УДК 546.23 *Оригинальная статья*

Синтез и физико-химическое исследование пектин-стабилизированных наночастиц селена

А.Б. Голик, Н.А. Русев, А.В. Блинов, Я.А. Облогин, А.В. Татов, А.М. Серов, М.А. Пирогов

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
355009, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
pirogov.m.2002@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.612

Аннотация: В данной работе образцы наночастиц селена, стабилизированных цитрусовым пектином, получали методом химического восстановления селенистой кислоты аскорбиновой кислотой в водной среде при варьировании концентраций прекурсора, стабилизатора и восстановителя согласно матрице планирования эксперимента. Проведено компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия участка цитрусового пектина, состоящего из трёх мономеров метилгалактуроновой кислоты, с атомом селена в программном комплексе QChem. Установлено, что взаимодействие энергетически выгодно (разница полной энергии цитрусового пектина и молекулярной системы селена с цитрусовым пектином $\Delta E >$ 2433 ккал/моль) и химически стабильно (химическая жёсткость η от 0,178 до 0,206 эВ), а наиболее вероятным является связывание через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 третьего А-связанного остатка метилгалактуроновой кислоты (ΔE = 2433,586 ккал/моль, η = 0,206 эВ). Методами фотонной корреляционной спектроскопии и электрофоретического рассеяния света показано, что средний гидродинамический диаметр полученных частиц варьируется от 193,70 до 1383,91 нм, а ζ-потенциал – от -11,83 до +3,10 мВ в зависимости от соотношения компонентов; наименьший размер частиц и наиболее отрицательный ζ-потенциал достигнуты при минимальных концентрациях прекурсора, стабилизатора и восстановителя. Методом ультрафиолетовой спектрофотометрии установлена полоса поглощения с максимумом при 265 нм (оптическая плотность составляет 0,8 отн. ед.), характерная для наноразмерного селена, что подтверждает образование наночастиц. Исследование коллоидной стабильности выбранного образца в диапазоне *pH* 1,81-11,98 показало нелинейную зависимость размера частиц от *pH*: максимальная агрегация наблюдается в слабокислой области при значениях ζ -потенциала, близких к нулю, тогда как при повышении *pH* формируется более устойчивая дисперсия (ζ -потенциал около -20 мВ) с меньшим размером частиц.

Ключевые слова: пектин-стабилизированные наночастицы селена, оптимизация методики синтеза, стабильность при различном pH, средний гидродинамический диаметр, ζ -потенциал.

Голик Алексей Борисович – старший преподаватель департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Русев Никита Александрович – инженер-исследователь международной научно-исследовательской лаборатории функциональных материалов и пищевых систем департамента науки ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Блинов Андрей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Облогин Ярослав Александрович – лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Татов Алексей Владимирович – лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

© А.Б. Голик, Н.А. Русев, А.В. Блинов, Я.А. Облогин, А.В. Татов, А.М. Серов, М.А. Пирогов, 2026

Серов Александр Михайлович – лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Пирогов Максим Александрович – ассистент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Original paper

Synthesis and physicochemical study of pectin-stabilized selenium nanoparticles

A.B. Golik, N.A. Rusev, A.V. Blinov, Ya.A. Oblogin, A.V. Tatov, A.M. Serov, M.A. Pirogov
North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.612

Abstract: In this work, samples of selenium nanoparticles stabilized by citrus pectin were obtained by the method of chemical reduction of selenous acid by ascorbic acid in an aqueous medium, varying the concentrations of the precursor, stabilizer, and reducing agent according to the experimental design matrix. Computer quantum-chemical modeling of the interaction of a citrus pectin fragment consisting of three methylgalacturonic acid monomers with a selenium atom was performed using the QChem software package. It was found that the interaction is energetically favorable (the difference in total energy between citrus pectin and the molecular system of selenium with citrus pectin is ΔE > 2433 kcal/mol) and is chemically stable (chemical rigidity η ranges from 0,178 to 0,206 eV), and the most probable binding is through the hydroxyl group attached to C_3 of the third A-bound methylgalacturonic acid residue (ΔE = 2433,586 kcal/mol, η = 0,206 eV). Photon correlation spectroscopy and electrophoretic light scattering methods were used to show that the average hydrodynamic diameter of the obtained particles varies from 193,70 to 1383,91 nm, and the ζ-potential ranges from -11,83 to +3,10 mV, depending on the ratio of the components; the smallest particle size and the most negative ζ-potential were achieved at the lowest concentrations of the precursor, stabilizer, and reducing agent. Using ultraviolet spectrophotometry, an absorption band with a maximum at 265 nm (the optical density is 0,8 r.u.), characteristic of nanosized selenium was detected, confirming the formation of nanoparticles. The study of the colloidal stability of the selected sample in the *pH* range of 1,81-11,98 showed a non-linear dependence of particle size on *pH*: maximum aggregation occurs in the slightly acidic region at ζ-potential values close to zero, while increasing the *pH* results in a more stable dispersion (ζ-potential around -20 mV) with smaller particle size.
Keywords: pectin-stabilized selenium nanoparticles, optimization of the synthesis method, stability at different pH levels,average hydrodynamic diameter, and ζ potential.

Alexey B. Golik – Senior Lecturer, Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0003-2580-9474
Nikita A. Rusev – Research Engineer, International Research Laboratory of Functional Materials and Food Systems of the Department of Science, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0004-8503-1507
Andrey V. Blinov – Ph. D., Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0002-4701-8633
Yaroslav A. Oblogin – Laboratory Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0003-5180-9045
Alexey V. Tatov – Laboratory Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0003-8842-232X
Alexander M. Serov – Laboratory Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0001-2929-4191
Maxim A. Pirogov – Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-9217-6262

Поступила в редакцию/received: 30.07.2026; после рецензирования/revised: 15.09.2026; принята/accepted: 20.09.2026.

1. Введение

Селен – эссенциальный микроэлемент, входящий в состав селеноцистеина и определяющий активность глутатионпероксидазы и тиоредоксинредуктазы, которые защищают клетки от окислительного

стресса [1, 2]. Однако терапевтическое окно традиционных форм селена (селенита, селената, селенометионина) узкое: при превышении физиологических концентраций они проявляют прооксидантное действие и гепатотоксичность [3].

В последние годы активно исследуется элементарный селен в наноразмерном состоянии. Наночастицы селена обладают более низкой токсичностью при сопоставимой биодоступности по сравнению с ионными формами [4-6], что открывает перспективы их использования в составе функциональных продуктов питания, биодобавок и антимикробных композиций [7].

Одним из главных препятствий для широкого применения наночастиц селена остаётся их склонность к агрегации. Нестабилизированные частицы быстро укрупняются, теряют коллоидную устойчивость и выпадают в осадок [8, 9]. Для решения этой проблемы используют различные стабилизаторы, среди которых особое место занимают природные полисахариды благодаря своей биосовместимости и биоразлагаемости [10]. Они адсорбируются на поверхности наночастиц, создавая стерический и электростатический барьер [11]. Для наноселена уже показана эффективность стабилизации альгинатом, хитозаном и их комплексами [12, 13].

Цитрусовый пектин – анионный полисахарид с большим количеством карбоксильных групп, способных взаимодействовать с поверхностью наночастиц и придавать им отрицательный заряд [14]. Предполагается, что это обеспечивает дополнительную электростатическую стабилизацию. Кроме того, пектин широко используется в пищевой и фармацевтической промышленности, что делает его перспективным компонентом для создания безопасных систем доставки микроэлементов [15].

Однако в литературе отсутствуют систематические данные о влиянии соотношений реагентов (селенистой кислоты, восстановителя и пектина) на размер и поверхностный заряд получаемых наночастиц. Большинство работ используют эмпирически подобранные фиксированные протоколы, не позволяющие оценить взаимное влияние компонентов [16]. Между тем размер частиц напрямую определяет их биологическую активность: частицы менее 100 нм обладают более выраженной антиоксидантной способностью [17]. Поверхностный заряд (ζ-потенциал) также критически важен для устойчивости коллоидной системы [18].

Таким образом, разработка воспроизводимого метода синтеза стабильных наночастиц селена, стабилизированных цитрусовым пектином, является актуальной задачей. В настоящей работе оптимизированы

условия такого синтеза с использованием матрицы планирования эксперимента, варьируя концентрации селенистой кислоты, пектина и аскорбиновой кислоты. Для полученных образцов определяли гидродинамический радиус и ζ-потенциал, что позволило выявить оптимальные соотношения компонентов, обеспечивающие формирование устойчивых наночастиц с минимальным размером [19].

2. Экспериментальная часть

На первом этапе проводили квантово-химическое моделирование элементарного акта взаимодействия участка цитрусового пектина, состоящего из трёх мономеров метилгалактуроновой кислоты, с элементом селена через гидроксильной группы. Для построения моделей использовали молекулярный редактор IQmol [20]. Для проведения расчётов использовали программное обеспечение QChem [21]. Была рассчитана полная энергия молекулярного комплекса E, энергия высшей заселённой молекулярной орбитали E_{HOMO}, а также энергия низшей свободной молекулярной орбитали E_{LUMO}. На основе полученных данных определяли разницу полной энергии участка цитрусового пектина и молекулярной системы взаимодействия селена с цитрусовым пектином ΔE, а также химическую жёсткость $\eta = (E_{LUMO} - E_{HOMO})/2$.

Для проведения исследовательской части работы были синтезированы образцы селена, стабилизированного цитрусовым пектином. Для оптимизации методики синтеза и выявления лучшего соотношения исходных компонентов была спланирована матрица эксперимента, представленная в Таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента.

№ опыта	$m_{H_2SeO_3}$, г	$m_{пектин}$, г	$m_{C_6H_8O_6}$, г	№ опыта	$m_{H_2SeO_3}$, г	$m_{пектин}$, г	$m_{C_6H_8O_6}$, г
1	0,0071	0,006	0,087	6	0,039	0,060	0,160
2	0,0071	0,033	0,160	7	0,071	0,006	0,160
3	0,0071	0,060	0,232	8	0,071	0,033	0,232
4	0,0391	0,006	0,232	9	0,071	0,060	0,087
5	0,0391	0,033	0,087				

Для получения наночастиц селена отдельно готовили растворы аскорбиновой кислоты и селенистой кислоты в присутствии цитрусового пектина. Раствор аскорбиновой кислоты одномоментно вливали в раствор прекурсора при постоянном перемешивании. У полученных образцов исследовали средний гидродинамическй диаметр методом фотонной корреляционной спектроскопии и ζ-потенциал методом электрофоретического рассеяния света. Оба параметра измеряли на анализаторе частиц BeNano 180 Zeta Pro («Bettersize», Китай).

Образец наночастиц селена после определения оптимального соотношения компонентов исследовали методом оптической спектроскопии на спектрофотометре Unico 2100 («UNICO (Shanghai) Instrument Co. Ltd», Китай).

На заключительном этапе проводили исследование стабильности коллоидной системы при различном pH. Для этого заранее приготовленные буферные растворы смешивали с наночастицами селена в объёмном соотношении 1:1.

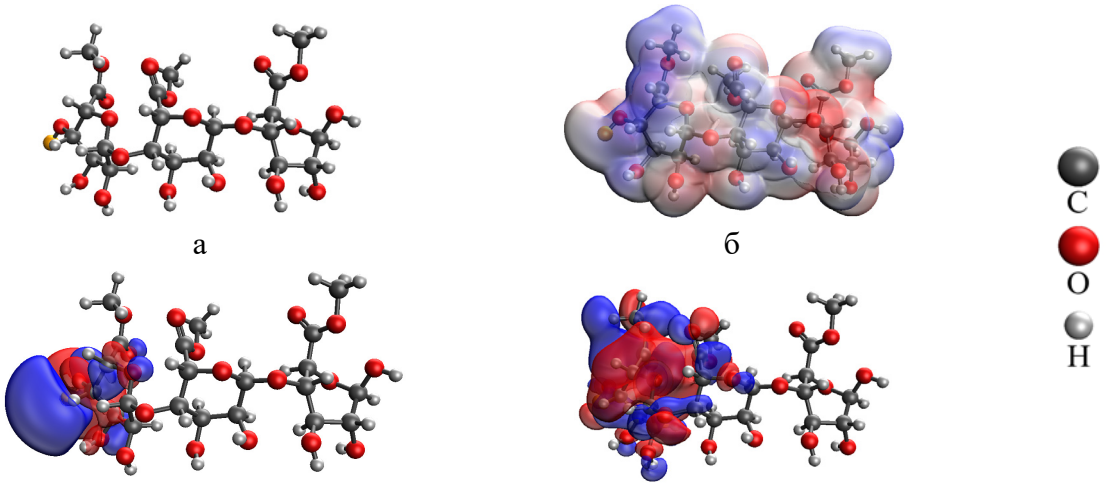
3. Обсуждение результатов

В результате квантово-химического моделирования элементарного акта взаимодействия участка цитрусового пектина с селеном получены данные, представленные в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты квантово-химического моделирования элементарного акта взаимодействия участка цитрусового пектина с селеном (здесь А-СОМГК – А-связанный остаток метилгалактуроновой кислоты).

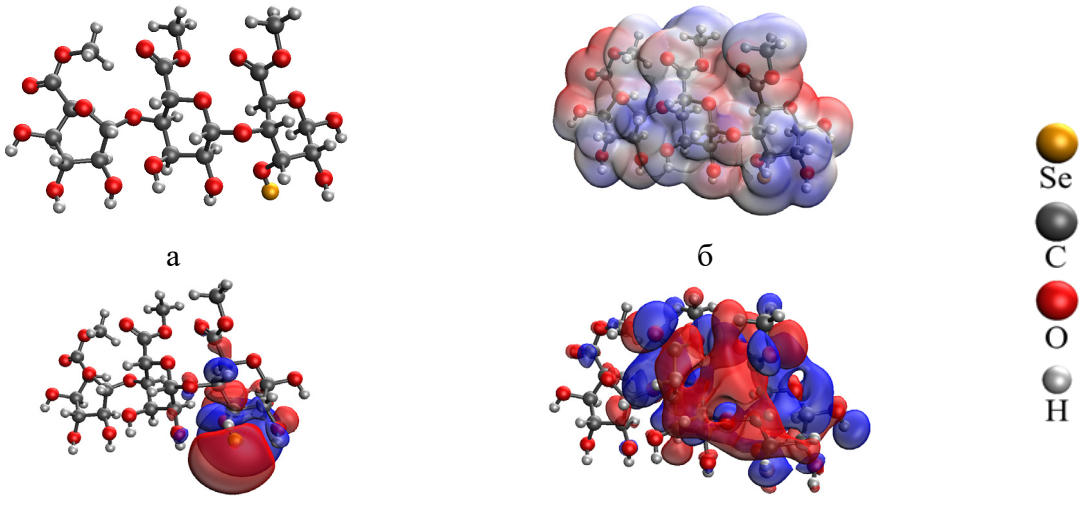
Взаимодействие селена с участком пектина	E, ккал/моль	ΔE, ккал/моль	E_{HOMO}, эВ	E_{LUMO}, эВ	η, эВ
Участок цитрусового пектина	-2199,196	–	-0,407	0,147	0,277
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_4 первого А-СОМГК	-4632,762	2433,566	-0,256	0,100	0,178
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 первого А-СОМГК	-4632,743	2433,547	-0,260	0,114	0,187
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 первого А-СОМГК	-4632,792	2433,596	-0,275	0,113	0,194
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 второго А-СОМГК	-4632,800	2433,604	-0,273	0,111	0,192
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 второго А-СОМГК	-4632,769	2433,573	-0,242	0,117	0,180
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 третьего А-СОМГК	-4632,782	2433,586	-0,278	0,133	0,206
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 третьего А-СОМГК	-4632,719	2433,523	-0,255	0,116	0,186
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_1 третьего А-СОМГК	-4632,799	2433,603	-0,254	0,124	0,189

На основе полученных данных можно сделать вывод, что взаимодействие селена с участком цитрусового пектина является энергетически выгодным (ΔE > 2433 ккал/моль) и химически стабильным (0,178 ≤ η ≤ 0,206 эВ). Наиболее вероятным вариантом взаимодействия является соединение селена с участком цитрусового пектина через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 третьего А-связанного остатка метилгалактуроновой кислоты, так как обладает оптимальными значениями разницы полной энергии (2433,586 ккал/моль) и химической жёсткости (0,206 эВ).



а б в г

Рис. 1. Результаты моделирования участка цитрусового пектина: а – модель молекулярного комплекса, б – распределение электронной плотности, в – высшая заселённая молекулярная орбиталь *HOMO*, г – низшая свободная молекулярная орбиталь *LUMO*.



а б в г

Рис. 2. Результаты моделирования взаимодействия участка цитрусового пектина с селеном через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 третьего А-связанного остатка метилгалактуроновой кислоты. Обозначения панелей а-г соответствуют рис. 1.

Результаты исследования образцов, полученных в соответствии с матрицей эксперимента (см. Таблицу 1), представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений размеров и ζ-потенциала наночастиц селена, стабилизированных цитрусовым пектином

№ образца	1	2	3	4	5
D, нм	193,70	445,09	979,23	267,38	662,18
ζ-потенциал, мВ	-11,83	-4,30	-1,70	-4,02	-2,43
№ образца	6	7	8	9	
D, нм	436,05	1383,91	424,47	693,38	
ζ-потенциал, мВ	-4,44	0,68	-1,03	3,10	

Проведённый анализ показывает, что размеры наночастиц селена и их ζ-потенциал существенно зависят от соотношения концентраций исходных реагентов, что определяется конкуренцией процессов нуклеации, роста и стабилизации в коллоидной системе. Увеличение концентрации прекурсора повышает степень пересыщения и количество образующегося селена, что при недостаточной стабилизации приводит к агрегации частиц и, впоследствии, увеличению среднего гидродинамического диаметра. Рост концентрации аскорбиновой кислоты ускоряет восстановление *Se* (IV) до *Se* (0), усиливая нуклеацию и рост; при избытке восстановителя начинают доминировать процессы укрупнения и слипания частиц, что сопровождается увеличением их размера. Пектин обеспечивает стерическую стабилизацию за счёт адсорбции на поверхности частиц.

Значения ζ-потенциала во всех образцах остаются невысокими по модулю, что указывает на слабую электростатическую стабилизацию и преобладание стерического механизма. Уменьшение модуля ζ-потенциала сопровождается увеличением размеров частиц из-за ослабления электростатического отталкивания. Наиболее оптимальные условия реализуются в первом образце, где наблюдаются минимальный размер и более отрицательный ζ-потенциал, что свидетельствует об эффективном подавлении агрегации. Таким образом, было решено проводить дальнейшие исследования, используя образец номер 1 в качестве основы для проведения всех последующих опытов. В результате исследования оптимального образца методом оптической спектроскопии получен спектр поглощения, представленный на рис. 3.

При анализе полученного спектра можно сделать вывод о наличии полосы поглощения на 265 нм (оптическая плотность составляет 0,8 отн. ед.). Электронный переход в этой области характерен для наноразмерного селена [22]. Результаты исследования стабильности наночастиц селена при различных показателях представлены в Таблице 4.

Изменение размера и ζ-потенциала наночастиц селена при варьировании pH обусловлено кислотно-основными свойствами цитрусового пектина и связанными с этим процессами коллоидной стабилизации. Карбоксильные группы пектина при низких значениях pH находятся преимущественно в протонированной форме ($–COOH$), что приводит к низкой плотности поверхностного заряда и, соответственно, к малым по модулю значениям ζ-потенциала. По мере увеличения pH происходит их диссоциация до $–COO^-$, что вызывает рост отрицательного заряда поверхности частиц и смещение ζ-потенциала в более отрицательную область, что согласуется с представлениями теории двойного электрического слоя.

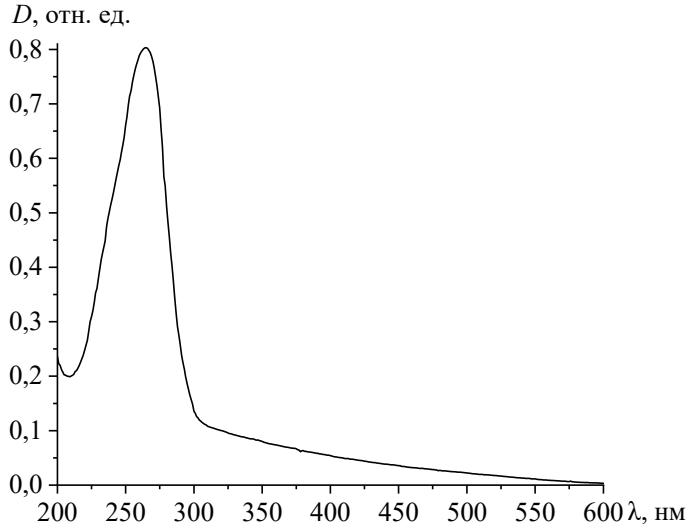


Рис. 3. Спектр поглощения наночастиц селена, стабилизированных цитрусовым пектином.

Таблица 4. Результаты исследования стабильности наночастиц селена при различных показателях pH.

pH	D, нм	ζ-потенциал, мВ	pH	D, нм	ζ-потенциал, мВ
1,81	412,99	0,89	7,96	387,20	-18,06
2,21	416,83	-6,07	9,15	315,04	-20,42
3,29	579,07	-13,61	10,38	268,98	-5,35
4,56	366,31	-17,94	11,58	292,02	-15,89
5,72	261,11	-19,92	11,98	265,72	-20,04
6,8	299,75	-20,03			

Изменение ζ-потенциала напрямую влияет на агрегативную устойчивость системы, которая описывается теорией Дерягина, Ландау, Фервея и Овербека (ДЛФО) как баланс между Ван-дер-Ваальсовыми силами притяжения и электростатическим отталкиванием. В области низких значений pH, где ζ-потенциал близок к нулю, энергетический барьер коагуляции минимален, что приводит к агрегации частиц и

увеличению их гидродинамического диаметра. При повышении pH увеличение отрицательного заряда усиливает электростатическое отталкивание, повышает устойчивость дисперсии и способствует уменьшению размеров агрегатов.

Наблюдаемая зависимость носит нелинейный характер: максимальные размеры частиц фиксируются в слабокислой области, где система наименее стабильна, тогда как при более высоких значениях pH достигаются более отрицательные значения ζ-потенциала (около -20 мВ) и формируется более устойчивая дисперсия с меньшими размерами частиц. Дополнительный вклад в стабилизацию вносит стерический фактор, связанный с конформационным расширением макромолекул пектина при увеличении степени ионизации.

4. Заключение

В данной работе методом химического восстановления селенистой кислоты аскорбиновой кислотой в водной среде в присутствии цитрусового пектина получены наночастицы селена; условия синтеза оптимизированы с использованием матрица планирования эксперимента, варьирующая концентрации прекурсора, стабилизатора и восстановителя. Квантово-химическим моделированием установлено, что взаимодействие цитрусового пектина с селеном энергетически выгодно (ΔE > 2433 ккал/моль) и химически стабильно (0,178 $\leq \eta \leq$ 0,206 эВ), а наиболее вероятным является связывание через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 третьего А-связанного остатка метилгалактуроновой кислоты.

Размер и ζ-потенциал частиц существенно варьируются (от 193,70 до 1383,91 нм и от -11,83 до +3,10 мВ соответственно) в зависимости от соотношения компонентов что определяется конкуренцией нуклеации, роста частиц и их стерической стабилизации пектином; невысокие по модулю значения ζ-потенциала указывают на преобладание стерического механизма над электростатическим. Оптимальным (минимальный размер, наиболее отрицательный ζ-потенциал) признан образец с минимальными концентрациями всех компонентов. Образование наночастиц селена подтверждено УФ-спектрофотометрией: наличие полосы поглощения с максимумом при 265 нм, характерной для наноразмерного селена.

Исследование коллоидной стабильности в диапазоне pH от 1,81 до 11,98 показало нелинейную зависимость: максимальная агрегация наблюдается в слабокислой области при ζ-потенциал близком к нулю, тогда как с ростом pH возрастание степени диссоциации карбоксильных групп пектина усиливает электростатическое отталкивание (ζ-потенциал

растёт до -20 мВ), что согласуется с теорией ДЛФО.

Цитрусовый пектин обеспечивает как стерическую, так и электростатическую стабилизацию наночастиц селена за счёт диссоциации карбоксильных групп, что делает его перспективным компонентом систем обогащения молочной продукции, в частности козьего молока. Вместе с тем нами также был рассмотрен альтернативный стабилизатор – поливинилпирролидон марки К-17 [23], обеспечивающий преимущественно стерический механизм стабилизации наночастиц селена; такой механизм менее чувствителен к присутствию поливалентных ионов и белковых компонентов матрицы, что делает его более подходящим для обогащения немолочной продукции (растительных напитков на основе кокоса, риса и др.), где стабилизация на основе диссоциации карбоксильных групп может быть менее эффективна.

В дальнейшем планируется провести исследование полученных образцов методом ИК-Фурье спектроскопии, проанализировать влияние ионной силы на стабильность наночастиц селена, а также исследовать коллоидную стабильность частиц при одновременном влиянии pH, температуры среды и времени выдержки наночастиц селена в данной среде. в зависимости обогащение козьего молока полученными наночастицами селена и последующие исследования его физико-химических свойств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-26-00466, https://rscf.ru/project/25-26-00466/.

Библиографический список:

1. **Третьяк, Л.Н.** Специфика влияния селена на организм человека и животных (применительно к проблеме создания селеносодержащих продуктов питания) / Л.Н. Третьяк, Е.М. Герасимов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 12 (79). – С. 136-145.
2. **Spallholz, J.E.** On the nature of selenium toxicity and carcinostatic activity / J.E. Spallholz // Free Radical Biology and Medicine. – 1994. – V. 17. – I. 1. – P. 45-64. DOI: 10.1016/0891-5849(94)90007-8.
3. **Hadrup, N.** Toxicity of repeated oral intake of organic selenium, inorganic selenium, and selenium nanoparticles: a review / N. Hadrup, G. Ravn-Haren // Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. – 2023. – V. 79. – Art. № 127235. – 14 p. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127235.
4. **Tran, P.A.** Selenium nanoparticles inhibit Staphylococcus aureus growth / P.A. Tran, T.J. Webster // International Journal of Nanomedicine. – 2011. – V. 6. – P. 1553-1558. DOI: 10.2147/IJN.S21729.
5. **Zhang, J.** Comparison of short-term toxicity between Nano-Se and selenite in mice / J. Zhang, H. Wang, X. Yan, L. Zhang // Life Sciences. – 2005. – V. 76. – I. 10. – P. 1099-1109. DOI: 10.1016/j.lfs.2004.08.015.
6. **Wang, H.** Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice / H. Wang, J. Zhang, H. Yu // Free Radical Biology and Medicine. – 2007. – V. 42. – I. 10. – P. 1524-1533. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013.
7. **Wadhwani, S.A.** Biogenic selenium nanoparticles: current status and future prospects / S.A. Wadhwani, U.U. Shedbalkar, R. Singh, B.A. Chopade // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2016. – V. 100. – I. 6. – P. 2555-2566. DOI: 10.1007/s00253-016-7300-7.
8. **He, Y.** Toxicity of selenium nanoparticles in male Sprague–Dawley rats at supranutritional and nonlethal levels / Y. He, S. Chen, Z. Zhang et al. // Life Sciences. – 2014. – V. 115. – I. 1-2. – P. 44-51. DOI: 10.1016/j.lfs.2014.08.023.

9. **Скоринова, К.Д.** Перспектива создания лекарственных препаратов на основе наночастиц селена (обзор) / К.Д. Скоринова, В.В. Кузьменко, А.И. Василенко // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2020. – Т. 9. – №. 2. – С. 33-44. DOI: 0.33380/2305-2066-2020-9-2-33-44.
10. **Ferro, C.** Selenium nanoparticles for biomedical applications: from development and characterization to therapeutics / C. Ferro, H.F. Florindo, H.A. Santos // Advanced Healthcare Materials. – 2021. – V. 10. – I. 16. – Art. №. 2100598. – 50 p. DOI: 10.1002/adhm.202100598.
11. **Юнусов, Х.Э.** Синтез и физико-химические свойства нанокомпозитов на основе натрий-карбоксиметилцеллюлозы и наночастиц селена / Х.Э. Юнусов, А.А. Сарымсаков, Ф.М. Туракулов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2022. – Т. 64. – № 1. – С. 60-70. DOI: 10.31857/S2308113922010089.
12. **Панов, Д.А.** Синтез и свойства наночастиц селена в матрице природных полисахаридов / Д.А. Панов, А.М. Кацев, А.В. Омельченко // Химия растительного сырья. – 2022. – №1. – С. 81-91. DOI: 10.14258/jcprm.2022019275.
13. **Chen, Z.** L-Cysteine-assisted controlled synthesis of selenium nanospheres and nanorods / Z. Chen, Y. Shen, A. Xie et al. // Crystal Growth & Design. – 2009. – V. 9. – I. 3. – P. 1327-1333. DOI: 10.1021/cg800398b.
14. **Torres, S.K.** Biosynthesis of selenium nanoparticles by Pantoea agglomerans and their antioxidant activity / S.K. Torres, V.L. Campos, C.G. León et al. // Journal of Nanoparticle Research. – 2012. – V. 14. – I. 11. – Art. № 1236. – 9 p. DOI: 10.1007/s11051-012-1236-3.
15. **Сайфина, Д.Ф.** Пектин: получение, структура и перспективы применения / Д.Ф. Сайфина, Е.Ю. Николаева, О.В. Цепаева, Г.Г. Исхакова // Георесурсы. – 2000. – № 2 (3). – С. 36-38.
16. **Bisht, N.** Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications / N. Bisht, P. Phalswal, P.K. Khanna // Materials Advances. – 2022. – V. 3. – I. 3. – P. 1415-1431. DOI: 10.1039/d1ma00639h.
17. **Peng, D.** Size effect of elemental selenium nanoparticles (Nano-Se) at supranutritional levels on selenium accumulation and glutathione S-transferase activity / D. Peng, J. Zhang, Q. Liu, E.W. Taylor // Journal of Inorganic Biochemistry. – 2007. – V. 101. – I. 10. – P. 1457-1463. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2007.06.021.
18. **Blinov, A.** Selenium nanoparticles stabilized with Tween 80: synthesis, characterization, and application in fortified milk and fermented dairy products / A. Blinov, A. Nagdalian, A. Serov et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2025. – V. 706. – Art. № 135822. – 10 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135822.
19. **Копейкин, В.В.** Синтез наночастиц селена в водных растворах поливинилпирролидона и морфологические характеристики образующихся нанокомпозитов / В.В. Копейкин, С.В. Валуева, А.И. Киппер и др. // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2003. – Т. 45. – № 4. – С. 615-622.
20. IQmol Molecular Viewer. – Режим доступа: http://www.iqmol.org/. – 12.06.2026.
21. Q-Chem 6.3 User's Manual. – Режим доступа: https://manual.q-chem.com/6.3/. – 12.06.2026.
22. **Валуева, С.В.** Влияние природы биологически активного стабилизатора на спектральные и размерные характеристики гибридных селенсодержащих наносистем / С.В. Валуева, Л.Н. Боровикова // Журнал физической химии. – 2019. – Т. 93. – № 1. – С. 113-118. DOI: 10.1134/S0044453719010308.
23. **Рехман, З.А.** Исследование свойств наночастиц селена, стабилизированных поливинилпирролидоном марки К-17 / З.А. Рехман, М.А. Пирогов, А.В. Блинов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2026. – Вып. 18. – С. 934-942. DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.934.

References:

1. Tretiyak L.N., Gerasimov E.M. Spetsifika vliyaniya selena na organizm cheloveka i zhivotnykh (primenitel'no k probleme sozdaniya selenosoderzhashchikh produktov pitaniya) [Specificity of selenium influence on human and animal's organism (with regard to the problem of creation of seleniumcontaining food stuff)], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [*Bulletin of Orenburg State University*], 2007, no. 12 (79), pp. 136-145. (In Russian).
2. Spallholz J.E. On the nature of selenium toxicity and carcinostatic activity, *Free Radical Biology and Medicine*, 1994, vol. 17, issue 1, pp. 45-64. DOI: 10.1016/0891-5849(94)90007-8.
3. Hadrup N. Ravn-Haren G. Toxicity of repeated oral intake of organic selenium, inorganic selenium, and selenium nanoparticles: a review, *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2023, vol. 79, art. no. 127235, 14 p. DOI: 10.1016/j.jtemb.2023.127235.
4. Tran P.A., Webster T.J. Selenium nanoparticles inhibit Staphylococcus aureus growth, *International Journal of Nanomedicine*, 2011, vol. 6, pp. 1553-1558. DOI: 10.2147/IJN.S21729.
5. Zhang J., Wang H., Yan X., Zhang L. Comparison of short-term toxicity between Nano-Se and selenite in mice, *Life Sciences*, 2005, vol. 76, issue 10, pp. 1099-1109. DOI: 10.1016/j.lfs.2004.08.015.

6. Wang H., Zhang J., Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: Comparison with selenomethionine in mice, *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, vol. 42, issue 10, pp. 1524-1533. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013.
7. Wadhwani S.A., Shedbalkar U.U., Singh R., Chopade B.A. Biogenic selenium nanoparticles: current status and future prospects, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, vol. 100, issue 6, pp. 2555-2566. DOI: 10.1007/s00253-016-7300-7.
8. He Y., Chen S., Zhang Z. et al. Toxicity of selenium nanoparticles in male Sprague–Dawley rats at supranutritional and nonlethal levels, *Life Sciences*, 2014, vol. 115, issue 1-2, pp. 44-51. DOI: 10.1016/j.lfs.2014.08.023.
9. Skorinova K.D., Kuzmenko V.V., Vasilenko I.A. Perspektiva sozdaniya lekarstvennykh preparatov na osnove nanochastits selena (obzor) [The prospect of creating medicines based on selenium nanoparticles (review)], *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv* [*Drug development & registration*], 2020, vol. 9, no. 2, pp. 33-44. DOI: 10.33380/2305-2066-2020-9-2-33-44. (In Russian).
10. Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: from development and characterization to therapeutics, *Advanced Healthcare Materials*, 2021, vol. 10, issue 16, art. no. 2100598, 50 p. DOI: 10.1002/adhm.202100598.
11. Yunusov K.E., Sarymsakov A.A., Turakulov F.M. Synthesis and physicochemical properties of the nanocomposites based on sodium carboxymethyl cellulose and selenium nanoparticles, *Polymer Science, Series B*, 2022, vol. 64, issue 1, pp. C. 68-77. DOI: 10.31857/S2308113922010089.
12. Panov D.A., Katsev A.M., Omel'chenko A.V. Sintez i svoistva nanochastits selena v matritse prirodnykh polisakharidov [Synthesis and properties of selenium nanoparticles in natural polysaccharides matrix], *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [*Chemistry of Plant Raw Materials*], 2022, no. 1, pp. 81-91. DOI: 10.14258/jcprm.2022019275. (In Russian).
13. Chen Z., Shen Y., Xie A. et al. L-Cysteine-assisted controlled synthesis of selenium nanospheres and nanorods, *Crystal Growth & Design*, 2009, vol. 9, issue 3, pp. 1327-1333. DOI: 10.1021/cg800398b.
14. Torres S.K., Campos V.L., León C.G. et al. Biosynthesis of selenium nanoparticles by Pantoea agglomerans and their antioxidant activity, *Journal of Nanoparticle Research*, 2012, vol. 14, issue 11, art. no. 1236. DOI: 10.1007/s11051-012-1236-3.
15. Saifina D.F., Nikolaeva E.Yu., Tsepaeva O.V., Iskhakova G.G. Pektin: poluchenie, struktura i perspektivy primeneniya [Pectin: production, structure, and application prospects], *Georesursy* [*Georesources*], 2000, no. 2 (3), pp. 36-38. (In Russian).
16. Bisht N., Phalswal P., Khanna P.K. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications, *Materials Advances*, 2022, vol. 3, issue 3, pp. 1415-1431. DOI: 10.1039/d1ma00639h.
17. Peng D., Zhang J., Liu Q., Taylor E.W. Size effect of elemental selenium nanoparticles (Nano-Se) at supranutritional levels on selenium accumulation and glutathione S-transferase activity, *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2007, vol. 101, issue 10, pp. 1457-1463. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2007.06.021.
18. Blinov A., Nagdalian A., Serov A. et al. Selenium nanoparticles stabilized with Tween 80: Synthesis, characterization, and application in fortified milk and fermented dairy products, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, vol. 706, art. no. 1358202, 10 p. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135822.
19. Kopeikin V.V., Valueva S.V., Kipper A.I. et al. Synthesis of selenium nanoparticles in aqueous solutions of poly(vinylpyrrolidone) and morphological characteristics of the related nanocomposites, *Polymer Science, Series A*, 2003, vol. 45, issue 4, pp. 374-379.
20. IQmol Molecular Viewer. Available at: www.url: http://www.iqmol.org/ (accessed 12.06.2026).
21. Q-Chem 6.3 User's Manual. Available at: https://manual.q-chem.com/6.3/ (accessed 12.06.2026).
22. Valueva S.V., Borovikova L.N. Effect of the type of biologically active stabilizers on the spectral and dimensional characteristics of selenium-containing hybrid nanosystems, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2019, vol. 93, issue 1, pp. 129-134. DOI: 10.1134/S0036024419010308.
23. Rekhman Z.A., Pirogov M.A., Blinov A.V. et al. Issledovanie svoistv nanochastits selena, stabilizirovannykh polivinilpirrolidonom marki K-17 [Study of properties of selenium nanoparticles stabilized with K-17 polyvinyl pyrrolidone], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2026, issue 18, pp. 934-942. DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.934 (In Russian).