



Получено: 1.09.2023 г. | Принято: 10.09.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.6.346.353>

Научная статья

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АЛЬФА-ОЛЕФИН СУЛЬФОНАТОМ НАТРИЯ

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

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

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

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

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

Я.А.Облогин¹, студент, лаборант, ORCID: 0009-0003-5180-9045

Аннотация. В данном исследовании проводили синтез и оптимизацию методики получения наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия (АОС). Наноразмерный селен получали методом химического восстановления аскорбиновой кислотой в водной среде. Селенсодержащим прекурсором выступала селенистая кислота. В результате оптимизации методики синтеза установили, что образец №9 является оптимальным для исследования влияния активной кислотности среды и ионной силы на агрегативную устойчивость. В результате многофакторного эксперимента установили оптимальные параметры для синтеза наночастиц селена. В результате компьютерного квантово-химического моделирования установили, процесс взаимодействия молекулы селена и альфа-олефин сульфоната натрия (АОС) является энергетически выгодным. Показано, что золь наночастиц селена является стабильным в нейтральной среде, а также что на агрегативную устойчивость значительное влияние оказывают трехзарядные положительные ионы Fe^{3+} .

Ключевые слова: наночастицы селена, альфа-олефин сульфонат, квантово-химическое моделирование, золь, восстановитель

Для цитирования: А.В. Блинов, З.А. Рехман, А.А. Гвозденко, А.Б. Голик, А.А. Блинова, Я.А. Облогин. Синтез наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 6. С. 346–353. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.6.346.353>

Received: 1.09.2023 | Accepted: 10.09.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.6.346.353>

Original paper

SYNTHESIS OF SELENIUM NANOPARTICLES STABILIZED WITH SODIUM ALPHA-OLEFIN SULFONATE

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

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

A.A.Gvozdenko¹, Assistant, ORCID: 0009-0005-9113-9335

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

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

Ya.A.Oblogin¹, Student, Laboratory Assistant, ORCID: 0009-0003-5180-9045

Abstract. In this study, we performed the synthesis and optimization of the procedure for obtaining selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate (AOS). Nanosized selenium was obtained by chemical reduction with ascorbic acid in an aqueous medium. Selenious acid acted as the selenium-containing

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



precursor. As a result, the optimizing synthesis technique, it was found that sample No. 9 is optimal for studying the effect of active acidity medium and ionic strength on aggregative stability. As a result of a multifactorial experiment, the optimal parameters for the synthesis of selenium nanoparticles were established. Due to the computer quantum-chemical modeling, it was established that interaction process between a selenium molecule and sodium alpha-olefin sulfonate (AOS) is energetically favorable. It is shown that the sol of selenium nanoparticles is stable in a neutral medium, and also that aggregative stability is significantly affected by three-charged positive Fe^{3+} ions.

Keywords: selenium nanoparticles, alpha-olefin sulfonate, quantum-chemical modeling, sol, reducing agent

For citation: A.V. Blinov, Z.A. Rekhman, A.A. Gvozdenko, A.B. Golik, A.A. Blinova, Y.A. Oblogin. Synthesis of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 6. PP. 346–353. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.6.346.353>.

ВВЕДЕНИЕ

Селен является микроэлементом, выполняющим важную роль в функционировании иммунной системы и регуляции окислительно-восстановительных механизмов [1]. Однако неорганическая и органическая формы селена обладают повышенной токсичностью, в связи с чем все больше внимания привлекает наноформа селена, которая обладает высокой биологической активностью, низкой токсичностью, антиоксидантными, противовоспалительными свойствами, а также наночастицы селена используются в качестве носителя для адресной доставки лекарств [2–5].

Химический метод синтеза наночастиц селена является основным и довольно простым методом получения коллоидных систем [6]. Стабилизация наночастиц селена также является важным процессом, благодаря ей удается контролировать размер и форму получаемых наночастиц [7]. Среди основных стабилизаторов можно выделить биополимеры (хитозан, поливинилпирролидон, метилцеллюлоза и др.) и поверхностно-активные вещества (алкилдиметилбензиламмония хлорид, кокамидопропилбетаин и др.) [8–11].

Анионактивные поверхностно-активные вещества отвечают за моющую способность любого мыла, а также большинства шампуней [12, 13]. В водном растворе они распадаются с образованием отрицательно заряженных ионов, гидрофобная часть молекулы анионного ПАВ связывает частицы грязи, а далее благодаря гидрофильной части молекулы ПАВ удерживаются водой и вымываются с поверхности [14]. Одним из таких ПАВ является альфа-олефин сульфонат натрия (АОС), который активно применяется для стабилизации различных наносистем [15–17].

Целью данной статьи является исследование метода синтеза наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия.

INTRODUCTION

Selenium is a trace element that plays an important role in the functioning of the immune system and the regulation of redox mechanisms [1]. However, the inorganic and organic forms of selenium have increased toxicity, and therefore, the nanoform of selenium, which has high biological activity, low toxicity, antioxidant, anti-inflammatory properties, is attracting more and more attention, and selenium nanoparticles are used as a carrier for targeted drug delivery [2–5].

The chemical method for the synthesis of selenium nanoparticles is the main and fairly simple method for obtaining colloidal systems [6]. Stabilization of selenium nanoparticles is also an important process, due to which it is possible to control the size and shape of the resulting nanoparticles [7]. Among the main stabilizers are biopolymers (chitosan, polyvinylpyrrolidone, methylcellulose, etc.) and surfactants (alkyldimethylbenzylammonium chloride, cocamidopropyl betaine, etc.) [8–11].

Anionic surfactants are responsible for the cleaning power of any soap, as well as most shampoos [12, 13]. In an aqueous solution, they decompose with the formation of negatively charged ions, the hydrophobic part of the anionic surfactant molecule binds dirt particles, and then, due to the hydrophilic part of the surfactant molecule, they are retained by water and washed out from the surface [14]. One of these surfactants is sodium alpha-olefin sulfonate (AOS), which is actively used to stabilize various nanosystems [15–17].

The purpose of this article is to study a method for the synthesis of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate.

RESEARCH METHODS

Selenium nanoparticles were synthesized by chemical reduction of a selenium-containing precursor



МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления селенсодержащего прекурсора в водной среде в присутствии стабилизатора. Прекурсором выступала селенистая кислота (H_2SeO_3), в качестве восстановителя использовали аскорбиновую кислоту ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), в качестве стабилизатора – анионоактивное поверхностно-активное вещество – альфа-олефин сульфонат натрия (АОС).

Синтез наночастиц селена проводили в несколько этапов: в начале готовили 0,036 М раствор селенистой кислоты, в котором растворяли навески АОС, далее готовили 0,088 М раствор аскорбиновой кислоты. Наконец, в раствор селенистой кислоты по каплям добавляли раствор восстановителя и перемешивали образец в течение 5–10 мин.

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.

Для оптимизации параметров эксперимента проводили многофакторный эксперимент с тремя входными параметрами и тремя уровнями варьирования. В качестве выходных параметров выступали средний гидродинамический радиус частиц (r_{cp}) и электрокинетический потенциал.

Математическая обработка результатов эксперимента осуществлялась в пакете прикладных программ Neural Statistica Network, а также с помощью прикладных программ была сформирована нейронная сеть.

Квантово-химическое моделирование процесса взаимодействия наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия проводили в программе QChem с использованием молекулярного редактора IQmol. Расчет осуществлялся на оборудовании центра обработки данных (Schneider Electric) ФГАОУ ВО Северо-Кавказского федерального университета. Расчет полной энергии и других характеристик проводили при следующих параметрах: расчет: Energy, метод: HF, базис: 3-21G, convergence – 5, силовое поле – Chemical.

Для исследования влияния активной кислотности среды на стабильность наночастиц селена в образцы добавляли растворы с различным показателем pH в соотношении 1:1.

Для изучения влияния ионной силы раствора на стабильность наночастиц селена приготовлены пять серий растворов: растворы хлорида натрия (NaCl), хлорида железа (FeCl_3), хлорида бария (BaCl_2), сульфата натрия (Na_2SO_4), фосфата калия

in an aqueous medium in the presence of a stabilizer. Selenious acid (H_2SeO_3) acted as a precursor, ascorbic acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) was used as a reducing agent, and an anionic surfactant, sodium alpha-olefin sulfonate (AOS), was used as a stabilizer.

The synthesis of selenium nanoparticles was carried out in several stages: at the beginning, a 0.036 M solution of selenious acid was prepared, in which weighed portions of AOS were dissolved, then a 0.088 M solution of ascorbic acid was prepared. Finally, the reducing agent solution was added dropwise to the selenious acid solution, and the sample was stirred for 5–10 minutes.

The average hydrodynamic radius of the obtained samples of selenium nanoparticles was determined by photon correlation spectroscopy using a Photocor-Complex setup (ООО Antek-97, Russia). The ζ potential of the obtained samples was determined by acoustic and electroacoustic spectroscopy using a DT-1202 setup manufactured by Dispersion Technology Inc., USA.

To optimize the experimental parameters, a multivariate experiment was performed with three input parameters and three levels of variation. The output parameters were the average hydrodynamic radius of particles (r_{av}) and the electrokinetic potential.

Mathematical processing of the experimental results was carried out in the Neural Statistica Network application package, and a neural network was formed using the application programs.

Quantum-chemical modeling of the interaction process of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha olefin sulfonate was carried out in the QChem program using the IQmol molecular editor. The calculation was carried out on the equipment of the data processing center (Schneider Electric) of the North Caucasian Federal University. The calculation of the total energy and other characteristics was carried out with the following parameters: calculation: Energy, method: HF, basis: 3-21G, convergence – 5, force field – Chemical.

To study the effect of the active acidity of the medium on the stability of selenium nanoparticles, solutions with different pH values were added to the samples in a ratio of 1:1.

To study the effect of the ionic strength of a solution on the stability of selenium nanoparticles, five series of solutions were prepared: solutions of sodium chloride (NaCl), iron chloride (FeCl_3), barium chloride (BaCl_2), sodium sulfate (Na_2SO_4), and potassium phosphate (K_3PO_4). The concentrations of the solutions were 0.1 M, 0.25 M, 0.5 M, 0.75 M, and 1 M. To assess the stability, 1 ml of selenium nanoparticle sol was added to 9 ml of the solution.

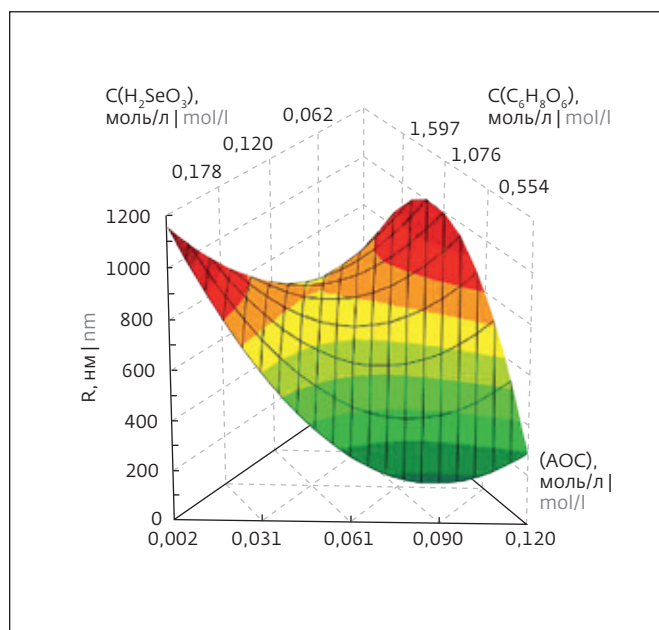


Рис.1. Тернарная поверхность, описывающая связь со средним гидродинамическим радиусом и концентрациями селенистой кислоты, аскорбиновой кислоты и альфа-олефин сульфоната натрия (АОС)

Fig.1. Ternary surface describing the connection between the level of hydrodynamic radius and concentration of selenious acid, ascorbic acid and sodium alpha-olefinsulfonate (AOS)

(K_3PO_4). Концентрации растворов составляли 0,1 М, 0,25 М, 0,5 М, 0,75 М и 1 М. Для оценки стабильности к 9 мл раствора добавляли 1 мл золя наночастиц селена.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе проводили оптимизацию методики синтеза наночастиц селена, результаты исследования представлены в табл.1.

В результате математической обработки данных получена трехмерная тернарная поверхность, описывающая связь со средним гидродинамическим радиусом и концентрациями прекурсора, восстановителя и стабилизатора, которая представлена на рис.1.

Далее проводили компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия (АОС). Полученные данные представлены на рис.2, а также в табл.2.

Следующим этапом исследовали влияние активной кислотности среды и ионной силы на стабильность наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия (АОС). Полученные данные представлены на рис.3 и 4.

Таблица 1. Значения среднего гидродинамического радиуса и ζ -потенциала полученных образцов

Table 1. The values of the average hydrodynamic radius and ζ -potential of the obtained samples

№ образца Sample No.	Средний гидродинамический радиус, нм Average hydrodynamic radius, nm	Электрокинетический потенциал, мВ Electrokinetic potential, mV
1	17	-18,86
2	15	-20,74
3	1312	-6,43
4	12	-38,29
5	18	-18,69
6	18	-15,92
7	556	-50,99
8	326	-22,17
9	17	-49,89

RESULTS

At the first stage, optimization of the procedure for the synthesis of selenium nanoparticles, the results of the study are presented in Table 1.

As a result of mathematical data processing, a three-dimensional ternary surface was obtained, describing the relationship with the average hydrodynamic radius and concentrations of the precursor, reducing agent, and stabilizer, which is shown in Fig.1.

Next, computer quantum-chemical modeling of selenium nanoparticles interaction stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate (AOS) was carried out. The data obtained are presented in Fig.2, as well as in Table 2.

At the next stage, we studied the effect of the active acidity of the medium and ionic strength on the stability of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate (AOS). The data obtained are presented in Fig.3 and 4.

DISCUSSION

An analysis of the results of studying the sols of selenium nanoparticles by dynamic light scattering showed that a monomodal distribution is observed in all samples and it was found that samples No. 3, 7



ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов исследования золей наночастиц селена методом динамического светорассеяния показал, что во всех образцах наблюдается мономодальное распределение и установлено, что наибольшим радиусом обладают образцы № 3, 7 и 8 (1312, 556 и 326 нм, соответственно), наименьшим радиусом обладают образцы № 2, 4 и 9 (15, 12 и 17 нм, соответственно). Однако в результате анализа исследования образцов методом акустической и электроакустической спектроскопии установлено, что у золей №4 и 9 наблюдается наибольшее значение электрокинетического потенциала (–38,29 и –49,89 мВ, соответственно). Для исследования влияния pH и ионной силы на агрегативную устойчивость наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия, был выбран образец №9.

Анализ трехмерной тернарной поверхности показал, что концентрации селенистой кислоты и аскорбиновой кислоты оказывают значительное влияние на средний гидродинамический радиус наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия. Так, во всем диапазоне концентраций селенистой кислоты и при концентрациях аскорбиновой кислоты от 0,6 до 1,6 моль/л, средний радиус частиц варьируется от 900 до 1180 нм. Стоит отметить, что оптимальными радиусом, около 20 нм, обладает образец, который получали со следующими параметрами: С (H_2SeO_3) – 0,15 моль/л, С ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) – 1,60 моль/л, С (АОС) – 0,09 моль/л.

В результате компьютерного квантово-химического моделирования установлено, что полная энергия молекулы альфа-олефин сульфоната натрия (АОС) составляет –1452,308 ккал/моль, а разница полной энергии молекулы альфа-олефин сульфоната натрия (АОС) и молекулярной системы Se-альфа-олефин сульфонат натрия (АОС) составляет более 2238 ккал/моль, что говорит об энергетически выгодном процессе образования связи между селеном и альфа-олефин сульфонатом натрия.

Анализ зависимости радиуса от активной кислотности среды показал, что при низком pH образец обладает радиусом около 750 нм. Данный факт можно объяснить тем, что большое количество протонов водорода в кислой среде обуславливает электронейтральность потенциалобразующего слоя. В нейтральной среде золь наночастиц селена имеет радиус около 80 нм, а при переходе в щелочную область средний радиус частиц увеличивается до 450 нм при pH=12. Это связано с тем, что происходит десорбция молекул альфа-олефин сульфоната натрия с поверхности частиц селена, в связи с чем происходит полимеризация с образованием полиселенидов [18].

Исследование влияния ионной силы на стабильность наночастиц селена показало, что катионы

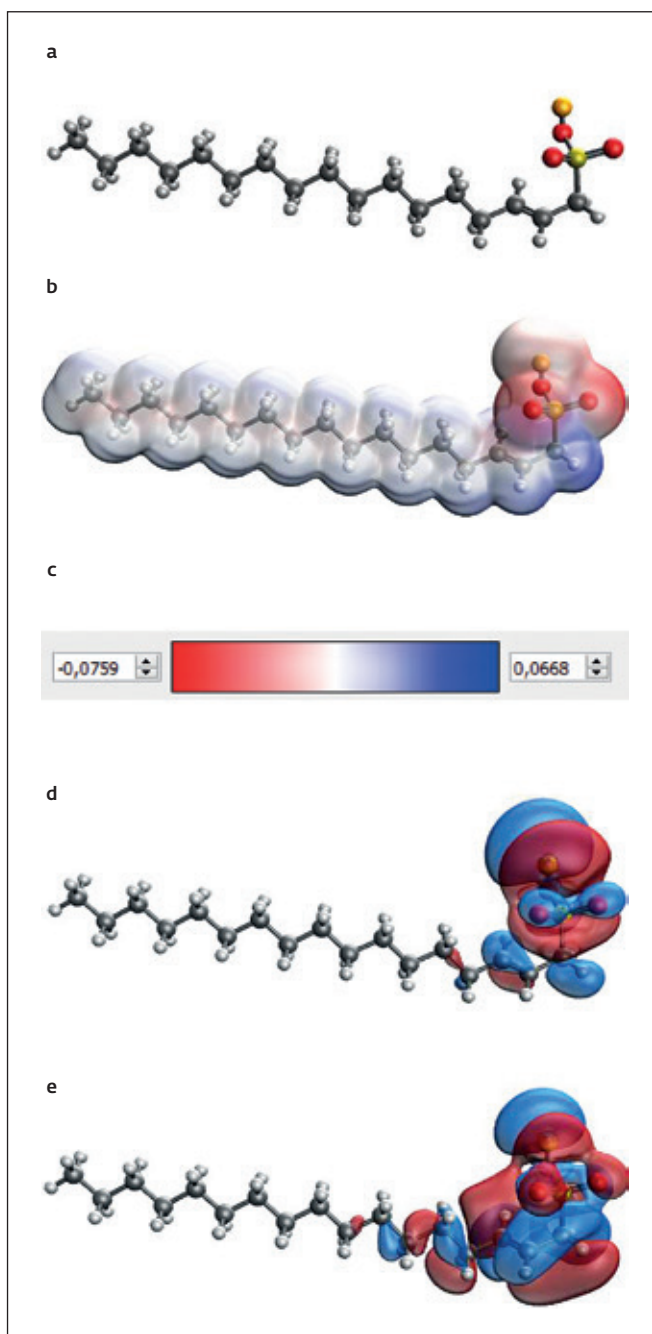


Рис.2. Результаты моделирования взаимодействия молекулы альфа-олефин сульфоната натрия с селеном через гидроксильную группу / (O–): модель молекулярного комплекса (а), распределение электронной плотности (b), градиент распределения электронной плотности (с), наивысшая населенная молекулярная орбиталь HOMO (d), низшая свободная молекулярная орбиталь LUMO (e)

Fig.2. Results of modeling the interaction of the sodium alpha-olefin sulfonate molecule with selenium through the hydroxyl group / (O–): model of the molecular complex (a), electron density distribution (b), electron density distribution gradient (c), the highest inhabited molecular orbital HOMO (d), lowest free molecular orbital LUMO (e)



Таблица 2. Результаты компьютерного квантово-химического моделирования взаимодействия наночастиц селена с альфа-олефин сульфонатом натрия (АОС)

Table 2. Results of computer quantum-chemical simulation of the interaction of selenium nanoparticles with sodium alpha-olefin sulfonate (AOS)

Молекулярная система Molecular system	Взаимодействие Interaction	E, ккал/моль kcal/mol	ΔE, ккал/моль kcal/mol	E _{НОМО} , эВ eV	E _{ЛУМО} , эВ eV	η, эВ eV
АОС AOS	–	–1452,308		–0,196	–0,053	0,072
Se-АОС Se-AOS	Через O [–] Through O [–]	–3690,889	2238,581	–0,195	–0,022	0,087

оказывают большее влияние на средний радиус и коагуляцию частиц, чем анионы. Стоит отметить, что с увеличением заряда положительного иона его воздействие на отрицательно заряженную частицу увеличивается в связи с правилом Шульце – Гарди. Так, при воздействии солей трехвалентного железа радиус увеличивается вплоть до 11000 нм. Однако при добавлении солей ортофосфорной кислоты размер также возрастает до 1700 нм. Предположительно, наличие трех катионов K⁺ в одной молекуле ортофосфата калия оказывает данный эффект.

ВЫВОДЫ

В данной статье проведен синтез наночастиц селена, стабилизированных альфа-олефин сульфонатом натрия, а также оптимизация методики получения. В результате многофакторного эксперимента установлено, что оптимальным радиусом (17 нм) и наибольшим ζ-потенциалом (–49,89 мВ) обладает образец № 9, который был выбран для исследования агрегативной устойчивости. В результате анализа тернарной поверхности установлено, что оптимальными параметрами для синтеза наночастиц селена, стабилизированных АОС, являются: C (H₂SeO₃) – 0,15 моль/л, C (C₆H₈O₆) – 1,60 моль/л, C (АОС) – 0,09 моль/л. Компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия молекулы селена с альфа-олефин сульфонатом натрия показало, что полная энергия взаимодействия составляет более 2238 ккал/моль, что свидетельствует об энергетической выгоде данного процесса. Исследование влияния активной кислотности среды показало, что образец стабилен в нейтральной среде, а в кислой и щелочной среде – средний радиус увеличивается до 750 и 450 нм, соответственно. Также исследовали влияние ионной силы на стабильность образца наночастиц селена: установили, что значительное влияние на агрегативную устойчивость оказывают трехзарядные катионы (Fe³⁺), при воздействии которых радиус увеличивается до 11000 нм.

and 8 have the largest radius (1312, 556 and 326 nm, respectively), samples No. 2, 4 and 9 have the smallest radius (15, 12 and 17 nm, respectively). However, as a result of the analysis of the study of samples by the method of acoustic and electroacoustic spectroscopy, it was found that sols No. 4 and No. 9 have the highest value of the electrokinetic potential (–38.29 mV and –49.89 mV, respectively). To study the effect of pH and ionic strength on the aggregative stability of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate, sample No. 9 was chosen.

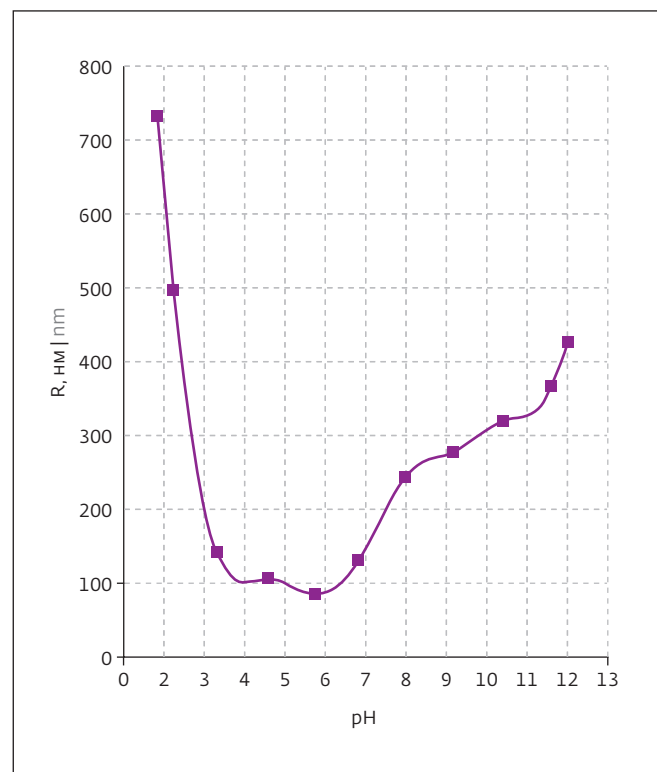


Рис. 3. Зависимость среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от активной кислотности среды
Fig. 3. Dependence of the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles on the active acidity of the medium

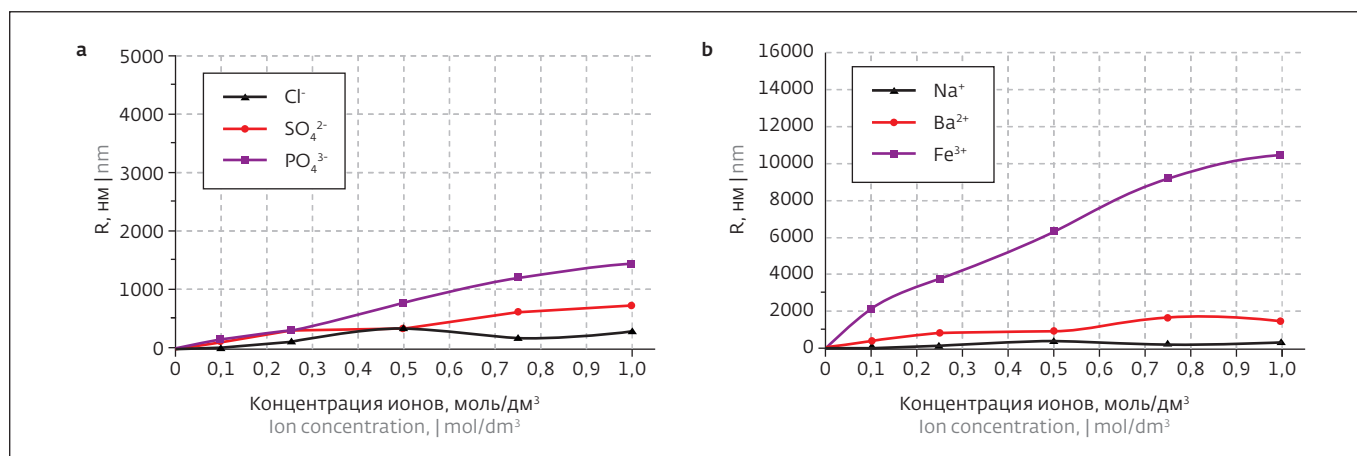


Рис. 4. Зависимости среднего гидродинамического радиуса наночастиц селена от концентрации положительных и отрицательных ионов

Fig. 4. Dependences of the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles on the concentration of positive and negative ions

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. Avery J.C., Hoffmann P.R. Selenium, selenoproteins, and immunity // *Nutrients*. 2018. V. 10. No. 9. P. 1203.
2. Abadi B. et al. Capping agents for selenium nanoparticles in biomedical applications // *Journal of Cluster Science*. 2023. V. 34. No. 4. PP. 1669–1690.
3. Zhai X. et al. Antioxidant capacities of the selenium nanoparticles stabilized by chitosan // *Journal of nanobiotechnology*. 2017. V. 15. PP. 1–12.
4. Nayak V. et al. Potentialities of selenium nanoparticles in biomedical science // *New Journal of Chemistry*. 2021. V. 45. No. 6. PP. 2849–2878.
5. Zhang H. et al. Antibacterial properties and mechanism of selenium nanoparticles synthesized by *Providencia* sp. DCX // *Environmental Research*. 2021. V. 194. P. 110630.

An analysis of the three-dimensional ternary surface showed that the concentrations of selenious acid and ascorbic acid have a significant effect on the average hydrodynamic radius of selenium nanoparticles stabilized with sodium alpha-olefin sulfonate. Thus, over the entire range of selenious acid concentrations and at concentrations of ascorbic acid from 0.6 to 1.6 mol/l, the average particle radius varies from 900 to 1180 nm. It should be noted that the optimal radius of about 20 nm has a sample that was obtained with the following parameters: C (H₂SeO₃) – 0.15 mol/l, C (C₆H₈O₆) – 1.60 mol/l, C (AOS) – 0, 09 mol/l.

As a result of computer quantum-chemical modeling, it was found that the difference in the total energy of the sodium alpha-olefin sulfonate (AOS) molecule and the Se-sodium alpha-olefin sulfonate (AOS) molecular system is more than 2238 kcal/mol, which indicates an energetically favorable process of bond formation between selenium and sodium alpha-olefin sulfonate.

An analysis of the dependence of the radius on the active acidity of the medium showed that, at low pH, the sample has a radius of about 750 nm. This fact can be explained by the fact that a large number of hydrogen protons in an acidic medium determines the electrical neutrality of the potential-forming layer. In a neutral medium, the sol of selenium nanoparticles has a radius of about 80 nm, and upon transition to the alkaline region, the average particle radius increases to 450 nm at pH=12. This is due to desorption of sodium alpha-olefin sulfonate molecules from the surface of selenium particles, which results in polymerization with the formation of polyselenides [18].



6. **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.
7. **Song X. et al.** Physicochemical stability and functional properties of selenium nanoparticles stabilized by chitosan, carrageenan, and gum Arabic // *Carbohydrate Polymers*. 2021. V. 255. P. 117379.
8. **Cao H., Xiao J., Liu H.** Enhanced oxidase-like activity of selenium nanoparticles stabilized by chitosan and application in a facile colorimetric assay for mercury (II) // *Biochemical Engineering Journal*. 2019. V. 152. P. 107384.
9. **Siddiqui S.A. et al.** Effect of selenium nanoparticles on germination of hordéum vulgäre barley seeds // *Coatings*. 2021. V. 11. No. 7. P. 862.
10. **Blinov A.V. et al.** Investigation of the Effect of Dispersion Medium Parameters on the Aggregative Stability of Selenium Nanoparticles Stabilized with Catamine AB // *Micromachines*. 2023. V. 14. No. 2. P. 433.
11. **Blinov A.V. et al.** Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. No. 1. P. 21975.
12. **Ghosh S., Ray A., Pramanik N.** Self-assembly of surfactants: An overview on general aspects of amphiphiles // *Biophysical Chemistry*. 2020. V. 265. P. 106429.
13. **Bazel Y.R. et al.** Methods for the determination of anionic surfactants // *Journal of Analytical Chemistry*. 2014. V. 69. PP. 211–236.
14. **Zheng Y. et al.** The micelle thermodynamics and mixed properties of sulfobetaine-type zwitterionic Gemini surfactant with nonionic and anionic surfactants // *Journal of Molecular Liquids*. 2020. V. 299. P. 112108.
15. **Rattanaudom P. et al.** Stabilization of foam using hydrophobic SiO₂ nanoparticles and mixed anionic surfactant systems in the presence of oil // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2021. V. 42. No. 4. PP. 581–594.
16. **Li H. et al.** Preparation and characterization of highly water-soluble magnetic Fe₃O₄ nanoparticles via surface double-layered self-assembly method of sodium alpha-olefin sulfonate // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. V. 384. PP. 213–218.
17. **Chea T.B. et al.** Investigation on the effect of types of nanoparticles and temperature on nanoparticles-foam stability // *IEOM Society International*. 2018.
18. **Roth A.N. et al.** Alkaline-Earth Chalcogenide Nanocrystals: Solution-Phase Synthesis, Surface Chemistry, and Stability // *ACS nano*. 2022. V. 16. No. 8. C. 12024–12035.

The study of the effect of ionic strength on the stability of selenium nanoparticles showed that cations have a greater effect on the average radius and coagulation of particles than anions. It should be noted that with an increase in the charge of a positive ion, its effect on a negatively charged particle increases in connection with the Schulze-Hardy rule. Thus, when exposed to ferric iron salts, the radius increases up to 11 000 nm. However, when salts of phosphoric acid are added, the size also increases to 1700 nm. Presumably, the presence of 3 K⁺ cations in one molecule of potassium orthophosphate has this effect.

CONCLUSIONS

In this paper, the synthesis of selenium nanoparticles stabilized by sodium alpha-olefin sulfonate was carried out, as well as the optimization of the production method. As a result of a multifactorial experiment, it was found that sample No. 9, which was chosen for the study of aggregative stability, has the optimal radius (17 nm) and the largest ζ -potential (–49.89 mV). As a result of the analysis of the ternary surface, it was found that the optimal parameters for the synthesis of selenium nanoparticles stabilized by AOS are: C (H₂SeO₃) – 0.15 mol/l, C (C₆H₈O₆) – 1.60 mol/l, C (AOS) – 0.09 mol/l. Computer quantum-chemical simulation of the interaction of a selenium molecule with sodium alpha-olefin sulfonate showed that the total interaction energy is more than 2238 kcal/mol, which indicates the energy benefit of this process. The study of the influence of the active acidity of the medium showed that the sample is stable in a neutral medium, and in an acidic and alkaline medium, the average radius increases to 750 and 450 nm, respectively. We also studied the effect of ionic strength on the stability of a sample of selenium nanoparticles: it was found that three-charged cations (Fe³⁺) have a significant effect on the aggregative stability, under the influence of which the radius increases to 11 000 nm.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Russian Science Foundation 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.