

УДК 661.691 + 620.3

Оригинальная статья

Разработка и оптимизация методики синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой

А.А. Блинова, А.А. Гвозденко, З.А. Рехман, А.В. Блинов, М.А. Тараванов,
Е.Д. Назаретова

*ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
agvozdenco@ncfu.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.758

Аннотация: В результате проведенной работы разработана и оптимизирована методика синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту, в качестве восстановителя – аскорбиновую кислоту, в качестве стабилизатора – метилцеллюлозу. Для оптимизации методики синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, проводили многофакторный эксперимент. Установлено, что для синтеза наночастиц селена с наименьшим средним гидродинамическим радиусом молярная концентрация селенистой кислоты в растворе должна находиться в диапазоне от 0,0036 до 0,1033 моль/л, масса метилцеллюлозы – от 3,0 до 3,985 г, молярная концентрация аскорбиновой кислоты – от 1,52 до 2,12 моль/л. Показано, что *pH* среды, заряд и концентрация ионов натрия и бария не влияют на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, однако при воздействии ионов железа радиус увеличивается со 150 до 270 нм. Установлено, что увеличение концентрации и заряда анионов оказывает значительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. При увеличении концентрации ионов хлора с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц происходило с 143 до 156 нм, при увеличении концентрации сульфат ионов с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц – с 165 до 6129 нм, при увеличении концентрации фосфат ионов с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц – с 149 до 17000 нм.

Ключевые слова: селен, наночастицы, метилцеллюлоза, средний гидродинамический радиус, оптимизация.

1. Введение

Селен является эссенциальным микроэлементом, который необходим для жизнедеятельности живых организмов [1, 2]. Он играет важную роль в укреплении иммунной системы, участвует в образовании гормонов щитовидной железы, проявляет антиоксидантные свойства [3-5].

В наноразмерной форме селен обладает высокой биологической активностью, биодоступностью и низкой токсичностью. Благодаря этим свойствам наночастицы селена находят свое применение в различных отраслях науки и техники, в частности, в сельскохозяйственной, медицинской, парфюмерно-косметической [6, 7]. Использование наночастиц селена в удобрениях обусловлено низкой токсичностью и пролонгированным действием по сравнению с ионной формой, что обеспечивает повышение поглощения минеральных веществ, углеводного

© А.А. Блинова, А.А. Гвозденко, З.А. Рехман, А.В. Блинов, М.А. Тараванов, Е.Д. Назаретова, 2024

обмена, фотосинтеза и дыхания клеток растений [8]. Наноразмерные формы селена способны улучшать клеточную функцию кожи, ускоряя ее регенерацию, повышают выработку коллагена, и минимизируют фотоповреждения от солнца [9]. В медицине наночастицы селена применяются в качестве биологически активных добавок, контрастных агентов для флуоресцентной томографии [10, 11]. Кроме того, наночастицы селена могут быть применены для создания тераностических систем, которые объединяют диагностические и терапевтические функции [12].

Стоит отметить, что для применения в промышленности наночастицы селена необходимо стабилизировать для повышения их агрегативной и коллоидной стабильности. В связи с этим актуальной задачей является оптимизация методики синтеза наночастиц селена, которая включает подбор стабилизатора и определение его влияния на свойства наночастиц. Таким образом, целью данной работы является разработка и оптимизация методики синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой.

2. Экспериментальная часть

Синтез наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, проводили по следующей методике: навески селенистой кислоты и метилцеллюлозы растворяли в 10 см³ дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при 500 об/мин в течение 5 минут. В другой колбе навеску аскорбиновой кислоты растворяли в 5 см³ дистиллированной воды и перемешивали на магнитной мешалке при 500 об/мин в течение 5 минут. Полученный раствор аскорбиновой кислоты добавляли в растворы селенистой кислоты и метилцеллюлозы и перемешивали образец на магнитной мешалке при 500 об/мин в течение 10 минут.

Для оптимизации методики синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, проводили многофакторный эксперимент, который включал в себя 3 входных параметра. В качестве входных параметров рассматривали массу селенистой кислоты, массу метилцеллюлозы, массу аскорбиновой кислоты. В качестве выходного параметра выступал средний гидродинамический радиус R наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. Для проведения многофакторного эксперимента варьировали входные параметры согласно Таблицы 1.

Измерение среднего гидродинамического радиуса проводили методом динамического рассеяния света на установке «Photocor-Complex» (ООО «Антекс-97», Россия). Компьютерную обработку полученных данных

осуществляли с использованием компьютерного программного обеспечения DynaLS [13, 14].

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программы Statistica 12.0 [15] и пакета прикладных программ Statistica Neural Networks [16].

Таблица 1. Уровни варьирования входных параметров для проведения многофакторного эксперимента.

Название параметра	Уровни варьирования переменных		
Масса селенистой кислоты, г	0,0071	0,0570	0,4560
Масса метилцеллюлозы, г	0,0620	0,4960	3,9850
Масса аскорбиновой кислоты, г	0,0870	0,6990	5,5920

3. Обсуждение результатов

На первом этапе исследований проводили оптимизацию методики синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. Полученные в результате обработки экспериментальных данных поверхности отклика представлены на рис. 1-3.

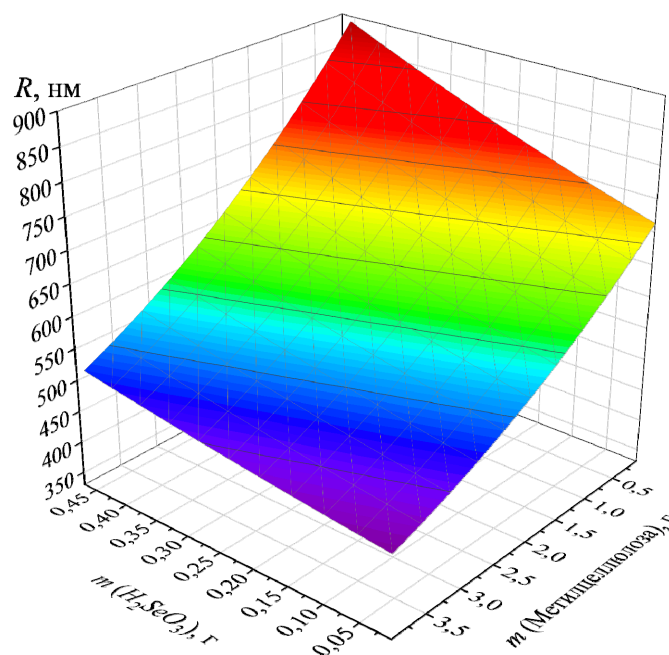


Рис. 1. Поверхность отклика среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от массы селенистой кислоты и массы метилцеллюлозы.

Анализ рис. 1-3 показал, что на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, оказывают значительное влияние все входные параметры (масса селенистой кислоты, масса метилцеллюлозы, масса аскорбиновой кислоты). Установлено, что оптимальными параметрами синтеза наночастиц селена, при которых наблюдается наименьший средний гидродинамический радиус, являются:

- масса селенистой кислоты от 0,0071 до 0,2 г, что соответствует молярной концентрации селенистой кислоты в растворе от 0,0036 до 0,1033 моль/л;
- масса метилцеллюлозы от 3,0 до 3,985 г;
- масса аскорбиновой кислоты от 4,5 до 5,592 г, что соответствует молярной концентрации аскорбиновой кислоты в растворе от 1,52 до 2,12 моль/л.

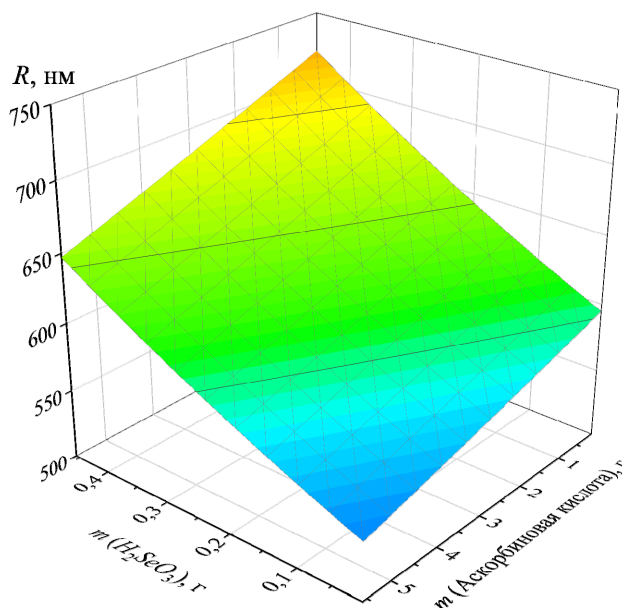


Рис. 2. Поверхность отклика среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от массы селенистой кислоты и массы аскорбиновой кислоты.

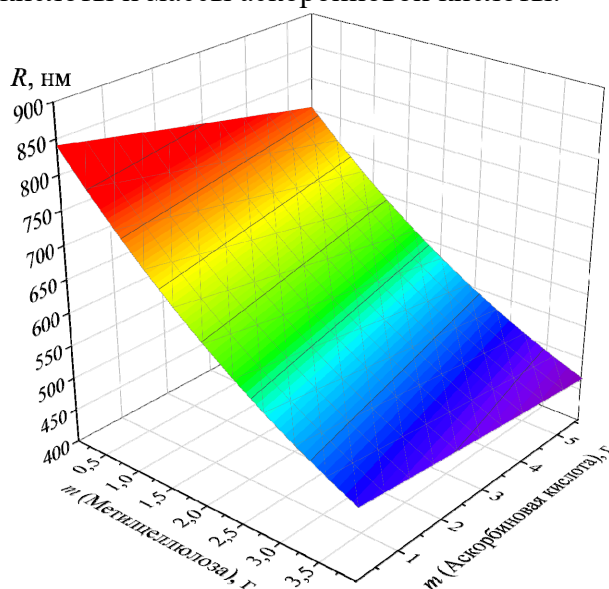


Рис. 3. Поверхность отклика среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от массы метилцеллюлозы и массы аскорбиновой кислоты.

На следующем этапе исследовали влияние pH и ионной силы раствора на средний гидродинамический радиус наночастиц селена,

стабилизированных метилцеллюлозой. Полученные зависимости представлены на рис. 4-6.

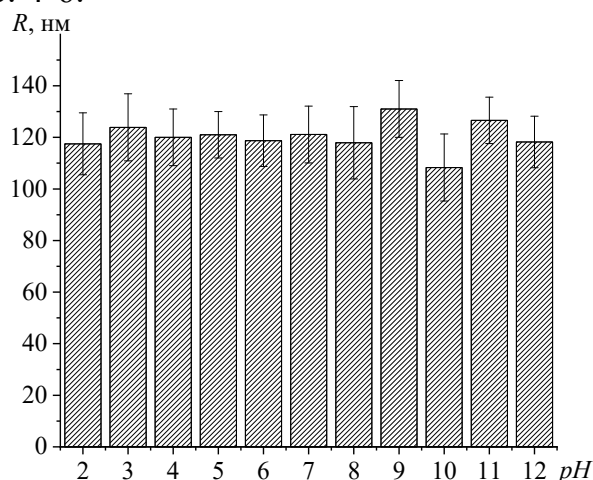


Рис. 4. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от pH среды.

Анализ рис. 4 показал, что pH среды незначительно влияет на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. Средний гидродинамический радиус находится в диапазоне значений от 108 до 126 нм.

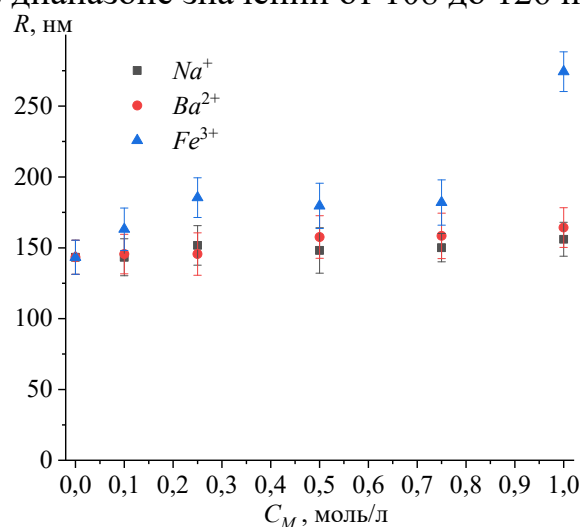


Рис. 5. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от концентрации и заряда катионов.

Анализ рис. 5 и 6 показал, что заряд и концентрация катионов не оказывают влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, однако при воздействии ионов железа радиус увеличивается со 150 до 270 нм.

Увеличение концентрации и заряда анионов оказывает значительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. При увеличении концентрации Cl^- с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц

происходило с 143 до 156 нм, при увеличении концентрации SO_4^{2-} с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц – с 165 до 6129 нм, при увеличении концентрации PO_4^{3-} с 0,1 до 1 моль/л увеличение среднего гидродинамического радиуса частиц – с 149 до 17000 нм. Полученные данные согласуются с правилом Шульце-Гарди [17]. Увеличение концентрации и заряда анионов вызывает коагуляцию наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. При этом увеличение концентрации и заряда катионов не оказывает значительного влияния на размер частиц.

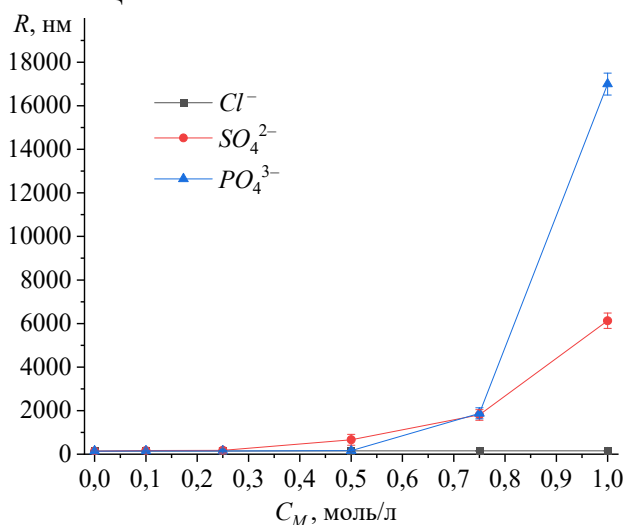


Рис. 6. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от концентрации и заряда анионов.

4. Заключение

В результате проведенной работы разработана и оптимизирована методика синтеза наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой. Установлено, что для синтеза наночастиц селена с наименьшим средним гидродинамическим радиусом частиц молярная концентрация селенистой кислоты в растворе должна находиться в диапазоне от 0,0036 до 0,1033 моль/л, масса метилцеллюлозы – от 3,0 до 3,985 г, молярная концентрация аскорбиновой кислоты – от 1,52 до 2,12 моль/л. Показано, что pH среды, заряд и концентрация положительно заряженных ионов незначительно влияют на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой, однако увеличение концентрации и заряда анионов оказывает значительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных метилцеллюлозой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-16-00120, <https://rscf.ru/project/23-16-00120/>).

Библиографический список:

1. **Бурцева, Т.И.** Селен: эссенциальный микроэлемент (обзор) / Т.И. Бурцева, О.И. Бурлуцкая // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 2 (52-2). – С. 7-9.
2. **Ахмеджанова, З.И.** Макро-и микроэлементы в жизнедеятельности организма и их взаимосвязь с иммунной системой (обзор литературы) / З.И. Ахмеджанова, Г.К. Жиемурадова, Е.А. Данилова, Д.А. Каримов // Журнал теоретической и клинической медицины. – 2020. – № 1. – С. 16-21.
3. **Салимадзе, Э.А.О.** Селен и его биологическая роль в живых организмах / Э.А.О. Салимадзе, О.В. Кашарная, Т.С. Ермилова, М.А. Самбурава // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 80-3. – С. 39-45. DOI: 10.18411/trnio-12-2021-120.
4. **Варламова, Е.Г.** Уникальность природы микроэлемента селена и его ключевые функции / Е.Г. Варламова, В.Н. Мальцева // Биофизика. – 2019. – № 4. – С. 646-660. DOI: 10.1134/S0006302919040021.
5. **Burk, R.F.** Regulation of selenium metabolism and transport / R.F. Burk, K.E. Hill // Annual Review of Nutrition. – 2015. – V. 35. – P. 109-134. DOI: 10.1146/annurev-nutr-071714-034250.
6. **Скоринова, К.Д.** Перспектива создания лекарственных препаратов на основе наночастиц селена (обзор) / К.Д. Скоринова, В.В. Кузьменко, А.И. Василенко // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2020. – Т. 9. – № 2. – С. 33-44.
7. **Шурыгина, И.А.** Нанокмозиты селена-перспективы применения в онкологии / И.А. Шурыгина, М.Г. Шурыгин // Вестник новых медицинских технологий. – 2020. – Т. 27. – № 1. – С. 81-86. DOI: 10.24411/1609-2163-2020-16517
8. **Егоров, Н.П.** Разработка и проведение экспериментальной оценки эффективности применения в растениеводстве новых видов удобрений, полученных с использованием нанотехнологий / Н.П. Егоров, О.Д. Шафронов, Д.Н. Егоров, Е.В. Сулейманов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2008. – №. 6. – С. 94-99.
9. **Геляхов, И.М.** Создание и исследование космецевтического средства с биологически активными композициями наноселена / И.М. Геляхов, Д.В. Компанцев, И.М. Привалов, Э.Ф. Степанова // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – № 5. – Ст. № 73. – 8 с.
10. **Perumal, S.** Selenium nanoparticle synthesis from endangered medicinal herb (*Enicostema axillare*) / S. Perumal, M.V.G. Samy, D. Subramanian // Bioprocess and Biosystems Engineering. – 2021. – V. 44. – I. 9. – P. 1853-1863. DOI:10.1007/s00449-021-02565-z.
11. **Кушнир, С.Е.** Процессы самоорганизации микро-и наночастиц в феррожидкостях / С.Е. Кушнир, П.Е. Казин, Л.А. Трусков, Ю.Д. Третьяков // Успехи химии. – 2012. – Т. 81. – Вып. 6. – С. 560-570. DOI: 10.1070/RC2012v081n06ABEH004250.
12. **Kipper, A.I.** Synthesis and properties of organo-inorganic composites based on daunomycin, polyvinylpyrrolidone, and selenium nanoparticles / A.I. Kipper, L.N. Borovikova, I.V. Yakovlev, O.A. Pisarev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2018. – V. 91. – I. 1. – P. 121-126. DOI: 10.1134/S1070427218010196.
13. **Кравцов, А.А.** Исследование люминесценции YAG: Се, допированного наночастицами серебра / А.А. Кравцов, И.С. Чикулина, Д.С. Вакалов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 220-227. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.220.
14. **Ясная, М.А.** Определение оптимальных режимов измерения размера коллоидных частиц методами фотонно-корреляционной и акустической спектроскопии / М.А. Ясная, А.В. Блинов, А.А. Блинова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 232-242. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.232.
15. STATISTICA 12.0. – Режим доступа: <https://statistica.software.informer.com/12.0/>. – 02.08.2024.
16. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / под ред. В.П. Боровикова; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.
17. **Волкова, А.В.** Фотометрическое исследование кинетики коагуляции гидрозоля TiO₂ в растворах электролитов / А.В. Волкова, Е.В. Голикова, Л.Э. Ермакова // Коллоидный журнал. – 2012. – Т. 74. – № 1. – С. 35-40.

References:

1. Burceva T.I., Selen: essentsial'nyj mikroelement (obzor) [Selenium: an essential trace element], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of the Orenburg State University], 2006, no. 2 (52-2), pp. 7-9. (In Russian).
2. Akhmedzhanova Z.I., Zhiemuratova G.K., Danilova E.A., Karimov D.A. Makro-i mikroelementy v zhiznedeyatel'noyi organizma i ikh vzaimosvyaz' s immunnymi sistemami (obzor literatury) [Macro- and

- microelements in the vital activity of the organism and their relationship with the immune system (literature review)], *Zhurnal teoreticheskoy i klinicheskoy meditsiny [Journal of Theoretical and Clinical Medicine]*, 2020, no. 1, pp. 16-21. (In Russian).
3. Salimadze E.A.O., Kasharnaya O.V., Ermilova T.S., Samburova M.A. Selen i ego biologicheskaya rol' v zhivyykh organizmakh [Selenium and its biological role in living organisms], *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya [Trends in the development of science and education]*, 2021, no. 80-3, pp. 39-45. (In Russian). DOI: 10.18411/trnio-12-2021-120.
4. Varlamova E.G., Maltseva V.N. Micronutrient selenium: uniqueness and vital functions, *Biophysics*, 2019, vol. 64, issue 4, pp. 510-521. DOI: 10.1134/S0006350919040213.
5. Burk R.F., Hill K.E. Regulation of selenium metabolism and transport, *Annual Review of Nutrition*, 2015, vol. 35, pp. 109-134. DOI: 10.1146/annurev-nutr-071714-034250.
6. Skorinova K.D., Kuzmenko V.V., Vasilenko I.A. Perspektiva sozdaniya lekarstvennykh preparatov na osnove nanochastits selena (obzor) [The prospect of creating medicines based on selenium nanoparticles (review)], *Razrabotka i registraciya lekarstvennykh sredstv [Drug development & registration]*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 33-44. (In Russian).
7. Shurygina I.A., Shurygin M.G. Selenium nanocomposites - the prospects of application in oncology [Selenium nanocomposite promising applications in oncology], *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy [Journal of New Medical Technologies]*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 81-86. DOI: 10.24411/1609-2163-2020-16517 (In Russian).
8. Egorov N.P., Shafronov O.D., Egorov D.N., Suleimanov E.V. Development and experimental estimation of application efficiency of new nanotechnology fertilizers in crop production [Development and experimental evaluation of the effectiveness of using new types of inventions in crop production obtained using nanotechnology], *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]*, 2008, no. 6, pp. 94-99. (In Russian).
9. Geljahov I.M., Kompantsev D.V., Privalov I.M., Stepanova E.F. Sozdanie i issledovanie kosmetsevticheskogo sredstva s biologicheski aktivnymi kompozitsiyami nanoselena [Creation and investigation of a cosmetrovic means with biologically active compositions of a nanoselene], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]*, 2017, no. 5, art. no. 73, 8 p. (In Russian).
10. Perumal S., Samy, M.V.G. Subramanian D., Selenium nanoparticle synthesis from endangered medicinal herb (*Enicostema axillare*), *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021, vol. 44, issue 9, pp. 1853-1863. DOI: 10.1007/s00449-021-02565-z.
11. Kushnir S.E., Kazin P.E., Trusov L.A., Tretyakov Yu.D. Self-organization of micro- and nanoparticles in ferrofluids, *Russian Chemical Reviews*, 2012, vol. 81, issue 6, pp. 560570, DOI: 10.1070/RC2012v081n06ABEH004250.
12. Kipper A.I., Borovikova L.N., Yakovlev I.V., Pisarev O.A. Synthesis and properties of organo-inorganic composites based on daunomycin, polyvinylpyrrolidone, and selenium nanoparticles, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2018, vol. 91, issue 1, pp. 121-126. DOI: 10.1134/S1070427218010196.
13. Kravtsov A.A., Chikulina I.S., Vakalov D.S. et al. Issledovanie lyuminestsentsii YAG: Ce, dopirovannogo nanochastitsami serebra [Luminescence of YAG: Ce doped with silver nanoparticles], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 220-227. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.220.
14. Yasnaya M.A., Blinov A.V., Blinova A.A. et al. Opredelenie optimal'nykh rezhimov izmereniya razmera kolloidnykh chastits metodami fotonno-korrelyatsionnoy i akusticheskoy spektroskopii [Determination of optimal modes for measuring the size of colloidal particles by photon-correlation spectroscopy and acoustic spectroscopy], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 232-242. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.232.
15. STATISTICA 12.0. Available at: <https://statistica.software.informer.com/12.0/> (accessed 02.08.2024).
16. Nejronnye seti. STATISTICA Neural Networks: Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh [Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and technologies of modern data analysis], ed. by V.P. Borovikov, 2nd ed. Moscow, Goryachaya Liniya – Telecom Publ., 2008, 392 p. (In Russian).
17. Volkova A.V., Golikova E.V., Ermakova L.E. Photometric study of the kinetics of TiO₂ hydrosol coagulation in electrolyte solutions, *Colloid Journal*, 2012, vol. 74, issue 1, pp. 32-37. DOI: 10.1134/S1061933X11060184.

**Development and optimization of the synthesis procedure of selenium nanoparticles stabilized
by methylcellulose**

A.A. Blinova, A.A. Gvozdenko, Z.A. Rekhman, A.V. Blinov, M.A. Taravanov, E.D. Nazaretova
North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.758

Abstract: As a result of the work performed, a method for synthesizing selenium nanoparticles stabilized with methylcellulose was developed and optimized. Selenious acid was used as a selenium-containing precursor, ascorbic acid as a reducing agent, and methylcellulose as a stabilizer. A multifactorial experiment was conducted to optimize the method for synthesizing selenium nanoparticles stabilized with methylcellulose. It was found that for the synthesis of selenium nanoparticles with the smallest average hydrodynamic radius, the molar concentration of selenious acid in the solution should be in the range from 0,0036 to 0,1033 mol/l, the mass of methylcellulose – from 3,0 to 3,985 g, the molar concentration of ascorbic acid – from 1,52 to 2,12 mol/l. It is shown that pH of the medium, charge and concentration of sodium and barium ions do not affect the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles stabilized with methylcellulose. However, when exposed to iron ions, the radius increases from 150 to 270 nm. It is established that an increase in the concentration and charge of anions has a significant effect on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles stabilized with methylcellulose. With an increase in the concentration of chlorine ions from 0,1 to 1 mol/l, an increase in the average hydrodynamic radius of particles occurred from 143 to 156 nm, with an increase in the concentration of sulfate ions from 0,1 to 1 mol/l, an increase in the average hydrodynamic radius of particles – from 165 to 6129 nm, with an increase in the concentration of phosphate ions from 0,1 to 1 mol/l, an increase in the average hydrodynamic radius of particles – from 149 to 17000 nm.

Keywords: *selenium, nanoparticles, methylcellulose, average hydrodynamic radius, optimization.*

Блинова Анастасия Александровна – к.т.н., доцент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Гвозденко Алексей Алексеевич – ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Рехман Зафар Абдулович – ассистент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Блинов Андрей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Тараванов Максим Александрович – лаборант кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

Назаретова Екатерина Дмитриевна – лаборант кафедры физики и технологии наноструктур и материалов физико-технического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Anastasia A. Blinova – Ph. D., Docent, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University

Alexey A. Gvozdenko – Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Material, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University.

Zafar A. Rehman – Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Material, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University.

Andrey. V. Blinov – Ph. D., Docent, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University.

Maxim A. Taravanov – Laboratory Assistant, of the Department of Physics and Technology of Nanostructures and Material, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University

Ekaterina D. Nazaretova – Laboratory Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Material, Faculty of Physics and Technology, North Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 20.08.2024; после рецензирования/revised: 29.09.2024; принята/accepted 02.10.2024.