УДК 546.23 *Оригинальная статья*

Исследование свойств наночастиц селена, стабилизированных поливинилпирролидоном марки К-17

З.А. Рехман, М.А. Пирогов, А.В. Блинов, А.В. Самоволов, А.Ю. Андиралов, Я.А. Облогин, А.В. Татов

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

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.934

Аннотация: В данной работе образцы наночастиц селена, стабилизированных поливинилпирролидоном К-17, получали методом химического восстановления селенистой кислоты аскорбиновой кислотой в водной среде в присутствии стабилизатора. Проведены исследования методами инфракрасной Фурье спектроскопии, динамического и электрофоретического рассеяния света, а также компьютерное квантово-химическое моделирование взаимодействия поливинилпирролидона К-17 с атомом селена в программном комплексе QChem. В результате моделирования установлено, что взаимодействие поливинилпирролидона К-17 с селеном через ионизированную аминогруппу энергетически выгодно (снижение полной энергии на 2397,942 ккал/моль) и химически стабильно (химическая жёсткость молекулярной системы составляет 0,160 эВ). Анализ инфракрасных спектров показал совпадение основных диагностических полос поглощения поливинилпирролидона (3400, 1660 и 1460 $см^{-1}$) до и после стабилизации наночастиц селена без образования новых полос поглощения, что свидетельствует о сохранении химической структуры полимера в процессе синтеза. Исследование коллоидной стабильности методами динамического и электрофоретического рассеяния света в диапазоне *pH* 3-11, температур 25-95°С и времени выдержки 5-25 мин показало, что средний гидродинамический диаметр частиц составляет от 45,44 до 197,67 нм, а ζ-потенциал – от -6,05 до -83,06 мВ, при этом наибольшая стабильность системы достигается в щелочной среде при температуре 25 °С, а наименьшая – в кислой среде и при повышенной температуре 95°С.

Ключевые слова: наночастицы селена, поливинилпирролидон, квантово-химическое моделирование, инфракрасная спектроскопия, коллоидная стабильность.

Рехман Зафар Абдулович – преподаватель 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»
Блинов Андрей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Самоволов Артём Владимирович – младший научный сотрудник международной научно-исследовательской лаборатории функциональных материалов и пищевых систем департамента науки ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Андиралов Александр Юрьевич – инженер-исследователь международной научно-исследовательской лаборатории функциональных материалов и пищевых систем департамента науки 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»

Original paper

Study of properties of selenium nanoparticles stabilized with K-17 polyvinyl pyrrolidone

Z.A. Rehman, M.A. Pirogov, A.V. Blinov, A.V. Samovolov, A.Yu. Andiralov, Ya.A. Oblogin, A.V. Tatov

North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.934

© З.А. Рехман, М.А. Пирогов, А.В. Блинов, А.В. Самоволов, А.Ю. Андиралов, Я.А. Облогин, А.В. Татов, 2026

Abstract: In this work, samples of selenium nanoparticles stabilized with polyvinylpyrrolidone K-17 were obtained by chemical reduction of selenious acid with ascorbic acid in an aqueous medium in the presence of a stabilizer. The samples were studied by Fourier transform infrared spectroscopy, dynamic and electrophoretic light scattering. Computational quantum-chemical modeling of the interaction between polyvinylpyrrolidone K-17 and a selenium atom was performed using the QChem software package. The modeling results showed that the interaction of polyvinylpyrrolidone K-17 with selenium via the ionized amino group is energetically favorable (a decrease the total energy of 2397,942 kcal/mol) and chemically stable (the chemical rigidity of the molecular system is 0,160 eV). Analysis of the infrared spectra showed a match between the main diagnostic absorption bands of polyvinylpyrrolidone (3400, 1660, and 1460 cm^{-1}) before and after stabilization of the selenium nanoparticles, with no new absorption bands appearing, indicating that the chemical structure of the polymer is preserved during synthesis. A study of colloidal stability by dynamic and electrophoretic light scattering over a pH range of 3-11, temperatures of 25-95°C, and holding times of 5-25 min showed that the average hydrodynamic diameter of the particles ranged from 45,44 to 197,67 nm, and the ζ-potential ranged from -6,05 to -83,06 mV, with the system exhibiting the highest stability in an alkaline medium at 25°C and the lowest stability in an acidic medium and at elevated temperature (95°C).
Keywords: selenium nanoparticles, polyvinyl pyrrolidone, quantum chemical modeling, infrared spectroscopy, colloidal stability.

Zafar A. Rekhman – Teacher, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0003-2809-4945
Maxim A. Pirogov– Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-9217-6262
Andrey V. Blinov – Ph. D., Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0002-4701-8633
Artem V. Samovolov – Junior Research Assistant, International Research Laboratory of Functional Materials and Food Systems of the Department of Science, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-5570-6201
Alexander Yu. Andiralov – Research Engineer, International Research Laboratory of Functional Materials and Food Systems of the Department of Science, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0006-1303-0083
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

Поступила в редакцию/received: 01.08.2026; после рецензирования/revised: 27.08.2026; принята/accepted: 29.08.2026.

1. Введение

Эссенциальные или жизненно необходимые микроэлементы являются необходимыми для нормального функционирования организма, поскольку выступают в качестве структурных элементов ферментов, гормонов, транспортных белков и факторов транскрипции [1]. Несмотря на то, что суточная потребность человека в данных микронутриентах крайне мала, их дефицит способен запустить метаболические нарушения, которые могут положить начало широкому спектру патологий [2]. Важно отметить, что микроэлементы функционируют в составе сложной системы, в которой дефицит одного нутриента часто влечет за собой нарушение обмена другого вследствие конкурентных взаимодействий за транспортные системы [3, 4].

Селен является одним из основных эссенциальных микроэлементов,

играющих ключевую роль в поддержании окислительно-восстановительных процессов гомеостаза благодаря его включению в активные центры селенопротеинов [5, 6]. Данные ферменты обеспечивают защиту клеточных мембран от перекисного окисления липидов, участвуют в регуляции функций щитовидной железы и работе иммунной системы [7]. Помимо антиоксидантного действия, селен демонстрирует иммуномодулирующие свойства [8].

Дефицит селена часто наблюдается в регионах с низким содержанием элемента в почвах [9]. В областях с выраженным дефицитом этого микроэлемента регистрируются характерные заболевания. Наиболее изученной является болезнь Кешана – эндемическая дилатационная кардиомиопатия, этиологически связанная с сочетанным действием селенодефицита и энтеровирусной инфекции [10, 11]. Кроме того, в селенодефицитных районах распространена болезнь Кашина-Бека, проявляющаяся нарушением роста и множественной деформацией суставов [12].

Традиционные неорганические и органические соединения селена (селенит натрия, селенометионин) характеризуются низкой биодоступностью и высокой токсичностью, что существенно ограничивает их применение в биомедицине и сельском хозяйств [13]. Наночастицы селена, обладающие уникальной поверхностной энергией и выраженными наноразмерными эффектами [14], лишены этих недостатков и демонстрируют улучшенные физико-химические и биологические свойства по сравнению с традиционными формами [15].

Таким образом, переход от традиционных селенсодержащих препаратов к наноструктурированным формам позволяет преодолеть метаболические и токсикологические барьеры, открывая перспективы для создания безопасных и высокоэффективных селеновых нутрицевтиков и фармацевтических агентов.

2. Экспериментальная часть

Для начала в молекулярном редакторе IQmol [16] проводили квантов-химическое моделирование взаимодействие участка поливинилпирролидона марки К-17 (ПВП К-17), содержащего два мономера N-винилпирролидона, с атомом селена через ионизированную аминогруппу ПВП. Квантово-химические расчёты проводили с помощью программного обеспечения QChem [17]: полная энергия молекулярного комплекса E, а также энергии высшей заселённой E_{HOMO} и низшей свободной E_{LUMO} молекулярных орбиталей. После определяли разницу полной энергии бета-глюкана и элементарного акта взаимодействия ΔE, а

также химическую жёсткость η, равную половине разницы энергий низшей свободной и высшей заселённой молекулярных орбиталей.

На следующем этапе получали наночастицы селена, стабилизированные ПВП К-17. Для начала в 10 мл дистиллированной воды смешивали 0,0071 г прекурсора – селенистой кислоты и 0,06 г стабилизатора – ПВП К-17. Далее в 5 мл дистиллированной воды растворяли 0,2323 г восстановителя –аскорбиновой кислоты. После полученный раствор восстановителя добавляли в раствор прекурсора и перемешивали при 600 об/мин в течение 5 мин. Полученный образец исследовали методом инфракрасной (ИК) Фурье-спектроскопии на спектрометре ФСМ-1201 («Инфраспек», Россия). Золь наночастиц селена наносили на покровное стекло и накрывали вторым покровным стеклом, формируя тонкий слой образца. В качестве фонового спектра использовали дистиллированную воду, также помещенную между двумя покровными стеклами. Регистрацию спектров проводили в режиме пропускания.

На следующем этапе проводилось исследование коллоидной стабильности наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, в зависимости от активной кислотности, температуры среды, а также времени выдержки. Для этого в круглодонные колбы добавляли 10 мл буферного раствора (pH 3, 7 или 11) и помещали в установку параллельного синтеза и нагревали до заданной температуры (25, 60 или 95°C) согласно матрице эксперимента (см. Таблицу 1). После достижения буферным раствором целевой температуры вносили в колбу 1 мл золя наночастиц селена и выдерживали полученную смесь при постоянном перемешивании со скоростью 500 об/мин в течение определённого времени (5, 15 или 25 мин) согласно матрице эксперимента.

Таблица 1. Матрица эксперимента по исследованию коллоидной стабильности наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, в зависимости от активной кислотности, температуры среды, а также времени выдержки.

№ опыта	pH	t, °C	τ, мин	№ опыта	pH	t, °C	τ, мин
1	3	25	5	6	7	95	5
2	3	60	15	7	11	25	25
3	3	95	25	8	11	60	5
4	7	25	15	9	11	95	15
5	7	60	25				

У полученных образцов исследовали средний гидродинамический диаметр D методом динамического рассеяния света и ζ-потенциал методом электрофоретического рассеяния света на анализаторе размеров частиц BeNano 180 Zeta Pro («BetterSize», Китай).

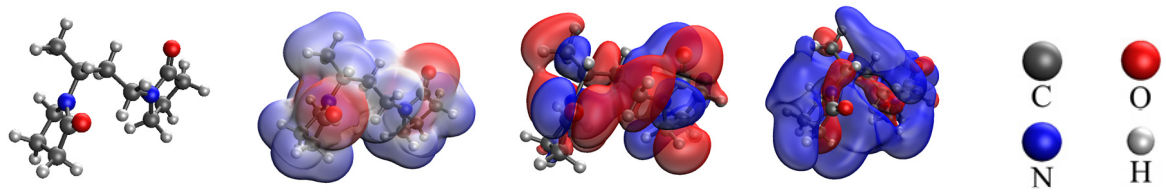
3. Обсуждение результатов

В результате квантово-химического моделирования получены данные, представленные в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты квантово-химического моделирования.

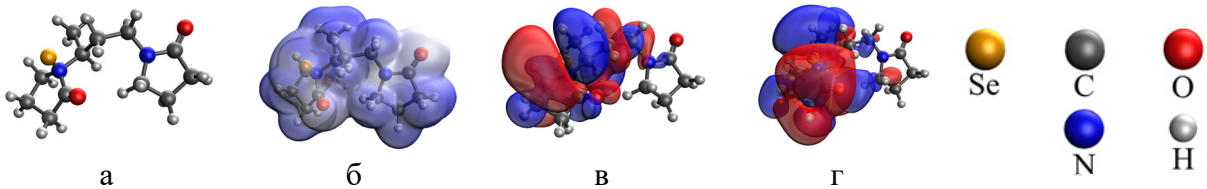
Тип взаимодействия	E , ккал/моль	E_{HOMO} , эВ	E_{LUMO} , эВ	η , эВ
– (ПВП К-13)	-724,393	-0,357	0,179	0,268
Через ионизированную аминогруппу азота	-3122,335	-0,223	0,096	0,160

Исходя из полученных данных установлено, что стабилизация селена поливинилпирролидоном К-13 является энергетически выгодным (падение полной энергии на 2397,942 ккал/моль) и химически стабильным (η = 0,160 эВ). Анализ моделей, представленных на рисунках 1 и 2, показал смещение заряда молекулы, а также молекулярных орбиталей, что свидетельствует о формировании химического взаимодействия между селеном и ПВП.



а б в г

Рис. 1. Результаты моделирования участка поливинилпирролидона: 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 поливинилпирролидона и селена через ионизированную аминогруппу. Обозначения панелей а-г соответствуют рис. 1.

В результате анализа наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, методом ИК-спектроскопии получены ИК-спектры наночастиц и бета-глюкана, представленные на рис. 3. Сравнение ИК-спектров поливинилпирролидона и наночастиц селена, стабилизированных ПВП, показывает совпадение основных диагностических полос поглощения. Полоса в области 3400 $см^{-1}$ соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп адсорбированной воды, полоса около 1660 $см^{-1}$ относится к валентным колебаниям карбонильной группы $C=O$

пирролидонового кольца, а полоса при 1460 $см^{-1}$ обусловлена деформационными колебаниями CH_2 групп полимерной цепи. Существенных смещений положения полос и появления новых полос поглощения не наблюдается, что свидетельствует о физической адсорбции ПВП-17 на поверхность наночастиц селена.

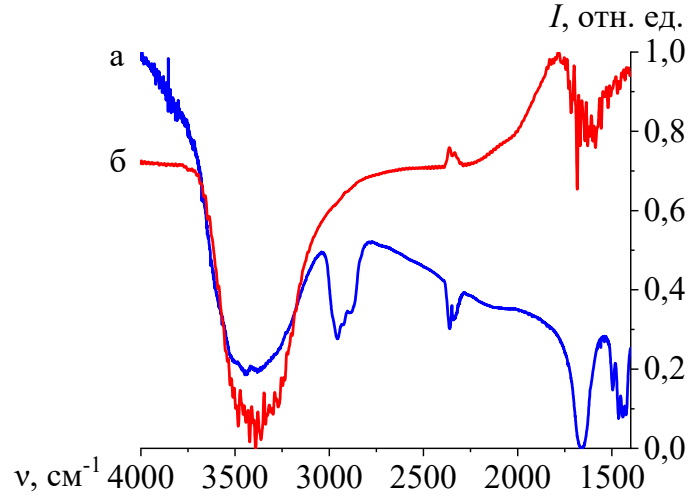


Рис. 3. ИК-спектры полученных образцов: а – ПВП К-17, б – наночастицы селена, стабилизированные ПВП К-17.

В результате исследования коллоидной стабильности наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, в зависимости от активной кислотности, температуры среды, а также времени выдержки получены значения среднего гидродинамического диаметра и ζ-потенциала, представленные в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты исследования коллоидной стабильности наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, в зависимости от активной кислотности, температуры среды, а также времени выдержки.

№ опыта	D, нм	ζ-потенциал, мВ	№ опыта	D, нм	ζ-потенциал, мВ
1	115,50	-13,44	6	79,25	-30,66
2	197,67	-14,68	7	45,44	-83,06
3	159,48	-6,05	8	49,08	-81,56
4	158,73	-21,87	9	85,80	-67,15
5	67,48	-52,77			

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что средний гидродинамический диаметр наночастиц селена во всём диапазоне pH, температуры и времени выдержки находится в диапазоне от 45,44 до 197,67 нм, а ζ-потенциал – в диапазоне от -83,06 до -6,05 мВ. При использовании ПВП К-17 в первую очередь происходит стерическая стабилизация частиц, однако полученные данные ζ-потенциала

показывают высокую стабильность системы в нейтральном pH и особенно, в щелочном pH. Анализ зависимости среднего гидродинамического диаметра от параметров показывает минимальный размер частиц в щелочном pH при температуре выдержки 25 и 60°С, а наибольший по модулю ζ-потенциал – в щелочном pH при температура 25°С. Также, можно сделать вывод, что стабильность частиц понижается в кислом pH, что приводит к значительному увеличению среднего гидродинамического диаметра до 197,67 нм и уменьшению ζ-потенциала до -6,05 мВ, а также при воздействии температуры 95°С.

4. Заключение

В данной работе методом химического восстановления в водной среде получены наночастицы селена, стабилизированные ПВП К-17. В результате компьютерного квантово-химического моделирования изучен процесс взаимодействия участка ПВП К-17, содержащего два мономера N-винилпирролидона, с атомом селена через ионизированную аминогруппу. Установлено, что данное взаимодействие энергетически выгодно (снижение полной энергии на 2397,942 ккал/моль) и химически стабильно (η = 0,160 эВ). Результаты ИК-спектроскопии показали совпадение основных диагностических полос поглощения ПВП (3400, 1660 и 1460 $см^{-1}$) в спектрах чистого полимера и стабилизированных им наночастиц селена без образования новых полос поглощения, что свидетельствует о физической адсорбции ПВП К-17 на поверхность наночастиц селена. Исследование коллоидной стабильности полученных наночастиц методами динамического и электрофоретического рассеяния света в зависимости от pH, температуры и времени выдержки показало, что средний гидродинамический диаметр частиц находится в диапазоне от 45,44 до 197,67 нм, а ζ-потенциал – от -6,05 до -83,06 мВ; наибольшая стабильность системы достигается в щелочной среде, тогда как в кислой среде и при температуре 95°С стабильность частиц снижается.

В дальнейшем планируется исследование влияния ионной силы и активной кислотности среды на коллоидную стабильность полученных наночастиц селена, стабилизированных ПВП К-17, а также исследование образцов методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-76-31002, (https://rscf.ru/project/26-76-31002/).

Библиографический список:

1. **Ахмеджанова, З.И.** Макро-и микроэлементы в жизнедеятельности организма и их взаимосвязь с

иммунной системой (обзор литературы) / З.И. Ахмеджанова, Г.К. Жиемуратова, Е.А. Данилова и др. // Журнал теоретической и клинической медицины. – 2020. – №. 1. – С. 16-21.
2. **Li, Q.** Emerging insights into the role of trace elements in human health and disease prevention / Q. Li, X. Yu, H. Liu et al. // Nutrients. – 2025. – V. 17. – I. 23. – Art. 3678. – 4 p. DOI: 10.3390/nu17233678.
3. **Василенко, А.М.** Дефицит микроэлементов и проблема коморбидности / А.М. Василенко, М.М. Шарипова // Микроэлементы в медицине. – 2019. – Т. 20. – №. 1. – С. 4-12. DOI: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-4-12.
4. **Дроздов, В.Н.** Рациональное возмещение дефицита витаминов и микроэлементов / В.Н. Дроздов // Лечебное дело. – 2009. – №. 3. – С. 34-41.
5. **Бурцева, Т.И.** Селен: эссенциальный микроэлемент (обзор) / Т.И. Бурцева, О.И. Бурлуцкая // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – №. 2S (52). – С. 7-9.
6. **Гмошинский, И.В.** Микроэлемент селен: роль в процессах жизнедеятельности / И.В. Гмошинский, В.К. Мазо, В.А. Тутельян, С.А. Хотимченко // Экология моря. – 2000. – Т. 54. – С. 5-19.
7**. Zhang, Y.** Role of selenoproteins in redox regulation of signaling and the antioxidant system: a review / Y. Zhang, Y.J. Roh, S.J. Han et al. // Antioxidants. – 2020. – V. 9. – I. 5. – Art. №. 383. – 17 p. DOI: 10.3390/antiox9050383.
8. **Шестакова, Т.П.** Использование селена в медицинской практике / Т.П. Шестакова // Русский Медицинский Журнал. – 2017. – Т. 25. – №. 22. – С. 1654-1659.
9. **Голубкина, Н.А.** Селен в почвах на разных высотных уровнях рельефа Днестровско-Прутского междуречья / Н.А. Голубкина, И.П. Капитальчук, М.В. Капитальчук // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 1. – С. 98-101.
10. **Решетник, Л.А.** Селен и здоровье человека (обзор литературы) / Л.А. Решетник, Е.О. Парфенова // Экология моря. – 2000. – Т. 54. – С. 20-25.
11. **Решетник, Л.А.** Биогеохимическое и клиническое значение селена для здоровья человека / Л.А. Решетник, Е.О. Парфенова // Микроэлементы в медицине. – 2001. – Т. 2. – № 2. – С. 2-8.
12. **Liu, L.** Effects of selenium and iodine on Kashin-Beck disease: an updated review / L. Liu, P. Luo, P. Wen, P. Xu // Frontiers in Nutrition. – 2024. – V. 11. – Art. № 1402559. – 11 p. DOI: 10.3389/fnut.2024.1402559.
13. **Егорова, Е.А.** Изучение всасывания и депонирования селена в составе биомассы селеносодержащих лактобацилл и селенита натрия у лабораторных животных / Е.А. Егорова, И.В. Гмошинский, С.Н. Зорин, В.К. Мазо // Вопросы детской диетологии. – 2006. – Т. 4. – №. 2. – С. 14-16.
14. **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: 10.33380/2305-2066-2020-9-2-33-44.
15. **Никитенко, О.В.** Структурно-клеточные перестройки лимфоидных органов после внутрибрюшинного введения селенита натрия в токсической дозе / О.В. Никитенко, И.Н. Путалова // Вестник новых медицинских технологий. – 2010. – Т. 17. – №. 2. – С. 32-35.
16. IQmol Molecular Viewer. – Режим доступа: http://www.iqmol.org/. – 12.06.2026.
17. Q-Chem 6.3 User's Manual. – Режим доступа: https://manual.q-chem.com/6.3/. – 12.06.2026.

References:

1. Akhmedzhanova Z.I., Zhiemuratova G.K., Danilova E.A. et al. Makro-i mikroelementy v zhiznedeyatel'nocti organizma i ikh vzaimosvyaz' s immunnoj sistemoj (obzor literatury) [Macro- and microelements in the body's vital functions and their relationship with the immune system (literature review)], *Zhurnal teoreticheskoi i klinicheskoi meditsiny [Journal of Theoretical and Clinical Medicine]*, 2020, no. 1, pp. 16-21. (In Russian).
2. Li Q., Yu X., Liu H. et al. Emerging Insights into the role of trace elements in human health and disease prevention, *Nutrients*, 2025, vol. 17, issue 23, art. no. 3678, 4 p. DOI: 10.3390/nu17233678.
3. Vasilenko A.M., Sharipova M.M. Defitsit mikroehlementov i problema komorbidnosti [Deficiencies of trace elements and the problem of comorbidity], *Mikroelementy v meditsine* [*Trace Elements in Medicine*], 2019. vol. 20., no. 1, pp. 4-12. DOI: 10.19112/2413-6174-2019-20-1-4-12. (In Russian).
4. Drozdov V.N. Ratsional'noe vozmeshchenie defitsita vitaminov i mikroehlementov [Rational compensation of vitamins and microcells deficiency], *Lechebnoe delo* [*Lechebnoe Delo Journal*], 2009, no. 3, pp. 34-41. (In Russian).
5. Burtseva T.I., Burlutskaya O.I. Selen: essentsial'nyj mikroelement (obzor) [Selenium: an essential trace element (review)], *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Vestnik of the Orenburg State University]*, 2006, no. 2 (52), pp. 7-9. (In Russian).
6. Gmoshinski I.V., Mazo V.K., Tuteljan V.A., Hotimchenko S.A. Mikroehlement selen: rol' v protsessakh zhiznedeyatel'nosti [Elenium microelement: its role in vitality processes], *Ekologiya morya* [*Ecology of the sea*],

2000, no. 54, pp. 5-19. (In Russian).
7. Zhang Y., Y.J. Roh, S.J. Han. Role of selenoproteins in redox regulation of signaling and the antioxidant system: a review, *Antioxidants*, 2020, vol. 9, issue 5, art. no. 383, 17 p. DOI: 10.3390/antiox9050383.
8. Shestakova T.P. Ispol'zovanie selena v meditsinskoi praktike [The use of selenium in medical practice], *Russkij Meditsinskij Zhurnal [Russian Medical Journal*], 2017, vol. 25, no. 22, pp. 1654-1659. (In Russian).
9. Golubkina N.A., Kapitalchuk I.P., Kapitalchuk M.V. Selen v pochvakh na raznykh vysotnykh urovnyakh rel'efa Dnestrovsko-Prutskogo mezhdurech'ya [Selenium in soils at different altitudes of the terrain between the rivers dniester and prut], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki [Bulletin of Moscow state regional university. Series: natural sciences]*, 2012, no. 1, pp. 98-101. (In Russian).
10. Reshetnik L.A., Parfjonova E.O. Selen i zdorov'e cheloveka (obzor literatury) [Selenium and people's health (literary review)], *Ekologiya morya* [*Ecology of the sea*], 2000, vol. 54, pp. 20-25. (In Russian).
11. Reshetnik L.A., Parfenova E.O. Biogeokhimicheskoe i klinicheskoe znachenie selena dlya zdorov'ya cheloveka [Biogeochemical and clinical significance of selenium for human health], *Mikroelementy v meditsine* [*Trace Elements in Medicine*], 2001, vol. 2, no. 2, pp. 2-8. (In Russian).
12. Liu L., Luo P., Wen P., Xu P. Effects of selenium and iodine on Kashin-Beck disease: an updated review, *Frontiers in Nutrition*, 2024, vol. 11, art. no. 1402559, 11 p. DOI: 10.3389/fnut.2024.1402559.
13. Egorova E.A., Gmoshinskii I.V., Zorin S.N., Mazo V.K. Izuchenie vsasyvaniya i deponirovaniya selena v sostave biomassy selenosoderzhashchikh laktobatsill i selenita natriya u laboratornykh zhivotnykh [Studies on essential trace element selenium absorption and lay up from selenium containing lactobacillus biomass in laboratory animals], *Voprosy detskoi dietologii [Pediatric Nutrition*], 2006, vol. 4, no. 2, pp. 14-16. (In Russian).
14. 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).
15. Nikitenko O.V., Putalova I.N. Strukturno-kletochnye perestroiki limfoidnykh organov posle vnutribryushinnogo vvedeniya selenita natriya v toksicheskoi doze [Structural and cellular changes in lymphoid organs after intraperitoneal of sodium selenite introductions in the toxic dose in the cavity peritoneale], Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologij [*Bulletin of new Medical Technologies*], 2010, vol. 17, no. 2, pp. 32-35. (In Russian).
16. IQmol Molecular Viewer. Available at: www.url: http://www.iqmol.org/ (accessed 12.06.2026).
17. Q-Chem 6.3 User's Manual. Available at: https://manual.q-chem.com/6.3/ (accessed 12.06.2026).