov A.R., Perekalin D.S., Petrovskii P.V., Grintselev-Knyazev G.V. // Russ. Chem. Bull. 2002. V. 51. № 10. P. 1928.]
<https://doi.org/10.1023/A:1021373106780>
56. Planas J.G., Viñas C., Teixidor F. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2005. № 20. P. 4193.
<https://doi.org/10.1002/ejic.200500470>
57. Логинов Д.А., Виноградов М.М., Старикова З.А., Кудинов А.Р. // Изв. АН. Сер. хим. 2013. № 5. С. 1262. [Loginov D.A., Vinogradov M.M., Starikova Z.A., Kudinov A.R. // Russ. Chem. Bull. 2013. V. 62. № 5. P. 1262.]
<https://doi.org/10.1007/s11172-013-0174-2>
58. Corsini M., Losi S., Grigiotti E. et al. // J. Solid State Electrochem. 2007. V. 11. № 12. P. 1643.
<https://doi.org/10.1007/s10008-007-0324-2>
59. Lancaster S.J., Hughes D.L. // Dalton Trans. 2003. № 9. P. 1779.
<https://doi.org/10.1039/B300552F>
60. Okio C.K.Y.A., Levason W., Monzittu F.M., Reid G. // J. Organomet. Chem. 2017. V. 848. P. 232.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2017.08.004>
61. Bruce M.I., Costuas K., Davin T. et al. // Organometallics. 2005. V. 24. № 16. P. 3864.
<https://doi.org/10.1021/om050293a>
62. Zhang J., Guo S.-Z., Dong Y.-B. et al. // Inorg. Chem. 2017. V. 56. № 2. P. 1001.
<https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b02809>
63. Zhang L., Meggers E. // Acc. Chem. Res. 2017. V. 50. № 2. P. 320.
<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00586>
64. Merbach A., Bünzli J.C. // Helv. Chim. Acta. 1972. V. 55. № 2. P. 580.
<https://doi.org/10.1002/hlca.19720550231>
65. Good R., Merbach A.E. // Helv. Chim. Acta. 1974. V. 57. № 4. P. 1192.
<https://doi.org/10.1002/hlca.19740570430>
66. Jura M., Levason W., Ratnani R. et al. // Dalton Trans. 2010. V. 39. № 3. P. 883.
<https://doi.org/10.1039/B916336K>
67. Benjamin S.L., Hyslop A., Levason W., Reid G. // J. Fluor. Chem. 2012. V. 137. P. 77.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2012.02.014>
68. Marchetti F., Pampaloni G., Zacchini S. // Inorg. Chem. 2008. V. 47. № 1. P. 365.
<https://doi.org/10.1021/ic7012254>
69. Marchetti F., Pampaloni G., Zacchini S. // Eur. J. Inorg. Chem. 2008. № 3. P. 453.
<https://doi.org/10.1002/ejic.200700911>
70. Bregadze V.I., Kosenko I.D., Lobanova I.A. et al. // Organometallics. 2010. V. 29. № 21. P. 5366.
<https://doi.org/10.1021/om100385m>
71. Marchetti F., Pampaloni G., Zacchini S. // J. Fluor. Chem. 2010. V. 131. № 1. P. 21.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2009.09.014>
72. Bernard R., Cornu D., Perrin M. et al. // J. Organomet. Chem. 2004. V. 689. № 16. P. 2581.
<https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2004.05.014>
73. Sivaev I.B., Semioshkin A.A., Brellochs B. et al. // Polyhedron. 2000. V. 19. № 6. P. 627.
[https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)00293-X)
74. Tarrés M., Viñas C., Cioran A.M. et al. // Chem. Eur. J. 2014. V. 20. № 48. P. 15808.
<https://doi.org/10.1002/chem.201403424>
75. Marchetti F., Pampaloni G. // Chem. Commun. 2012. V. 48. № 5. P. 635.
<https://doi.org/10.1039/C1CC14592D>
76. Hawthorne M.F., Shelly K., Li F. // Chem. Commun. 2002. № 6. P. 547.
<https://doi.org/10.1039/B110076A>
77. Авдеева В.В., Малинина Е.А., Гоева Л.В., Кузнецов Н.Т. // Докл. Акад. наук. 2017. Т. 474. № 6. С. 700. [Avdeeva V.V., Malinina E.A., Goeva L.V., Kuznetsov N.T. // Dokl. Chem. 2017. V. 474. № 2. P. 141.]
<https://doi.org/10.1134/S0012500817060052>
78. Volkov O., Hu C., Kölle U., Paetzold P. // Z. Anorg. Allg. Chem. 2005. V. 631. № 10. P. 1909.
<https://doi.org/10.1002/zaac.200500149>
79. Авдеева В.В., Малинина Е.А., Белоусова О.Н. и др. // Журн. неорг. химии. 2011. Т. 56. № 4. С. 564. [Avdeeva V.V., Malinina E.A., Belousova O.N. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2011. V. 56. № 4. P. 524.]
<https://doi.org/10.1134/S003602361104005X>
80. Несмеев А.Н. На качелях века. М.: Москвоведение, 2018. 480 с.