



Получено: 27.07.2023 г. | Принято: 10.08.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА

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

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

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

Д.Д.Филиппов¹, студент, ORCID: 0000-0003-1997-6583

А.Г.Храмцов¹, акад. РАН, д.т.н., проф., ORCID: 0000-0002-5188-4657

М.А.Колодкин¹, зав. УЛК, ORCID: 0009-0004-2045-4787

Т.Н.Бахолдина¹, аспирант, ORCID: 0000-0002-6160-8031

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования процесса восстановления наночастиц селена с использованием различных восстановителей. Наночастицы получали методом химического восстановления в водной среде, в качестве прекурсора использовалась селенистая кислота, а стабилизатором был выбран кокаמידопропилбетаин. Средний гидродинамический радиус образцов исследовали методом фотонной корреляционной спектроскопии, а ζ-потенциал – методом акустической и электроакустической спектроскопии. Установлено, что наночастицы селена, полученные с использованием аскорбиновой кислоты имеют средний гидродинамический радиус – 12,93 нм, с использованием боргидрида натрия – 23,16 нм, с тимочевиной – 21,85 нм. Образцы, полученные с использованием гидразина, тиосульфата натрия и L-цистеина, коагулировали в течение некоторого времени после синтеза, а с такими восстановителями, как уротропин, цитрат натрия, глюкоза и мочевины, наночастицы селена не были сформированы. Определены оптимальные соотношения прекурсора и восстановителя, а также получены зависимости среднего гидродинамического радиуса полученных образцов. Анализ полученных результатов показал, что оптимальным восстановителем для получения наночастиц селена является аскорбиновая кислота с соотношением прекурсора к восстановителю 1:4 и средним гидродинамическим радиусом 14 нм.

Ключевые слова: наночастицы селена, восстановитель, акустическая и электроакустическая спектроскопия

Для цитирования: А.В. Блинов, А.А. Блинова, З.А. Рехман, А.А. Гвозденко, А.Б. Голик, Д.Д. Филиппов, А.Г. Храмцов, М.А. Колодкин, Т.Н. Бахолдина. Исследование процесса восстановления наночастиц селена. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 288-296. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>

Received: 27.07.2023 | Accepted: 10.08.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>

Original paper

STUDY OF SELENIUM NANOPARTICLES REDUCTION PROCESS

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

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

Z.A.Rekman¹, Assistant, ORCID: 0000-0003-2809-4945 / zafrehman1027@gmail.com

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



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

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

D.D.Filippov¹, Student, ORCID: 0009-0003-5180-9045

A.G.Khrantsov¹, Academician of the RAS, Prof., ORCID: 0000-0002-5188-4657

M.A.Kolodkin¹, Head of Educational and Laboratory Complex, ORCID: 0009-0004-2045-4787

T.N.Bakholdina¹, Post graduate, ORCID: 0000-0002-6160-8031

Abstract. This paper presents the results of study of selenium nanoparticles reduction process of using various reducing agents. Nanoparticles were obtained by chemical reduction in an aqueous medium, selenious acid was used as a precursor, and cocamidopropyl betaine was chosen as a stabilizer. The average hydrodynamic radius of the samples was studied by photon correlation spectroscopy, and the ζ potential was studied by acoustic and electroacoustic spectroscopy. It has been established that selenium nanoparticles obtained using ascorbic acid have an average hydrodynamic radius of 12.93 nm, with sodium borohydride – 23.16 nm, with timurea – 21.85 nm. Samples obtained using hydrazine, sodium thiosulfate, and L-cysteine coagulated for some time after synthesis, while with reducing agents such as urotropine, sodium citrate, glucose, and urea, selenium nanoparticles were not formed. The optimal ratios of the precursor and reducing agent were determined, and the dependences of the average hydrodynamic radius of the obtained samples were obtained. An analysis of the obtained results showed that the optimal reducing agent for obtaining selenium nanoparticles is ascorbic acid with a precursor to reducing agent ratio of 1:4 and an average hydrodynamic radius of 14 nm.

Keywords: selenium nanoparticles, reducing agent, acoustic and electroacoustic spectroscopy

For citation: A.V. Blinov, A.A. Blinova, Z.A. Rekhman, A.A. Gvozdenko, A.B. Golik, D.D. Filippov, A.G. Khrantsov, M.A. Kolodkin, T.N. Bakholdina. Study of selenium nanoparticles reduction process. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 288–296. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>.

ВВЕДЕНИЕ

Селен является эссенциальным микроэлементом, биологическая роль которого широко исследуется и представлена в ряде оригинальных публикаций и обзоров [1, 2]. Он оказывает существенное влияние на процессы функционирования иммунной системы, а также обладает выраженными антиоксидантными свойствами [3]. Основной функцией Se в организме человека является участие в формировании и действии органической молекулы глутатионпероксидазы – одного из важнейших антиоксидантных ферментов, который предотвращает окислительные процессы свободно действующих радикалов [4]. Кроме того, достаточное содержание селена в организме человека способствует снижению риска развития сердечно-сосудистых заболеваний и стимулирует обменные процессы в организме [5, 6].

Благодаря своим уникальными свойствам, наноразмерные формы селена находят свое применение в различных областях науки и техники. Так, этот наноматериал используется в качестве препаратов в ветеринарии и медицине, а также в качестве биологически активной кормовой добавки и антиоксидантного

INTRODUCTION

Selenium is an essential trace element, the biological role of which is widely studied and presented in a number of original publications and reviews [1, 2]. It has a significant influence on the processes of immune system functioning and also has pronounced antioxidant properties [3]. The main function of Se in the human body, is to participate in the formation and action of the organic molecule glutathione peroxidase – one of the most important antioxidant enzymes, which prevents oxidative processes of free-acting radicals [4]. In addition, sufficient selenium content in the human body helps to reduce the risk of cardiovascular diseases and stimulates metabolic processes in the body [5, 6].

Due to their unique properties, nanoscale forms of selenium find their application in various fields of science and technology. Thus, this nanomaterial is used as preparations in veterinary medicine and medicine, as well as a biologically active feed additive and antioxidant preparation for products of the perfume and cosmetic industry [7–11].

It is worth noting that nanosized selenium is characterised by low toxicity compared to inorganic selenium [12]. However, selenium nanoparticles

препарата для продуктов парфюмерно-косметической промышленности [7–11].

Стоит отметить, что наноразмерный селен отличается низкой токсичностью по сравнению с неорганическим селеном [12]. Однако наночастицы селена не проявляют агрегативную устойчивость в водной среде без использования стабилизаторов и склонны к коагуляции, что затрудняет их практическое применение [13]. В связи с этим, разработка методов получения наночастиц селена и подбор оптимальных условий синтеза являются актуальными вопросами [14–16]. Таким образом, целью работы стало исследование процесса формирования наночастиц селена с использованием различных восстановителей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления прекурсора селена в водной среде в присутствии стабилизаторов. В качестве прекурсора селена использовали селенистую кислоту (H_2SeO_3). В процессе работы были исследованы золи наночастиц селена с использованием следующих восстановителей: боргидрид натрия ($NaBH_4$), аскорбиновая кислота ($C_6H_8O_6$), тиомочевина (CH_4N_2S), тиосульфат натрия ($Na_2S_2O_3$), гидразин солянокислый (N_2H_5Cl), L-цистеин ($C_3H_7NO_2S$), цитрат натрия ($Na_3C_6H_5O_7$), глюкоза ($C_6H_{12}O_6$), мочеви́на ($(NH_2)_2CO$), уротропин ($C_6H_{12}N_4$). В качестве стабилизатора использовалось поверхностно-активное вещество кокамидопропилбетаин.

Синтез наночастиц селена проводили следующим образом: на первом этапе готовили 0,036 М раствор селенистой кислоты, в котором растворяли навески стабилизатора, далее готовили 0,088 М растворы используемых восстановителей. Наконец, в растворы селенистой кислоты по каплям добавляли растворы восстановителей и перемешивали полученные образцы 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).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На первом этапе проводили синтез наночастиц селена с использованием разных

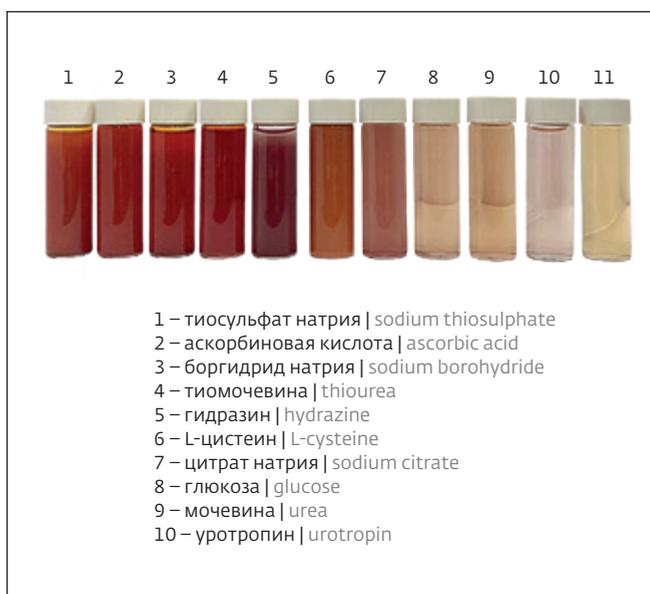


Рис.1. Образцы наночастиц селена с различными восстановителями

Fig.1. Samples of selenium nanoparticles with various reducing agents

do not exhibit aggregative stability in aqueous medium without the use of stabilisers and are prone to coagulation, which complicates their practical application [13]. In this regard, the development of methods for the production of selenium nanoparticles and the selection of optimal synthesis conditions is an urgent issue [14–16]. Thus, the aim of this work was to study the formation of selenium nanoparticles using different reducing agents.

RESEARCH METHODS

Selenium nanoparticles were synthesised by chemical reduction of selenium precursor in aqueous medium in the presence of stabilisers. Selenic acid (H_2SeO_3) was used as selenium precursor. In the process, selenium nanoparticle sols were investigated using the following reducing agents: sodium borohydride ($NaBH_4$), ascorbic acid ($C_6H_8O_6$), thiourea (CH_4N_2S), sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$), hydrazine hydrochloric acid (N_2H_5Cl), L-cysteine ($C_3H_7NO_2S$), sodium citrate ($Na_3C_6H_5O_7$), glucose ($C_6H_{12}O_6$), urea ($(NH_2)_2CO$), and urotropine ($C_6H_{12}N_4$). The surfactant cocamidopropyl betaine was used as a stabiliser.

The synthesis of selenium nanoparticles was carried out as follows: at the first stage 0.036 M selenic acid solution was prepared in which the stabiliser suspensions were dissolved, then 0.088 M solutions of the used reducing agents were prepared. Finally, the solutions of reducing agents were added dropwise to the selenic acid solutions and the obtained samples were stirred for 5–10 minutes.



восстановителей, получены образцы золей наночастиц селена, изображения которых представлены на рис.1.

Значения среднего гидродинамического радиуса и ζ-потенциала полученных образцов представлены в табл.1.

Для более наглядного представления процесса восстановления, реакции образования наночастиц селена представлены в табл.2.

На втором этапе для определения оптимального соотношения прекурсора и восстановителя на стабильность и размер наночастиц селена проводили синтез наночастиц селена с различным соотношением концентрации восстановителя и прекурсора селена – селенистой кислоты, были исследованы золи наночастиц селена с использованием следующих восстановителей: боргидрид натрия (NaBH₄), аскорбиновая кислота (C₆H₈O₆), тиомочевина (CH₄N₂S), гидразин солянокислый (N₂H₅Cl), L-цистеин (C₃H₇NO₂S). В качестве стабилизатора использовалось поверхностно-активное вещество – кокамидопропилбетаин.

На рис.2 приведены образцы золей наночастиц селена с использованием в качестве восстановителя аскорбиновой кислоты, боргидрида натрия, L-цистеина, тиомочевины, гидразина солянокислого.

Для определения оптимального соотношения прекурсора и восстановителя получены зависимости среднего гидродинамического радиуса и интенсивности рассеяния

Таблица 1. Значения среднего гидродинамического радиуса и ζ-потенциала полученных образцов золей наночастиц селена
Table 1. Values of mean hydrodynamic radius and ζ-potential of the obtained samples of selenium nanoparticle sol sols

Наименование восстановителя Name of reduction agent	г, нм nm	ζ-потенциал ζ-potential
Тиомочевина (CH ₄ N ₂ S) Thiourea	21,85	- 9,71
Натрия боргидрид (NaBH ₄) Sodium borohydride	23,16	- 4,80
Натрия тиосульфат (Na ₂ S ₂ O ₃) Sodium thiosulphate	12,93	- 6,71
Гидразин (N ₂ H ₅ Cl) Hydrazine	385,50	- 11,45
Аскорбиновая кислота (C ₆ H ₈ O ₆) Ascorbic acid	12,24	- 16,69
L-цистеин (C ₃ H ₇ NO ₂ S) L-cysteine	157,80	- 3,95

The average hydrodynamic radius of the obtained samples of selenium nanoparticles was determined by photon correlation spectroscopy on the Photocor-Complex unit (Antec-97 Ltd., Russia).

Таблица 2. Химические реакции образования наночастиц селена с использованием различных восстановителей
Table 2. Chemical reactions of selenium nanoparticle formation using different reducing agents

Восстановитель Reduction agent	Реакция образования Reaction of formation
Аскорбиновая кислота (C ₆ H ₈ O ₆) Ascorbic acid	H ₂ SeO ₃ + 2 C ₆ H ₈ O ₆ → Se + 2 C ₆ H ₄ O ₆ + 3H ₂ O
Боргидрид натрия (NaBH ₄) Sodium borohydride	4H ₂ SeO ₃ +3NaBH ₄ → 4Se + 3NaB(OH) ₄ + 4H ₂ ↑
Тиомочевина (CH ₄ N ₂ S) Thiourea	CH ₄ N ₂ S + H ₂ SeO ₃ + H ₂ O → 4NH ₃ + 2CO ₂ ↑ + 2S + Se
L-цистеин (C ₃ H ₇ NO ₂ S) L-cysteine	2C ₃ H ₇ NO ₂ S + 2H ₂ SeO ₃ → 2C ₃ H ₈ NO ₂ S + 2Se + H ₂ ↑
Гидразин (N ₂ H ₅ Cl) Hydrazine	N ₂ H ₅ Cl + H ₂ SeO ₃ → N ₂ ↑ + Se + 3H ₂ O + HCl



света от соотношения компонентов методом фотонной корреляционной спектроскопии. На данном этапе в качестве восстановителя использовались аскорбиновая кислота, боргидрид натрия и тиомочевина, так как образцы с использованием данных веществ показали наибольшую стабильность.

В табл.3 представлены значения средних гидродинамических радиусов золь наночастиц селена в зависимости от соотношения концентрации прекурсора и восстановителя.

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования влияния типа восстановителя определено, что наиболее агрегативно неустойчивыми являлись образцы, полученные с использованием гидразина, тиосульфата натрия и L-цистеина – данные образцы осели в течение 60 мин после синтеза. В образцах с использованием аскорбиновой кислоты, боргидрида натрия и тиомочевины выпадение осадка не наблюдалось, получены стабильные образцы наноразмерного селена. С остальными восстановителями (цитрат натрия, глюкоза, мочевины и уротропин) реакции образования наночастиц селена не произошло.

В результате анализа полученных данных установлено, что наночастицы, в синтезе которых использовались гидразин и L-цистеин, имеют наибольшее значение среднего гидродинамического радиуса 385,5 и 157,8 нм соответственно. Наночастицы селена, полученные с использованием аскорбиновой кислоты, имеют средний гидродинамический радиус – 12,93 нм, с использованием боргидрида натрия – 23,16 нм, с тимочевинной – 21,85 нм, с тиосульфатом натрия – 12,93 нм.

По результатам исследования оптимального соотношения прекурсора и восстановителя в соответствии с результатами фотонной корреляционной спектроскопии образцов было определено, что в серии экспериментов с боргидридом натрия наиболее оптимальное соотношение прекурсора и восстановителя – 1:2, размер образцов в данной серии – 17 нм.

В серии с аскорбиновой кислотой наиболее стабильные образцы получены с соотношением 1:8, 1:4, 1:2. Данные золи имеют размер 15, 14 и 15 нм соответственно. Образцы с содержанием восстановителя больше, чем соотношение 1:8, отличаются меньшей стабильностью и быстрее коагулируют.

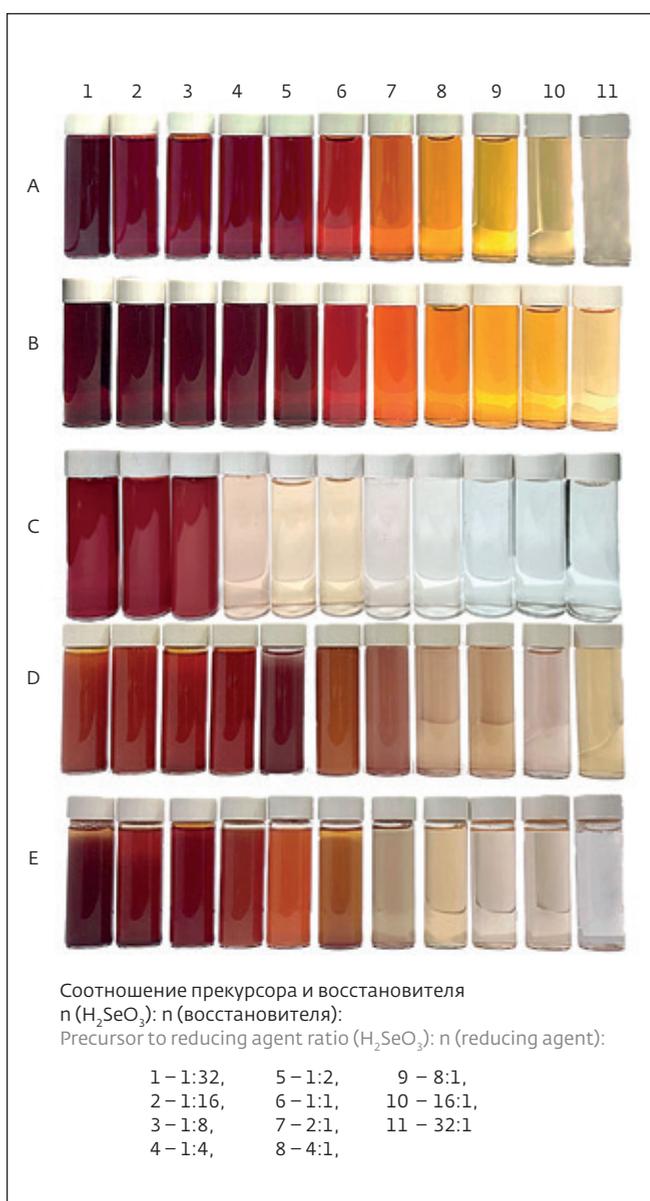


Рис.2. Образцы золь наночастиц селена с различным соотношением прекурсора и восстановителя n (H₂SeO₃):n (восстановителя), в качестве восстановителя использовались: А – аскорбиновая кислота, Б – боргидрид натрия, В – L-цистеин, Г – тиомочевина, Д – гидразин солянокислый

Fig.2. Samples of sols of selenium nanoparticles with different ratios of precursor and reducing agent n (H₂SeO₃):n (reducing agent), the following was used as a reducing agent: A – ascorbic acid, B – sodium borohydride, C – L-cysteine, D – thiourea, E – hydrazine hydrochloric

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.



Таблица 3. Значения средних гидродинамических радиусов и интенсивности рассеяния света золей наночастиц селена в зависимости от соотношения концентрации прекурсора и восстановителя

Table 3. Values of mean hydrodynamic radii and light scattering intensity of selenium nanoparticle sols as a function of precursor and reducing agent concentration ratio

Соотношение Ratio	Восстановитель Reduction agent									
	Аскорбиновая кислота Ascorbic acid		Боргидрид натрия Sodium borohydride		Тиомочевина Thiourea		L-цистеин L-cysteine		Гидразин солянокислый Hydrazine hydrochloric acid	
n(Se): n(восстановитель reduction)	R, нм R, nm	I, отн. ед. I, r.u.	R, нм R, nm	I, отн. ед. I, r.u.	R, нм R, nm	I, отн. ед. I, r.u.	R, нм R, nm	I, отн. ед. I, r.u.	R, нм R, nm	I, отн. ед. I, r.u.
32:1	5000	14472	8500	11792	30	59968	6643	7700	21	6571
16:1	2507	5826	1245	46973	26	519964	194	5128	122	282307
8:1	1295	8741	57	10085	22	659350	200	7865	125	336043
4:1	1600	11762	142	33794	22	681013	381	27474	87	380547
2:1	63	10756	180	4183	326	735599	422	180474	360	620243
1:1	33	13197	65	26783	57	980298	136	100315	368	675384
1:2	15	43661	17	15673	273	318832	50	76428	45	985937
1:4	14	50890	5900	20087	247	671484	48	76882	38	781116
1:8	15	60288	3685	8765	2989	607884	78	8952	293	510283
1:16	16	71668	7400	7691	100	849818	42	738654	35	380848
1:32	17	84273	7125	7783	69	884250	40	787006	263	484686

В серии с использованием тиомочевины образцы с соотношением компонентов 16:1, 8:1, 4:1 отличались оптимальным средним гидродинамическим радиусом (26, 22, 22 нм соответственно), но являлись нестабильными во времени и коагулировали в течение 60 мин после синтеза.

В серии экспериментов с использованием L-цистеина оптимальный размер (42 и 40 нм) был у образцов с соотношением прекурсора к восстановителю 1:16 и 1:32, а в образцах, где восстановителем был гидразин солянокислый, оптимальным средним гидродинамическим радиусом (21, 38 и 35 нм) обладали золи с соотношением прекурсора к восстановителю 32:1, 1:4 и 1:16, соответственно.

RESULTS

At the first stage, the synthesis of selenium nanoparticles was carried out using different reducing agents, samples of selenium nanoparticle sols were obtained, the images of which are presented in Fig.1.

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

To better visualise the reduction process, the selenium nanoparticle formation reactions are presented in Table 2.

In the second step, to determine the optimum ratio of precursor and reducing agent on the stability and size of selenium nanoparticles, the synthesis of selenium nanoparticles with different concentration ratio of reducing agent and selenium

Стоит отметить, что образцы наночастиц селена, восстановленные с использованием L-цистеина и гидразина солянокислого, не обладали агрегативной устойчивостью и коагулировали в течение некоторого времени после синтеза.

Важно отметить, что при использовании боргидрида натрия, L-цистеина, тиомочевины и гидразина солянокислого в качестве восстановителя в результате реакции выделяются газообразные продукты реакции (водород, углекислый газ, азот), которые препятствуют формированию однородного слоя стабилизатора на поверхности частиц.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе работы было проведено исследование процесса восстановления наночастиц селена. Анализ исследования показал, что наиболее стабильными являются образцы наночастиц селена, восстановленные с использованием аскорбиновой кислоты и боргидрида натрия. Стоит отметить, что восстановление не произошло в образцах, где в качестве восстановителей использовались цитрат натрия, глюкоза, мочевины и уротропин.

Для определения оптимального соотношения прекурсора и восстановителя получены зависимости среднего гидродинамического радиуса от соотношения компонентов методом фотонной корреляционной спектроскопии. На этом этапе в качестве восстановителей использовались аскорбиновая кислота, боргидрид натрия и тиомочевина. Анализ данных показал, что в серии с аскорбиновой кислотой образцы с оптимальным размером получены при соотношениях прекурсора к восстановителю 1:8, 1:4 и 1:2. Средний гидродинамический радиус полученных золь составляет 15, 14 и 15 нм соответственно. В серии с боргидридом натрия определено соотношение прекурсора к восстановителю 1:2 с размером 17 нм. В свою очередь, образцы с использованием тиомочевины в качестве восстановителя, хоть и отличались оптимальным размером, но коагулировали в течение 60 мин после синтеза.

После исследования типа восстановителя на процесс образования наночастиц селена можно заключить, что оптимальным восстановителем является аскорбиновая кислота, при использовании которой не происходит выделения газообразных продуктов реакции.

precursor selenic acid was carried out. Selenium nanoparticle sols were investigated using the following reducing agents: Sodium borohydride (NaBH_4), ascorbic acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$), thiourea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$), hydrazine hydrochloric acid ($\text{N}_2\text{H}_5\text{Cl}$), L-cysteine ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$). The surfactant cocamidopropyl betaine was used as a stabiliser.

Figure 2 shows samples of selenium nanoparticle sols using ascorbic acid, sodium borohydride, L-cysteine, thiourea, and hydrazine hydrochloride as reducing agent.

To determine the optimal ratio of precursor and reducing agent, the dependences of the average hydrodynamic radius and light scattering intensity on the ratio of components were obtained by photon correlation spectroscopy. At this stage, ascorbic acid, sodium borohydride and thiourea were used as reducing agents, since the samples using these substances showed the highest stability.

Table 3 shows the values of average hydrodynamic radii of selenium nanoparticle sols as a function of precursor to reducing agent concentration ratio.

DISCUSSION

According to the results of the study of the influence of the type of reducing agent, it was determined that the most aggregatively unstable were the samples obtained using hydrazine, sodium thiosulfate and L-cysteine – these samples precipitated within 60 minutes after synthesis. No precipitation was observed in samples using ascorbic acid, sodium borohydride and thiourea and stable samples of nanoscale selenium were obtained. With the other reducing agents (sodium citrate, glucose, urea and urotropine) no reaction of selenium nanoparticles formation occurred.

As a result of analysing the obtained data, it was found that the nanoparticles synthesised using hydrazine and L-cysteine have the highest values of mean hydrodynamic radius of 385.5 nm and 157.8 nm, respectively. Selenium nanoparticles obtained using ascorbic acid have an average hydrodynamic radius of – 12.93 nm, using sodium borohydride – 23.16 nm, with thymourea – 21.85 nm, with sodium thiosulphate – 12.93 nm.

According to the results of the study of the optimum ratio of precursor and reducing agent according to the results of photon correlation spectroscopy of the samples, it was determined that in the series of experiments with sodium borohydride, the most optimal ratio of precursor and reducing agent was 1:2, and the size of the samples in this series was 17 nm.



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. Kieliszek M. Selenium-fascinating microelement, properties and sources in food // Molecules. 2019. T. 24. № 7. С. 1298.
2. Lungu I.I. et al. A Review of Essential Microelements in the Immune System // International Journal of Immunology. 2022. T. 10. № 1. С. 1-4.

In the series with ascorbic acid, the most stable samples were obtained with a ratio of 1:8, 1:4, 1:2. These sols have a size of 15, 14 and 15 nm, respectively. Samples with a reducing agent content greater than the 1:8 ratio are less stable and coagulate faster.

In the series using thiourea, samples with component ratios of 16:1, 8:1, 4:1 exhibited optimal mean hydrodynamic radii (26, 22, 22 nm, respectively) but were unstable over time and coagulated within 60 min of synthesis.

In the series of experiments using L-cysteine, the optimum size (42 and 40 nm) were samples with precursor to reducing agent ratios of 1:16 and 1:32, and in the samples where the reducing agent was hydrazine hydrochloric acid, the optimum mean hydrodynamic radius (21, 38 and 35 nm) were possessed by sols with precursor to reducing agent ratios of 32:1, 1:4 and 1:16, respectively. It is worth noting that the samples of selenium nanoparticles reduced using L-cysteine and hydrazine hydrochloride did not possess aggregation stability and coagulated for some time after synthesis.

It is important to note that when sodium borohydride, L-cysteine, thiourea and hydrazine



г. Махачкала
10-14 октября



vacuum.org.ru



30-я конференция «Вакуумная наука и техника»

Научно-техническая конференция с участием
зарубежных специалистов

Секция 1. Физические явления в вакууме
Секция 2. Вакуумные системы и устройства
Секция 3. Специальное технологическое оборудование
Секция 4. Тонкопленочные покрытия и наноструктуры
Секция 5. Эмиссионные процессы и источники заряженных частиц в приборах и устройствах



ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



3. **Bjørklund G. et al.** Selenium: an antioxidant with a critical role in anti-aging // *Molecules*. 2022. V. 27. No. 19. P. 6613.
4. **Flohé L., Toppo S., Orian L.** The glutathione peroxidase family: Discoveries and mechanism // *Free Radical Biology and Medicine*. 2022. V. 187. PP. 113–122.
5. **Fang X. et al.** The molecular and metabolic landscape of iron and ferroptosis in cardiovascular disease // *Nature Reviews Cardiology*. 2023. V. 20. No. 1. PP. 7–23.
6. **Miao Z. et al.** The antagonistic effect of selenium on lead-induced apoptosis and necroptosis via P 38/JNK/ERK pathway in chicken kidney // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2022. V. 231. PP. 113176.
7. **Błażej Grabowska J. et al.** Effect of long-acting selenium preparation on health and productivity of sheep // *Animals*. 2022. V. 12. No. 2. P. 140.
8. **Zheng Y. et al.** Effects of selenium as a dietary source on performance, inflammation, cell damage, and reproduction of livestock induced by heat stress: A review // *Frontiers in Immunology*. 2022. V. 12. P. 6002.
9. **Chen W. et al.** Chitosan-based selenium composites as potent Se supplements: Synthesis, beneficial health effects, and applications in food and agriculture // *Trends in Food Science & Technology*. 2022.
10. **Huang J. et al.** Selenium Status and Its Antioxidant Role in Metabolic Diseases // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2022. V. 2022.
11. **Ojeda M.L., Nogales F.** Dietary Selenium and Its Antioxidant Properties Related to Growth, Lipid and Energy Metabolism // *Antioxidants*. 2022. V. 11. No. 7. P. 1402.
12. **Vijayakumar S. et al.** A review on biogenic synthesis of selenium nanoparticles and its biological applications // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2022. V. 32. No. 7. PP. 2355–2370.
13. **Abadi B. et al.** Capping agents for selenium nanoparticles in biomedical applications // *Journal of Cluster Science*. 2022. PP. 1–22.
14. **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.
15. **Blinov A.V. et al.** Synthesis and characterization of selenium nanoparticles stabilized with cocamidopropyl betaine // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. No. 1. P. 21975.
16. **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.

hydrochloride are used as reducing agents, the reaction results in the release of gaseous reaction products (hydrogen, carbon dioxide, nitrogen), which prevent the formation of a homogeneous layer of stabiliser on the particle surface.

CONCLUSIONS

Thus, in the course of the work, the process of reduction of selenium nanoparticles was investigated. The analysis of the study showed that the most stable are the samples of selenium nanoparticles reduced using ascorbic acid and sodium borohydride. It is worth noting that the reduction did not occur in the samples where sodium citrate, glucose, urea and urotropine were used as reducing agents.

To determine the optimal precursor and reducing agent ratio, the dependences of the average hydrodynamic radius on the ratio of components were obtained by photon correlation spectroscopy. At this stage, ascorbic acid, sodium borohydride and thiourea were used as reducing agents. The data analysis showed that in the series with ascorbic acid the samples with optimum size were obtained at precursor to reducing agent ratios of 1:8, 1:4 and 1:2. The average hydrodynamic radius of the obtained sols is 15, 14 and 15 nm, respectively. In the series with sodium borohydride, a precursor to reducing agent ratio of 1:2 was determined with a size of 17 nm. In turn, the samples using thiourea as a reducing agent, although characterised by optimal size, coagulated within 60 min after synthesis.

After studying the reducing agent type on formation of selenium nanoparticles, it can be concluded that the optimal reducing agent is ascorbic acid, which does not produce gaseous reaction products.

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.*

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИИ И НАУК О МАТЕРИАЛАХ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО МАТЕРИАЛАМ И НАНОМАТЕРИАЛАМ
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БАЙКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА

VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НАНОМАТЕРИАЛАМ



**Приглашаем Вас принять участие в VIII–ой
Всероссийской конференции по наноматериалам**

21 – 24 НОЯБРЯ 2023 ГОДА

Место проведения

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова
Российской академии наук (ИМЕТ РАН),
г. Москва, Ленинский проспект, д.49.

Направления конференции

-  Фундаментальные основы синтеза нанопорошков
-  Наноструктурные пленки и покрытия в конструкционных и функциональных материалах
-  Объемные наноматериалы
-  Инновационные применения нанотехнологий (энергетика, машиностроение, медицина и др.) и развитие методов аттестации наноматериалов

Регистрация и прием тезисов возможны на сайте конференции в режиме **on – line до 15 сентября 2023 года**.

Сборник докладов конференции НАНО–2023 будет размещен в наукометрической базе РИНЦ.

С подробной информацией Вы можете ознакомиться на сайте конференции **www.nano.imetran.ru**

Тел.: +7(499) 135 4425
Факс: +7(499) 135 8680
E–MAIL: NANO@IMETRAN.RU

WWW.NANO.IMETRAN.RU