

**СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ
НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА
В СРЕДЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ НЕИОНОГЕННЫХ
ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

А.В. Блинов

blinov.a@mail.ru

З.А. Рехман

zafrehman1027@gmail.com

А.А. Гвозденко

gvozdenco.1999a@gmail.com

А.Б. Голик

lexgooldman@gmail.com

М.А. Колодкин

koliduk@yandex.ru

Д.Д. Филиппов

dio_5@mail.ru

СКФУ, Ставрополь, Российская Федерация

Аннотация

Работа направлена на синтез и изучение стабилизации наночастиц селена в среде водорастворимых неионогенных поверхностно-активных веществ. Наночастицы селена получены методом химического восстановления в водной среде. В качестве селенсодержащего прекурсора использована селенистая кислота, стабилизаторами являлись неионогенные поверхностно-активные вещества, а восстановителем — аскорбиновая кислота. Определено оптимальное неионогенное поверхностно-активное вещество для стабилизации наночастиц селена. Полученные образцы исследованы методами динамического рассеяния света, акустической и электроакустической спектроскопии. Установлено, что наименьшим радиусом (16 нм) обладают образцы наноселена, стабилизированные *Tween 80*, а дзета-потенциал составил 17,91 мВ. Образцы исследованы с использованием просвечивающей электронной микроскопии. Результаты анализа полученных микрофотографий показали, что наночастицы селена, стабилизированные *Tween 80*, имеют сферическую форму, а радиус принадлежит диапазону значений 12...22 нм. Изучено влияние времени экспозиции на агрегативную устойчивость наночастиц селена. Полученные результаты показали, что

Ключевые слова

Наночастицы селена, неионогенные поверхностно-активные вещества, Tween 80, средний гидродинамический радиус, просвечивающая электронная микроскопия

спустя пять недель экспозиции в образце сформировались агрегаты, а средний радиус частиц увеличился в 2,8 раза — с 16 до 45 нм

Поступила 19.07.2023

Принята 16.10.2023

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-16-00120, <https://rscf.ru/project/23-16-00120/>). Исследование выполнено на оборудовании Центра коллективного пользования СКФУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта РФ 2296.61321X0029)

Введение. Наночастицы активно используют в качестве терапевтических агентов в косметической, пищевой и фармацевтической промышленности, а также как материал для таргетной доставки лекарств [1–3]. Вследствие их высокодисперсного состояния и большой удельной площади поверхности наночастицы являются актуальным материалом в любой сфере деятельности [4, 5].

Среди таких структур наиболее распространенными являются наночастицы селена. Селен — жизненно необходимый микроэлемент в организме человека и животных, который участвует в синтезе ДНК, обмене веществ и защите от инфекций [6, 7]. Недостаток селена приводит к ослаблению иммунитета, различным болезням и неврологическим расстройствам [8–10]. Таким образом, внедрение наночастиц селена в различные отрасли промышленности позволит решить проблему недостатка этого элемента в селендефицитных территориальных сегментах.

Один из самых распространенных методов синтеза наночастиц селена — химическое восстановление в водной среде [11]. Восстановителями могут быть вещества, способные снизить степень окисления (аскорбиновая кислота, цистеин и др.) [12–14]. Полученные этим методом частицы являются агрегативно неустойчивыми, поэтому для контроля их размера используют вещества — стабилизаторы, например, поливиниловый спирт, фолиевую кислоту, поливинилпирролидон (ПВП), различные биополимеры и поверхностно-активные вещества (ПАВ) [15–17]. Так, в современных работах использование хитозана в качестве стабилизатора позволило получить частицы размерами 136...195 нм [18]. В свою очередь частицы меньшего размера (45 нм) получены с использованием в качестве стабилизатора ПВП [19].

Наиболее подходящими веществами для стабилизации наночастиц селена являются ПАВ. По классификации ПАВ можно подразделить на катионактивные, анионактивные, амфолитные и неионогенные. Одни из самых распространенных ПАВ — неионогенные, что обусловлено их оптимальными значениями гидрофильно-липофильного баланса,

а также низкой токсичностью [20]. Так, наночастицы селена, стабилизированные неионогенными ПАВ, могут использоваться как в пищевой и парфюмерно-косметической промышленности, так и в медицинских целях [21–24].

Цель работы — синтез и изучение стабилизации наночастиц селена в среде водорастворимых неионогенных ПАВ.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Синтез наночастиц селена, стабилизированных неионогенными ПАВ, проводили методом химического восстановления в водной среде. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту («ЛенРеактив», х.ч, Российская Федерация), в качестве восстановителя — аскорбиновую кислоту («ЛенРеактив», х.ч, Российская Федерация), а стабилизаторами выступали неионогенные ПАВ: *Tween 80* (полисорбат) («ЛенРеактив», Российская Федерация), «Твалам П18» (кокамидопропиламиноксид) (ГК ЕТС, Российская Федерация), «Твалам 24» (алкилдиметиламиноксид) (ГК ЕТС, Российская Федерация), «Твалам ПЭГ-7» (глицерил кокоат) (ГК ЕТС, Российская Федерация), *Rokanol* (этокселированный спирт) (ГК ЕТС, Российская Федерация), ПЭГ-40 (гидрогенизированное касторовое масло) (ГК ЕТС, Российская Федерация), *APG-1214* (алкилполиглюкозид С12-С14) (ГК ЕТС, Российская Федерация), неол АФ 9-12 (ГК ЕТС, Российская Федерация). Схема синтеза приведена на рис. 1.

Синтез проводили при постоянных перемешивании, температуре и атмосферном давлении. Средний гидродинамический радиус полученных образцов исследовали методом динамического рассеяния света на приборе *Photocor-Complex* («Антекс-97», Москва, Российская Федерация).

Электрокинетический потенциал (дзета-потенциал) изучали методом акустической и электроакустической спектроскопии на приборе *DT-1202* (*Dispersion Technology Inc.*, Нью-Йорк, США).

Форму и размер частиц определяли методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе *Tecnai G2 30F STWIN STEM* (*FEI Company*, Хиллсборо, США).

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием прикладных пакетов программ *OriginPro 2021* и *STATISTICA 12*.

Результаты исследований и их обсуждение. На первом этапе изучали влияние вида неионогенного ПАВ на размер и дзета-потенциал наночастиц селена. Средний гидродинамический радиус и электрокинетический потенциал полученных образцов измеряли на следующий день после синтеза. Результаты приведены в таблице и на рис. 2.

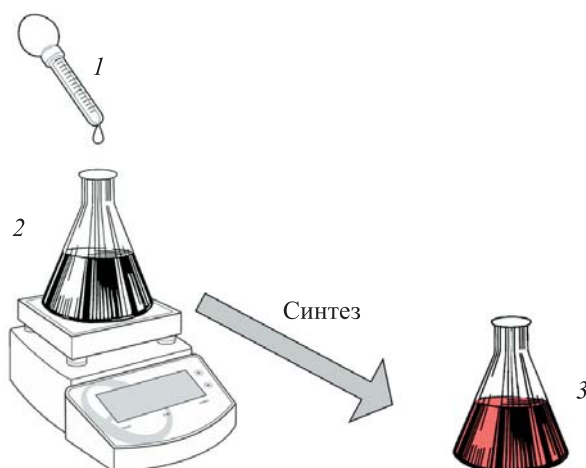
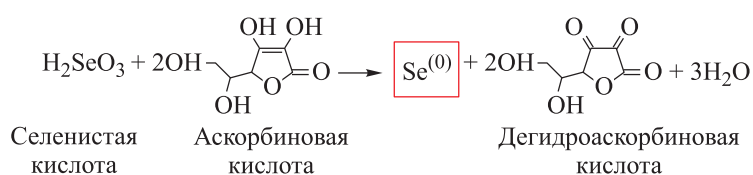


Рис. 1. Схема синтеза наночастиц селена, стабилизированных неионогенными ПАВ:

1 — раствор аскорбиновой кислоты; 2 — раствор селенистой кислоты H_2SeO_3 + неионогенное ПАВ; 3 — наночастицы селена, стабилизированные неионогенными ПАВ; параметры синтеза:

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}, V = 850 \text{ мин}^{-1}, t = 15 \text{ мин}$$

Характеристики полученных образцов наночастиц селена

ПАВ	Средний гидродинамический радиус частиц, нм	Электрокинетический потенциал, мВ
<i>Tween 80</i>	16 ± 7	17,91
«Твалам 24»	21 ± 9	8,26
«Твалам ПЭГ-7»	84 ± 13	5,14
<i>Rokanol</i>	20 ± 6	-14,25
ПЭГ-40	105 ± 21	-2,89
<i>APG-1214</i>	207 ± 34	3,01
Неонол АФ 9-12	18 ± 8	5,91

Результаты анализа показали, что вид неионогенного ПАВ значительно влияет на размер и дзета-потенциал наночастиц селена. Установлено, что образцы, стабилизированные ПЭГ-7, ПЭГ-40 и *APG-1214*, имеют наибольший размер частиц (80...210 нм) и не обладают агрегативной устойчивостью. Это связано с низкой по модулю величиной дзета-

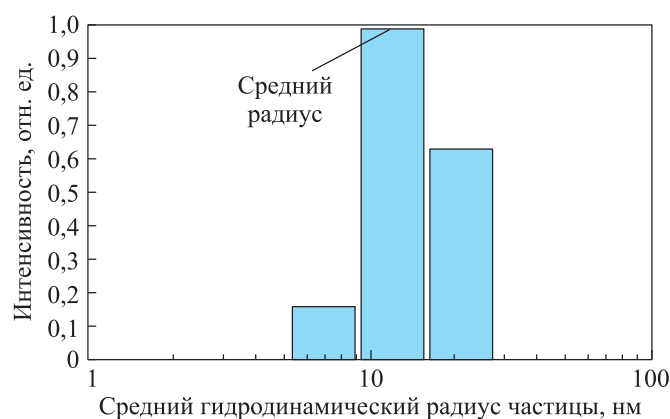


Рис. 2. Гистограмма распределения среднего гидродинамического радиуса частиц селена, стабилизированных *Tween 80*

потенциала ($|\xi| \leq 5,14$ мВ). В свою очередь наименьшим радиусом обладают наночастицы селена, стабилизированные *Tween 80*. Гистограмма на рис. 2 имеет мономодальный характер распределения по размерам. Таким образом, средний гидродинамический радиус частиц и электрокинетический потенциал для образца наночастиц селена, стабилизированных *Tween 80*, составили 16 нм и 17,91 мВ соответственно.

На втором этапе образцы исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Микрофотографии приведены на рис. 3.

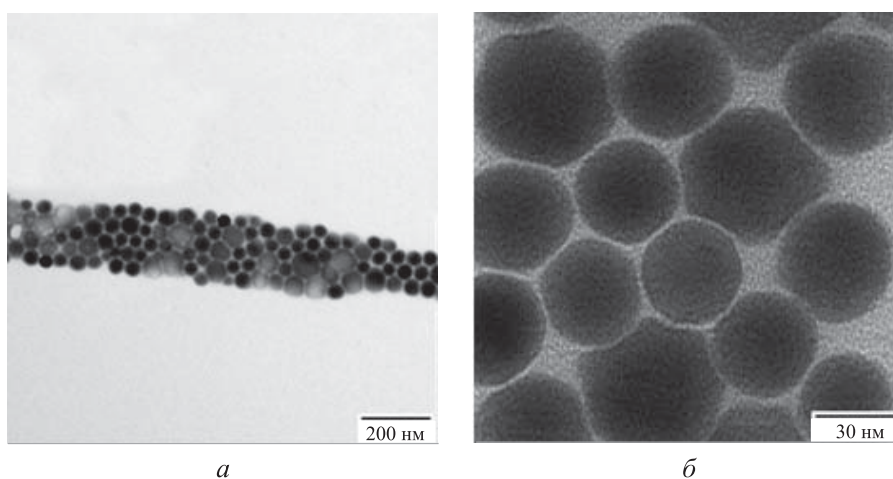


Рис. 3. ПЭМ-микрофотографии наночастиц селена, стабилизированных *Tween 80*:

a — светлорольное изображение; *b* — светлорольное изображение при высоком разрешении

Результаты анализа полученных ПЭМ-микрофотографий показали, что в образце наноселена, стабилизированного *Tween 80*, формируются частицы сферической формы. Образец представлен мономодальным распределением по размерам. Так, гидродинамический радиус частиц принадлежит диапазону значений 12...22 нм, что согласуется с результатами спектроскопии динамического рассеяния света.

На третьем этапе изучали влияние времени экспозиции на агрегативную устойчивость наноселена. Для этого каждый седьмой день на протяжении пяти недель образцы исследовали методом динамического рассеяния света. Результаты приведены на рис. 4.

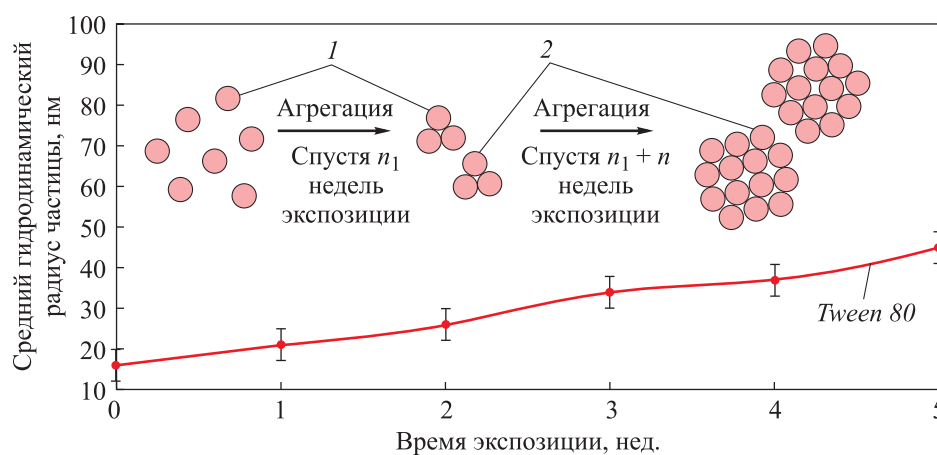


Рис. 4. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от времени экспозиции (числа недель):

1 — наночастицы селена; 2 — агрегаты наночастиц селена

Результаты анализа полученных данных показали, что зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена, стабилизированных *Tween 80*, от времени экспозиции носит линейный характер. Спустя одну неделю экспозиции средний радиус частиц увеличился в 1,3 раза (с 16 до 21 нм), спустя 2,5 недели — в 2 раза (с 16 до 32 нм), а спустя пять недель экспозиции — в 2,8 раза (с 16 до 45 нм).

Потеря стабильности увеличивается с каждой неделей $n_1 + n$ и сопровождается формированием агрегатов, состоящих из наночастиц селена, при этом без визуальных изменений образца. Следовательно, можно сделать вывод, что образцы наночастиц селена, стабилизированных *Tween 80*, обладают высокой агрегативной устойчивостью, так как спустя 35 сут экспозиции средний радиус частиц увеличился менее чем в 3 раза.

Заключение. Получены образцы наночастиц селена, стабилизированных неионогенными ПАВ. Установлено, что из представленных стабилизаторов оптимальным является *Tween 80*. Размер и электрокинетический потенциал наночастиц селена, стабилизированных *Tween 80*, составили 16 нм и 17,91 мВ соответственно. Образцы исследовали методом ПЭМ-микроскопии. Образец наноселена, стабилизированный *Tween 80*, представлен сферическими частицами радиусом 12...22 нм. Полученные данные согласуются с результатами спектроскопии динамического рассеяния света. Исследовали влияние времени экспозиции на агрегативную устойчивость наночастиц селена. Установлено, что спустя пять недель экспозиции в образце сформировались агрегаты, а радиус увеличился с 16 до 45 нм. В дальнейшем планируется внедрение разработанного препарата в продукты пищевой и парфюмерно-косметической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Khurana A., Tekula S., Saifi M.A., et al. Therapeutic applications of selenium nanoparticles. *Biomed. Pharmacother.*, 2019, vol. 111, pp. 802–812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.146>
- [2] Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: From development and characterization to therapeutics. *Adv. Healthc. Mater.*, 2021, vol. 10, iss. 16, art. 2100598. DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.202100598>
- [3] Gubarev A.S., Lezov A.A., Mikhailova M.E., et al. Ag(0) nanoparticles stabilized with poly(ethylene glycol)s modified with amino groups: formation and properties in solutions. *Colloid J.*, 2019, vol. 81, no. 13, pp. 226–234. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X19030062>
- [4] Bisht N., Phalswal P., Khanna P.K. Selenium nanoparticles: a review on synthesis and biomedical applications. *Mater. Adv.*, 2022, no. 3, pp. 1415–1431. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1MA00639H>
- [5] Gudkov S.V., Shafeev G.A., Glinushkin A.P., et al. Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 28, pp. 17767–17774. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02448>
- [6] Kumar A., Prasad K.S. Role of nano-selenium in health and environment. *J. Biotechnol.*, 2021, vol. 325, pp. 152–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.11.004>
- [7] Kieliszek M. Selenium-fascinating microelement, properties and sources in food. *Molecules*, 2019, vol. 24, iss. 7, art. 1298. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24071298>
- [8] Chen N., Zhao C., Zhang T. Selenium transformation and selenium-rich foods. *Food Biosci.*, 2021, vol. 40, art. 100875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100875>

- [9] Gać P., Czerwińska K., Macek P., et al. The importance of selenium and zinc deficiency in cardiovascular disorders. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 2021, vol. 82, art. 103553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103553>
- [10] Skesters A., Kustovs D., Lece A., et al. Selenium, selenoprotein P, and oxidative stress levels in SARS-CoV-2 patients during illness and recovery. *Inflammopharmacol.*, 2022, vol. 30, no. 2, pp. 499–503. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10787-022-00925-z>
- [11] Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Rekhman Z.A., et al. Investigation of the effect of dispersion medium parameters on the aggregative stability of selenium nanoparticles stabilized with catamine AB. *Micromachines*, 2023, vol. 14, iss. 2, art. 433. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14020433>
- [12] Siddiqui S.A., Blinov A.V., Serov A.V., et al. Effect of selenium nanoparticles on germination of *Hordéum vulgáre* barley seeds. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 7, art. 862. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11070862>
- [13] Pekarkova J., Gablech I., Fialova T., et al. Modifications of parylene by microstructures and selenium nanoparticles: evaluation of bacterial and mesenchymal stem cell viability. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2021, vol. 9, art. 782799. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.782799>
- [14] Blinov A.V., Nagdalian A.A., Siddiqui S.A., et al. Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine. *Sc. Rep.*, 2022 vol. 12, art. 21975. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25884-x>
- [15] Lesnichaya M.V., Aleksandrova G.P., Malysheva S.F., et al. Synthesis of selenium-containing humic nano-biocomposites from sodium bis(2-phenylethyl)phosphinodiselenoate. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2020, vol. 90, no. 1, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363220010193>
- [16] Валуева С.В., Боровикова Л.Н. Влияние природы биологически активного стабилизатора на спектральные и размерные характеристики гибридных селенсодержащих наносистем. *Журнал физической химии*, 2019, т. 93, № 1, с. 113–118. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0044453719010308>
- [17] Valueva S.V., Vylegzhanina M.E., Plyushchenko A.V. Atomic force microscopy and the optical characteristics of hybrid polymeric nanosystems based on silver and selenium nanoparticles. *J. Surf. Investig.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 586–593. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451019040177>
- [18] Boroumand S., Safari M., Shaabani E., et al. Selenium nanoparticles: synthesis, characterization and study of their cytotoxicity, antioxidant and antibacterial activity. *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 8, art. 0850d8. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2558>
- [19] Gablech E., Fohlerová Z., Švec K., et al. Selenium nanoparticles with boron salt-based compound act synergistically against the brown-rot *Serpula lacrymans*. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 2022, vol. 169, art. 105377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105377>

[20] Knepper T.P., Berna J.L. Surfactants: properties, production, and environmental aspects. *Compr. Anal. Chem.*, 2003, vol. 40, pp. 1–49.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-526X\(03\)40004-4](https://doi.org/10.1016/S0166-526X(03)40004-4)

[21] Salager J.-L., Antón R., Bullón J., et al. How to use the normalized hydrophilic-lipophilic deviation (HLDN) concept for the formulation of equilibrated and emulsified surfactant-oil-water systems for cosmetics and pharmaceutical products. *Cosmetics*, 2020, vol. 7, iss. 3, art. 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/cosmetics7030057>

[22] Une V.R., Bondarde M.P., Some S. Formulation and development of water-based fragrance from patchouli essential oils using nonionic surfactant. *Appl. Nanosci.*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 2117–2125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02489-4>

[23] Arya S.S., Kaimal A.M., Chib M., et al. Novel, energy efficient and green cloud point extraction: technology and applications in food processing. *J. Food Sci. Technol.*, 2019, vol. 56, no. 13, pp. 524–534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3546-7>

[24] Nirmala M.J., Durai L., Rao K.A., et al. Ultrasonic nanoemulsification of Cuminum cuminum essential oil and its applications in medicine. *Int. J. Nanomedicine*, 2020, vol. 15, pp. 795–807. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S230893>

Блинов Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика и технология наноструктур и материалов» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Рехман Зафар Абдулович — ассистент кафедры «Физика и технология наноструктур и материалов» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Гвозденко Алексей Алексеевич — ассистент кафедры «Физика и технология наноструктур и материалов» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Голик Алексей Борисович — ассистент кафедры «Физика и технология наноструктур и материалов» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Колодкин Максим Андреевич — заведующий учебно-лабораторным комплексом СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Филиппов Дионис Демокритович — лаборант НИЛ «Керамика и теххимия» СКФУ (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Блинов А.В., Рехман З.А., Гвозденко А.А. и др. Синтез и изучение стабилизации наночастиц селена в среде водорастворимых неионогенных поверхностно-активных веществ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 2 (113), с. 103–115. EDN: LWCFBA

**SYNTHESIS AND STUDY OF STABILIZATION
OF SELENIUM NANOPARTICLES
IN THE MEDIUM OF WATER-SOLUBLE
NONIONIC SURFACTANTS**

A.V. Blinov

Z.A. Rekhman

A.A. Gvozdenko

A.B. Golik

M.A. Kolodkin

D.D. Filippov

blinov.a@mail.ru

zafrehman1027@gmail.com

gvozdenko.1999a@gmail.com

lexgoldman@gmail.com

koliduk@yandex.ru

dio_5@mail.ru

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

Abstract

This paper is aimed at synthesizing and studying the stabilization of selenium nanoparticles in a medium of water-soluble nonionic surfactants. Selenium nanoparticles were obtained by chemical reduction in an aqueous medium. Selenous acid was used as a selenium-containing precursor, nonionic surfactants were stabilizers, and ascorbic acid acted as a reducing agent. At the first stage, the optimal nonionic surfactant was determined for the stabilization of selenium nanoparticles. The obtained samples were studied by dynamic light scattering and acoustic and electroacoustic spectroscopy. It was found that nanoselenium samples stabilized with *Tween 80* have the smallest radius (16 nm), and the zeta potential was 17.91 mV. Further, the obtained samples were examined using transmission electron microscopy. The analysis of the obtained micrographs showed that the selenium nanoparticles stabilized with *Tween 80* have a spherical shape, and the radius lies in the range from 12 to 22 nm. At the final stage, we studied the effect of exposure time on the aggregative stability of selenium nanoparticles. The results obtained showed that after 5 weeks of exposure, aggregates were formed in the sample, and the average particle radius increased by 2.8 times from 16 to 45 nm

Keywords

Selenium nanoparticles, nonionic surfactants, Tween 80, average hydrodynamic radius, transmission electron microscopy

Received 19.07.2023

Accepted 16.10.2023

© Author(s), 2024

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-16-00120, <https://rscf.ru/project/23-16-00120/>). The study was carried out using the equipment of the North Caucasus Federal University Shared Use Center with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (unique RF project identifier 2296.61321X0029)

REFERENCES

- [1] Khurana A., Tekula S., Saifi M.A., et al. Therapeutic applications of selenium nanoparticles. *Biomed. Pharmacother.*, 2019, vol. 111, pp. 802–812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.146>
- [2] Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: From development and characterization to therapeutics. *Adv. Healthc. Mater.*, 2021, vol. 10, iss. 16, art. 2100598. DOI: <https://doi.org/10.1002/adhm.202100598>
- [3] Gubarev A.S., Lezov A.A., Mikhailova M.E., et al. Ag(0) nanoparticles stabilized with poly(ethylene glycol)s modified with amino groups: formation and properties in solutions. *Colloid J.*, 2019, vol. 81, no. 13, pp. 226–234. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061933X19030062>
- [4] Bisht N., Phalswal P., Khanna P.K. Selenium nanoparticles: a review on synthesis and biomedical applications. *Mater. Adv.*, 2022, no. 3, pp. 1415–1431. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1MA00639H>
- [5] Gudkov S.V., Shafeev G.A., Glinushkin A.P., et al. Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 28, pp. 17767–17774. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02448>
- [6] Kumar A., Prasad K.S. Role of nano-selenium in health and environment. *J. Biotechnol.*, 2021, vol. 325, pp. 152–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.11.004>
- [7] Kieliszek M. Selenium-fascinating microelement, properties and sources in food. *Molecules*, 2019, vol. 24, iss. 7, art. 1298. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24071298>
- [8] Chen N., Zhao C., Zhang T. Selenium transformation and selenium-rich foods. *Food Biosci.*, 2021, vol. 40, art. 100875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100875>
- [9] Gać P., Czerwińska K., Macek P., et al. The importance of selenium and zinc deficiency in cardiovascular disorders. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 2021, vol. 82, art. 103553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103553>
- [10] Skesters A., Kustovs D., Lece A., et al. Selenium, selenoprotein P, and oxidative stress levels in SARS-CoV-2 patients during illness and recovery. *Inflammopharmacol.*, 2022, vol. 30, no. 2, pp. 499–503. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10787-022-00925-z>
- [11] Blinov A.V., Maglakelidze D.G., Rekhman Z.A., et al. Investigation of the effect of dispersion medium parameters on the aggregative stability of selenium nanoparticles stabilized with catamine AB. *Micromachines*, 2023, vol. 14, iss. 2, art. 433. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14020433>
- [12] Siddiqui S.A., Blinov A.V., Serov A.V., et al. Effect of selenium nanoparticles on germination of *Hordéum vulgäre* barley seeds. *Coatings*, 2021, vol. 11, iss. 7, art. 862. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11070862>
- [13] Pekarkova J., Gablech I., Fialova T., et al. Modifications of parylene by microstructures and selenium nanoparticles: evaluation of bacterial and mesenchymal stem cell viability. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2021, vol. 9, art. 782799. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.782799>

- [14] Blinov A.V., Nagdalian A.A., Siddiqui S.A., et al. Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine. *Sc. Rep.*, 2022 vol. 12, art. 21975. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25884-x>
- [15] Lesnichaya M.V., Aleksandrova G.P., Malysheva S.F., et al. Synthesis of selenium-containing humic nano-biocomposites from sodium bis(2-phenylethyl)phosphinodiselenoate. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2020, vol. 90, no. 1, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363220010193>
- [16] Valueva S.V., Borovikova L.N. Influence of the nature of a biologically active stabilizer on the spectral and dimensional characteristics of hybrid selenium-containing nanosystems. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry], 2019, vol. 93, no. 1, pp. 113–118 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0044453719010308>
- [17] Valueva S.V., Vylegzhanina M.E., Plyushchenko A.V. Atomic force microscopy and the optical characteristics of hybrid polymeric nanosystems based on silver and selenium nanoparticles. *J. Surf. Investig.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 586–593. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1027451019040177>
- [18] Boroumand S., Safari M., Shaabani E., et al. Selenium nanoparticles: synthesis, characterization and study of their cytotoxicity, antioxidant and antibacterial activity. *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 8, art. 0850d8. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2558>
- [19] Gablech E., Fohlerová Z., Švec K., et al. Selenium nanoparticles with boron salt-based compound act synergistically against the brown-rot *Serpula lacrymans*. *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 2022, vol. 169, art. 105377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105377>
- [20] Knepper T.P., Berna J.L. Surfactants: properties, production, and environmental aspects. *Compr. Anal. Chem.*, 2003, vol. 40, pp. 1–49. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-526X\(03\)40004-4](https://doi.org/10.1016/S0166-526X(03)40004-4)
- [21] Salager J.-L., Antón R., Bullón J., et al. How to use the normalized hydrophilic-lipophilic deviation (HLDN) concept for the formulation of equilibrated and emulsified surfactant-oil-water systems for cosmetics and pharmaceutical products. *Cosmetics*, 2020, vol. 7, iss. 3, art. 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/cosmetics7030057>
- [22] Une V.R., Bondarde M.P., Some S. Formulation and development of water-based fragrance from patchouli essential oils using nonionic surfactant. *Appl. Nanosci.*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 2117–2125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02489-4>
- [23] Arya S.S., Kaimal A.M., Chib M., et al. Novel, energy efficient and green cloud point extraction: technology and applications in food processing. *J. Food Sci. Technol.*, 2019, vol. 56, no. 13, pp. 524–534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3546-7>
- [24] Nirmala M.J., Durai L., Rao K.A., et al. Ultrasonic nanoemulsification of Cuminum cyminum essential oil and its applications in medicine. *Int. J. Nanomedicine*, 2020, vol. 15, pp. 795–807. DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S230893>

Blinov A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Rehman Z.A. — Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Gvozdenko A.A. — Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Golik A.B. — Assistant, Department of Physics and Technology of Nanostructures and Materials, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Kolodkin M.A. — Head of Educational and Laboratory Complex, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Filippov D.D. — Laboratory Assistant, Research Laboratory “Ceramics and Technochemistry”, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Blinov A.V., Rehman Z.A., Gvozdenko A.A., et al. Synthesis and study of stabilization of selenium nanoparticles in the medium of water-soluble nonionic surfactants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 2 (113), pp. 103–115 (in Russ.). EDN: LWCFBA