



Получено: 23.10.2023 г. | Принято: 30.10.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.426.433>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПРЕКУРСОРА НА ДИСПЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА

А.В.Блинов¹, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-4701-8633

И.М.Шевченко¹, к.т.н., доц., ORCID: 0009-0005-9113-9335

А.А.Гвозденко¹, ассистент, ORCID: 0000-0001-7763-5520

З.А.Рехман¹, ассистент, ORCID: 0000-0003-2809-4945 / zafrehman1027@gmail.com

А.Б.Голик¹, ассистент, ORCID: 0000-0003-2580-9474

А.А.Блинова¹, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0001-9321-550X

М.В.Вакуленко¹, студент, ORCID: 0009-0008-7797-0538

Аннотация. В рамках данной работы исследовано влияние типа прекурсора и стабилизатора на дисперсионные характеристики наночастиц селена, в частности, средний гидродинамический радиус и ζ -потенциал частиц. Наночастицы получали методом химического восстановления в водной среде. В качестве прекурсора использовали селениты лития, натрия, калия, а в качестве восстановителя – аскорбиновую кислоту, в качестве стабилизатора – 4 поверхностно-активных вещества: анионоактивное – лауретсульфат натрия, катионоактивное – ЦТАХ, неионогенное – Твин-80, амфотерное – кокамидопропилбетаин. У образцов, стабилизированных лауретсульфатом натрия, наблюдается отрицательное значение данного показателя, при использовании остальных стабилизаторов – положительное значение ζ -потенциала. Оптимальным поверхностно-активным веществом является кокамидопропилбетаин, что обусловлено тем, что при изменении концентраций веществ, он показал наименьшие изменения среднего гидродинамического радиуса и ζ -потенциала наночастиц селена. Показано, что тип и концентрация прекурсора оказывают незначительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена. Установлено, что увеличение концентрации прекурсора приводит к уменьшению по модулю ζ -потенциала частиц. Важно отметить, что тип прекурсора не оказывает значительного влияния на ζ -потенциал наночастиц селена.

Ключевые слова: наночастицы, прекурсор, селен, потенциал частиц, дисперсные характеристики

Для цитирования: А.В. Блинов, А.А. Гвозденко, З.А. Рехман, А.Б. Голик, А.А. Блинова, М.В. Вакуленко. Исследование влияния типа прекурсора на дисперсные характеристики наночастиц селена. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 7–8. С. 426–433. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.426.433>

Received: 23.10.2023 | Accepted: 30.10.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.426.433>

Original paper

STUDY OF THE INFLUENCE OF PRECURSOR TYPE ON THE DISPERSION CHARACTERISTICS OF SELENIUM NANOPARTICLES

A.V.Blinov¹, Cand. of Sci. (Tech), Associate Professor, ORCID: 0000-0002-4701-8633

I.M.Shevchenko¹, Cand. of Sci. (Tech), Associate Professor, ORCID: 0009-0005-9113-9335

A.A.Gvozdenko¹, Assistant, ORCID: 0000-0001-7763-5520

Z.A.Rekhan¹, Assistant, ORCID: 0000-0003-2809-4945 / zafrehman1027@gmail.com

A.B.Golik¹, Assistant, ORCID: 0000-0003-2580-9474

A.A.Blinova¹, Cand. of Sci. (Tech), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-9321-550X

M.V.Vakulenko¹, Student, ORCID: 0009-0008-7797-0538

¹ Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия / North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia



Abstract. In the framework of this work, the influence of the type of precursor and stabilizer on the dispersion characteristics of selenium nanoparticles, in particular, the average hydrodynamic radius and ζ potential of the particles, was studied. Nanoparticles were obtained by chemical reduction in an aqueous medium. Lithium, sodium, and potassium selenites were used as a precursor, and ascorbic acid was used as a reducing agent, and 4 surfactants were used as a stabilizer: anionic – sodium laureth sulfate, cationic – CTAC, nonionic – Tween-80, amphoteric – cocamidopropyl betaine. For samples stabilized with sodium laureth sulfate, a negative value of this indicator is observed, while using other stabilizers, a positive value of the ζ -potential is observed. The optimal surfactant is cocamidopropyl betaine, which is due to the fact that when changing the concentrations of substances, it showed the smallest changes in the average hydrodynamic radius and ζ -potential of selenium nanoparticles. It is shown that the type and concentration of the precursor have little effect on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles. It has been established that an increase in the concentration of the precursor leads to a decrease in modulus ζ -potential of particles. It is important to note that the type of precursor does not significantly affect the ζ potential of selenium nanoparticles.

Keywords: nanoparticles, precursor, selenium, particle potential, dispersion characteristics

Для цитирования: A.V. Blinov, A.A. Gvozdenko, Z.A. Rekhman, A.B. Golik, A.A. Blinova, M.V. Vakulenko. Study of the influence of precursor type on the dispersion characteristics of selenium nanoparticles. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 7–8. PP. 426–433. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.426.433>.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом интерес ученых к наночастицам селена только увеличивается. Он играет важную роль в антиоксидантной защите организма, обладает противоопухолевой и иммуномодулирующей активностью и входит в состав ферментов, которые избавляют организм от свободных радикалов и избытка перекисей [1–7]. Особое внимание привлекают уникальные свойства получаемых частиц: фотоэлектрические, каталитические, биологические, полупроводниковые [8]. Внимание ученых особенно привлекает низкая токсичность наночастиц селена по сравнению с его органической и неорганической формой [9, 10]. Существует несколько методов синтеза наночастиц, которые включают физические (импульсная лазерная абляция, осаждение из паровой фазы, гидротермальный метод [11–13]), биологические (восстановление наночастиц селена в присутствии биологических агентов [14, 15]), а также химические методы получения. Наиболее широко используемые химические методы синтеза основаны на восстановлении окисленных форм неорганического селена, особенно селенитов и селенатов, в присутствии восстановителей, таких как белки, фенолы, спирты и амины [16–20]. Также известны методы получения наночастиц селена из селенорганических соединений с использованием биотехнологических методов [21]. Для контроля размеров наночастиц селена применяются различные

INTRODUCTION

Every year interest in selenium nanoparticles only increases. It plays an important role in antioxidant defense of the body, has antitumor and immunomodulatory activity, and is part of enzymes that rid the body of free radicals and excess peroxides [1–7]. Particular attention is attracted by the unique properties of the obtained particles: photovoltaic, catalytic, biological, semiconductor [8]. The attention of scientists is especially attracted by the low toxicity of selenium nanoparticles compared to its organic and inorganic forms [9, 10]. There are several methods of nanoparticle synthesis, which include physical (pulsed laser ablation, vapor deposition, hydrothermal method [11–13]), biological (reduction of selenium nanoparticles with biological agents [14, 15]), and chemical methods of production. The most widely used chemical synthesis methods are based on reduction of oxidized forms of inorganic selenium, especially selenites and selenates with reducing agents such as proteins, phenols, alcohols, and amines [16–20]. Methods for preparing selenium nanoparticles from organoselenium compounds using biotechnological methods are also known. [21]. Various stabilizers are used to control the size of selenium nanoparticles: polymers, biologically active substances, surfactants [22–26].

The aim of this work is to study the effect of the type of alkali metal selenite-based precursor on the dispersion characteristics of selenium nanoparticles stabilized by different classes of surfactants.

Таблица 1. Концентрации веществ, используемых для синтеза наночастиц селена

Table 1. Concentrations of substances used for the synthesis of selenium nanoparticles

Вещество Substance	Концентрация или масса веществ Concentration or mass of substances				
X ₂ SeO ₃ , моль/л mol/L	0,015	0,022	0,033	0,050	0,075
Аскорбиновая кислота, моль/л Ascorbic acid, mol/L	0,1	0,15	0,22	0,33	0,5
Стабилизатор, г Stabilizer, g	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

стабилизаторы: полимеры, биологически активные вещества, ПАВы [22–26].

Целью данной работы является исследование влияния типа прекурсора на основе селенитов щелочных металлов на дисперсные характеристики наночастиц селена, стабилизированных различными классами поверхностно-активных веществ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наночастицы селена, стабилизированные различными поверхностно-активными веществами получали методом химического восстановления в водной среде. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селениты лития, натрия, калия (АО "ЛенРеактив", хч, Россия), в качестве восстановителя – аскорбиновую кислоту (АО "ЛенРеактив", хч, Россия), а в качестве стабилизаторов выбрали 4 поверхностно-активных вещества: анионактивное – лауретсульфат натрия, катионактивное – ЦТАХ, неионогенное – Твин-80, амфотерное – кокамидопропилбетаин (ГК ЕТС, Россия). Синтез проводили при постоянных температуре и давлении и непрерывном перемешивании.

Изначально растворяли селенсодержащий прекурсор и стабилизатор в дистиллированной воде. Вторым этапом подготавливали раствор аскорбиновой кислоты в дистиллированной воде. В последнюю очередь раствор восстановителя заливали в раствор прекурсора и стабилизатора. Полученный золь перемешивали в течение 15 мин. Концентрации веществ представлены в табл.1.

Средний гидродинамический радиус полученных образцов наночастиц селена определяли методом фотонной корреляционной спектроскопии на установке Photocor-Complex (ООО "Антек-97", Россия). ζ -потенциал полученных образцов определяли методом акустической и электроакустической спектроскопии на установке DT-1202 производства Dispersion Technology Inc., USA.

RESEARCH METHODS

Selenium nanoparticles stabilized by various surfactants were obtained by chemical reduction in aqueous medium. Lithium, sodium, potassium selenites ("LenReactiv", Russia) were used as selenium-containing precursor, ascorbic acid ("LenReactiv", Russia) was used as reducing agent, and four surfactants were chosen as stabilizers: anionactive – sodium laureth sulfate, cationactive – ЦТАХ, non-ionogenic – Tween-80,

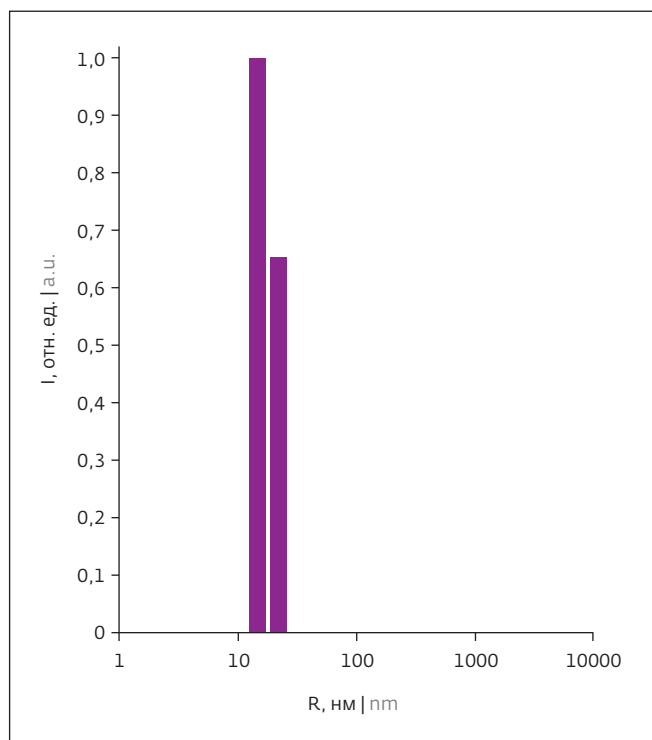


Рис.1. Гистограмма распределения гидродинамического радиуса наночастиц селена, стабилизированных лауретсульфатом натрия и полученных из селенита калия

Fig.1. Histogram of the distribution of the hydrodynamic radius of selenium nanoparticles stabilized with sodium laureth sulfate and obtained from potassium selenite



Таблица 2. Средний гидродинамический радиус частиц (R , нм) в образцах наночастиц селена, стабилизированных различными поверхностно-активными веществами, с разной концентрацией прекурсора
 Table 2. Average hydrodynamic particle radius (R , nm) in samples of selenium nanoparticles stabilized by different surfactants with different precursor concentrations

Прекурсор Precursor	Наименование ПАВ Name of surfactant	Концентрация прекурсора, моль/л Precursor concentration, mol/L				
		0,015	0,022	0,033	0,050	0,075
H_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	15 ± 2	15 ± 1	13 ± 2	19 ± 3	16 ± 2
	Твин-80 Tween-80	19 ± 3	18 ± 3	16 ± 1	18 ± 3	19 ± 3
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	18 ± 3	17 ± 3	16 ± 2	16 ± 2	17 ± 2
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	17 ± 3	17 ± 2	15 ± 2	16 ± 2	17 ± 2
Li_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	20 ± 2	17 ± 2	17 ± 2	18 ± 2	19 ± 3
	Твин-80 Tween-80	25 ± 3	19 ± 3	20 ± 2	21 ± 1	23 ± 2
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	26 ± 4	20 ± 1	17 ± 1	18 ± 2	17 ± 2
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	22 ± 2	18 ± 2	18 ± 2	20 ± 3	26 ± 3
Na_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	15 ± 2	19 ± 2	17 ± 1	17 ± 2	18 ± 3
	Твин-80 Tween-80	18 ± 3	15 ± 2	20 ± 2	20 ± 3	23 ± 3
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	19 ± 2	18 ± 3	18 ± 3	17 ± 2	19 ± 2
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	16 ± 3	16 ± 2	16 ± 2	19 ± 2	25 ± 3
K_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	15 ± 2	14 ± 2	16 ± 2	16 ± 3	19 ± 2
	Твин-80 Tween-80	17 ± 2	17 ± 2	18 ± 3	19 ± 2	23 ± 3
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	15 ± 1	17 ± 2	16 ± 2	16 ± 2	19 ± 2
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	14 ± 2	15 ± 1	15 ± 2	19 ± 3	25 ± 3

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе изучали влияние типа прекурсора на размер и ζ -потенциал наночастиц селена. Средний гидродинамический радиус и электрокинетический потенциал полученных образцов измеряли сразу после

amphoteric – cocamidopropyl betaine (GC ETS, Russia). The synthesis was carried out under constant stirring, temperature and atmospheric pressure.

Initially, selenium-containing precursor and stabilizer were dissolved in distilled water. The



Таблица 3. ζ -потенциал образцов (мВ) наночастиц селена, стабилизированных различными поверхностно-активными веществами, с разной концентрацией прекурсора

Table 3. ζ -potential of samples (mV) of selenium nanoparticles stabilized by different surfactants with different precursor concentrations

Прекурсор Precursor	Наименование ПАВ Name of surfactant	Концентрация прекурсора, моль/л Precursor concentration, mol/L				
		0,015	0,022	0,033	0,050	0,075
H_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	2,35	4,99	4,27	5,49	3,52
	Твин-80 Tween-80	-10,96	-6,68	-4,28	1,57	-0,05
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	-18,36	-14,84	-13,36	-8,95	-6,98
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	14,69	11,97	10,24	8,69	10,03
Li_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	2,12	-4,25	-1,56	-2,75	-2,31
	Твин-80 Tween-80	-12,99	-7,91	-6,86	-4,02	-2,96
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	-30,46	-23,34	-15,52	-9,65	-7,09
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	15,65	7,72	4,54	2,68	1,06
Na_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	2,65	2,67	1,9	1,48	0,8
	Твин-80 Tween-80	-6,36	3,62	-1,56	-0,9	1,96
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	-12,57	-9,94	4,09	1,59	3,36
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	5,42	-7,37	-3,83	-4,24	-2,31
K_2SeO_3	Кокаמידопропилбетаин Cocamidopropyl Betaine	5,52	6,97	5,77	4,69	5,36
	Твин-80 Tween-80	-1,34	2,26	4,43	5,37	4,94
	Лауретсульфат натрия Sodium laureth sulfate	-27,59	-14,48	-8,9	-3,31	-1,83
	Цетилтриметиламмония хлорид (ЦТАХ) Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC)	15,71	13,64	8,96	5,63	5,1

синтеза. Результаты представлены на рис.1 и в табл.2 и 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ табл.2 и рис.1 показал, что тип и концентрация прекурсора, а также тип поверхностно-активного вещества оказывают незначительное влияние на средний гидродинамический радиус

second step was to prepare a solution of ascorbic acid in distilled water. Lastly, the reducing agent solution was poured into precursor and stabilizer solution. The resulting sol was stirred for 15 minutes. The concentrations of substances are presented in Table 1.

The average hydrodynamic radius of the obtained samples of selenium nanoparticles was

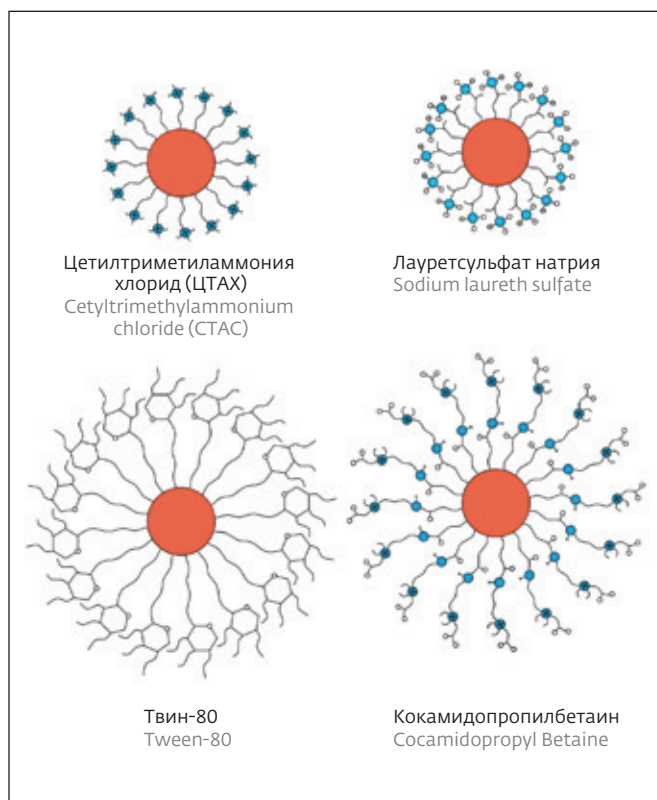


Рис.2. Схемы мицелл наночастиц селена, стабилизированных различными ПАВ

Fig.2. Schemes of micelles of selenium nanoparticles, stabilized surfactant molecules

наночастиц селена. Наибольшее значение среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена наблюдается в образце, стабилизированном лауретсульфатом натрия и полученном из селенита лития ($R = 26 \pm 4$ нм), наименьшее значение среднего гидродинамического радиуса - в образце, стабилизированном кокамидопропилбетаином и полученном из селенистой кислоты ($R = 13 \pm 2$ нм).

Анализ табл.3 показал, что тип поверхностно-активного вещества значимо влияет на значение ζ -потенциала наночастиц селена: у образцов, стабилизированных лауретсульфатом натрия, наблюдается отрицательное значение данного показателя, при использовании остальных стабилизаторов - положительное значение ζ -потенциала (рис.2). Наибольшее значение ζ -потенциала наночастиц селена наблюдается в образце, стабилизированном цетилтриметиламмония хлоридом и полученном из селенистой кислоты (ζ -потенциал = + 14,69 мВ), наименьшее значение - в образце, стабилизированном лауретсульфатом натрия и полученном из селенита лития (ζ -потенциал = -30,46 мВ). Установлено, что увеличение концентрации прекурсора приводит к уменьшению по модулю ζ -потенциала частиц. При

determined by photon correlation spectroscopy on the Photocor-Complex unit (Antec-97 LLC, Russia). The ζ -potential of the obtained samples was determined by acoustic and electroacoustic spectroscopy on the DT-1202 unit manufactured by Dispersion Technology Inc., USA.

RESULTS

At the first stage, influence of precursor type on the size and ζ -potential of selenium nanoparticles was studied. The average hydrodynamic radius and electrokinetic potential of the obtained samples were measured immediately after synthesis. The results are presented in Fig.1 and Tables 2 and 3.

DISCUSSION

The analysis of Table 2 and Fig.1 showed that the type and concentration of precursor as well as the type of surfactant have a negligible effect on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles. The highest value of the mean hydrodynamic radius of selenium nanoparticles is observed in the sample stabilized with sodium lauryl sulfate and obtained from lithium selenite ($R = 26 \pm 4$ нм), the lowest value of the mean hydrodynamic radius is observed in the sample stabilized with cocamidopropyl betaine and obtained from selenic acid ($R = 13 \pm 2$ нм).

The analysis of Table 3 showed that the type of surfactant significantly affects the value of ζ -potential of selenium nanoparticles: the samples stabilized with sodium lauryl sulfate have a negative value of this index, while the other stabilizers have a positive value of ζ -potential (Fig.2). The highest value of ζ -potential of selenium nanoparticles is observed in the sample stabilized with cetyltrimethylammonium chloride and obtained from selenic acid (ζ -potential = + 14.69 мВ), the lowest value concerned to the sample stabilized with sodium lauryl sulfate and obtained from lithium selenite (ζ -potential = -30.46 мВ). It was found that increasing the precursor concentration leads to a modulo decrease in the ζ -potential of the particles. At precursor concentration of 0.015 mol/L ζ -potential of selenium nanoparticles obtained from lithium selenate and stabilized with sodium lauryl sulfate is - 30.46 мВ, at precursor concentration of 0.075 mol/L ζ -potential decreases modulo - 7.09 мВ. It is important to note that in addition to nanoparticles, both positively charged ions (alkali metal ions) and negatively charged ions (oxalic acid ions) are present in the solution, which influence the ζ -potential value of selenium nanoparticles and their stability according



концентрации прекурсора 0,015 моль/л ζ -потенциал наночастиц селена, полученных из селената лития и стабилизированных лауретсульфатом натрия, составляет $-30,46$ мВ, при концентрации прекурсора 0,075 моль/л ζ -потенциал уменьшается по модулю до $-7,09$ мВ. Важно отметить, что в растворе, помимо наночастиц, присутствуют как положительно заряженные ионы (ионы щелочных металлов), так и отрицательно заряженные ионы (ионы щавелевой кислоты), которые оказывают влияние на значение ζ -потенциала наночастиц селена и их стабильность в соответствии с правилом Шульце-Гарди. Установлено, что тип прекурсора не оказывает значительного влияния на ζ -потенциал наночастиц селена. Так, ζ -потенциал наночастиц селена, стабилизированных цетилтриметиламмония хлоридом при концентрации прекурсора 0,015 моль/л, составляет: $14,69$ мВ при использовании селенистой кислоты; $15,65$ мВ при использовании селената лития; $5,42$ мВ при использовании селената натрия; $15,71$ мВ при использовании селената калия.

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы исследовано влияние типа прекурсора и стабилизатора на дисперсионные характеристики наночастиц селена, в частности, средний гидродинамический радиус и ζ -потенциал частиц. Установлено, что тип поверхностно-активного вещества значимо влияет на значение ζ -потенциала наночастиц селена и незначительно на средний гидродинамический радиус частиц. У образцов, стабилизированных лауретсульфатом натрия, наблюдается отрицательное значение данного показателя, при использовании остальных стабилизаторов – положительное значение ζ -потенциала. Оптимальным поверхностно-активным веществом является кокамидопропилбетаин, что обусловлено тем, что при изменении концентраций веществ, он показал наименьшие изменения среднего гидродинамического радиуса и ζ -потенциала наночастиц селена.

Показано, что тип и концентрация прекурсора оказывают незначительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена. Установлено, что увеличение концентрации прекурсора приводит к уменьшению по модулю ζ -потенциала частиц. При концентрации прекурсора 0,015 моль/л ζ -потенциал наночастиц селена, полученных из селената лития и стабилизированных лауретсульфатом натрия, составляет $-30,46$ мВ, при концентрации прекурсора 0,075 моль/л ζ -потенциал уменьшается по модулю до $-7,09$ мВ. Важно отметить, что тип прекурсора не оказывает значительного влияния на ζ -потенциал наночастиц селена.

to the Schulze-Gardi rule. The type of precursor was found to have no significant effect on the ζ -potential of selenium nanoparticles. Thus, the ζ -potential of selenium nanoparticles stabilized by cetyltrimethylammonium chloride at a precursor concentration of 0.015 mol/L is: 14.69 mV using selenic acid; 15.65 mV using lithium selenate; 5.42 mV using sodium selenate; 15.71 mV using potassium selenate.

CONCLUSIONS

In this work, influence of precursor and stabilizer type on dispersion characteristics of selenium nanoparticles, in particular, the average hydrodynamic radius and ζ -potential of the particles was studied. The type of surfactant was found to have a significant effect on the ζ -potential value of selenium nanoparticles and an insignificant effect on the mean hydrodynamic radius of the particles. The samples stabilized with sodium laurth sulfate have a negative value of this index, while the other stabilizers have a positive value of ζ -potential. The optimal surfactant is cocamidopropyl betaine, which is due to the fact that it showed the smallest changes in the average hydrodynamic radius and ζ -potential of selenium nanoparticles when changing the concentrations of substances.

It is shown that precursor type and concentration have an insignificant effect on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles. It is established that the increase in the precursor concentration leads to a modulus decrease in the ζ -potential of the particles. At a precursor concentration of 0.015 mol/L, the ζ -potential of selenium nanoparticles derived from lithium selenate and stabilized with sodium laurth sulfate is -30.46 mV, while at a precursor concentration of 0.075 mol/L, the ζ -potential decreases modulo -7.09 mV. It is important to note that precursor type has no significant effect on the ζ -potential of selenium nanoparticles.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation of the Russian Federation (grant No. 23-16-00120), <https://rscf.ru/project/23-16-00120>

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



БЛАГОДАРНОСТИ

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

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Dawood M.A.O. *et al.* Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: a review // *Antioxidants*. 2021. V. 10. No. 9. P. 1364.
2. Boroumand S. *et al.* Selenium nanoparticles: synthesis, characterization and study of their cytotoxicity, antioxidant and antibacterial activity // *Materials Research Express*. 2019. V. 6. No. 8. P. 0850d8.
3. Nayak V. *et al.* Potentialities of selenium nanoparticles in biomedical science // *New Journal of Chemistry*. 2021. V. 45. No. 6. PP. 2849–2878.
4. Tang S. *et al.* Construction of arabinogalactans/selenium nanoparticles composites for enhancement of the antitumor activity // *International journal of biological macromolecules*. 2019. V. 128. PP. 444–451.
5. Liao G. *et al.* Selenium nanoparticles (SeNPs) have potent antitumor activity against prostate cancer cells through the upregulation of miR-16 // *World Journal of Surgical Oncology*. 2020. V. 18. PP. 1–11.
6. Jiang W. *et al.* Synthesis, characterization of tuna polypeptide selenium nanoparticle, and its immunomodulatory and antioxidant effects in vivo // *Food Chemistry*. 2022. T. 383. C. 132405.
7. Xia I.F. *et al.* Selenium nanoparticles (SeNPs) immunomodulation is more than redox improvement: serum proteomics and transcriptomic Analyses // *Antioxidants*. 2022. V. 11. No. 5. P. 964.
8. Ikram M. *et al.* Biomedical potential of plant-based selenium nanoparticles: a comprehensive review on therapeutic and mechanistic aspects // *International Journal of Nanomedicine*. 2021. PP. 249–268.
9. Bhattacharjee A., Basu A., Bhattacharya S. Selenium nanoparticles are less toxic than inorganic and organic selenium to mice in vivo // *The Nucleus*. 2019. V. 62. PP. 259–268.
10. Dhanraj G., Rajeshkumar S. Anticariogenic effect of selenium nanoparticles synthesized using *Brassica oleracea* // *Journal of Nanomaterials*. 2021. V. 2021. PP. 1–9.
11. Tzeng W.Y. *et al.* Selenium nanoparticle prepared by femtosecond laser-induced plasma shock wave // *Optics Express*. 2020. V. 28. No. 1. PP. 685–694.
12. Tan L. *et al.* Effective shape-controlled synthesis of gallium selenide nanosheets by vapor phase deposition // *Nano Research*. 2020. V. 13. PP. 557–563.
13. Shar A.H. *et al.* Facile synthesis of reduced graphene oxide encapsulated selenium nanoparticles prepared by hydrothermal method for acetone gas sensors // *Chemical Physics Letters*. 2020. T. 755. P. 137797.
14. Alvi G.B. *et al.* Biogenic selenium nanoparticles (SeNPs) from citrus fruit have anti-bacterial activities // *Scientific Reports*. 2021. V. 11. No. 1. P. 4811.
15. Zhang H. *et al.* Antibacterial properties and mechanism of selenium nanoparticles synthesized by *Providencia* sp. DCX // *Environmental Research*. 2021. V. 194. P. 110630.
16. Pyrzynska K., Sentkowska A. Biosynthesis of selenium nanoparticles using plant extracts // *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2021. PP. 1–14.
17. Ghaderi R.S. *et al.* Green synthesis of selenium nanoparticle by *Abelmoschus esculentus* extract and assessment of its antibacterial activity // *Materials Technology*. 2022. V. 37. No. 10. PP. 1289–1297.
18. Hussain A. *et al.* Recent progress on green synthesis of selenium nanoparticles—a review A comprehensive study on green synthesis of selenium nanoparticles—review // *Materials Today Sustainability*. 2023. P. 100420.
19. Gorshunova S.V. *et al.* A new method for the selenium nanoparticles synthesis and study of their influence on the characteristics of physiological processes in spring rye seedlings at the initial stages of ontogenesis // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. V. 723. No. 2. P. 022070.
20. Blinov A.V. *et al.* Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. No. 1. P. 21975.
21. Murugesan G. *et al.* Methods involved in the synthesis of selenium nanoparticles and their different applications—a review // *Eur J Biomed*. 2019. V. 6. No. 4. PP. 189–194.
22. Liu G. *et al.* Synthesis, stability and anti-fatigue activity of selenium nanoparticles stabilized by *Lycium barbarum* polysaccharides // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. V. 179. PP. 418–428.
23. Blinov A.V. *et al.* Synthesis of Selenium Nanoparticles Stabilized by Quaternary Ammonium Compounds // *Russian Journal of General Chemistry*. 2022. V. 92. No. 3. PP. 424–429.