

УДК 541.49:546.98:546.131:542.951.1:547.415.5

**КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ ПАЛЛАДИЯ(II)  
С N,N'-[ЭТАН-1,2-ДИИЛ-БИС(ИМИНОЭТАН-2,1-ДИИЛ)]  
БИС(2,2-ДИМЕТИЛДЕКАНАМИД)ОМ**

© Л. Г. Голубятникова\*, Р. А. Хисамутдинов,  
С. О. Бондарева, Ю. И. Муринов

Уфимский Институт химии УФИЦ РАН  
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 69.

Тел.: +7 (347) 235 54 00.

\*Email: hisam@anrb.ru

Полиамины, содержащиеся в клетках живых организмов, участвуют в различных процессах, в том числе и связанных с замедлением развития раковых клеток. В настоящей работе методом лигандного замещения из водно-ацетоновой среды синтезирован хлорокомплекс палладия(II) с N,N'-[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид)ом (**L**) при соотношении металл : **L**, равном 1 : 1. Элементный состав соединения соответствует формуле PdCl<sub>2</sub>**L**. Хлорокомплекс палладия(II) охарактеризован методами ЭСП, ИК, ЯМР <sup>13</sup>C и <sup>15</sup>N спектроскопии. Установлено, что в комплексообразовании участвуют только атомы азота аминных групп реагента. Комплекс является цис-изомером. Проведены квантово-химические расчеты реагента и хлорокомплекса палладия(II). По результатам квантово-химических расчетов, реагент имеет строение, близкое к линейному. Наиболее термодинамически выгодная конфигурация комплекса соответствует цис-хелату, в котором ион палладия(II) связан с двумя атомами азота аминогруппы ( $\Delta G^\circ = -52.1$  ккал/моль).

**Ключевые слова:** палладий(II), хлорокомплекс, бис-ацилированный триэтилентетрамин, N,N'-[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид).

### Введение

Известно, что полиамины (путресцин, спермин и др.), содержащиеся в клетках живых организмов, участвуют в различных процессах, в том числе и связанных с замедлением развития раковых клеток [1–2]. Было установлено [3], что при введении в организм модифицированных синтетических полиаминов клетки распознают их как природные, тем самым стимулируя противовоспалительную функцию данных соединений. Линейные алкилполиамины могут являться исходными соединениями в синтезе комплексов с различными металлами (платина, медь, родий, золото), а также с палладием [4–6]. Эти комплексы взаимодействуют с ДНК и обладают высокой противоопухолевой активностью [1–2; 7].

Интерес к комплексам палладия(II) обусловлен их значительной биологической активностью и меньшей токсичностью по сравнению с соответствующими комплексами платины(II). Что касается комплексов палладия(II) с полиаминами, то в работах [8–9] описано получение плоско-квадратных хелатных комплексов с N,N,N',N' – тетраметилэтилендиамином и N,N'-бис(3-аминопропил)бутан-1,4-диамином (спермин) состава PdCl<sub>2</sub>**L**. Синтез координационных соединений осуществляли при задаваемом соотношении палладий : реагент, равном 1:1, при этом время реакции не превышало 1 ч.

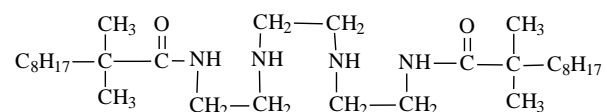
Полиамины, в т.ч. производные этиленаминов, могут быть также успешно использованы в качестве экстрагентов некоторых благородных металлов. Ранее нами было установлено, что бис-ацилированный диэтилентриамин и триацилированный

этиленамин эффективно извлекают палладий(II) из солянокислых растворов [10–11].

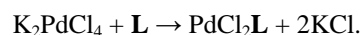
Целью настоящей работы является синтез хлорокомплекса палладия(II) с N,N'-[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид)ом и определение строения внутренней координационной сферы соединения.

### Экспериментальная часть

В работе в качестве реагента для синтеза хлорокомплекса палладия(II) использовали бис-ацилированный триэтилентетрамин N,N'-[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид) (**L**), синтезированный в УФИХ УФИЦ РАН:



Синтез и некоторые физико-химические характеристики реагента **L** приведены в работе [13]. Комплексное соединение палладия(II) синтезировали методом замещения при задаваемом соотношении Pd : **L**, равном 1:1, и температуре 20°C:



Навеску 0.55 г (0.17 ммоль) тетрахлооропалладата калия помещали в коническую колбу емкостью 100 мл и растворяли при перемешивании в 15 мл воды. К полученному раствору добавляли 10 мл (0.81 г, 0.17 ммоль) раствора реагента **L** в ацетоне. Образовавшуюся густую массу перемешивали в течение 6 часов. Полученный осадок краснокоричневого цвета отфильтровывали, трижды про-

мывали гексаном (по 10 мл) и высушивали при комнатной температуре. Выход 0.95 г (86%).

Электронные спектры поглощения (ЭСП) записывали на спектрофотометре Specord M40 (растворитель ацетонитрил марки о.с.ч.), ИК-спектры – на Фурье-спектрофотометре Bruker Tensor 27 и спектрофотометре Specord M80 (жидкая пленка).

Спектры ЯМР реагента и комплекса регистрировали на импульсном спектрометре "Bruker" Avance III (рабочая частота 50.58 МГц ( $^{15}\text{N}$ ), 125.47 МГц ( $^{13}\text{C}$ ), 5 мм датчик с Z-градиентом РАВВО, 298 К). Химические сдвиги в спектрах ЯМР  $^{13}\text{C}$  приведены в м.д. относительно сигнала внутреннего стандарта (ТМС), в спектрах ЯМР  $^{15}\text{N}$  – относительно сигнала внешнего стандарта ( $\text{NH}_3$ ), растворитель хлороформ- $d_6$ .

Удельную электропроводность раствора комплекса в сухом ацетоне определяли с помощью кондуктометра типа ОК 102/1 (Венгрия) с электродом ОР-907/3, температуру плавления – на нагревательном столике Voetius.

Квантово-химические расчеты проводили на кластерном суперкомпьютере УФИХ УФИЦ РАН в пакете программ ПРИРОДА 06 [21–22] в приближении изолированной молекулы. Оптимизацию геометрических параметров исследуемых соединений выполняли методом РВЕРВЕ/Λ2 (скалярно-релятивистский гамильтониан) [23–24]. При оптимизации структуры не налагали ограничение на симметрию молекулярных систем. Соответствие оптимизированных геометрических параметров минимумам на поверхности потенциальной энергии (ППЭ) подтверждено отсутствием отрицательных силовых поправок в матрице Гесса. Термодинамические поправки рассчитывали для температуры 25°C.

### Обсуждение результатов

Комплексное соединение палладия(II) с  $\text{N,N}'$ -[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид)ом (**L**), полученное методом за-

мещения из водно-ацетоновой среды, представляет собой порошкообразное вещество красно-коричневого цвета, элементный состав которого соответствует формуле  $\text{PdCl}_2\text{L}$ , соотношение  $\text{Pd} : \text{L}$  отвечает задаваемому:

Найдено, %: C – 47.6, H – 7.8, N – 7.6, Cl – 10.4, Pd – 15.3.

Вычислено для  $\text{PdCl}_2\text{L}$ , %: C – 47.4, H – 7.8, N – 8.0, Cl – 10.1, Pd – 15.3.

Для установления строения внутренней координационной сферы комплекса были записаны его ЯМР, ИК и ЭСП спектры.

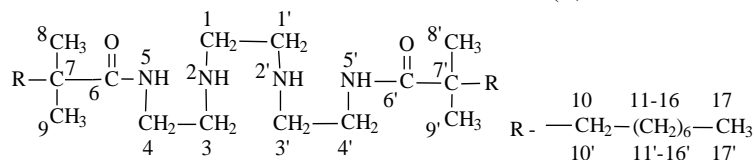
В табл. 1 приведена характеристика спектров ЯМР реагента **L** и его комплекса с палладием(II)  $\text{PdCl}_2\text{L}$ .

В спектре ЯМР  $^{13}\text{C}$  комплекса по сравнению со спектром реагента **L** наибольшее изменение испытывают сигналы атомов углерода метиленовых групп C3 и C3', смещаясь более чем на 3 м.д. в слабое поле без уширения. В то же время, сигналы атомов углерода C1 и C1' сдвигаются в сильное поле не более чем на 0.5 м.д. Сигналы других атомов углерода, за исключением C10 и C10', своего положения практически не меняют. В спектре ЯМР  $^{15}\text{N}$  комплекса по сравнению со спектром реагента **L** сигнал атомов N2 и N2' смещается на 8.36 м.д. в сильное поле, а сигнал атомов азота амидной группы N5 и N5' – незначительно в слабое поле. Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что в комплексообразовании участвуют только атомы аминного азота реагента.

Значение молярной электропроводности 0.001 моль/л раствора комплекса  $\text{PdCl}_2\text{L}$  в ацетоне составляет 6.2  $\text{Om}^{-1}\text{cm}^2\text{mоль}^{-1}$ , что свидетельствует о его электронейтральности [12] (значение молярной электропроводности ионного ассоциата  $\text{LHPdCl}_4$ , который образуется при экстракции палладия(II) изучаемым реагентом, равна 106  $\text{Om}^{-1}\text{cm}^2\text{mоль}^{-1}$  [13]).

Таблица 1

Характеристика спектров ЯМР  $^{13}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$  реагента **L** и его комплекса с палладием(II)



Соединение	Параметр	Значения химсдвигов $\delta$ и изменения химсдвигов $\Delta$ сигналов атомов углерода и азота, м.д.										
		1, 1'	3, 3'	4, 4'	6, 6'	7, 7'	8, 8' 9, 9'	10, 10'	11-16 11'-16'	17, 17'	5, 5'	2, 2'
<b>L</b>	$\delta$	52.86	48.24	41.03	178.36	41.96	25.42	35.96	22.62-31.89	14.12	106.97	30.13
<i>цис</i> - $\text{PdCl}_2\text{L}$	$\delta$	52.36	51.72	41.05	179.05	42.10	25.42	33.28	22.72-31.96	14.13	107.28	21.77
	$\Delta$	0.50	<b>-3.48</b>	-0.02	-0.69	-0.14	0.00	<b>2.68</b>	-0.10-0.07	-0.01	-0.31	<b>8.36</b>

Строение исследуемого реагента таково, что координация двух атомов аминного азота может осуществляться к палладию(II) или одновременно с образованием пятичленного *цис*-хелата, или путем «сшивки» молекул реагента **L** палладием(II) (*транс*-изомер). На преимущественное образование мономерного комплекса свидетельствует его хорошая растворимость в обычных органических растворителях (хлороформ, ацетон, этанол, толуол) и узкий интервал температуры плавления ( $T_{пл.} = 92-93^{\circ}\text{C}$ ).

В ЭСП комплекса  $\text{PdCl}_2\text{L}$  наряду с полосой поглощения реагента при 308 нм имеется полоса поглощения в виде плеча в области 390 нм. В соответствии с литературными данными [14–15], наблюдаемый гипсохромный сдвиг полосы *d-d* перехода в ионе палладия(II) в спектре комплекса по сравнению со спектром иона  $\text{PdCl}_4^{2-}$  (476 нм  $\rightarrow$  390 нм) указывает на образование плоско-квадратного комплекса типа *цис*- $\text{PdCl}_2\text{L}$ .

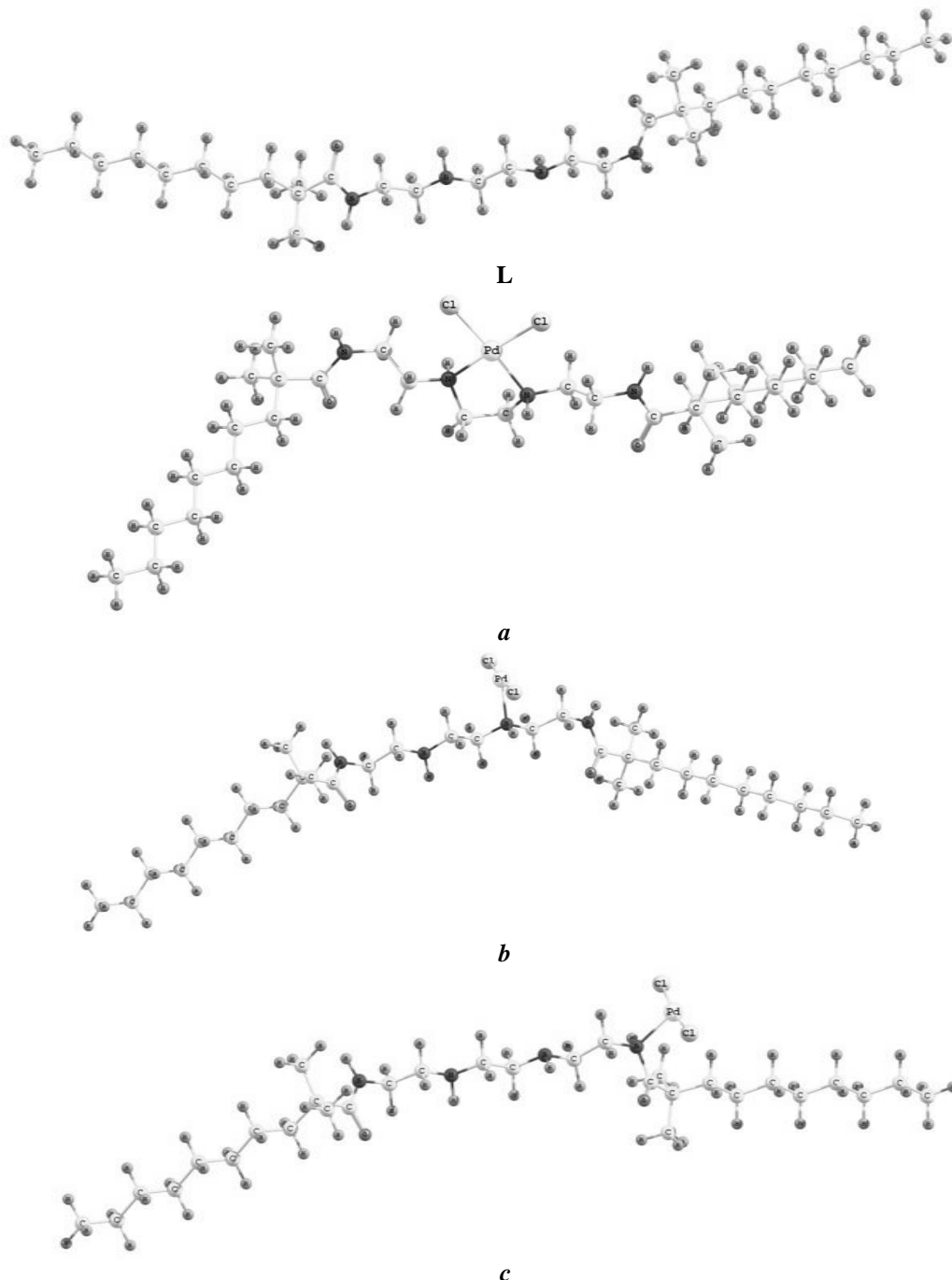


Рис. Оптимизированные в приближении РВЕ/ $\Lambda$ 2 структуры реагента **L**, а также его возможных комплексов с палладием(II).

В ИК спектре комплексного соединения имеются сильные полосы поглощения при 339 и 320 см<sup>-1</sup> (табл. 2), относящиеся к частоте валентных колебаний  $\nu(\text{Pd-Cl})$  в соединениях типа *цис*-PdCl<sub>2</sub>L [16–17]. Полосу средней интенсивности при 298 см<sup>-1</sup> можно отнести к частоте деформационных колебаний  $\delta(\text{N-Pd-N})$  [18–19]. Комбинированная полоса поглощения валентных колебаний  $\nu(\text{NH})$  в спектре реагента **L**, располагающаяся при 3340 см<sup>-1</sup>, в спектре комплекса положения не меняет, однако ее интенсивность уменьшается. Это связано с координацией атомов азота реагента к иону металла, вследствие чего связь N-H ослабляется [20]. Незначительное изменение положения полос поглощения валентных и деформационных колебаний амидных полос в спектре комплекса по сравнению со спектром самого реагента обусловлено смещением электронной плотности вследствие комплексообразования.

Таблица 2

Информативные полосы поглощения в ИК спектрах реагента **L** и его комплекса с палладием(II), см<sup>-1</sup>

L	PdCl <sub>2</sub> L	Отнесение
3340 с	3350 с	$\nu(\text{N-H})$ аминных и амидных групп
1645 с 1633 с	1652 с	I амидная полоса $\nu(\text{C=O})$
1519 с	1527 с	II амидная полоса $\delta(\text{N-H})$
	339 ср 320 с	$\nu(\text{Pd-Cl})$
	298 ср	$\delta(\text{N-Pd-N})$

По результатам квантово-химических расчетов, для реагента **L** реализуется структура, близкая к линейной (рис.).

Данные по свободной энергии Гиббса комплексообразования  $\Delta G^\circ$  теоретически возможных комплексов состава PdCl<sub>2</sub>L свидетельствуют, что наиболее термодинамически выгодная конфигурация комплекса соответствует *цис*-хелату (рис. (a)), в котором атом палладия(II) связан с двумя атомами азота аминной группы ( $\Delta G^\circ = -52.1$  ккал/моль). Координация только по одному из атомов азота аминной или амидной групп (рис. (b, c)) термодинамически менее выгодна ( $\Delta G^\circ_b = -33.3$  ккал/моль,  $\Delta G^\circ_c = -13.1$  ккал/моль). Расчеты подтверждают экспериментальные данные и свидетельствуют о том, что в комплексообразовании с палладием(II) участвуют только атомы азота аминной группы реагента.

### Вывод

Комплексы палладия(II) с N,N'-[этан-1,2-диил-бис(иминоэтан-2,1-диил)]бис(2,2-диметилдеканамид)ом PdCl<sub>2</sub>L, полученный методом замещения из водно-ацетоновой среды при задаваемом соотношении Pd : L, равном 1:1, является *цис*-изомером. В комплексообразовании участвуют только атомы азота аминогрупп реагента.

Работа выполнена по теме госзадания «Комплексообразование моно- и полиидентатных сера-азоторганических соединений с ионами металлов и фармаконами» №АААА-А17-117011910033-1.

### ЛИТЕРАТУРА

- Igarashi K., Kashiwagi K. Characteristics of cellular polyamine transport in prokaryotes and eukaryotes // *Plant Physiol. Biochem.* 2010. V. 48. P. 506–512. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.01.017.
- Agostinelli E., Marques M. P., Calheiros R., Gil F. P., Tempera G. Polyamines: fundamental characters in chemistry and biology // *Amino Acids.* 2010. V. 38. P. 393–403. DOI: 10.1007/s00726-009-0396-7.
- Seiler N. Thirty years of polyamine-related approaches to cancer therapy. retrospect and prospect. Part 2. Structural analogues and derivatives // *Curr. Drug Targets.* 2003. V. 4. P. 565–585. DOI: 10.2174/1389450033490876.
- Silva T. M. Novel Pt(II) and Pd(II) complexes with polyamine analogues: synthesis and vibrational analysis // *J. Inorg. Biochem.* 2012. V. 108. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2011.11.021.
- Corduneanu O., Chiorcea-Paquim A. M., Fiuza S. M., Marques M. P. M., Oliveira-Brett A. M. Polynuclear palladium complexes with biogenic polyamines: AFM and voltammetric characterization // *Bioelectrochem.* 2010. V. 78. P. 97–105. DOI: 10.1016/j.bioelectrochem.2009.08.003.
- Bazzicalupi C. Pd(II) complexes of aliphatic polyamine ligands in aqueous solution: Thermodynamic and structural features // *Coord. Chem. Rev.* 1999. V. 184. P. 243–270. DOI: 10.1016/S0010-8545(99)00003-X.
- Chválová K., Kaspárková J., Farrell N., Brabec V. Deoxyribonuclease I footprinting reveals different DNA binding modes of bifunctional platinum complexes // *FEBS J.* 2006. V. 273. P. 3467–3478. DOI: 10.1111/j.1742-4658.2006.05356.x.
- Mann F. G., Watson H. R. The constitution of complex metallic salts. Part XVIII. The chelated metallic derivatives of NNN'N'-tetramethylethylene-diamine and of 1: 4-dimethylpiperazine // *J. Chem. Soc.* 1958. P. 2772. DOI: 10.1039/JR9580002772.
- Lomozik L., Odani A., Yamauchi O. Spectroscopic studies on complex formation and non-covalent interactions in ternary palladium(II) systems involving spermidine and 2,3-diaminopropionate or 2,4-diaminobutyrate // *Inorg. Chim. Acta.* 1994. V. 219. P. 107–114. DOI: 10.1016/0020-1693(94)03837-6.
- Khislamutdinov R. A., Bondareva S. O., Murinov Yu. I., Baikova I. P. Extraction of palladium(II), platinum(II), and platinum(IV) by bisacylated diethylenetriamine from hydrochloric acid solutions // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2008. V. 53. №3. P. 462–469. DOI: 10.1134/S0036023608030236.
- Golubyatnikova L. G., Anpilogova G. R., Bondareva S. O., Khislamutdinov R. A., Murinov Yu. I. Extraction of palladium(II) from hydrochloric acid solutions with triacylated ethyleneamines // *Russ. J. General Chem.* 2013. V. 83. №4. P. 624–632. DOI: 10.1134/S1070363213040026.
- Кукушкин Ю. Н. Химия координационных соединений. М.: Высш. шк., 1985. 455 с.
- Golubyatnikova L. G., Khislamutdinov R. A., Bondareva S. O., Lobov A. N., Murinov Yu. I. Palladium(II) extraction from hydrochloric acid solutions with diacylated triethylenetetramine // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2014. V. 59. №6. P. 620–625. DOI: 10.1134/S0036023614060084.
- Курбатова Н. В., Васильева А. А., Гиндин Л. М. // Тез. докл. IX Всесоюз. совещ. по химии, анализу и технологии платиновых металлов. Новосибирск. 1976. Ч. 1. С. 66.
- Ochkin A. V., Sergievskii V. V. Thermodynamics of extraction by solutions of amines and salts of substituted ammonium bases // *Russ. Chem. Rev.* 1989. V. 58. P. 835–847. DOI: 10.1070/RC1989v058n09ABEH003481.
- Berg R. W., Rasmussen K. Infrared and far infrared spectra of dihalo(ethylenediamine) palladium(II) and platinum(II) //

- Spectrochim. Acta. 1973. V. 29A. №2. P. 319. DOI: 10.1016/0584-8539(73)80076-5.
17. Ferraro J. R. Low-frequency vibrations of inorganic and coordination compounds. N.Y.: Plenum Press, 1971. 309 p.
  18. Adams D. M. Metal-ligand and related vibrations: a critical survey of the infrared and Raman spectra of metallic and organometallic compounds. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1967. 379 p.
  19. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
  20. Fujita J., Nakamoto K., Kobayashi M. infrared spectra of metallic complexes. ii. the absorption bands of coordinated water in aquo complexes // J. Am. Chem. Soc. 1956. V. 78. P. 3295. DOI: 10.1021/ja01597a026.
  21. Laikov D. N., Ustynyuk Yu. A. Priroda-04: A quantum-chemical program suite. New possibilities in the study of molecular systems with the application of parallel computing Система квантово-химических программ «Природа-04» // Rus. Chem. Bull. 2005. V. 54. I. 3. P. 820–826.
  22. Laikov D. N. Fast evaluation of density functional exchange-correlation terms using the expansion of the electron density in auxiliary basis sets // Chem. Phys. Lett. 1997. V. 281. P. 151–156. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)01206-2.
  23. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. №18. P. 3865–3868. DOI: dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865.
  24. Laikov D. N. A new class of atomic basis functions for accurate electronic structure calculations of molecules // Chem. Phys. Lett. 2005. V. 416. P. 116–120. DOI: 10.1016/j.cplett.2005.09.046.

*Поступила в редакцию 23.04.2018 г.*

**COMPLEXATION OF PALLADIUM(II)  
WITH N,N'-[ETHANE-1,2-DIYL-*bis*(IMINOETHANE-2,1-DIYL)]  
*bis*(2,2-DIMETHYLDECANAMIDE)**

© L. G. Golubyatnikova\*, R. A. Khisamutdinov,  
S. O. Bondareva, Yu. I. Murinov

*Ufa Institute of Chemistry, Ufa Federal Research Center of RAS  
69 Oktyabrya Avenue, 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

*Phone: +7 (347) 235 54 00.*

*\*Email: hisam@anrb.ru*

The polyamines are present in all eukaryotic organisms and are essential for cell proliferation and differentiation (both in normal and malignant cells). In the present work, the chloro-complex of palladium(II) with N,N'-[ethane-1,2-di-yl-bis(iminoethane-2,1-di-yl)]bis(2,2-dimethyldecanamide) (**L**) was synthesized in the aqueous acetone medium by ligand substitution method with a metal:**L** ratio of 1:1. The elemental composition of the compound corresponds to the formula PdCl<sub>2</sub>**L**. The palladium(II) chlorocomplex was characterized by electronic, IR, <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N NMR spectra. The reagent was found to be coordinated in a *cis* configuration through the nitrogen atoms of the secondary amino groups. Quantum-chemical calculations of the reagent and the chlorocomplex of palladium(II) were carried out. According to the results of quantum chemical calculations, the structure of the reagent is almost linear. It was assumed that the most thermodynamically advantageous configuration of the complex corresponded to a *cis*-chelate in which the palladium(II) ion was bonded to two nitrogen atoms of the amino group ( $\Delta G^\circ = -52.1$  kcal/mol).

**Keywords:** palladium(II), chlorocomplex, *bis*-acylated triethylenetetramine, N,N'-[ethane-1,2-diyl-*bis*(iminoethane-2,1-diyl)]*bis*(2,2-dimethyldecanamide).

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin\_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

## REFERENCES

- Igarashi K., Kashiwagi K. *Plant Physiol. Biochem.* 2010. Vol. 48. Pp. 506–512. DOI: 10.1016/j.plaphy.2010.01.017.
- Agostinelli E., Marques M. P., Calheiros R., Gil F. P., Tempera G. *Amino Acids.* 2010. Vol. 38. Pp. 393–403. DOI: 10.1007/s00726-009-0396-7.
- Seiler N. *Curr. Drug Targets.* 2003. Vol. 4. Pp. 565–585. DOI: 10.2174/1389450033490876.
- Silva T. M. J. *Inorg. Biochem.* 2012. Vol. 108. Pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2011.11.021.
- Corduneanu O. *Bioelectrochem.* 2010. Vol. 78. Pp. 97–105. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2009.08.003.
- Bazzicalupi C. *Coord. Chem. Rev.* 1999. Vol. 184. Pp. 243–270. DOI: 10.1016/S0010-8545(99)00003-X.
- Chválová K., Kaspárková J., Farrell N., Brabec V. *FEBS J.* 2006. Vol. 273. Pp. 3467–3478. DOI: 10.1111/j.1742-4658.2006.05356.x.
- Mann F. G., Watson H. R. *J. Chem. Soc.* 1958. Pp. 2772. DOI: 10.1039/JR9580002772.
- Lomozik L., Odani A., Yamauchi O. *Inorg. Chim. Acta.* 1994. Vol. 219. Pp. 107–114. DOI: 10.1016/0020-1693(94)03837-6.
- Khisamutdinov R. A., Bondareva S. O., Murinov Yu. I., Baikova I. P. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2008. Vol. 53. No. 3. Pp. 462–469. DOI: 10.1134/S0036023608030236.
- Golubyatnikova L. G., Anpilogova G. R., Bondareva S. O., Khisamutdinov R. A., Murinov Yu. I. *Russ. J. General Chem.* 2013. Vol. 83. No. 4. Pp. 624–632. DOI: 10.1134/S1070363213040026.
- Kukushkin Yu. N. *Khimiya koordinatsionnykh soedinenii* [Chemistry of coordination compounds]. Moscow: Vyssh. shk., 1985.
- Golubyatnikova L. G., Khisamutdinov R. A., Bondareva S. O., Lobov A. N., Murinov Yu. I. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2014. Vol. 59. No. 6. Pp. 620–625. DOI: 10.1134/S0036023614060084.
- Kurbatova N. V., Vasil'eva A. A., Gindin L. M. *Tez. dokl. IX Vsesoyuz. soveshch. po khimii, analizu i tekhnologii platinovykh metallov.* Novosibirsk. 1976. Pt. 1. Pp. 66.
- Ochkin A. V., Sergievskii V. *Russ. Chem. Rev.* 1989. Vol. 58. Pp. 835–847. DOI: 10.1070/RC1989v058n09ABEH003481.
- Berg R. W., Rasmussen K. *Spectrochim. Acta.* 1973. Vol. 29A. No. 2. Pp. 319. DOI: 10.1016/0584-8539(73)80076-5.
- Ferraro J. R. *Low-frequency vibrations of inorganic and coordination compounds.* N.Y.: Plenum Press, 1971.
- Adams D. M. *Metal-ligand and related vibrations: a critical survey of the infrared and Raman spectra of metallic and organometallic compounds.* London: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1967.
- Nakamoto K. *IK-spektry i spektry KR neorganicheskikh i koordinatsionnykh soedinenii* [IR spectra and Raman spectra of inorganic and coordination compounds]. Moscow: Mir, 1991.
- Fujita J., Nakamoto K., Kobayashi M. *J. Am. Chem. Soc.* 1956. Vol. 78. Pp. 3295. DOI: 10.1021/ja01597a026.
- Laikov D. N., Ustynuk Yu. A. *Rus. Chem. Bull.* 2005. Vol. 54. I. 3. Pp. 820–826.
- Laikov D. N. *Chem. Phys. Lett.* 1997. Vol. 281. Pp. 151–156. DOI: 10.1016/S0009-2614(97)01206-2.
- Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 77. No. 18. Pp. 3865–3868. DOI: dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865.
- Laikov D. N. *Chem. Phys. Lett.* 2005. Vol. 416. Pp. 116–120. DOI: 10.1016/j.cplett.2005.09.046.

*Received 23.04.2018.*