

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>
<https://elibrary.ru/GCUDDN>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Химический синтез наночастиц селена: исследование метода и перспектив его применения



А. С. Жигайлов^{1,*}, Е. А. Вечтомова¹,
О. В. Козлова¹, А. Л. Верещагин²

¹ Кемеровский государственный университет , Кемерово, Россия

² Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова , Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 28.10.2025

Принята после рецензирования: 03.12.2025

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: szhigailov@ya.ru

© А. С. Жигайлов, Е. А. Вечтомова, О. В. Козлова,

А. Л. Верещагин, 2026



Аннотация.

Селен – жизненно важный микроэлемент, однако его биодоступность и токсичность сильно зависят от химической формы. Наночастицы селена (SeNPs) представляют значительный интерес благодаря повышенной биодоступности, низкой токсичности и выраженным антиоксидантным свойствам по сравнению с органическими и неорганическими формами селена. Ключевой проблемой в их применении остается агрегация частиц, ведущая к потере коллоидной стабильности. Цель исследования – изучить особенности получения наночастиц селена методом химического восстановления селенсодержащего прекурсора с использованием различных восстановителей; исследовать размер, морфологию и стабильность получаемых наночастиц и оценить перспективы их применения.

Объекты исследования – стабильные дисперсии наночастиц селена (SeNPs). Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления селенистой кислоты (H_2SeO_3) в водной среде. В качестве восстановителей исследовали аскорбиновую кислоту и тиосульфат натрия. Для стабилизации образующихся наночастиц применяли полисорбат 80 (Tween 80), альгинат натрия и кукурузный крахмал. Полученные золи характеризовали методами УФ-спектрофотометрии (концентрация селена, калибровочные зависимости) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным детектором (размер, морфология, элементный состав, распределение частиц). Дополнительно измеряли вязкость стабилизированных систем.

Установлено, что аскорбиновая кислота – более эффективный восстановитель, чем тиосульфат натрия. Наилучшая стабилизация достигнута с полисорбатом 80: образец на основе аскорбиновой кислоты и полисорбата 80 показал равномерное распределение селена с минимальным размером частиц (0,2–0,7 мкм) и максимальным содержанием Se (3,62 %). Высоковязкие стабилизаторы, напротив, провоцировали агрегацию. Оптимальное соотношение селенистая кислота:восстановитель составило 1:4.

Система на основе аскорбиновой кислоты и полисорбата 80 формирует дисперсии наночастиц селена с равномерным распределением, гидродинамическим радиусом порядка десятков нанометров и повышенной коллоидной стабильностью. Такие системы перспективны для применения в качестве источника селена при обогащении пищевых продуктов (хлебобулочных, молочных и мясных), а также при создании препаратов для биофортификации сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова. Наночастицы селена, химический синтез, стабилизаторы, восстановители, агротехнологии, коллоидная стабильность

Для цитирования: Жигайлов А. С., Вечтомова Е. А., Козлова О. В., Верещагин А. Л. Химический синтез наночастиц селена: исследование метода и перспектив его применения. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 317–327. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>

Chemical Synthesis of Selenium Nanoparticles: Application Prospects



Alexander S. Zhigailov^{1,*}, Elena A. Vechtomova¹,
Oksana V. Kozlova¹, Alexander L. Vereshchagin²

¹ Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

² Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Received: 28.10.2025

Revised: 03.12.2025

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: szhigailov@ya.ru

© A.S. Zhigailov, E.A. Vechtomova, O.V. Kozlova, A.L. Vereshchagin, 2026



Abstract.

Selenium is an essential micronutrient, but its bioavailability and toxicity depend on its chemical form. Selenium nanoparticles (SeNPs) are of significant interest due to their increased bioavailability, low toxicity, and pronounced antioxidant properties compared to organic and inorganic forms of selenium. However, particle aggregation, leading to a loss of colloidal stability, remains a key challenge in their industrial application. The research investigated the method of obtaining selenium nanoparticles by chemical reduction of a selenium-containing precursor using various reducing agents. The research objective was to study the size, morphology, and stability of the resulting nanoparticles and to evaluate the prospects for their application.

Stable selenium nanoparticles were synthesized by chemical reduction of selenious acid (H_2SeO_3) in an aqueous medium. Ascorbic acid and sodium thiosulfate were studied as reducing agents. Polysorbate 80 (Tween 80), sodium alginate, and corn starch were used to stabilize the resulting nanoparticles. The resulting solids were characterized by UV spectrophotometry to determine the selenium concentration and construct calibration curves. Particle size, morphology, elemental composition, and distribution within the samples were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) with an energy-dispersive detector. The tests also included viscosity of the stabilized systems.

Ascorbic acid proved to be a more effective reducing agent than sodium thiosulfate. The best stabilization results belonged to Polysorbate 80. The sample based on ascorbic acid and Polysorbate 80 showed a uniform distribution of selenium with the smallest particle size (0.2–0.7 microns) and the highest selenium content (3.62%). Highly viscous stabilizers provoked agglomeration. The optimal ratio of H_2SeO_3 :reducing agent was 1:4.

When ascorbic acid served as a reducing agent and Polysorbate 80 as a stabilizer, the dispersion of selenium nanoparticles was uniform, the hydrodynamic radius was tens of nanometers, and the colloidal stability was high. Such systems are promising as a source of selenium in the fortification of bakery, dairy and meat food products, as well as in innovative biofortification of crops.

Keywords. Selenium nanoparticles, chemical synthesis, stabilizers, reducing agents, agricultural technology, colloidal stability

For citation: Zhigailov AS, Vechtomova EA, Kozlova OV, Vereshchagin AL. Chemical Synthesis of Selenium Nanoparticles: Application Prospects. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(2):317–327. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2639>

Введение

Селен (Se) – незаменимый микроэлемент, необходимый для функционирования большинства живых существ. Он является основным структурным компонентом ферментов, таких как глутатионпероксидаза, тиоредоксинредуктаза и дейодиназа, которые играют важную роль в антиоксидантной защите, правильной работе репродуктивной системы и мышц и профилактике онкологических заболеваний [1]. Элементарный селен не обладает биологической активностью, но выполняет свои биологические функции за счет включения в состав селеноцистеина и селенометионина с последующим встраиванием в белок. В организме человека селеновые аминокислоты интегрируются как минимум в 25 селенопротеинов.

В настоящее время внимание многих исследователей приковано к роли селена в поддержании широкого спектра физиологических процессов в организме, что обуславливает устойчивый интерес к изучению биологического значения этого элемента. В организм человека или животного селен поступает по цепочке: почва – растение – организм. Растения способны усваивать только ту часть селена, которая находится в подвижных водорастворимых формах, к ним относятся селенаты, обменно-поглощенные селениты и некоторые органические соединения [2].

Нанотехнологии – междисциплинарная область науки, занимающаяся получением, обработкой и применением наноматериалов. Их появление на мировой научной арене значительно расширило возможности

применения многих материалов. Благодаря тому, что наноматериалы обладают свойствами, отличными от характеристик сыпучих аналогов, некоторые из них нашли применение в новых областях [3–6]. Нанотехнологии служат перспективным инструментом во многих областях исследований: фармацевтике, сельском хозяйстве, пищевой и химической промышленности, электронике и машиностроении. Наноматериалы демонстрируют новые физические и химические свойства, связанные с их наноразмерностью. Один из таких материалов – элементарный селен. Синтез и применение наночастиц селена (SeNPs) привлекли внимание ученых в силу ряда преимуществ, включая химическую стабильность, биосовместимость и низкую токсичность [7]. Наночастицы селена предложены в качестве нового типа удобрений, их синтезируют с помощью физических, химических или биологических процессов, получая различные размеры, стабильность и биодоступность [8]. По сравнению с органическими и неорганическими соединениями селена, такими как селеновые аминокислоты и соли селеносодержащих кислот, наночастицы используются для обеспечения безопасности пищевых продуктов [9].

В пищевой промышленности наночастицы селена (SeNPs) перспективны как многофункциональные добавки за счет их антибактериальных свойств и способности продлевать срок хранения продуктов [10]. Наночастицы интегрируются в съедобные покрытия на основе альгината натрия, обеспечивая как защиту от микробной порчи гидропонных фруктов (например клубники), так и обогащение их селеном в биодоступной форме. Такие системы повышают питательную ценность продуктов, улучшают антиоксидантный потенциал и способствуют формированию функциональных пищевых ингредиентов [11].

Кроме того, применение SeNPs в агротехнологиях позволяет получать сельскохозяйственную продукцию с повышенным содержанием селена уже на этапе выращивания, что усиливает цепочку обогащения пищи микроэлементом от почвы до потребителя. Стабилизация наночастиц полисахаридами (альгинатом и крахмалом) и поверхностно-активными веществами обеспечивает их равномерное распределение в пищевых матрицах без потери коллоидной стабильности [12, 13].

Синтез наночастиц селена осуществляется двумя методами: «сверху вниз» и «снизу вверх». Первый из них основан на уменьшении размера макроскопического материала до более мелких частиц с помощью физических процессов (литографии, импульсной лазерной абляции, ультразвука, микроволн и электроосаждения) с последующей агрегацией с образованием наночастицы. Во втором случае синтез наночастиц происходит путем самосборки атомов, формирующих новое ядро, которое растет с получением нанометрических структур как химическими, так и биологическими процессами [14]. Химические методы синтеза наночастиц селена используют растворимые соедине-

ния микроэлемента. Эта группа методов заключается в восстановлении высоковалентного селена до простого состояния в восстановительной реакционной системе. Химическое восстановление селена обычно включает добавление стабилизаторов или диспергаторов и восстановителей в раствор селеносодержащего прекурсора. В качестве стабилизаторов выступают полисахариды, белки и поверхностно-активные вещества [15]. Химический синтез SeNPs требует использование таких реагентов, как боргидрид натрия, цитрат натрия и аскорбиновая кислота, которые оказывают восстанавливающее действие на селеносодержащий прекурсор. Наночастицы селена нестабильны и имеют тенденцию к агрегации, поэтому крайне важно разработать простые и эффективные методы повышения их дисперсности и стабильности. Как отражено в многочисленных работах, наноразмерный селен обладает выраженными антиоксидантными свойствами и низкой токсичностью по сравнению с неорганическими формами селена, что определяет его перспективность для биомедицинских применений.

В работе А. В. Блинова и др. [16] синтез наночастиц осуществляли методом химического восстановления селенистой кислоты (H_2SeO_3) в водной среде с применением кокамидопропилбетаина в качестве стабилизирующего агента. Были исследованы десять восстановителей, включая аскорбиновую кислоту, боргидрид натрия, тиомочевину, гидразин гидрохлорид и L-цистеин. Установлено, что наиболее эффективным восстановителем признана аскорбиновая кислота – средний гидродинамический радиус 12,93 нм, дзета-потенциал –16,69 мВ; в то время как у боргидрида натрия – 23,16 нм, –4,80 мВ; у тиомочевины – 21,85 нм, –9,71 мВ. При этом образцы, полученные с гидразином, тиосульфатом натрия и L-цистеином, демонстрировали склонность к коагуляции в течение 60 мин после синтеза. Оптимизация соотношения прекурсор:восстановитель показала, что для системы с аскорбиновой кислотой оптимальным признано молярное соотношение 1:4, обеспечивающее образование наночастиц с гидродинамическим радиусом 14 нм и высокой коллоидной стабильностью. Использование аскорбиновой кислоты в качестве восстановителя исключает образование газообразных побочных продуктов, что является существенным преимуществом по сравнению с другими исследованными восстановителями. Полученные результаты имеют важное значение для разработки эффективных методов синтеза стабильных наночастиц селена с контролируемыми характеристиками для потенциальных применений в медицине и биотехнологии.

Использование наночастиц селена для обогащения растений селеном представляет собой перспективное направление в пищевой промышленности, а также в агротехнологиях и бионанотехнологии. В связи с этим предложено синтезировать и применять эти наночастицы в качестве источника селена для растений.

Цель исследования – изучить особенности получения наночастиц селена методом химического восстановления селенсодержащего прекурсора с использованием различных восстановителей; исследовать размер, морфологию и стабильность получаемых наночастиц и оценить перспективы их применения.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – стабильные дисперсии наночастиц селена (SeNPs). Синтез наночастиц селена проводили методом химического восстановления прекурсора селена в водной среде в присутствии стабилизаторов согласно описанной ранее методике [16]. В качестве селенсодержащего прекурсора использовали селенистую кислоту (H_2SeO_3 , ЧДА, ООО «Компонент-Реактив», Россия). В ходе работы исследовали золи наночастиц селена, полученные с использованием восстановителей: аскорбиновой кислоты (пищевая марка, CSPC Pharmaceutical Group, Китай), тиосульфата натрия (АО «ХимМед», Россия), а также стабилизаторов: полисорбата 80 (Guangdong Runhua Chemistry Co., Ltd., Китай), альгината натрия (ООО «Реахим», Россия) и кукурузного крахмала (ООО ПО «Агрегат», Россия).

Селенистая кислота (H_2SeO_3) представляет собой бесцветные ромбические кристаллы, кристаллизующиеся из растворов SeO_2 с плотностью $3,004 \text{ г/см}^3$. Она хорошо растворима в воде, однако при нагревании до 72°C разлагается по перитектической реакции на SeO_2 и ее насыщенный раствор. Селенистая кислота – слабая и уступает сернистой. В кислых средах она легко окисляется пероксидом водорода или перманганатом калия до H_2SeO_4 , тогда как окисление хромом и бромом протекает обратимо. Более характерны для селенистой кислоты окислительные свойства: восстановление

сероводородом, диоксидом серы и иодоводородом до элементарного селена.

Аскорбиновая кислота – сильный восстановитель за счет наличия двух гидроксильных групп в молекуле. Механизм ее действия заключается в передаче электронов с образованием дегидроаскорбиновой кислоты.

Тиосульфат натрия – мягкий восстановитель, который вступает в реакцию с селенистой кислотой, образуя тетраионат и элементарный селен. Недостатком является более длительный период восстановления по сравнению с аскорбиновой кислотой.

Полисорбат (Tween 80) – неионный поверхностно-активный агент, используемый для стабилизации коллоидных растворов. Вещество образует защитную оболочку вокруг наночастиц, предотвращая их агрегацию и оседание.

Альгинат натрия – полисахарид, обладающий хорошими эмульгирующими и стабилизирующими свойствами. Полисорбат помогает удерживать наночастицы в суспензии, однако его растворимость в воде может быть ограничена, что затрудняет равномерное распределение в растворе.

Кукурузный крахмал служит источником углеводов и может действовать как стабилизирующий агент, образуя защитные оболочки вокруг наночастиц. Несмотря на это, его растворимость в холодной воде низка, что приводит к образованию мутного раствора и снижает эффективность стабилизации.

Использование наночастиц селена для обогащения растений представляет собой перспективное направление в агротехнологиях и бионанотехнологии. В связи с этим предложено синтезировать и использовать наночастицы в качестве источника селена для растений. Схема синтеза представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема химического синтеза

Figure 1. Chemical synthesis

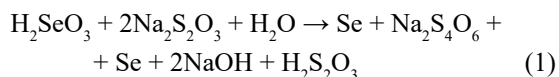
Мольные соотношения прекурсор:восстановитель подбирали исходя из литературных данных о протекании восстановительных реакций селена и предварительных экспериментов. Методика определения концентрации раствора наночастиц спектрофотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5400УФ (ООО «Экохим», Россия), включает несколько этапов: приготовление стандартных растворов для построения калибровочного графика (из стандартного раствора высокой концентрации приготовили серию разбавленных растворов разной концентрации путем последовательного разбавления: 100, 75, 50, 25 и 0 %); измерение оптической плотности на длине волны, соответствующей максимуму поглощения ($\lambda = 345$ нм). Кинематическую вязкость определяли в соответствии с ГОСТ 33768-2015.

Электронно-микроскопическое исследование химического состава и размера наночастиц проводили методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JSM-6390 (JEOL Ltd., Япония) с рентгеновским энергодисперсионным детектором JED 2300 (JEOL Ltd., Япония) в режиме регистрации: обратно-рассеянных электронов с конфигурацией детекторов электронов (контраст изображения преимущественно зависит от химического состава) и по характеристическому рентгеновскому излучению для определения химического состава и картирования элементов поверхности. Каплю образца наносили на проводящий двусторонний скотч, приклеенный к предметному столику. После высушивания образовавшийся осадок растерался по поверхности скотча.

Результаты и их обсуждение

Реакция между тиосульфатом натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) и селенистой кислотой (H_2SeO_3) происходит по механизму окислительно-восстановительных реакций, где $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ выступает в роли восстановителя, а H_2SeO_3 – окислителя. В ходе процесса тиосульфат натрия окисляется до тетрагидратата натрия ($\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$), тогда как селенистая кислота восстанавливается до элементарного селена (Se).

Общая схема реакции (1):

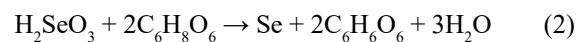


Скорость данной реакции ниже, а ее ход менее предсказуем. Визуально процесс сопровождается изменением окраски системы от бледно-красного до практически бесцветного состояния, что свидетельствует о вариативности размеров и распределения формирующихся наночастиц селена.

При использовании аскорбиновой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) в качестве восстановителя процесс протекает стабильнее. Селенистая кислота выступает в роли окислителя, а аскорбиновая кислота – восстановителя. Аскорбиновая кислота теряет электроны и окисляется

до дегидроаскорбиновой кислоты ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$), что сопровождается потерей двух электронов и двух протонов. Селенистая кислота принимает электроны от аскорбиновой кислоты и восстанавливается до элементарного селена (Se), при этом происходит образование воды и выделение протонов.

Общая схема реакции (2):



Кислая среда облегчает окисление аскорбиновой кислоты, способствуя протеканию реакции. В результате формируется раствор винного оттенка, что указывает на образование мелкодисперсных наночастиц селена.

Для стабилизации синтезированных наночастиц селена исследованы три типа стабилизаторов: альгинат натрия, полисорбат 80 (Tween 80) и кукурузный крахмал.

Альгинат натрия (вязкость 1,2588 мм²/с) – высоковязкий полимер, формирующий гелеподобные структуры. Обладает высокой влагоудерживающей способностью и эффективно защищает частицы от агрегации. Однако повышенная вязкость может затруднять транспортировку и обработку растворов. При использовании с аскорбиновой кислотой или тиосульфатом натрия получается прозрачный раствор, который со временем мутнеет и приобретает окраску, напоминающую морковный сок.

Полисорбат 80 (Tween 80, вязкость 0,7756 мм²/с) – низковязкий стабилизатор, хорошо диспергирующийся в водной среде, создавая тонкие защитные слои вокруг наночастиц и обеспечивая устойчивость коллоидной системы. В сочетании с аскорбиновой кислотой образует прозрачный раствор винного цвета, а с тиосульфатом натрия – прозрачный раствор бледно-красного оттенка.

Кукурузный крахмал (вязкость 0,8186 мм²/с) – обеспечивает вязкую среду, способствующую равномерному распределению наночастиц. Однако его медленная растворимость в воде осложняет получение однородных систем. Применение крахмала наиболее целесообразно для краткосрочного хранения. Растворы с данным стабилизатором имеют мутную консистенцию, визуальную схожую с томатным соком.

Для подтверждения наличия селена в системе был проведен анализ спектров поглощения в диапазоне $\lambda = 200$ –800 нм. Наибольшая прозрачность наблюдалась у образцов, полученных с использованием аскорбиновой кислоты и тиосульфата натрия [17]. На рисунке 2 зарегистрирован характерный пик при $\lambda = 345$ нм, соответствующий наночастицам селена, что согласуется с литературными данными по спектрам коллоидного селена и дополнительно подтверждает формирование наночастиц в исследуемых системах [18].

Определение концентрации Se проводили спектрофотометрическим методом при $\lambda = 345$ нм. На рисунке 3 представлена градуировочная кривая.

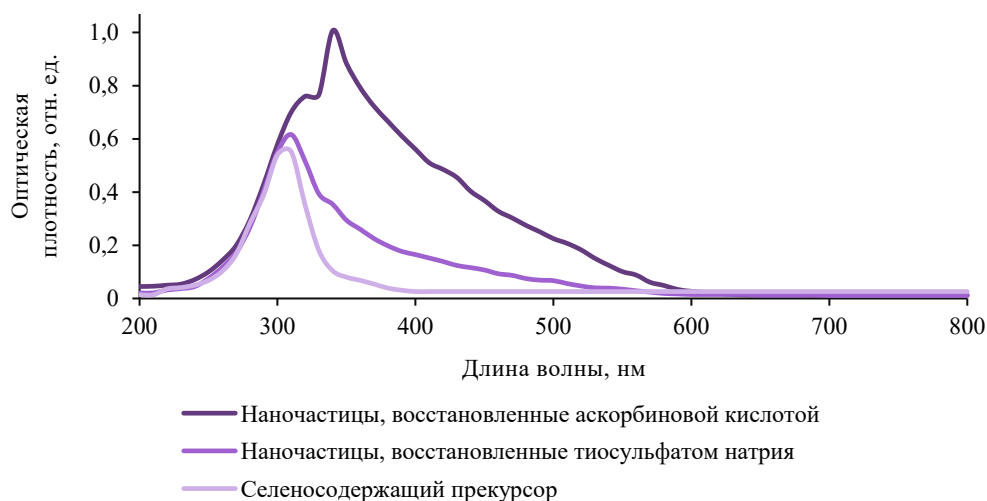


Рисунок 2. Спектры поглощения наночастиц селена

Figure 2. Absorption spectra of selenium nanoparticles

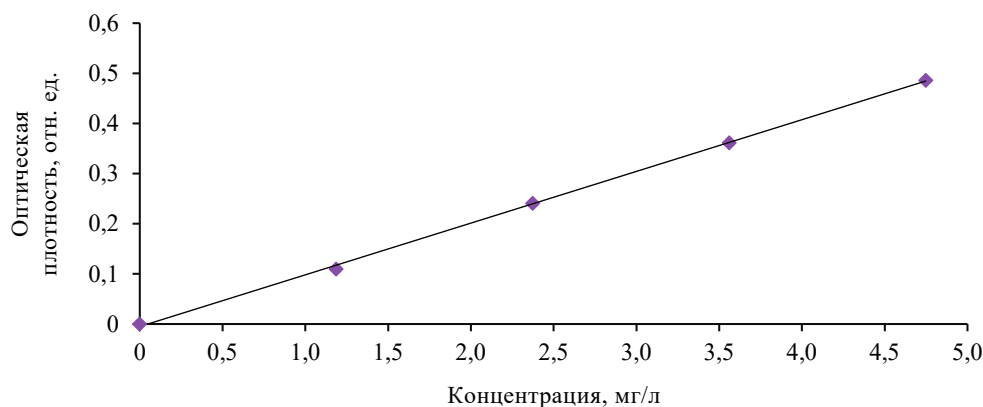


Рисунок 3. Градуировочная кривая определения концентрации селена

Figure 3. Calibration curve for determining selenium concentration

По результатам измерений построен график зависимости оптической плотности от концентрации. Проведена линейная аппроксимация полученных точек, уравнение прямой имеет вид:

$$D = 0,1031 \times Cm - 0,005$$

где D – оптическая плотность, отн. ед.; Cm – концентрация селена, мг/л.

Коэффициент корреляции ($R^2 = 0,9994$) близок к единице, что свидетельствует о хорошей линейности градуировочной кривой и позволяет использовать данную калибровку для количественного анализа селена в растворах.

Вязкость стабилизатора является одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость систем наночастиц селена, влияя на подвижность и взаимодействие частиц в коллоидной системе, а также предотвращая их агрегацию.

При повышении вязкости стабилизатора подвижность наночастиц селена уменьшается вследствие подавления броуновского движения. Снижение скорости перемещения частиц приводит к уменьшению частоты их столкновений, тем самым минимизируя вероятность агрегации. Высоковязкие стабилизаторы, особенно полимерной природы, способны формировать более толстые защитные слои на поверхности наночастиц, усиливая пространственное отталкивание и повышая устойчивость коллоидной системы. Повышение вязкости среды также замедляет диффузию химических активных компонентов, обеспечивая контролируемое протекание процессов зародышеобразования и роста частиц, что способствует формированию более однородного распределения по размерам.

Однако чрезмерное увеличение вязкости может отрицательно сказаться на кинетике реакции и технологическом процессе. Ограничение массопереноса восстановителя или селеновой кислоты к реакционным

центрам способно приводить к неполному восстановлению прекурсора и неравномерному образованию зародышей. Кроме того, снижение текучести системы затрудняет стадии смешивания, обработки и последующей очистки продукта.

При низкой вязкости наночастицы селена сохраняют высокую подвижность, что приводит к частым столкновениям и повышает вероятность их агрегации. Стабилизаторы с низкой вязкостью также имеют тенденцию образовывать более тонкие защитные слои, которые не обеспечивают достаточного пространственного барьера, что приводит к снижению коллоидной стабильности со временем или при изменении условий окружающей среды. Графическое представление вязкости растворов представлено на рисунке 4.

Повышенная вязкость среды, характерная для альгината натрия, снижает подвижность частиц из-за подавления броуновского движения, что способствует уменьшению их агрегации. Одновременно высоковязкие

системы обеспечивают формирование более выраженных защитных слоев вокруг наночастиц, усиливая пространственное отталкивание между ними. Вместе с тем чрезмерное увеличение вязкости может отрицательно влиять на кинетику процесса, затрудняя массоперенос реагентов.

Стабилизаторы с более низкой вязкостью, такие как полисорбат 80 и крахмал, гарантируют лучшую текучесть системы, однако меньшая толщина стабилизирующего слоя повышает вероятность агрегации наночастиц.

На рисунках 5–10 представлены карты распределения частиц исследуемых образцов (1–6). Образец 1 представлял собой систему $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + альгинат натрия; образец 2 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ + полисорбат 80; образец 3 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{H}_2\text{SeO}_3$ + кукурузный крахмал; образец 4 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + кукурузный крахмал; образец 5 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + альгинат натрия; образец 6 – $\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ + полисорбат 80.

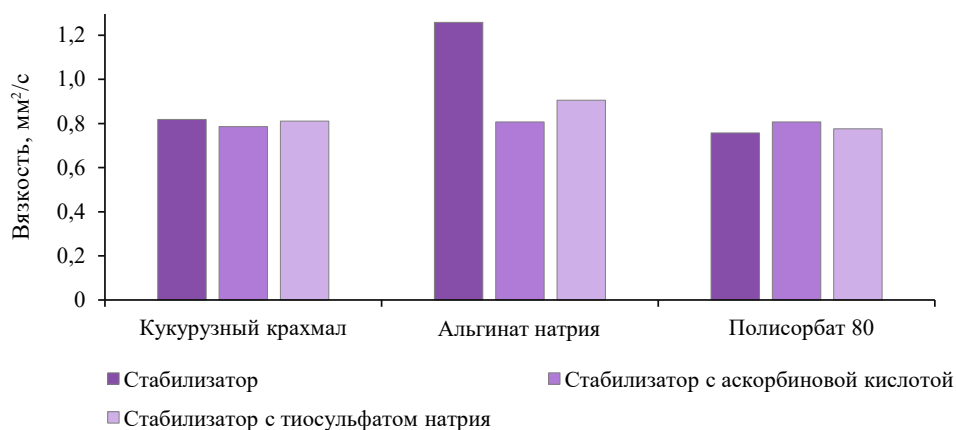


Рисунок 4. Вязкость растворов

Figure 4. Viscosity of solutions

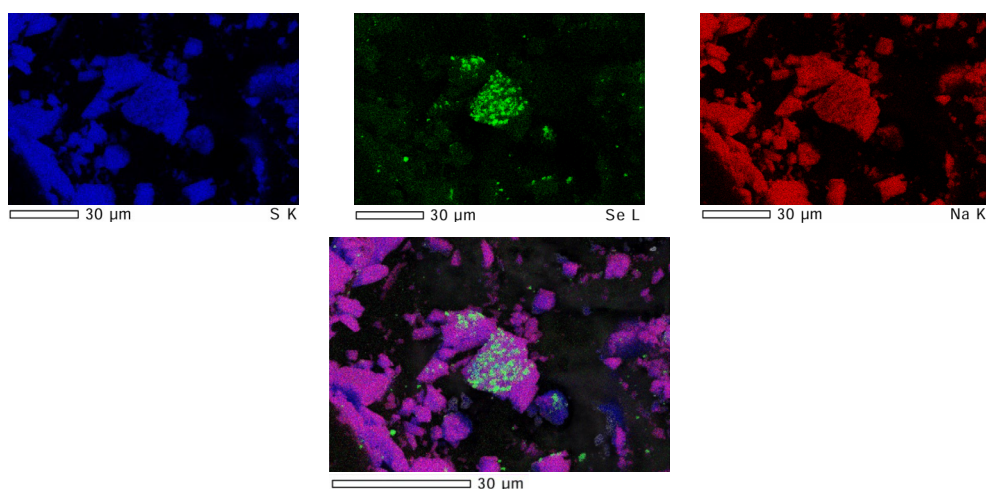


Рисунок 5. Карты распределения частиц образца 1

Figure 5. Particle distribution maps, Sample 1

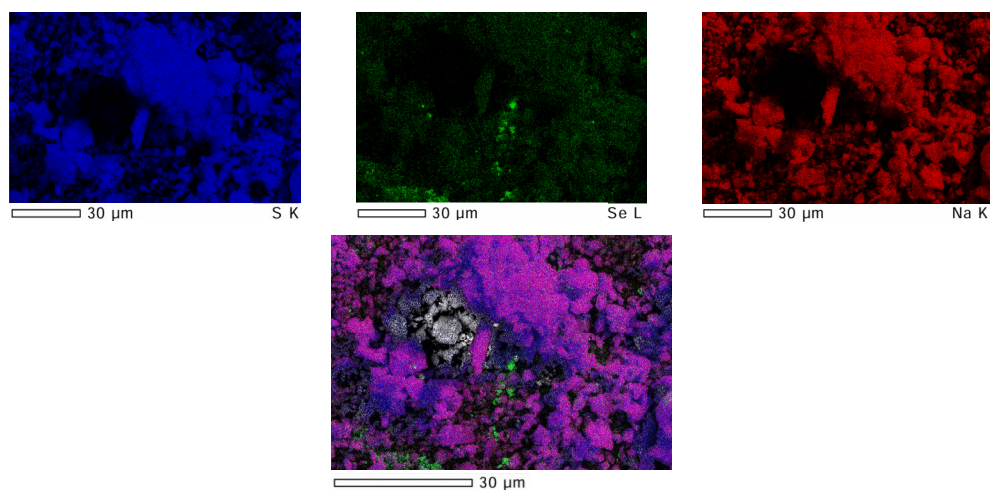


Рисунок 6. Карты распределения частиц образца 2

Figure 6. Particle distribution maps, Sample 2

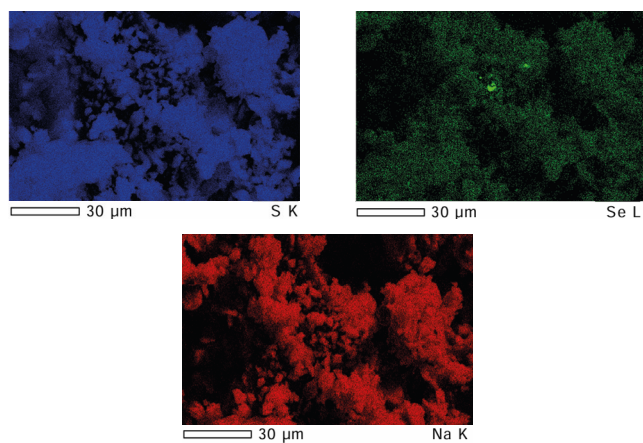


Рисунок 7. Карты распределения частиц образца 3

Figure 7. Particle distribution maps, Sample 3

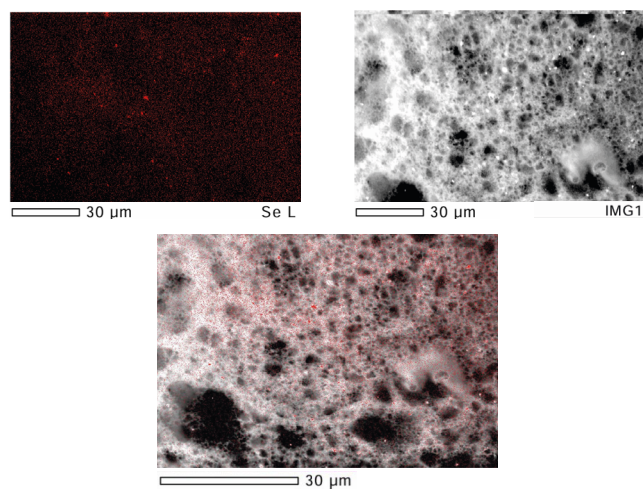


Рисунок 8. Карты распределения частиц образца 4

Figure 8. Particle distribution maps, Sample 4

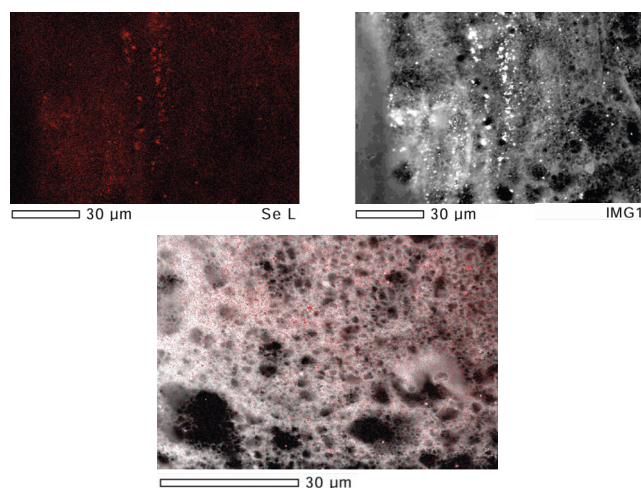


Рисунок 9. Карты распределения частиц образца 5

Figure 9. Particle distribution maps, Sample 5

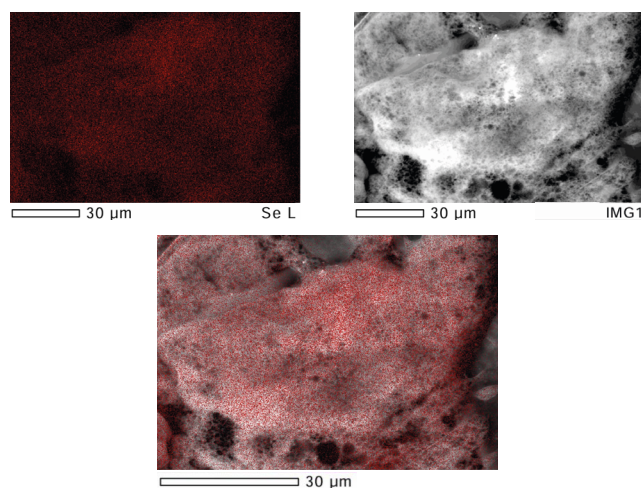


Рисунок 10. Карты распределения частиц образца 6

Figure 10. Particle distribution maps, Sample 6

Элементный состав образца 1 мас. %, углерод – 55,99; кислород – 25,93; натрий – 8,49; сера – 8,78; селен – 0,82. Селен обнаруживается в виде редких скоплений. Картирование показывает неравномерное распределение. На микрофотографиях (масштаб 30 мкм) наблюдаются агломераты размером 1–2 мкм.

Элементный состав образца 2 мас. %, углерод – 64,47; кислород – 21,49; натрий – 6,51; сера – 6,46; селен – 1,07. Селен распределен более равномерно по сравнению с образцом 1, но сохраняет тенденцию к кластеризации. Частицы меньшего размера (0,5–1,0 мкм), что указывает на лучшую диспергирующую способность полисорбата 80.

Элементный состав образца 3 мас. %, углерод – 21,27; кислород – 33,08; натрий – 20,36; сера – 24,21; селен – 1,08. Селен образует мелкие кластеры, но его общее содержание остается низким. Частицы размером 0,3–0,8 мкм с тенденцией к агломерации.

Элементный состав образца 4 мас. %, углерод – 44,96; кислород – 54,67; селен – 0,37. Селен обнаруживается в следовых количествах, четкие частицы не наблюдаются. Частицы не идентифицируются ввиду низкого содержания селена.

Элементный состав образца 5 мас. %, углерод – 56,80; кислород – 41,91; натрий – 0,24; сера – 0,11; селен – 0,94. Селен распределен точно, без образования крупных скоплений. Частицы размером 0,5–1,5 мкм, с умеренной агломерацией.

Элементный состав образца 6 мас. %, углерод – 62,80; кислород – 32,30; натрий – 0,96; сера – 0,31; селен – 3,62. Селен демонстрирует наиболее равномерное распределение среди всех образцов. Частицы мелкие (0,2–0,7 мкм), с минимальной агломерацией.

Наибольшая однородность распределения селена наблюдается в образце 6 ($\text{H}_2\text{SeO}_3 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6 + \text{полисорбат 80}$), где селен равномерно диспергирован по поверх-

ности. В образцах с тиосульфатом натрия (1–3) распределение менее равномерное, с тенденцией к образованию кластеров.

Во всех образцах размеры частиц превышают наноразмерный диапазон (0,2–2,0 мкм). Наименьшие частицы зафиксированы в образцах с полисорбатом 80 (2 и 6), что подтверждает его эффективность в качестве стабилизатора.

Полисорбат 80 обеспечивает лучшую дисперсность частиц по сравнению с альгинатом натрия и кукурузным крахмалом. Высоковязкие стабилизаторы (альгинат и крахмал) способствуют агломерации, особенно в сочетании с тиосульфатом натрия.

Выводы

В результате исследования проведен химический синтез наночастиц селена восстановлением селенистой кислоты в водной среде с использованием различных восстановителей и стабилизаторов. Наиболее эффективным восстановителем признана аскорбиновая кислота, обеспечивающая быстрое и контролируемое протекание реакции без образования газообразных побочных продуктов. Среди исследованных стабилизаторов наилучшие результаты показал полисорбат 80, который способствовал формированию стабильных дисперсий наночастиц с минимальной склонностью к агрегации. Методами спектрофотометрии и электронной микроскопии подтверждено, что полученные таким образом наночастицы селена демонстрируют равномерное распределение в коллоидном растворе. При этом высоковязкие стабилизаторы (альгинат натрия и кукурузный крахмал), напротив, снижая подвижность частиц, могут провоцировать их агломерацию.

Дисперсии наночастиц селена представляют интерес не только для медицины и агротехнологий, но и для пищевой промышленности. Система « H_2SeO_3 – аскорбиновая кислота – полисорбат 80» может быть исполь-

зована при разработке селеносодержащих обогащающих добавок для хлебобулочных, молочных и мясных изделий, где наночастицы селена способны выполнять функцию источника микроэлемента и антиоксидантного компонента. Коллоидная стабильность и контролируемые размеры частиц обеспечивают равномерное распределение селена в пищевой матрице и повышение биодоступности при сниженной токсичности по сравнению с традиционными солями селена.

Критерии авторства

А. С. Жигайлов – проведение эксперимента, анализ данных, визуализация, подготовка исходного варианта рукописи. Е. А. Вечтомова – анализ данных, интерпретация результатов, редактирование рукописи. О. В. Козлова – руководство проектом, методология, утверждение окончательного варианта рукописи. А. Л. Верещагин – постановка научной проблемы, концептуализация исследования, обсуждение результатов и выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.S. Zhigailov performed the experiment, data analysis, and visualization, and drafted the manuscript. E.A. Vechtomova was responsible for the data analysis, interpretation, and proofreading. O.V. Kozlova supervised the project, developed the methodology, and proofread the manuscript. A.L. Vereshchagin formulated the scientific problem, developed the research concept, interpreted the results, and provided scientific counselling.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Список литературы / References

1. Mehdi Y, Hornick J-L, Istasse L, Dufrasne I. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*. 2013;18(3):3292–3311. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>
2. Trippe III RC, Pilon-Smits EAH. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;404:124178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>
3. Filipović N, Ušjak D, Milenković MT, Zheng K, Liverani L, et al. Comparative study of the antimicrobial activity of selenium nanoparticles with different surface chemistry and structure. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:624621. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.624621>
4. Salishcheva OV, Prosekov AYU. Antimicrobial activity of mono- and polynuclear platinum and palladium complexes. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(2):298–311. DOI: <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-2-298-311>
5. Prasad J, Dixit A, Sharma SP, Mwakosya AW, Petkoska AT, et al. Nanoemulsion-based active packaging for food products. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(1):22–36. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-585>
6. Eremeeva NB. Nanoparticles of metals and their compounds in films and coatings: A review. *Foods and Raw Materials*. 2024;12(1):60–79. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-1-588>
7. Hu J, Wang Z, Zhang L, Peng J, Huang T, et al. Seleno-amino acids in vegetables: A review of their forms and metabolism. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:804368. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>

8. Gudkov SV, Shafeev GA, Glinushkin AP, Shkirin AV, Barmina EV, *et al.* Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers. *ACS Omega*. 2020;5(28):17767–17774. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02448>
9. D'Amato R, Regni L, Falcinelli B, Mattioli S, Benincasa P, *et al.* Current knowledge on selenium biofortification to improve the nutraceutical profile of food: A comprehensive review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020;68(14):4075–4097. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00172>
10. Ao B, Du Q, Liu D, Shi X, Tu J, *et al.* A review on synthesis and antibacterial potential of bio-selenium nanoparticles in the food industry. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1229838. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229838>
11. Tran TH, Le XC, Tran TNM, Nguyen NTT, Pham BN, *et al.* Nano selenium–alginate edible coating extends hydroponic strawberry shelf life and provides selenium fortification as a micro-nutrient. *Food Bioscience*. 2023;53:102597. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102597>
12. Bisht N, Phalswal P, Khanna PK. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Materials Advances*. 2022;3(3):1415–1431. <https://doi.org/10.1039/d1ma00639h>
13. Саримов Р. М., Асташев М. Е., Яныкин Д. В., Мартинович Г. Г., Семенова Н. А. и др. Наночастицы селена как полифункциональная добавка, обеспечивающая рост и развитие сельскохозяйственных культур: механизмы, эффективность, перспективы и ограничения. *Агрохимия*. 2025. № 6. С. 92–104. [Sarimov RM, Astashev ME, Yanikin DV, Martinovich GG, Semenova NA, *et al.* Selenium nanoparticles as a multifunctional additive that ensures the growth and development of agricultural crops: Mechanisms, effectiveness, prospects and limitations. *Agrochemistry*. 2025;(6):92–104. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S0002188125060124>
14. Garza-García JJ, Hernández-Díaz JA, Zamudio-Ojeda A, León-Morales JM, Guerrero-Guzmán A, *et al.* The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology. *Biological Trace Element Research*. 2023;200(5):2528–2548. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02847-3>
15. Zhang T, Qi M, Wu Q, Xiang P, Tang D, *et al.* Recent research progress on the synthesis and biological effects of selenium nanoparticles. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1183487. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1183487>
16. Блинов А. В., Блинова А. А., Рехман З. А., Гвозденко А. А., Голик А. Б. и др. Исследование процесса восстановления наночастиц селена. *Наноиндустрия*. 2023. Т. 16. № 5. С. 288–296. [Blinov AV, Blinova AA, Rekhman ZA, Gvozdenko AA, Golik AB, *et al.* Study of selenium nanoparticles reduction process. *Nanotechnologies*. 2023;16(5):288–296. (In Russ.)] <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.288.296>
17. Ельяшевич М. А. Периодический закон Д. И. Менделеева, спектры и строение атома (К истории физической интерпретации периодической системы элементов). *Успехи физических наук*. 1970. Т. 100. № 1. С. 5–43. [Yelyashevich MA. Periodic law of D.I. Mendeleev, spectra and structure of the atom (On the history of the physical interpretation of the periodic system of elements). *Successes of Physical Sciences*. 1970;100(1):5–43. (In Russ.)] <https://doi.org/10.3367/UFNr.0100.197001a.0005>
18. Alvi GB, Iqbal MS, Ghaith MMS, Haseeb A, Ahmed B, *et al.* Biogenic selenium nanoparticles (SeNPs) from citrus fruit have anti-bacterial activities. *Scientific Reports*. 2021;11(1):4811. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84099-8>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Жигайлов Александр Сергеевич / Alexander S. Zhigailov ORCID 0009-0000-2128-5904; eLIBRARY SPIN 7190-4171
Вечтомова Елена Александровна / Elena A. Vechtomova ORCID 0000-0001-6842-4537; eLIBRARY SPIN 3569-8977
Козлова Оксана Васильевна / Oksana V. Kozlova ORCID 0000-0002-2960-0216; eLIBRARY SPIN 9985-6468
Верещагин Александр Леонидович / Alexander L. Vereshchagin ORCID 0000-0003-4510-720X; eLIBRARY SPIN 4122-2828