

Научная статья

УДК 546.23

EDN XYLMIR

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-4-116-124>

Микробный синтез наноселена

Ирина Сергеевна Хамагаева¹, Людмила Михайловна Качанина²,
Наталья Александровна Замбалова³, Анна Сергеевна Столярова⁴

^{1, 2, 3, 4} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Республика Бурятия, Улан-Удэ, Россия

¹ ikhamagaeva@mail.ru, ² lm.kaluda@mail.ru,

³ zambalova2015@mail.ru, ⁴ anna_sergsto@mail.ru

Аннотация. Развитие методов «зеленого» синтеза для получения безопасных и биосовместимых наноматериалов является ключевой задачей нанотехнологий. Особый интерес представляет использование пробиотических культур для синтеза наночастиц селена, что позволяет объединить полезные свойства пробиотиков с уникальной биологической активностью наноформы микроэлемента. Целью исследований явился синтез и характеристика наночастиц селена, полученных с использованием пробиотических бактерий *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083 и *Propionibacterium shermanii* AC2503. Биосинтез наноселена осуществляли путем инкубации бактериальных клеток с селенитом натрия (Na₂SeO₃). Полученные наночастицы характеризовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии и лазерной дифракции. Установлено, что штаммы пробиотиков восстанавливают селенит натрия до элементарного селена с формированием сферических аморфных наночастиц, стабилизированных биомолекулами. Впервые продемонстрирована возможность получения стабильных и биологически активных наночастиц селена с использованием пробиотических штаммов. Показано, что биогенный наноселен обладает низкой токсичностью; это делает его перспективным для создания синергических пробиотических препаратов и функциональных пищевых продуктов нового поколения.

Ключевые слова: наноселен, биосинтез, пробиотики *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083 и *Propionibacterium shermanii* AC2503, функциональное питание

Для цитирования: Хамагаева И. С., Качанина Л. М., Замбалова Н. А., Столярова А. С. Микробный синтез наноселена // Дальневосточный аграрный вестник. 2025. Том 19. № 4. С. 116–124. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-4-116-124>.

Original article

Microbial synthesis of nanoselenium

Irina S. Khamagaeva¹, Lyudmila M. Kachanina²,
Natalya A. Zambalova³, Anna S. Stolyarova⁴

^{1, 2, 3, 4} East Siberian State University of Technology and Management
Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Russian Federation

¹ ikhamagaeva@mail.ru, ² lm.kaluda@mail.ru,

³ zambalova2015@mail.ru, ⁴ anna_sergsto@mail.ru

Abstract. The development of green synthesis methods for the production of safe and biocompatible nanomaterials is a key task of nanotechnology. The use of probiotic cultures for the synthesis of selenium nanoparticles is of scientific and practical importance. This makes it possible to combine the beneficial properties of probiotics with the unique biological activity of the microelement nanoform. The aim of the research is the synthesis and characterization of selenium nanoparticles obtained using probiotic bacteria *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083 and

Propionibacterium shermanii AC2503. Nanoselenium biosynthesis was performed by incubating bacterial cells with sodium selenite (Na_2SeO_3). The resulting nanoparticles were characterized using transmission electron microscopy and laser diffraction. It has been established that probiotic strains reduce sodium selenite to elementary selenium with the formation of spherical amorphous nanoparticles stabilized by biomolecules. The possibility of obtaining stable and biologically active selenium nanoparticles using probiotic strains has been shown for the first time. It is proved that biogenic nanoselenium has low toxicity. This makes it promising for the creation of synergistic probiotic drugs and functional food products of a new generation.

Keywords: nanoselenium, biosynthesis, probiotics *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083 and *Propionibacterium shermanii* AC2503, functional food

For citation: Khamagaeva I. S., Kachanina L. M., Zambalova N. A., Stolyarova A. S. Microbial synthesis of nanoselenium. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2025;19;4:116–124. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2025-19-4-116-124>.

Введение. Селен как важный микроэлемент играет фундаментальную роль в организме человека и животных, участвуя в обмене веществ и выполняя антиоксидантную, антивозрастную, противоопухолевую и иммунную регуляции [1–5]. Однако между дефицитом, оптимальным потреблением и токсичностью селена существует очень узкий диапазон. Традиционные неорганические (селенит, селенат) и органические (селенметионин) формы селена обладают относительно низкой биодоступностью и высокой токсичностью при передозировке, что стимулирует поиск новых более безопасных и эффективных норм этого микроэлемента [6, 7].

В последнее десятилетие внимание исследователей привлекает элементарный селен в наноформе (нано-Se). Наночастицы селена демонстрируют значительно более низкую токсичность по сравнению с ионными формами, при этом обладают высокой биологической активностью. Они эффективно имитируют активность глутатионпероксидазы и проявляют выраженные антиоксидантные, противоопухолевые, противовоспалительные и антимикробные свойства [8, 9].

Ключевой проблемой до недавнего времени являлся синтез стабильных и биосовместимых наночастиц. Классические химические методы синтеза наноселена часто связаны с использованием восстановителей и стабилизаторов, что ограничивает их применение в медицине и пищевой промышленности [4, 7, 10].

Альтернативой выступает «зеленый» синтез с использованием микроорганизмов. Микробный синтез происходит в мягких условиях, экологически безопасен

и позволяет получить наночастицы, стабилизированные белками, полисахаридами, что придает им высокую коллоидную стабильность и биосовместимость [11].

Особый интерес в этом направлении исследований представляют пробиотические микроорганизмы. Их использование для синтеза наночастиц селена позволяет объединить преимущества биогенного подхода с доказанными полезными свойствами самих пробиотиков. Восстанавливая токсичные селенит-ионы до нетоксичного наноселена, пробиотики не только детоксифицируют среду, но и продуцируют уникальный симбиотический продукт, сочетающий пробиотический эффект с терапевтическим потенциалом.

Несмотря на растущий интерес, вопросы, связанные с оптимизацией условий синтеза, характеристикой свойств, получаемых «пробиотических» наночастиц и изучением их биологической активности, остаются недостаточно изученными.

Целью исследований явился синтез наночастиц с использованием бифидобактерий и пропионовокислых бактерий, а также их комплексная характеристика.

Материалы и методы исследований. В работе использовали активизированные культуры пробиотических микроорганизмов *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083 и *Propionibacterium shermanii* AC2503 [12]. Синтез наночастиц селена проводили путем инкубации штаммов соответствующих культур.

В опытные образцы вносили стерильный раствор Na_2SeO_3 . Инкубацию проводили при температуре 37 °С для бифидобактерий; 30 °С – для пропионо-

вокислых бактерий в течение 24 часов. Контролем служили питательные среды без добавления селенита натрия. Визуальным признаком синтеза наночастиц селена служило появление характерного красно-оранжевого окрашивания.

Форму и размер наночастиц селена анализировали на просвечивающем электронном микроскопе Hitachi (Япония) при ускоренном напряжении 100 кэВ. Для определения размера наночастиц в коллоидном растворе применяли лазерный дифракционный анализатор SLAD-7500 nano. Он является точным и высокочувствительным инструментом для измерения области ультрамалых и высоких концентраций.

Лазерная дифракция – широко применяемая технология анализа размеров частиц, составляющих от 7 до 800 мкм. Это общепризнанная технология, требования к которой определяются международным стандартом ISO 13320:2020 «Гранулометрический анализ. Методы лазерной дифракции».

Все эксперименты проводили в трех независимых повторностях ($n=3$). Данные представлены как средние стандартные отклонения. Статистическую значимость различия определяли с помощью t -критерия Стьюдента, считая различия достоверными при $p < 0,05$. Обработку данных выполняли с использованием табличного процессора Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Инкубация клеток бифидобактерий и пропионовокислых бактерий в присутствии селена привела к появлению интенсивного красно-оранжевого окрашивания клеточной суспензии в течение 20–24 часов, в то время как контрольные образцы без селена оставались бесцветными. Изменение цвета является классическим индикатором восстановления ионов (Se^0) с образованием наночастиц [6, 13].

Окрашивание проявлялось более интенсивно с увеличением дозы селенита, что указывает на повышение восстановительной активности микроорганизмов. Полученные данные согласуются с результатами других исследователей, демонстрирующими способность молочнокислых бактерий детоксифицировать среду от селенита [9, 14].

В дальнейших исследованиях методом лазерной дифракции изучали формирование наночастиц селена пробиотическими микроорганизмами.

Результаты исследований представлены в таблицах 1 и 2. Из данных таблицы 1 видно, что максимальный выход наночастиц селена отмечен при дозе 2 мг/мл. Установлен большой разброс наночастиц, находящийся в пределах от 7 до 830 нм; при этом 24 % составляют мелкие частицы – от 7 до 36 нм.

Дезинтеграция клеток пропионовокислых бактерий приводит к незначительному увеличению выхода наночастиц селена; данное увеличение касается преимущественно наиболее мелких частиц.

Наибольший выход наноселена при инкубации бифидобактерий (штамм *Bifidobacterium adolescentis* DSM20083) составляет 71 %, а при дальнейшем повышении дозы до 5 мг/мл наблюдается резкое снижение его выхода, который достигает лишь 48 %. Дезинтеграция приводит к незначительному увеличению выхода наночастиц.

Методом электронного микроскопирования изучены форма и размеры частиц, что показано на рисунке 1.

При микробном синтезе наноселена видны наносферы различной формы, покрытые белковой оболочкой, которая обеспечивает их стабильность. Статистический анализ микрофотографий показал, что наночастицы, синтезированные бифидобактериями, имели средний размер $(130 \pm 7,5)$ нм, в то время как размер частиц, полученных пропионовокислыми бактериями, составил $(115 \pm 4,7)$ нм ($p < 0,05$).

В дальнейших исследованиях изучали влияние селенита натрия на морфологию бифидобактерий. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

Изменение морфологии бифидобактерий с увеличением дозы селенита натрия свидетельствует о снижении токсического действия в результате образования нуль-валентного селена. Из данных микрокартины (рис. 2, б) видно, что стандартные палочковидные и кокковидные клетки бифидобактерий при дозе селенита 15 мкг/мл преобразуются в агрегированные ветвящиеся, булавовидные атипичные формы. Такая биотрансформация

Таблица 1 – Характеристика синтезированных пропионовокислыми бактериями наночастиц селена

Table 1 – Characteristics of selenium nanoparticles synthesized by propionic acid bacteria

Количество в растворе селенита натрия, мг/мл	Размер наночастиц селена, нм	Выход частиц, %	Общий выход частиц, %
<i>Без дезинтеграции</i>			
1	136–286	63,60	63,60
2	7–36	24,00	72,22
	230–367	12,75	
	412–585	15,43	
	657–830	20,04	
5	7–28	9,54	52,74
	230–367	11,83	
	412–585	13,12	
	657–830	18,25	
<i>С дезинтеграцией</i>			
1	136–286	68,30	68,30
2	7–36	26,71	76,49
	230–367	13,43	
	412–585	16,14	
	657–830	20,21	

Таблица 2 – Характеристика синтезированных бифидобактериями наночастиц селена

Table 2 – Characteristics of selenium nanoparticles synthesized by bifidobacteria

Количество в растворе селенита натрия, мг/мл	Размер наночастиц селена, нм	Выход частиц, %	Общий выход частиц, %
<i>Без дезинтеграции</i>			
1	70–95	21,20	65,30
	123–321	44,10	
2	5–34	18,35	71,05
	220–387	15,47	
	389–537	16,75	
	648–790	20,48	
5	5–31	6,35	48,85
	220–387	10,48	
	389–537	13,57	
	648–790	18,45	
<i>С дезинтеграцией</i>			
1	70–95	26,33	68,70
	123–321	43,37	
2	5–34	22,00	75,56
	220–387	15,12	
	389–537	17,36	
	648–790	21,01	

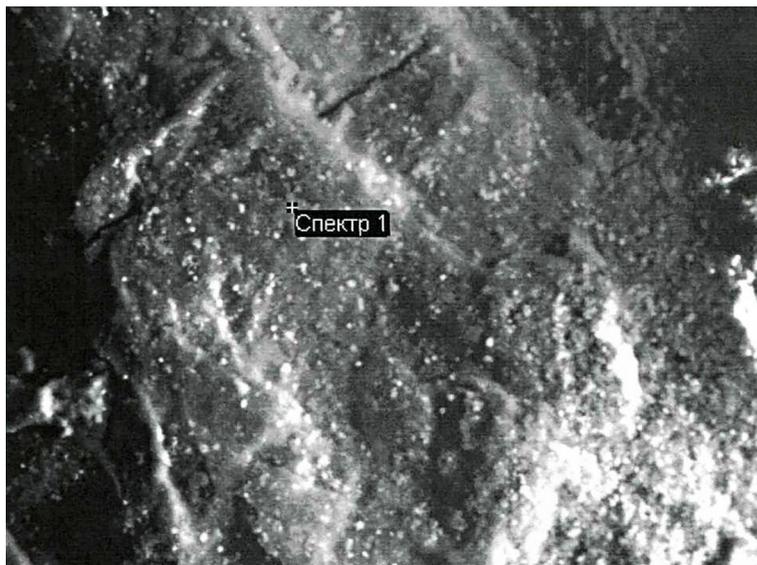


Рисунок 1 – Наночастицы селена, полученные бифидобактериями *Bifidobacterium Adolescentis* DSM 20083
Figure 1 – Selenium nanoparticles produced by *Bifidobacterium Adolescentis* DSM 20083

клеток вероятно связана с адаптацией бифидобактерий к токсическому действию селенита.

При дозе селенита 50 мкг/мл с началом образования наноселена и снижением его токсичности наблюдается дезагрегация клеток (рис. 2, в). При максимальной дозе селенита 1 мг/мл питательная среда окрашивается в красно-оранжевый цвет (рис. 2, г), что демонстрирует переход селенита в нуль-валентный селен Se^0 ; при этом морфология клеток приобретает первоначальную форму (рис. 2, а).

Полученные результаты свидетельствуют, что в присутствии наноселена морфология клеток не подвергается изменениям и он не оказывает токсического действия на бифидобактерии.

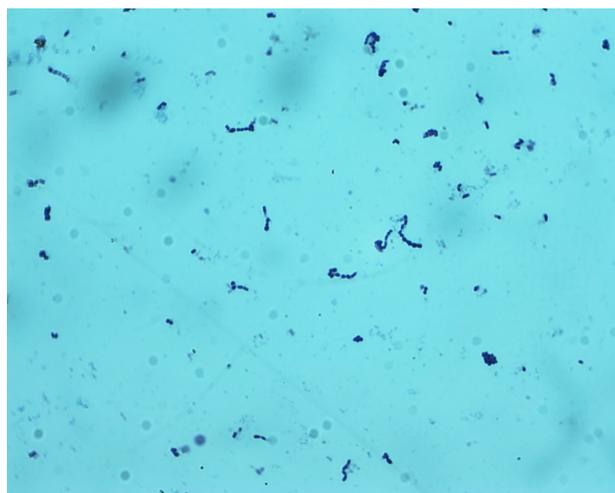
Ключевым результатом является тот факт, что процесс биосинтеза совмещает детоксикацию вредного селенита с производством биосовместимой и биоактивной формой наноселена самими пробиотическими микроорганизмами. Это открывает путь к созданию синергических комплексов (пробиотик + наноселен), где полезный эффект бактерий усиливается терапевтическим действием наноселена.

Характеристика наноселена, полученного с применением микробного синтеза, представлена в таблице 3.

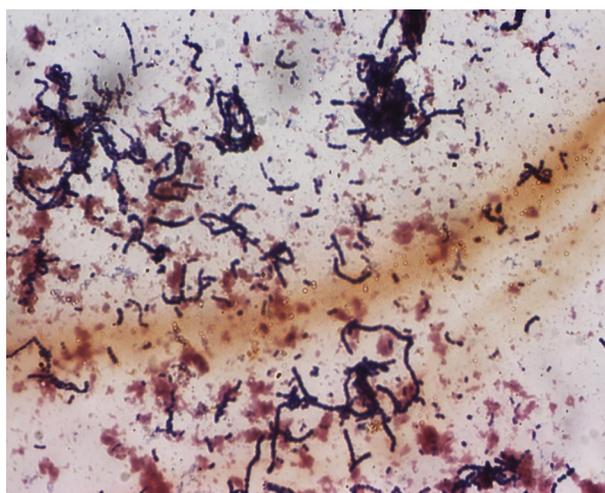
Полученные данные подтверждают способность штаммов пробиотических микроорганизмов к эффективному восстановлению селенита натрия с образованием стабильных наночастиц элементарного селена (Se^0) красно-оранжевого цвета. Оптимальными параметрами для синтеза являлись доза селенита 2 мг/мл и время инкубации 24 часа. Санитарно-гигиенические показатели наноселена соответствует требованиям технического регламента Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Основные преимущества микробного синтеза по сравнению с физико-химическими методами включают: экологичность; не требует высоких температур, давления и токсичных химических реагентов; энергоэффективность; процесс происходит в мягких условиях (при температуре 30–37 °С, нормальном давлении); биосовместимость (наночастицы, синтезируемые бактериями, имеют естественное биологическое покрытие (белки, полисахариды), которые стабилизируют их, повышают усвояемость и биодоступность по сравнению с химически синтезируемыми частицами).

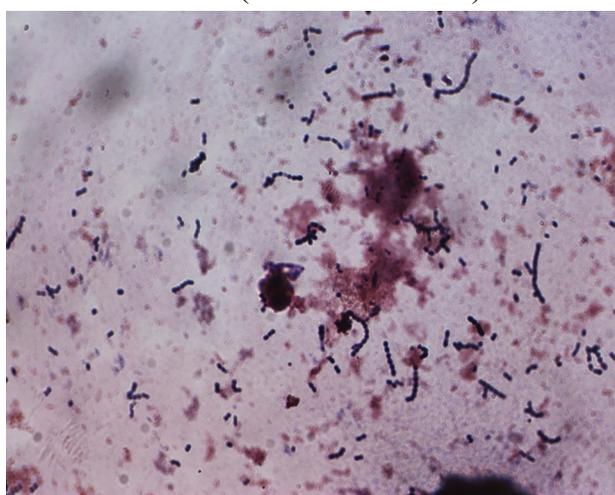
Полученный наноселен представляет собой стабильную коллоидную форму оранжево-красного цвета, его выход составляет 76 %.



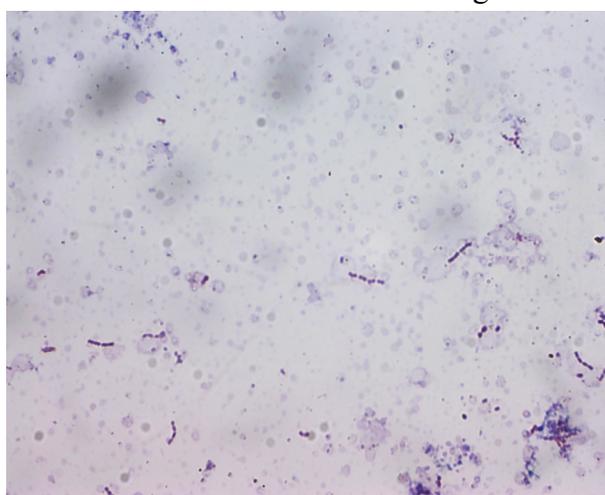
контроль (без селена)
control (without selenium)



концентрация селена – 15 мкг/мл
selenium concentration – 15 micrograms/ml



концентрация селена – 50 мкг/мл
selenium concentration – 50 micrograms/ml



концентрация селена – 1 мг/мл
selenium concentration – 1 mg/ml

Рисунок 2 – Штамм *B. Adolescentis* DSM 20083, ATCC 15703
Figure 2 – Strain *B. Adolescentis* DSM 20083, ATCC 15703

Заключение. Впервые продемонстрирована эффективная способность штаммов пробиотиков *Bifidobacterium adolescentis* и *Propionibacterium shermanii* осуществлять биовосстановление токсичного селенита натрия Na_2SeO_3 с образованием стабильных наночастиц элементарного селена.

Установлены оптимальные условия получения (культивирования) пробиотических микроорганизмов: инкубация при температуре 30–37 °C в течение 24 часов.

Комплекс методов (электронная микроскопия, лазерная дифракция) выявил, что синтезируемые наночастицы являются

сферическими, аморфными и стабилизированными биомолекулами; это является ключевым фактором для их последующего практического применения. Установлено, что размер наночастиц, продуцируемых разными штаммами пробиотических микроорганизмов, зависит не только от штаммовой принадлежности пробиотиков, но и условий культивирования.

Результаты работы доказывают перспективность использования пробиотиков в качестве экологических и безопасных био-нанофабрик для производства функциональных наноматериалов и продуктов питания.

Таблица 3 – Показатели качества биологически активной добавки с наноселеном, полученной с использованием пробиотических микроорганизмов**Table 3 – Quality indicators of biologically active additives with nanoselenium obtained using probiotic microorganisms**

Наименование показателей	Значения
Консистенция и внешний вид	однородная; допускается отделение сыворотки
Цвет	красно-оранжевый
Предельное значение pH, ед.	4,5–7,0
Температура при выпуске с предприятия, не более °С	4±2
Содержание наночастиц селена, мг/л	1,5
Объем продукта (см ³), в котором не допускаются: бактерии группы кишечной палочки (колиформы) <i>S. aureus</i>	10 10
патогенные микроорганизмы (включая сальмонеллы)	50
Дрожжи и плесени, не более КОЕ/см ³	5

Список источников

1. Решетник Е. И., Захарова Л. М., Пакулина А. П., Пашина Л. Л., Школьников П. Н. Разработка инновационно новых продуктов функционального назначения // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2024. № 3 (86). С. 45–53. doi: 10.33979/2219-8466-2024-86-3-45-53. EDN YTWQUF.
2. Bai K., Hong B., He J., Hong Zh., Tan R. Preparation and antioxidant properties of selenium nanoparticles-loaded chitosan microspheres // International Journal of Nanomedicine. 2017. No. 12. P. 4527–4539. <https://doi.org/10.2147/IJN.S129958>.
3. Rayman M. P. The importance of selenium to human health // Lancet. 2000. No. 356 (9225). P. 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02490-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02490-9).
4. Schomburg L. Dietary selenium and human health // Nutrients. 2016. Vol. 9. No. 1. P. 22. doi: 10.3390/nu9010022.
5. Xu C., Guo Y., Qiao L., Ma L., Cheng Y., Roman A. Biogenic synthesis of novel functionalized selenium nanoparticles by *Lactobacillus casei* ATCC 393 and its protective effects on intestinal barrier dysfunction caused by enterotoxigenic *Escherichia coli* K88 // Frontiers in Microbiology. 2018. No. 9. P. 1129. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01129>.
6. Neha Bisht, Priyanka Phalswal, Pawan K. Khanna. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications // Materials Advances. 2022. Vol. 3. Iss. 3. P. 1415–1431. <https://doi.org/10.1039/d1ma00639h>.
7. Quintana M., Haro-Poniatowski E., Morales J., Batina N. Synthesis of selenium nanoparticles by pulsed laser ablation // Applied Surface Science. 2002. Vol. 195. No. 1–4. P. 175–186. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00549-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00549-4). EDN LXYHRR.
8. Ahmad M. S., Yasser M. M., Sholkamy E. N., Ali A. M., Mehanni M. M. Anticancer activity of biostabilized selenium nanorods synthesized by *Streptomyces bikiniensis* strain Ess amA-1 // International Journal of Nanomedicine. 2015. No. 10. P. 3389–401. doi: 10.2147/IJN.S82707.
9. Wadhvani 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. No. 6. P. 2555–2566. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7300-7>.
10. Kessi J., Hanselmann K. W. Similarities between the abiotic reduction of selenite with glutathione and the dissimilatory reaction mediated by *Rhodospirillum rubrum* and *Escherichia coli* // Journal of Biological Chemistry. 2004. Vol. 279. No. 49. P. 50662–50669. doi: 10.1074/jbc.M405887200.

11. Van Overschelde O., Guisbiers G., Snyders R. Green synthesis of selenium nanoparticles by excimer pulsed laser ablation in water // *Apl Materials*. 2013. Vol. 1. No. 4. doi: 10.1063/1.4824148. EDN SPIIJL.
12. Патент № 2333655 Российская Федерация. Способ получения селеносодержащей биологически активной добавки : № 2006127216/13 : заявл. 26.07.2006 : опубл. 20.09.2008 / Хамагаева И. С., Кузнецова О. С. Бюл. № 26. 10 с.
13. Butler C. S., Debieux C. M., Dridge E. J., Splatt P., Wright M. Biomineralization of selenium by the selenate-respiring bacterium *Thauera selenatis* // *Biochemical Society Transactions*. 2012. Vol. 40. No. 6. P. 1239–1243. doi: 10.1042/BST20120087.
14. Husen A., Siddiqi K. S. Plants and microbes assisted selenium nanoparticles: Characterization and application // *Journal of Nanobiotechnology*. 2014. No. 12. P. 28. <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0028-6>.

References

1. Reshetnik E. I., Zakharova L. M., Pakusina A. P., Pashina L. L., Shkolnikov P. N. Development of innovative new functional products. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov*, 2024;3(86):45–53. doi: 10.33979/2219-8466-2024-86-3-45-53. EDN YTWQUF (in Russ.).
2. Bai K., Hong B., He J., Hong Zh., Tan R. Preparation and antioxidant properties of selenium nanoparticles-loaded chitosan microspheres. *International Journal of Nanomedicine*, 2017;12:4527–4539. <https://doi.org/10.2147/IJN.S129958>.
3. Rayman M. P. The importance of selenium to human health. *Lancet*, 2000;356(9225): 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02490-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02490-9).
4. Schomburg L. Dietary selenium and human health. *Nutrients*, 2016;9;1:22. doi: 10.3390/nu9010022.
5. Xu C., Guo Y., Qiao L., Ma L., Cheng Y., Roman A. Biogenic synthesis of novel functionalized selenium nanoparticles by *Lactobacillus casei* ATCC 393 and its protective effects on intestinal barrier dysfunction caused by enterotoxigenic *Escherichia coli* K88. *Frontiers in Microbiology*, 2018;9:1129. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01129>.
6. Neha Bisht, Priyanka Phalswal, Pawan K. Khanna. Selenium nanoparticles: A review on synthesis and biomedical applications. *Materials Advances*, 2022;3;3:1415–1431. <https://doi.org/10.1039/d1ma00639h>.
7. Quintana M., Haro-Poniatowski E., Morales J., Batina N. Synthesis of selenium nanoparticles by pulsed laser ablation. *Applied Surface Science*, 2002;195;1–4:175–186. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)00549-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)00549-4). EDN LXHYHR.
8. Ahmad M. S., Yasser M. M., Sholkamy E. N., Ali A. M., Mehanni M. M. Anticancer activity of biostabilized selenium nanorods synthesized by *Streptomyces bikiniensis* strain Ess_amaA-1. *International Journal of Nanomedicine*, 2015;10:3389–401. doi: 10.2147/IJN.S82707.
9. Wadhvani S. A., Shedbalkar U. U., Singh R., Chopade B. A. Biogenic selenium nanoparticles: Current status and future prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016;100;6:2555–2566. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7300-7>.
10. Kessi J., Hanselmann K. W. Similarities between the abiotic reduction of selenite with glutathione and the dissimilatory reaction mediated by *Rhodospirillum rubrum* and *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry*, 2004;279;49:50662–50669. doi: 10.1074/jbc.M405887200.
11. Van Overschelde O., Guisbiers G., Snyders R. Green synthesis of selenium nanoparticles by excimer pulsed laser ablation in water. *Apl Materials*, 2013;1;4. doi: 10.1063/1.4824148. EDN SPIIJL.
12. Khamagaeva I. S., Kuznetsova O. S. Method for producing a selenium-containing dietary supplement. *Patent RF, No. 2333655 patents.google.com* 2008 Retrieved from <https://patents.google.com/patent/RU2333655C2/ru> (Accessed 10 August 2025) (in Russ.).

13. Butler C. S., Debieux C. M., Dridge E. J., Splatt P., Wright M. Biomineralization of selenium by the selenate-respiring bacterium *Thauera selenatis*. *Biochemical Society Transactions*, 2012;40;6:1239–1243. doi: 10.1042/BST20120087.

14. Husen A., Siddiqi K. S. Plants and microbes assisted selenium nanoparticles: Characterization and application. *Journal of Nanobiotechnology*, 2014;12:28. <https://doi.org/10.1186/s12951-014-0028-6>.

© Хамагаева И. С., Качанина Л. М., Замбалова Н. А., Столярова А. С., 2025

Статья поступила в редакцию 12.11.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 10.12.2025.

The article was submitted 12.11.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 10.12.2025.

Информация об авторах

Хамагаева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, профессор, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>, Author ID: 545158, ikhamagaeva@mail.ru;

Качанина Людмила Михайловна, кандидат технических наук, доцент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Author ID: 561053, lm.kaluda@mail.ru;

Замбалова Наталья Александровна, кандидат технических наук, доцент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Author ID: 586980, zambalova2015@mail.ru;

Столярова Анна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Author ID: 443669, anna_sergsto@mail.ru

Information about the authors

Irina S. Khamagaeva, Doctor of Technical Sciences, Professor, East Siberian State University of Technology and Management, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4294-5857>, Author ID: 545158, ikhamagaeva@mail.ru;

Lyudmila M. Kachanina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Author ID: 561053, lm.kaluda@mail.ru;

Natalya A. Zambalova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Author ID: 586980, zambalova2015@mail.ru;

Anna S. Stolyarova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, East Siberian State University of Technology and Management, Author ID: 443669, anna_sergsto@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.