

**ПОЛУЧЕНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ СЕРЕБРА И ПАЛЛАДИЯ  
В СРЕДЕ N,N – ДИМЕТИЛФОРМАМИДА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ПРОСТЫМ  
ПОЛИЭФИРОМ ЛАПРОЛ 5003**

**А.В. Беспалов, Я.О. Иванова**

Александр Валерьевич Беспалов \*, Яна Олеговна Иванова

Кафедра органической химии и технологий, Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, Российская Федерация, 350040

E-mail: bespalov-alex@mail.ru \*, yana.emris@gmail.com

*Данная статья посвящена получению и исследованию устойчивости золей серебра и палладия в среде N,N-диметилформамида. Благодаря уникальным свойствам, проявляющимся у металлов в наноразмерном состоянии, металлические наночастицы находят все большее применение в различных областях науки и техники, что обуславливает актуальность задачи получения устойчивых золей металлов. Синтез агрегативно устойчивых органозолой металлов сопряжен с рядом проблем, так как золи металлов, полученные в органических растворителях, отличаются гораздо меньшей стабильностью по сравнению с гидрозолями, из-за чего задача выбора подходящего стабилизатора является весьма актуальной. В данной работе в качестве стабилизатора был выбран простой разветвленный полиэфир Лапрол 5003. Отличительной особенностью синтеза золей серебра было отсутствие специального восстановителя, так как диметилформамид, использующийся в качестве растворителя, способен восстанавливать катионы серебра. В ходе работы были получены устойчивые золи серебра и палладия в среде диметилформамида. В качестве восстановителя для синтеза наночастиц палладия был использован боргидрид натрия. Были проведены спектральные исследования полученных золей. При помощи электронной микроскопии определен размер образующихся наночастиц серебра и палладия. Показано, что средний размер частиц серебра, формирующихся в среде N,N-диметилформамида, составляет  $4\pm 2$  нм, что существенно меньше размера частиц, полученных в среде изопропанола боргидридным способом. При помощи оптической спектроскопии поглощения исследован процесс агрегации золей серебра в диметилформамиде под действием роданида калия. Показано, что устойчивость золя серебра в диметилформамиде по отношению к действию электролита выше, чем золя, полученного в изопропаноле. Установлено, что в оптическом спектре золя палладия в диметилформамиде присутствует несколько полос поглощения. Изучено влияние концентрации стабилизирующего полиэфира на устойчивость золей серебра и палладия в N,N-диметилформамиде. Показано, что при повышении концентрации Лапрола 5003 свыше определенных значений наблюдается резкое увеличение времени агрегации золей, что свидетельствует о значительном повышении их устойчивости.*

**Ключевые слова:** серебро, палладий, наночастицы, полиэфир, стабилизация, диметилформамид

**PREPARATION AND STABILITY OF SILVER AND PALLADIUM NANOPARTICLES STABILIZED  
BY POLYETHER LAPROL 5003 IN N,N – DIMETHYLFORMAMIDE MEDIA**

**A.V. Bespalov, Ya.O. Ivanova**

Alexander V. Bespalov\*, Yana O. Ivanova

Department of Organic Chemistry and Technologies, Kuban State University, Stavropolskaya st., 149, Krasnodar, 350040, Russia

E-mail: bespalov-alex@mail.ru\*, yana.emris@gmail.com

*This paper is devoted to obtaining and investigating the stability of silver and palladium sols in N,N-dimethylformamide medium. Due to the unique properties exhibited by metals in the nanosized state, metallic nanoparticles are gaining increasing importance in various fields of application, science and technology. This makes the task of obtaining stable metal sols extremely urgent. The synthesis of aggregate-resistant organosols of metals is associated with a number of problems, since the metal sols obtained in organic media are much less stable than hydrosols. For this reason, there arises the challenge of choosing an appropriate stabilizer. In this study, the stabilizer was branched polyester Laprol 5003. A distinctive feature of the synthesis of silver sols was the absence of a special reducing agent, since N,N-dimethylformamide, used as a solvent, recovers silver cations itself. As a result, stable sols of silver and palladium have been obtained in N,N-dimethylformamide medium. Sodium borohydride was used as the reducing agent for the synthesis of palladium nanoparticles. Spectral studies of the resulting sols were carried out. The silver and palladium nanoparticles were sized up by scanning electron microscopy. The procedure has shown that the average size of the silver particles formed in the N,N-dimethylformamide medium is  $4 \pm 2$  nm, which is substantially smaller than the particles obtained in isopropanol medium by the borohydride method. The silver sols aggregation in dimethylformamide under the action of potassium thiocyanate was studied via optical absorption spectroscopy. It has been found that the stability of the silver sol in dimethylformamide to the electrolyte is higher than that of the sol obtained in isopropanol. It has also been detected that several absorption bands are present in the optical spectrum of the palladium sol in dimethylformamide. The effect of the stabilizing polyester concentration on the stability of silver and palladium sols in N,N-dimethylformamide was studied. The result is that when the concentration of Laprol 5003 exceeds some quantity, a sharp increase in the aggregation time of sols is observed, which indicates a significant increase in their stability.*

**Key words:** silver, palladium, nanoparticles, polyether, stabilization, dimethylformamide

**Для цитирования:**

Беспалов А.В., Иванова Я.О. Получение и устойчивость наноразмерных частиц серебра и палладия в среде N,N-диметилформамида, стабилизированных простым полиэфиром Лапрол 5003. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 50–55

**For citation:**

Bespalov A.V., Ivanova Ya.O. Preparation and stability of silver and palladium nanoparticles stabilized by polyether Laprol 5003 in N,N – dimethylformamide media. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 5. P. 50–55

**ВВЕДЕНИЕ**

Наночастицы металлов обладают рядом уникальных свойств, в связи с чем материалы и композиции на их основе находят все более широкое применение. Так, наночастицы серебра известны, в первую очередь, своей высокой биоцидной активностью [1–3], а наночастицы палладия активно используются в катализе [4–6].

Получение устойчивых дисперсий металлических наночастиц в неводных системах в настоящее время вызывает повышенный интерес. По сравнению с гидрозолями, органозоли металлов обладают существенно меньшей агрегативной устойчивостью, что связано с малой величиной электростатического заряда отдельных наночастиц в органических растворителях [7]. В связи с этим, подбор стабилизаторов, обеспечивающих повышение устойчивости органозолей металлов, представляет собой актуальную задачу.

В ряде работ было показано, что N,N-диметилформамид (ДМФА) может успешно использоваться в качестве реакционной среды для синтеза

наночастиц серебра, при этом он выступает в роли как растворителя, так и восстановителя катионов  $Ag^+$  [8–10].

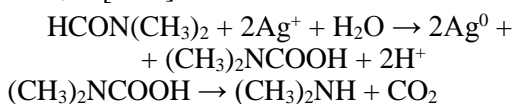
Ранее был осуществлен синтез устойчивых золей серебра в изопропанол, стабилизированных при помощи разветвленного полиэфира Лапрол 5003 [11]. На основании результатов, полученных при исследовании агрегации данных золей под действием электролитов и УФ-излучения, был предложен механизм стабилизации наночастиц серебра указанным полиэфиром [12]. Так как данный полиэфир представляет собой перспективный стабилизатор для ультрадисперсных органозолей, существенный интерес представляет расширение диапазона используемых органических растворителей и синтезируемых наночастиц металлов с целью определения границ его возможного применения.

Целью данной работы было получение и исследование золей серебра и палладия в среде ДМФА, стабилизированных простым полиэфиром Лапрол 5003, определение влияния концентрации стабилизатора на устойчивость получаемых золей, а также изучение процесса агрегации золя серебра

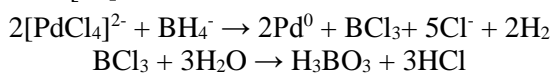
под действием электролита. Выбор указанных металлов был обусловлен тем, что наночастицы серебра и палладия являются достаточно удобными объектами для исследования, а в связи с их каталитическими свойствами и биологической активностью, препараты на их основе могут найти широкое применение в различных областях науки и техники, в частности, для создания эффективных катализаторов, содержащих в своем составе одновременно частицы этих двух металлов [13].

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения золей исследуемых металлов применялась стандартная методика, включающая растворение соли металла ( $\text{AgNO}_3$  или  $\text{K}_2[\text{PdCl}_4]$ ) в ДМФА, добавление необходимого количества стабилизатора и последующее восстановление катионов металла, приводящее к образованию наночастиц. Отличительной особенностью синтеза наночастиц серебра, проведенного в среде ДМФА, был отказ от использования какого-либо специального восстановителя, так как эту роль выполнял непосредственно растворитель, восстанавливающий катионы серебра согласно следующей схеме реакции [8-10]:



Методика синтеза наночастиц палладия была, в целом, аналогична способу получения наночастиц серебра, однако в данном случае было необходимо использовать дополнительный восстановительный реагент, в качестве которого применялся боргидрид натрия, восстанавливающий соли палладия (II) в среде ДМФА по следующей схеме реакции [14]:



В качестве стабилизатора применяли разветвленный простой полиэфир марки Лапрол 5003 (ОАО «Нижекамскнефтехим») – продукт алкольной полимеризации окиси этилена и окиси пропилена с глицерином ( $M = 5000 \pm 300$ ).

Оптические спектры поглощения полученных золей регистрировали на приборе UV 2109 (Leki) в кварцевых спектрофотометрических кюветках с толщиной поглощающего слоя 1 см. Исследования методом растровой электронной микроскопии производили на приборе JSM-7500F (JEOL) в ПРЭМ-режиме при ускоряющем напряжении 30 кВ. Гистограммы распределения частиц серебра и палладия по размеру строили при помощи программы анализа оптических изображений UTHSCSA ImageTool с последующей статистической обработкой полученных данных.

Для исследования процесса электролитической коагуляции наночастиц серебра к 10 мл полученного золя небольшими порциями по 0,01 мл прибавляли насыщенный раствор роданида калия ( $\text{KSCN}$ ) в ДМФА, регистрируя спектр поглощения системы после добавления каждой порции коагулянта.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восстановление катионов  $\text{Ag}^+$  в среде ДМФА сопровождается постепенным окрашиванием раствора в желтый цвет, характерный для золей серебра. Оптический спектр поглощения золя, полученного таким способом, содержит ярко выраженную полосу поверхностного плазмонного резонанса с максимумом при 414 нм. Следует отметить, что исследуемый золь при отсутствии светового воздействия сохраняет свою устойчивость в течение длительного времени, что подтверждается отсутствием каких-либо существенных изменений в его спектре поглощения.

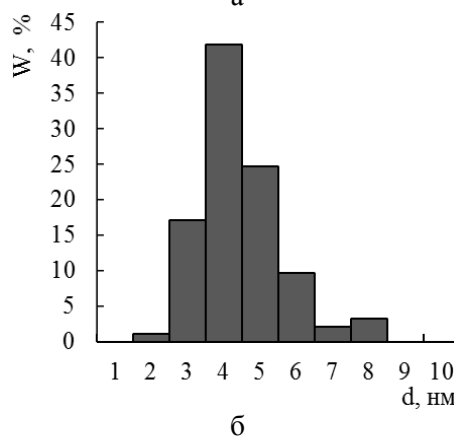
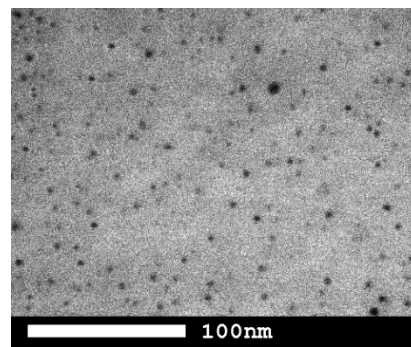


Рис. 1. Микрофотография наночастиц серебра, полученных в среде ДМФА, стабилизированных простым полиэфиром Лапрол 5003 (а), и гистограмма их распределения по размеру (б)  
Fig. 1. Electron micrograph (a) and size-distribution histogram (b) of silver nanoparticles, stabilized by polyether Laprol 5003 in DMF

Исследование полученного золя при помощи растровой электронной микроскопии позволило определить средний диаметр наночастиц серебра, который составил  $4 \pm 2$  нм (микрофотография наночастиц исследуемого золя и гистограмма их распределения по размеру представлены на рис. 1).

Таким образом, было установлено, что средний размер частиц, полученных в среде ДМФА несколько меньше, чем частиц, восстановленных боргидридным методом в изопропанолe с использованием аналогичного стабилизатора, который был равен  $14 \pm 5$  нм [11]. Основной причиной этого, по всей видимости, является тот факт, что ДМФА, являясь как средой, так и восстановительным реагентом, присутствует в постоянном избытке по отношению к катионам серебра, в связи с чем в системе одновременно образуется множество точек нуклеации. Результатом данного процесса является формирование значительного количества небольших частиц с достаточно узким распределением по размеру. При этом полиэфир, играющий роль стабилизатора, в значительной мере препятствует агрегации образовавшихся частиц.

Золи серебра являются достаточно удобными объектами для исследования агрегации наночастиц, так как данный процесс сопровождается характерными изменениями в их оптических спектрах поглощения [15, 16]. Агрегация гидрозолей серебра под действием различных факторов достаточно подробно изучена, в то время как для органозолой серебра этот процесс исследован в меньшей степени. Таким образом, существенный интерес представляло изучение устойчивости полученного золя по отношению к действию раствора электролита (рис. 2) с целью определения границ его устойчивости, а также получения дополнительной информации о стабилизации наночастиц серебра полиэфиром Лапрол-5003 в среде ДМФА. В качестве коагулянта использовался насыщенный раствор тиоцианата (роданида) калия, выбор которого был обусловлен высокой коагулирующей способностью тиоцианат-анионов по отношению к золям серебра [17] и хорошей растворимостью данного соединения в ДМФА ( $18,2$  г/100 г при  $25$  °С [18]). Как можно заметить, при добавлении к исследуемой системе раствора данного электролита, у полосы ППП снижается интенсивность, что свидетельствует об уменьшении концентрации одиночных наночастиц серебра в растворе, а постепенный рост поглощения в длинноволновой области вызван процессом их агрегации. Батохромный сдвиг максимума поглощения в длинноволновой области связан с постепенным увеличением размера агломератов, а общее снижение интенсивности данного поглощения указывает на то, что, достигнув определенного критического размера, агломераты наночастиц подвергаются седиментации. В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод о более высокой устойчивости исследуемого золя серебра в ДМФА к электролитической коагуляции по сравнению с золями серебра, полученными боргидридным способом в изопропанолe с использованием аналогичного стабилизатора [12].

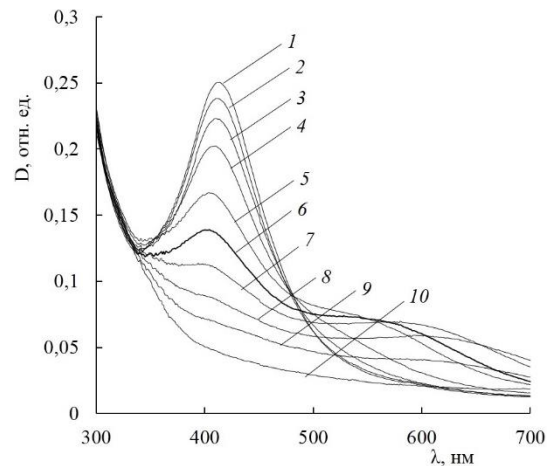


Рис. 2. Зависимость спектра поглощения золя серебра от объема добавленного раствора тиоцианата калия в ДМФА: 1 – исходный золь, 2 – 0,05 мл, 3 – 0,07 мл; 4 – 0,09 мл, 5 – 0,12 мл, 6 – 0,14 мл, 7 – 0,19 мл, 8 – 0,26 мл, 9 – 0,31 мл, 10 – 0,37 мл

Fig. 2. Dependence of absorption spectra of silver sol on added volume of KSCN solution in DMF: 1 – initial sol, 2 – 0.05 ml; 4 – 0.09 ml, 5 – 0.12 ml, 6 – 0.14 ml, 7 – 0.19 ml, 8 – 0.26 ml, 9 – 0.31 ml, 10 – 0.37 ml

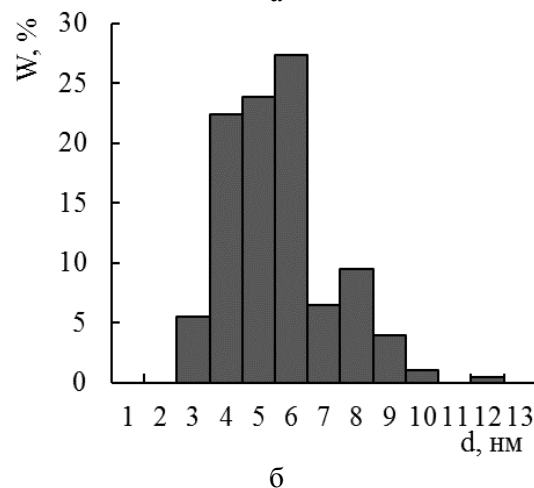
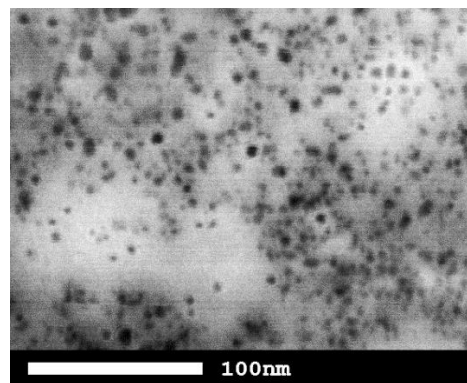


Рис. 3. Микрофотография наночастиц палладия, полученных при помощи боргидридного восстановления в ДМФА, стабилизированных простым полиэфиром Лапрол 5003 (а), и гистограмма их распределения по размеру (б)  
Fig. 3. Electron micrograph (a) and size-distribution histogram (b) of palladium nanoparticles, reduced by sodium borohydride in DMF and stabilized by polyether Laprol 5003

В спектре поглощения полученного золя палладия в ДМФА наблюдается ряд слабо выраженных полос при 273, 325 и 370 нм на фоне общего роста поглощения по мере продвижения в УФ-область. Несмотря на то, что спектр поглощения наночастиц палладия в водном растворе, полученных радиационно-химическим способом, содержит лишь одну полосу ППР в области 220 нм [19], эффект появления нескольких полос поглощения в ближней УФ области описан в работе [20], посвященной синтезу наночастиц палладия в обратных мицеллах. Микрофотография полученных частиц палладия и их гистограмма распределения по размеру представлены на рис. 3.

С целью определения влияния концентрации полиэфира на устойчивость получаемых золей серебра и палладия в ДМФА, исследовали серию образцов с различным содержанием стабилизирующего полиэфира. Результаты проведенных исследований представлены в таблице. Как можно заметить, золи палладия практически неустойчивы при концентрации Лапрола 5003 менее 2 об. %, что определяется по их обесцвечиванию и выпадению черного хлопьевидного осадка в течение 1 ч. При

повышении концентрации полиэфира до величины 3,9 об. % данный процесс протекает уже в течение 24 ч, что, тем не менее, так же является признаком неустойчивой системы. Резкий рост устойчивости золей наблюдается при повышении концентрации Лапрола до 5,7% (время агрегации такой системы составляло уже около 2-х месяцев). Как можно заметить, последующее увеличение концентрации приводит к дальнейшему повышению устойчивости золей. Так, при использовании Лапрола в концентрации более 16%, золи палладия сохраняют свою устойчивость более полугода, что подтверждается отсутствием существенных изменений в их спектрах поглощения в течение данного времени. Для золей серебра в ДМФА так же наблюдается резкое увеличение времени агрегации при повышении концентрации стабилизатора до 3,9 об. %. Следует отметить, что золи серебра обладают более высокой устойчивостью при равных концентрациях стабилизирующего полиэфира по сравнению с золями палладия (даже при минимальных значениях используемых концентраций устойчивость золей серебра превышала 14 сут).

Таблица

**Зависимость времени агрегации золей палладия и серебра в ДМФА от концентрации полиэфира Лапрол 5003**  
**Table. Aggregation time of palladium and silver sols in DMF as a function of the concentration of polyether Laprol 5003**

Концентрация полиэфира, об. %	1	2	3,9	5,7	7,4	9,1	16,7	28,6
Время агрегации золя палладия	менее 1 ч.	менее 1 ч.	24 ч.	около 60 сут.	около 75 сут.	около 90 сут.	более 180 сут.	более 180 сут.
Время агрегации золы серебра	15 сут.	28 сут.	около 60 сут.	около 90 сут.	более 180 сут.	более 180 сут.	-	-

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что использование простого полиэфира Лапрол 5003 позволяет получать устойчивые золи серебра и палладия в среде ДМФА с достаточно узким распределением частиц по размеру. Исследование процесса агрегации полученного золы серебра под действием электролита

показало его более высокую устойчивость по сравнению с золями серебра, полученными в среде изопропанола с использованием аналогичного стабилизатора. Изучение влияния концентрации стабилизирующего полиэфира на устойчивость золей серебра и палладия в ДМФА позволило установить, что увеличение концентрации полиэфира до 3,9 об. % в случае серебра и 5,7 об. % в случае палладия приводит к резкому повышению агрегативной устойчивости исследуемых систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы. *Усп. химии*. 2008. Т. 77. № 3. С. 242-269.
2. Егорова Е.М., Ревина А.А., Ростовщичкова Т.Н., Киселева О.И. Бактерицидные и каталитические свойства стабильных металлических наночастиц в обратных мицеллах. *Вестн. Моск. ун-та. Сер.2. Химия*. 2001. Т. 42. № 5. С. 332-338.
3. Александрова Г.П., Грищенко Л.А., Фадеева Т.В., Сухов Б.Г., Трофимов Б.А. Особенности формирования

## REFERENCES

1. Krutyakov Yu.A., Kudrinskiy A.A., Olenin A.Yu., Lisichkin G.V. Synthesis and properties of silver nanoparticles: achievements and prospects. *Russ. Chem. Rev.* 2008. V. 77. N 3. P. 233-357. DOI: 10.1070/RC2008v077n03ABEH003751.
2. Egorova E.M., Revina A.A., Rostovshchikova T.N., Kiseleva O.I. Bactericidal and catalytic properties of stable metallic nanoparticles in reverse micelles. *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser.2. Khimiya*. 2001. V. 42. N 5. P. 332-338 (in Russian).
3. Aleksandrova G.P., Grishchenko L.A., Fadeeva T.V., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Features of formation of silver

- нанобиокмпозитов серебра и золота с антимикробной активностью. *Нанотехника*. 2010. Т. 23. № 3. С. 34-42.
4. **Яшгулов Н.А., Ревина А.А., Лебедева М.В., Флид В.Р.** Каталитическая активность металлополимерных нанокомпозигов палладия в реакциях восстановления кислорода и окисления водорода. *Кинетика и катализ*. 2013. Т. 54. № 3. С. 336-339. DOI: 10.7868/S0453881113030179.
  5. **Губин С.П.** Наночастицы палладия. *Рос. хим. журн.* 2006. Т. 50. № 4. С. 46-54.
  6. **Валецкий П.М., Сульман М.Г., Бронштейн Л.М., Сульман Э.М., Сидоров А.И., Матвеева В.Г.** Наноразмерные катализаторы в тонком органическом синтезе – основа для разработки инновационных технологий в фармацевтической отрасли. *Рос. нанотехнол.* 2009. Т. 4. № 9-10. С. 94-108.
  7. **Зимон А.Д., Павлов А.Н.** Коллоидная химия наночастиц. М.: Научный мир. 2012. 224 с.
  8. **Pastoriza-Santos I., Liz-Marzan L.M.** Formation and stabilization of silver nanoparticles through reduction by N,N-dimethylformamide. *Langmuir*. 1999. V. 15. N 4. P. 948-951. DOI: 10.1021/la980984u.
  9. **Pastoriza-Santos I., Liz-Marzan L.M.** N,N-Dimethylformamide as a reaction medium for metal nanoparticle synthesis. *Adv. Funct. Mater.* 2009. V. 19. N 5. P. 679-688. DOI: 10.1002/adfm.200801566.
  10. **Кузнецова Н.П., Ермакова Т.Г., Поздняков А.С., Емельянов А.И., Прозорова Г.Ф.** Синтез и характеристика серебросодержащих полимерных нанокомпозигов на основе сополимера 1-винил-1,2,4-триазола с акрилонитрилом. *Изв. АН. Сер. хим.* 2013. Т. 62. № 11. С. 2509-2513.
  11. **Буклиский В.Д., Беспалов А.В.** Стабилизация наноразмерных частиц серебра в спиртовом растворе полиэфира. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. Вып. 3. С. 59-61.
  12. **Беспалов А.В., Буклиский В.Д.** Исследование процессов агрегации зольей серебра, стабилизированных простым полиэфиром Лапрол 5003 в изопропанол. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 4. С. 38-40.
  13. **Михайлов Ю.М., Кустов Л.М., Алешин В.В., Тарасов А.Л., Жемчугова Л.В.** О каталитической активности продуктов низкотемпературного волнового превращения энергетического материала, содержащих наночастицы серебра и палладия, в реакции гидрирования пиперилена. *Кинетика и катализ*. 2011. Т. 52. № 2. С. 286-290.
  14. **Мальцева Н.Н., Хаин В.С.** Борогидрид натрия. М.: Наука. 1985. 207 с.
  15. **Карпов С.В., Слабко В.В., Чиганова Г.А.** О причинах фотостимулированной агрегации зольей металлов. *Коллоид. журн.* 2002. Т. 64. № 4. С. 474-492.
  16. **Карпов С.В., Герасимов В.С., Грачев А.С., Исаев И.Л., Подавалова О.П., Слабко В.В.** Экспериментальные проявления взаимосвязи локальной структуры агрегатов наночастиц серебра и их спектров поглощения. *Коллоид. журн.* 2007. Т. 69. № 2. С. 190-200.
  17. **Szymanski M., Turner A.P., Porter R.** Electrochemical dissolution of silver nanoparticles and its application in metalloimmunoassay. *Electroanalysis*. 2010. V. 22. N 2. P. 191-198.
  18. **Flick E.W.** Industrial solvents handbook. Westwood, N.J.: Noyes Data Corp. 1998. 963 p.
  19. **Ершов Б.Г.** Наночастицы металлов в водных растворах: электронные, оптические и каталитические свойства. *Рос. хим. журн.* 2001. Т. 45. № 3. С. 20-30.
  20. **Ревина А.А., Кезиков А.Н., Ларионов О.Г., Дубенчук В.Т.** Синтез и физико-химические свойства стабильных наночастиц палладия. *Рос. хим. журн.* 2006. Т. 50. № 4. С. 55-60.
  - and gold nanobiocomposites with antimicrobial activity. *Nanotekhnika*. 2010. V. 23. N 3. P. 34-42 (in Russian).
  4. **Yashgulov N.A., Revina A.A., Lebedeva M.V., Flid V.R.**, Catalytic activity of polymer-palladium metal nanocomposites in oxygen reduction and hydrogen oxidation reactions. *Kinet. Catal.* 2013. V. 54. N 3. P. 322-325. DOI: 10.1134/S0023158413030178.
  5. **Gubin S.P.** Palladium nanoparticles. *Ross. Khim. Zhurn.* 2006. V. 50. N 4. P. 46-54 (in Russian).
  6. **Valetsky P.M., Sulman M.G., Bronstein L.M., Sulman E.M., Sidorov A.I., Matveeva V.G.** Nanosized catalysts in fine organic synthesis as a basic for developing innovative technologies in the pharmaceutical industry. *Nanotechnologies in Russia*. 2009. V. 4. N 9-10. P. 647-664. DOI: 10.1134/S1995078009090092.
  7. **Zimon A.D., Pavlov A.N.** Colloidal chemistry of nanoparticles. M.: Nauchnyi mir. 2012. 224 p.
  8. **Pastoriza-Santos I., Liz-Marzan L.M.** Formation and stabilization of silver nanoparticles through reduction by N,N-dimethylformamide. *Langmuir*. 1999. V. 15. N 4. P. 948-951. DOI: 10.1021/la980984u.
  9. **Pastoriza-Santos I., Liz-Marzan L.M.** N,N-Dimethylformamide as a reaction medium for metal nanoparticle synthesis. *Adv. Funct. Mater.* 2009. V. 19. N 5. P. 679-688. DOI: 10.1002/adfm.200801566.
  10. **Kuznetsova N.P., Ermakova T.G., Pozdnyakov A.S., Emel'yanov A.I., Prozorova G.F.** Synthesis and characterization of silver polymer nanocomposites of 1-vinyl-1,2,4-triazole with acrylonitrile. *Izv. AN Ser. Khim.* 2013. V. 62. N 11. P. 2509-2513 (in Russian). DOI: 10.1007/s11172-013-0364-y.
  11. **Bukliskiy V.D., Bespalov A.V.** Stabilization of silver nanoparticles in alcoholic solution of polyether. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2012. V. 55. N 3. P. 59-61 (in Russian).
  12. **Bespalov A.V., Bukliskiy V.D.** Aggregation of silver sols, stabilized by polyether Laprol 5003 in isopropanol solutions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 4. P. 38-40 (in Russian).
  13. **Mikhailov Yu.M., Kustov L.M., Aleshin V.V., Tarasov A.L., Zhemchugova L.V.** Silver and palladium nanoparticles-containing products of the low-temperature wave conversion of an energetic material: catalytic activity in piperylene hydrogenation. *Kinet. Catal.* 2011. V. 52. N 2. P. 277-281. DOI: 10.1134/S0023158411020121.
  14. **Mal'tseva N.N., Khain V.S.** Sodium borohydride. M.: Nauka. 1985. 207 p. (in Russian)
  15. **Karpov S.V., Slabko V.V., Chiganova G.A.** Physical principles of the photostimulated aggregation of metal sols. *Colloid J.* 2002. V. 64. N 4. P. 425-442.
  16. **Karpov S.V., Gerasimov V.S., Grachev A.S., Isaev I.L., Podavalova O.P., Slabko V.V.** Experimental manifestations of the correlation between the local structure of silver nanoparticle aggregates and their absorption spectra. *Colloid J.* 2007. V. 69. N 2. P. 170-179.
  17. **Szymanski M., Turner A.P., Porter R.** Electrochemical dissolution of silver nanoparticles and its application in metalloimmunoassay. *Electroanalysis*. 2010. V. 22. N 2. P. 191-198.
  18. **Flick E.W.** Industrial solvents handbook. Westwood, N.J.: Noyes Data Corp. 1998. 963 p.
  19. **Ershov B.G.** Metal nanoparticles in aqueous solutions: electronic, optical and catalytic properties. *Ross. Khim. Zhurn.* 2001. V. 45. N 3. P. 20-30 (in Russian).
  20. **Revina A.A., Kezikov A.N., Larionov O.G., Dubenchuk V.T.** Synthesis and physicochemical properties of stable palladium nanoparticles. *Ross. Khim. Zhurn.* 2006. V. 50. N 4. P. 55-60 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 20.07.2017  
Принята к опубликованию (Accepted) 10.12.2018