УДК 546.883:539.26

К 90-летию академика Н.Т. Кузнецова

АМИДОФЕНОЛЯТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТАНТАЛА

© 2021 г. П. А. Петров^{1, *}, Е. А. Голубицкая¹, И. В. Ельцов², Т. С. Сухих¹, М. Н. Соколов¹

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия ²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

> **e-mail: panah@niic.nsc.ru* Поступила в редакцию 09.03.2021 г. После доработки 16.04.2021 г. Принята к публикации 19.04.2021 г.

При взаимодействии Ta(NMe₂)₅ с 2,4-ди-*трет*-бутил-6-((2,6-диизопропилфенил)амино)фенолом (H₂AP^{Dipp}) получены смешанно-лигандные амидофенолятные комплексы [Ta(AP^{Dipp})(NMe₂)₃] (I) и [Ta(AP^{Dipp})₂(NMe₂)] (II), охарактеризованные с помощью рентгеноструктурного анализа (CIF files CCDC № 2060699 (I), 2060700 (II · 0.5C₅H₁₂)) и ЯМР-спектроскопии.

Ключевые слова: тантал, амиды, амидофеноляты, рентгеноструктурный анализ **DOI:** 10.31857/S0132344X21090073

Бидентантные N-замещенные *о*-иминобензохиноны являются структурными аналогами *о*-бензохинонов и дииминов [1]. Все три класса лигандов относятся к редокс-активным, поскольку могут претерпевать серию обратимых окислительно-восстановительных переходов (схема 1; $IQ^R =$ иминохинон, (ISQ^R) – иминосемихинолят, (AP^R)²⁻ = амидофенолят). При этом окислительно-восстановительные потенциалы *о*-иминохинонов смещены в более отрицательный диапазон по сравнению с потенциалами *о*-хинонов. С другой стороны, стерическое влияние иминобензохинонов менее выражено по сравнению с дииминами. Таким образом, использование производных иминохинонов в качестве лигандов дает возможность стерической и электронной настройки координационного узла, например для получения комплексов с нужными магнитными свойствами [2–11]. Кроме того, для комплексов с производными иминобензохинонов возможно протекание реакций окислительного присоединения и восстановительного элиминирования, которые не изменяют степень окисления центрального атома, а затрагивают π -систему лиганда. Эти реакции могут протекать как стехиометрически [12– 16], так и в каталитическом варианте [17].



На сегодняшний день существуют два основных метода синтеза катехолатных и семихинолятных комплексов. Первый из них — взаимодействие хинона с металлом или его низковалентным комплексом (чаще всего карбонилом). В этом случае хинон окисляет достаточно активный металл или его соединение, восстанавливаясь, в зависимости от условий реакции, до катехолата или семихинолята. Второй метод состоит в замещении лиганда при взаимодействии галогенидов металла и катехолата или семихинолята (чаще всего Na, K или Tl). В случае ниобия и тантала слабой стороной этого подхода является то, что их галогениды чрезвычайно реакционноспособны и могут, в частности, расщеплять связи С–О эфирных растворителей [18, 19]. Именно отсутствие удобных металлсодержащих предшественников представляется причиной чрезвычайно малого числа известных катехолатов ниобия и тантала. Единственный на сегодняшний день катехолатный комплекс тантала – $[Ta(Cat)_2(HCat)(Py)]$ – был получен при взаимодействии $Ta(OEt)_5$ и пирокатехина при соотношении 1 : 3 в пиридине [20]. Комплекс ниобия был получен аналогично. С другой стороны, известно, что амиды (в частности, диалкиламиды) ранних переходных металлов являются удобными предшественниками других соединений.

Настоящая работа посвящена исследованию взаимодействия диметиламида тантала(V) $Ta(NMe_2)_5 c$ 2,4-ди-*трет*-бутил-6-((2,6-диизопропилфенил) амино)фенолом (H_2AP^{Dipp}), содержащим при атоме азота объемный диизопропилфенильный заместитель.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтезы проводили в инертной атмосфере с использованием стандартной аппаратуры Шленка. Растворители подвергались обезвоживанию и дегазации кипячением и перегонкой в атмосфере аргона с использованием соответствующих осушителей. Спектры ЯМР регистрировали на спектрометре Bruker Avance III 500 с рабочей частотой 500.03 МГц для ядер ¹Н, 125.73 МГц для ядер ¹³С и 50.67 МГц для ядер 15 N; в качестве стандартов использовали сигналы растворителя ($\delta({}^{1}\mathrm{H}) = 7.16 \mathrm{ м.д.}$, $\delta(^{13}C) = 128.06$ м.д.) [21]. Спектры на ядре ¹⁵N получали проекцией двумерной ¹H,¹⁵N-HMBCкорреляции, калибровку сигналов проводили относительно внешнего стандарта формамида $(\delta(^{15}N) = 112.5$ м.д.). Определение строения и отнесение сигналов в спектрах ЯМР на ядрах ¹H, ¹³C и ¹⁵N проводили на основании гетероядерных ¹Н, ¹³С-НМВС, ¹Н, ¹⁵N-НМВС и ¹Н, ¹³С-НSQC двумерных корреляций. Элементный анализ выполняли в Аналитической лаборатории ИНХ СО PAH.

Синтез [Та(AP^{Dipp})(NMe_2)₃] (I). 150 мг (0.37 ммоль) Та(NMe_2)₅ и 145 мг (0.38 ммоль) H_2AP^{Dipp} помещали в сосуд Шленка, вакуумировали и сконденсировали в него при пониженном давлении и охлаждении жидким азотом 30 мл толуола. После отогревания до комнатной температуры полученный оранжевый раствор нагревали на масляной бане ($T = 55^{\circ}$ С) при перемешивании в течение 2 сут. Растворитель упаривали в вакууме, остаток экстрагировали 30 мл пентана, экстракт декантировали в двухколенную ампулу. Медленное упаривание привело к образованию оранжевых кристаллов. Выход 77 мг (30%).

ЯМР ¹Н (500 МГц; C₆D₆; δ , м.д.): 1.15 (д., $J = 7.0 \Gamma$ ц, 6H, CH(C<u>H</u>₃)₂), 1.29 (д., $J = 7.0 \Gamma$ ц, 6H,

СH(С<u>H</u>₃)₂), 1.32 (с., 9H, *t*-Bu-4), 1.74 (s., 9H, *t*-Bu-6), 2.21, 2.69 (ш.с., 12H, N(CH₃)₂), 3.25 (ш. м., 14H, N(CH₃)₂ и С<u>H</u>(CH₃)₂), 6.12 (д., J = 2.1 Гц, 1H, CH-3), 7.10 (д., J = 2.1 Гц, 1H, CH-5), 7.17 (т., J = 7.7 Гц, 1H, CH-4 (Dipp)), 7.28 (д., J = 7.7 Гц, 2H, CH-3 (Dipp)).

ЯМР ¹³C{¹H} (126 МГц; C₆D₆; δ, м.д.): 24.1 (CH(<u>C</u>H₃)₂), 26.5 (CH(<u>C</u>H₃)₂), 28.8 (<u>C</u>H(CH₃)₂), 30.5 (C(<u>C</u>H₃)₃(*t*-Bu-6)), 32.3 (C(<u>C</u>H₃)₃(*t*-Bu-4)), 34.7 (<u>C</u>(CH₃)₃(*t*-Bu-4)), 35.1 (<u>C</u>(CH₃)₃(*t*-Bu-6)), 39.0 (N(CH₃)₂), 44.6 (N(CH₃)₂), 46.7 (N(CH₃)₂), 110.3 (C-3), 113.4 (C-5), 123.6 (C-3,5 (Dipp)), 126.0 (C-4 (Dipp)), 134.4 (C-6), 139.6 (C-4), 144.7 (C-2,6 (Dipp)), 150.1 (C-O), 150.9 (C-N).

ЯМР ¹⁵N (51 МГц; С₆D₆; δ, м.д.): 211.5 (NDipp).

ИК-спектр (КВг; v, см⁻¹): 2961 с, 2867 ср, 1653 ср, 1636 ср, 1558 ср, 1541 ср, 1472 ср, 1457 с, 1437 ср, 1419 ср, 1361 сл, 1326 ср, 1240 ср, 1102 ср, 1026 ср, 990 ср, 796 ср, 743 сл, 538 сл.

Найдено, %:	C 55.10;	Н 7.85;	N 8.25.
Для C ₃₂ H ₅₅ N ₄ O7	Га		
вычислено, %:	C 55.48;	H 8.00;	N 8.09.

Синтез [Ta(AP^{Dipp})₂(NMe₂)] · 0.5C₅H₁₂ (II · • 0.5С₅H₁₂). 100 мг (0.249 ммоль) Та(NMe₂)₅ и 192 мг (0.503 ммоль) H₂AP^{Dipp} помещали в сосуд Шленка, вакуумировали и сконденсировали в него при пониженном давлении и охлаждении жидким азотом 30 мл толуола. После отогревания до комнатной температуры полученную оранжево-красную смесь нагревали на масляной бане ($T = 55^{\circ}$ C) при перемешивании в течение 2 сут. Растворитель упаривали в вакууме, остаток экстрагировали 30 мл пентана, затем декантировали в двухколенную ампулу. Медленное упаривание привело к образованию темно-красного масла, в котором после аккуратного нагревания на воздушной бане в течение 3 сут образовались сростки красно-коричневых кристаллов. Выход 150 мг (61%).

ЯМР ¹Н (500 МГц, C₆D₆ δ , м.д.): 1.10 (д., J = 6.9 Гц, 6H, CH(C<u>H</u>₃)₂-2), 1.13 (с., 9H, *t*-Bu-4), 1.20 (с., 9H, *t*-Bu-6), 1.22 (д., J = 6.7 Гц, 6H, CH(C<u>H</u>₃)₂-2), 1.30 (д., J = 6.9 Гц, 6H, CH(C<u>H</u>₃)₂-6), 1.40 (д., J = 7.0 Гц, 6H, CH(C<u>H</u>₃)₂-6), 3.39 (с., 6H, N(CH₃)₂), 3.49 (септ., J = 6.8 Гц, 2H, C<u>H</u>(CH₃)₂-2), 3.51 (септ., J = = 6.9 Гц, 2H, C<u>H</u>(CH₃)₂-6), 6.14 (д., J = 2.1 Гц, 2H, CH-3), 6.92 (д., J = 2.1 Гц, 1H, CH-5), 7.20 (д.д., 2H, J = 7.6 Гц, CH-4 (Dipp)), 7.32 (д.д., 2H, ³J = = 7.1 Гц, ⁴J = 2.0 Гц, CH-5 (Dipp)).

ЯМР ¹³C{¹H} (126 МГц, C₆D₆ δ, м.д.): 24.7 (CH(<u>C</u>H₃)₂-6), 25.3 ((CH(<u>C</u>H₃)₂)-2), 25.5 ((CH(<u>C</u>H₃)₂)-2), 25.5 ((CH(<u>C</u>H₃)₂)-6), 28.5 (($\underline{C}H(CH_3)_2$)-6), 28.6 (($\underline{C}H(CH_3)_2$)-2), 30.1 (C($\underline{C}H_3$)₃(*t*-Bu-6)), 31.8 (C($\underline{C}H_3$)₃(*t*-Bu-4)), 34.6 ($\underline{C}(CH_3)_3$ (*t*-Bu-6)), 34.8 ($\underline{C}(CH_3)_3$ (*t*-Bu-4)), 44.3 (N(CH₃)₂)), 110.3 (C-3), 114.6 (C-5), 123.7 (C-5 (Dipp)), 125.3 (C-3 (Dipp)), 125.7 (C-4 (Dipp)), 135.6 (C-6), 143.5 (C-1 (Dipp)), 144.3 (C-4), 145.3 (C-6 (Dipp)), 145.7 (C-2 (Dipp)), 146.9 (C-O), 151.6 (C-N).

ЯМР ¹⁵N (51 МГц, C₆D₆ δ, м.д.): 189.7 (NMe₂), 206.8 (NDipp).

ИК-спектр (КВг, v, см⁻¹): 3057 сл, 2963 с, 2867 с, 2790 сл, 1576 ср, 1465 с, 1442 с, 1410 с, 1360 ср, 1321 ср, 1286 ср, 1251 ср, 1229 ср, 1201 с, 1109 сл, 1056 сл, 977 ср, 926 ср, 907 ср, 857 ср, 824 с, 801 ср, 748 сл, 647 ср, 586 ср, 554 ср.

Найдено, %:	C 65.50;	H 8.15;	N 4.05.
Для C ₅₄ H ₈₀ N ₃ O ₂	Та		
вычислено, %:	C 65.90;	H 8.19;	N 4.27.

РСА. Все измерения проведены по стандартной методике на автоматическом четырехкружном дифрактометре Bruker-Nonius X8 APEX (двухкоординатный ССD детектор, $\lambda = 0.71073$ Å, графитовый монохроматор). Интенсивности отражений измерены методом φ -сканирования узких (0.5°) фреймов. Поглощение учтено эмпирически (SADABS) [22]. Структуры расшифрованы с использованием программ SHELXS [23] и SHELXT [24] и уточнены с использованием программы SHELXL [25] в анизотропном приближении для неводородных атомов с использованием программной оболочки Olex2 [26]. Атомы водорода локализованы геометрически и уточнены в приближении жесткого тела. Кристаллографические характеристики комплекса и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 1.

Кристаллографические данные депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2060699 (I) и 2060700 (II \cdot 0.5C₅H₁₂); http://www.ccdc.cam.ac.uk/conts/retrieving.html).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция Та(NMe₂)₅ и аминофенола H₂AP^{Dipp} (1:1) в толуоле с перекристаллизацией пролукта из пентана привела к выделению амидофенолятного комплекса [Ta(AP^{Dipp})(NMe₂)₃] (I, схема 2). Он имеет искаженное тригонально-бипирамидальное строение (рис. 1), при этом атомы азота N(11), N(21) и N(31) образуют экваториальную плоскость тригональной бипирамиды (ТБП), соответствующие углы NTaN равны 121.51(6)°, 117.27(7)° и 120.13(6)°. Атомы О(21) и N(41) находятся в аксиальных положениях, а длина связи Та(1)–N(41) (1.9959(16) Å) несколько превышает соответствующие значения для диметиламидных лигандов в экваториальной плоскости комплекса. Количественный анализ структуры с помощью программы Shape [27, 28] однозначно указывает на ТБП в качестве координационного полиэдра ($S_{\rm O}({\rm T}{\rm B}{\Pi}) = 0.613$).





При взаимодействии Ta(NMe₂)₅ и аминофенола H_2AP^{Dipp} в соотношении 1 : 2 в толуоле с последующей перекристаллизацией из пентана был выделен *бис* (амидофенолятный) комплекс [Ta(AP^{Dipp})₂-(NMe₂)] · 0.5C₅H₁₂ (**II** · **0.5C**₅H₁₂). Комплекс II, скорее, имеет искаженное квадратно-пирамидальное (**КП**) строение (КЧ Та 5), хотя анализ структуры при помощи программы Shape дает сравнимые значения для обоих (ТБП и КП) координационных полиэдров (S_Q (ТБП) = 1.745, $S_O(K\Pi) = 2.115$). Амидофенолятные лиганды на-

ходятся в базальной плоскости КП в трансоидном положении друг относительно друга (рис. 2). Длины связей С–О и С–N, равные 1.368(10) и 1.417(11) Å характерны для амидофенолятов. Длина связи Ta(1)–N(3) (1.923(7) Å) и сумма трех валентных углов при атоме N(3) (360.0°) подтверждают координацию лиганда в амидной форме. В качестве альтернативы, координационный полиэдр комплекса II можно рассматривать как искаженную тригональную бипирамиду с тремя атомами N в экваториальной плоскости и аксиаль-

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур I и II · 0.5C₅H₁₂

	Значение		
Параметр	Ι	$II \cdot 0.5C_5H_{12}$	
Брутто-формула	C ₃₂ H ₅₅ N ₄ OTa	C _{56.5} H ₈₆ N ₃ O ₂ Ta	
М	692.75	1020.23	
Сингония, пр. гр.	Триклинная, <i>Р</i> І	Моноклинная, <i>Р</i> 2 ₁ / <i>n</i>	
<i>a</i> , Å	10.1202(5)	11.3038(6)	
b, Å	12.1128(7)	23.2747(13)	
<i>c</i> , Å	14.6967(8)	20.7177(11)	
α, град	93.090(2)	90	
β, град	98.061(2)	91.566(2)	
ү, град	110.526(2)	90	
<i>V</i> , Å ³	1660.18(16)	5448.6(5)	
Ζ	2	4	
μ, мм ⁻¹	3.339	2.058	
Размер кристалла, мм	0.27 imes 0.22 imes 0.18	0.23 imes 0.21 imes 0.05	
<i>F</i> (000)	712.0	2140.0	
Область сбора данных 20, град	3.612-54.262	2.632-48.812	
Диапазон индексов <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>	$-12 \le h \le 11,$ $-15 \le k \le 15,$ $-18 \le l \le 18$	$-13 \le h \le 13,$ $-27 \le k \le 27,$ $-24 \le l \le 19$	
Число измеренных, независимых и наблюдаемых (<i>I</i> > 2σ(<i>I</i>)) отражений	19766, 7305, 7027	57326, 8960, 7060	
<i>R</i> _{int}	0.0215	0.0727	
Число уточняемых параметров	359	591	
GOOF	1.064	1.172	
$R_1, wR_2 (I > 2\sigma(I))$	0.0153, 0.0366	0.0624, 0.1270	
R_1 , wR_2 (все отражения)	0.0165, 0.0370	0.0828, 0.1336	
Число ограничений	0	0	
$\Delta \rho_{\min} / \Delta \rho_{\max}$, <i>e</i> Å ⁻³	-0.48/0.41	-3.63/1.93	

ными атомами O. Углы NTaN лежат в пределах $113.4(3)^{\circ}-129.8(3)^{\circ}$, угол O(1)Ta(1)O(2) равен $161.1(2)^{\circ}$, что указывает на сильное отклонение от идеальной геометрии ТБП.

При взаимодействии Ta(NMe₂)₅ с H₂AP^{Dipp} в мольном соотношении 1 : 3 также образуется комплекс II. Его образование вместо анионного *mpuc*(амидофенолята) [Ta(AP^{Dipp})₃]⁻ или нейтрального [Ta(AP^{Dipp})₂(HAP^{Dipp})] можно объяснить наличием объемного диизопропилфенильного заместителя при атоме азота. Известные гомолептические комплексы [M^{III}(ISQ^R)₃] (M = Cr, Fe, Co) содержат при атоме N иминосемихинолята относительно небольшие фенильные и 3,5-дифторфенильные заместители [1]. Также известен комплекс ванадия [V^V(AP^{Ph})₂(HAP^{Ph})], содержащий монопротонированный N-фенил-3,5-ди*трет*-бутиламидофенолят [1]. Можно сделать вывод, что стерические трудности, обусловленные наличием трех объемных диизопропилфенильных групп, слишком велики даже для такого относительно крупного центрального иона как Ta⁵⁺.

Комплексы I и II также были охарактеризованы методом ЯМР на ядрах ¹H, ¹³C и ¹⁵N. Результаты анализа свидетельствуют о достаточно жесткой конформационной структуре соединений в растворе. При этом структура соединения II является более жесткой: в соединении I наблюдается лишь неэквивалентность метильных групп изопропильного фрагмента, в то время как в спектрах соединения II все группы атомов проявляются в

КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ том 47 № 9 2021



Рис. 1. Молекулярная структура комплекса І. Некоторые длины связей и углы: Ta(1)–O(11) 2.0129(12), Ta(1)–N(11) 2.0632(15), Ta(1)–N(21) 1.9634(15), Ta(1)–N(31) 1.9653(16), Ta(1)–N(41) 1.9958(16) Å и O(11)Ta(1)N(11) 75.00(5)°.



Рис. 2. Молекулярная структура комплекса II. Некоторые длины связей и углы: Ta(1)–O(11) 1.941(5), Ta(1)–O(21) 1.927(5), Ta(1)–N(11) 2.029(7), Ta(1)–N(21) 2.038(7), Ta(1)–N(3) 1.923(7) Å и O(11)Ta(1)N(11) 78.5(3)°, O(21)Ta(1)N(21) 76.8(3)°.

КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ том 47 № 9 2021

виде отдельных хорошо разрешенных сигналов. Химические сдвиги ариламидного атома азота практически совпадают для I и II ($\delta_N = 211.5$ и 206.8 м.д. соответственно). Сигнал диметиламидного лиганда для II ($\delta_N = 189.8$ м.д.) несколько смещен в слабое поле по сравнению с Ta(NMe₂)₅ (164.6 м.д.). В спектре ¹⁵N ЯМР комплекса I сигналы диметиламидных лигандов зафиксировать не удалось, что может быть связано с недостаточно быстрым (в шкале времени ЯМР) конформационным обменом между неэквивалентными позициями в стереохимически нежесткой структуре с КЧ 5. Подтверждением этого является значи-

тельное уширение сигналов групп NMe_2^- в спектре ЯМР ¹Н комплекса I ($\omega_{1/2} \sim 7-25$ Гц) по сравнению с комплексом II ($\omega_{1/2} \sim 2$ Гц). Следует отметить сдвиг в сильное поле сигнала углерода при связи С–N (С-2) по сравнению с углеродом при связи С–O (С-1). Также в значительно более слабом поле располагается сигнал атома H-3. Причина этого, по всей видимости, кроется во взаимно-перпендикулярном расположении колец: атом углерода С-2 располагается практически в плоскости кольца диизопропилфенильного фрагмента и испытывает дезэкранирующее действие ароматического кольца, тогда как атом водорода H-5, наоборот, находится над плоскостью кольца и попадает в область экранирования (ср. [29]).

Таким образом, в данной работе показано, что продуктами реакции $Ta(NMe_2)_5$ с аминофенолом H_2AP^{Dipp} являются, в зависимости от соотношения реагентов, $[Ta(AP^{Dipp})(NMe_2)_3]$ и $[Ta(AP^{Dipp})_2(NMe_2)]$, представляющие собой первые амидофенолятные комплексы тантала. *Трис*-амидофенолятный комплекс получить не удается, по-видимому, по стерическим причинам. Примечательно, что в обоих комплексах реализуется КЧ 5, что предполагает известную координационную ненасыщенность и льюисовскую кислотность амидофенолятных комплексов. Комплекс II обладает сильно искаженной структурой с промежуточной между КП и ТБП геометрией координационного полиэдра тантала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Poddel'sky A.I., Cherkasov V.K., Abakumov G.A. // Coord. Chem. Rev. 2009. V. 253. P. 291.
- 2. Ершова И.В., Пискунов А.В., Черкасов В.К. // Успехи химии. 2020. Т. 89. № 11. С. 1157 (Ershova I.V., Piskunov A.V., Cherkasov V.K. // Russ. Chem. Rev. 2020.

V.89. P. 1157).

https://doi.org/10.1070/RCR4957

- Ершова И.В., Пискунов А.В. // Коорд. химия. 2020. Т. 46. № 3. С. 132 (Ershova I.V., Piskunov A.V. // Russ. J. Coord. Chem. 2020. V. 46. Р. 154). https://doi.org/10.1134/S1070328420030021
- Piskunov A.V., Pashanova K.I., Bogomyakov A.S. et al. // Polyhedron. 2020. V. 186. 114610.
- 5. Piskunov A.V., Meshcheryakova I.N., Piskunova M.S. et al. // J. Mol. Struct. 2019. V. 1195. P. 417.
- Ershova I.V., Bogomyakov A.S., Fukin G.K., Piskunov A.V.// Eur. J. Inorg. Chem. 2019. P. 938.
- Чегерев М.Г., Пискунов А.В. // Коорд. химия. 2018.
 Т. 44. № 2. С. 109 (Chegerev M.G., Piskunov A.V. // Russ. J. Coord. Chem. 2018. V. 44. P. 258). https://doi.org/10.1134/S1070328418040036
- Piskunov A.V., Maleeva A.V., Fukin G.K. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2017. V. 455. P. 13.
- Piskunov A.V., Ershova I.V., Bogomyakov A.S. et al. // Inorg. Chem. 2015. V. 54. P. 6090.
- Piskunov A.V., Maleeva A.V., Bogomyakov A.S. et al. // Polyhedron. 2015. V. 102. P. 715.
- 11. Piskunov A.V., Meshcheryakova I.N., Maleeva A.V. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2014. P. 3252–3258.
- 12. Piskunov A.V., Meshcheryakova I.N., Fukin G.K. et al. // Dalton Trans. 2013. V. 42. P. 10533.
- Пискунов А.В., Пискунова М.С., Чегерев М.Г. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. Т. 63. № 4. С. 912 (*Piskunov A.V., Piskunova M.S., Chegerev M.G.* // Russ. Chem. Bull. 2014. V. 63. P. 912).
- 14. Piskunov A.V., Ershova I.V., Fukin G.K., Shavyrin A.S. // Inorg. Chem. Commun. 2013. V. 38. P. 1270.
- Piskunov A.V., Chegerev M.G., Fukin G.K. // J. Organomet. Chem. 2016. V. 803. P. 51.
- 16. *Matson E.M., Opperwall S.R., Fanwick P.E., Bart S.C. //* Inorg. Chem. 2013. V. 52. P. 7295.
- Blackmore K.J., Lal N., Ziller J.W., Heyduk A.F. // J. Am. Chem. Soc. 2008. V. 130. P. 2728.
- Bini R., Chiappe C., Marchetti F. et al. // Inorg. Chem. 2010. V. 49. P. 339.
- 19. *Marchetti, F., Pampaloni, G., Zacchini S. //* Inorg. Chem. 2008. V. 47. P. 365.
- 20. *Boyle T.J., Tribby L.J., Alam T.M. et al.* // Polyhedron. 2005. V. 24. P. 1143.
- Fulmer G.R., Miller A.J.M., Sherden N.H. et al. // Organometallics. 2010. V. 29. P. 2176.
- APEX2 (version 1.08), SAINT (version 7.03), SAD-ABS (version 2.11), SHELXTL (version 6.12). Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2004.
- 23. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2008. V. 64. P. 112.
- 24. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2015. V. 71. P. 3.
- 25. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
- 26. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Cryst. 2009. V. 42. P. 339.
- 27. SHAPE (version 2.1). Barcelona (Spain): Universitat de Barcelona, 2013.
- 28. Alvarez S., Alemany P., Casanova D. et al. // Coord. Chem. Rev. 2005. V. 249. P. 1693.
- 29. *Shuvalov V.Y., Eltsov I.V., Tumanov N.A. et al.* // Eur. J. Org. Chem. 2017. V. 36. P. 5410.