

Александр Сергеевич Жигайлов^{1✉}, Елена Александровна Вечтомова²,

Дмитрий Михайлович Руссаков³, Владимир Петрович Юстратов⁴

^{1,2,3,4}Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

¹szhigailov@ya.ru

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ БИОФОРТИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР СЕЛЕНОМ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Цель исследования – провести сравнительный анализ современных методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном, оценить их эффективность, перспективы и ограничения. Объект исследования – сельскохозяйственные культуры, подвергаемые обогащению селеном, а также применяемые к ним агрономические (почвенное внесение, внекорневая подкормка, гидропоника), биотехнологические (генетическая селекция, использование микроорганизмов) и интегрированные методы биофортификации. Предмет исследования составили количественные показатели эффективности различных методов биофортификации, включая коэффициент усвоения селена (soil-to-plant transfer factor, STPTF), долю органических форм селена в урожае и влияние выбранных технологий на агробиологические характеристики растений. Методология основана на систематизации и анализе данных научных публикаций с акцентом на количественные показатели эффективности. Коэффициенты усвоения селена (soil-to-plant transfer factor, STPTF) варьировали от 0,2–0,7 при почвенном внесении до 0,7–0,9 в гидропонных системах. Доля органического селена в урожае составила 40–60 % для агрохимических методов и возросла до 60–90 % при применении микробной инокуляции и генетических модификаций. Внекорневая подкормка обеспечивала увеличение содержания селена в съедобных органах на 5–15 %, а использование ризосферных бактерий (например *Bacillus subtilis*) повышало концентрацию селенометионина в зерне пшеницы на 15 %. Наибольшая эффективность достигалась при интегрированных подходах, сочетающих листовые обработки наноразмерными формами селена (прирост содержания Se в плодах томата на 75 %) с применением селен-аккумулирующих сортов. Ограничения методов включают зависимость агрохимических подходов от почвенных условий, высокую стоимость и регуляторные барьеры для биотехнологических решений. Оптимальная стратегия биофортификации требует комбинации методов с учетом целевой культуры, почвенных условий и экономических факторов, при этом перспективы связаны с развитием точных технологий дозирования и созданием сортов с повышенной аккумуляционной способностью.

Ключевые слова: биофортификация, селен, агрономические методы, биотехнологические методы, коэффициент усвоения, органический селен, интегрированные подходы

Для цитирования: Жигайлов А.С., Вечтомова Е.А., Руссаков Д.М., и др. Современные методы биофортификации сельскохозяйственных культур селеном: эффективность, перспективы и ограничения // Вестник КрасГАУ. 2026. № 4. С. 297–312. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-297-312.

Alexander Sergeevich Zhigaylov^{1✉}, Elena Aleksandrovna Vechtomova²,

Dmitry Mikhailovich Russakov³, Vladimir Petrovich Yustratov⁴

^{1,2,3,4}Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

¹szhigailov@ya.ru

MODERN METHODS OF CROPS BIOTIFICATION WITH SELENIUM: EFFICIENCY, PROSPECTS, AND LIMITATIONS

The objective of the study is to conduct a comparative analysis of modern methods of biofortification of agricultural crops with selenium, and to evaluate their effectiveness, prospects, and limitations. The object of the study is agricultural crops fortified with selenium, as well as the agronomic (soil application, foliar feeding, hydroponics), biotechnological (genetic selection, use of microorganisms), and integrated biofortification methods applied to them. The subject of the study was quantitative indicators of the effectiveness of various biofortification methods, including the selenium assimilation coefficient (soil-to-plant transfer factor, STPTF), the proportion of organic forms of selenium in the yield, and the impact of the selected technologies on the agrobiological characteristics of plants. The methodology is based on the systematization and analysis of scientific publications, with an emphasis on quantitative indicators of effectiveness. Selenium assimilation coefficients (soil-to-plant transfer factor, STPTF) ranged from 0.2–0.7 for soil application to 0.7–0.9 in hydroponic systems. The share of organic selenium in the yield was 40–60 % for agrochemical methods and increased to 60–90 % when microbial inoculation and genetic modification were used. Foliar application increased selenium content in edible organs by 5–15 %, while the use of rhizosphere bacteria (e.g., *Bacillus subtilis*) increased selenomethionine concentration in wheat grain by 15 %. The greatest efficiency was achieved with integrated approaches combining foliar applications of nanosized forms of selenium (increasing Se content in tomato fruits by 75 %) with the use of selenium-accumulating varieties. Limitations of these methods include the dependence of agrochemical approaches on soil conditions, high cost, and regulatory barriers for biotechnological solutions. An optimal biofortification strategy requires a combination of methods taking into account the target crop, soil conditions, and economic factors, with potential lies in the development of precise dosing technologies and the creation of varieties with increased accumulation capacity.

Keywords: biofortification, selenium, agronomic methods, biotechnological methods, absorption coefficient, organic selenium, integrated approaches

For citation: Zhigailov AS, Vechtomova EA, Russakov DM, et al. Modern methods of selenium biofortification of agricultural crops: effectiveness, prospects, and limitations. *Bulletin of KSAU*. 2026;(4):297-312. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-297-312.

Введение. С 1960 г. после открытия антиоксидантных свойств селена этот микроэлемент получил статус эссенциального для человека и животных. Было установлено, что его ключевые функции заключаются в разрушении перекисей и гидроперекисей липидов, а также в обеспечении защиты организма от окислительного стресса. Накопленные к настоящему времени данные демонстрируют уникальную двойственную природу селена: являясь одним из наиболее токсичных элементов, он в то же время выступает незаменимым кофактором, определяющим каталитическую активность широкого спектра жизненно важных ферментов [1, 2].

Поскольку селен поступает в организм человека с продуктами растениеводства и животноводства, которые, в свою очередь, получают его из почвы, уровень обеспеченности этим микроэлементом напрямую определяется геохимическими условиями [3].

Сегодня все большее число исследователей сосредотачивают свое внимание на роли Se в

сохранении широкого спектра процессов в организме, что привлекло к росту интереса к исследованиям биологического значения этого микроэлемента. Подсчитано, что во всем мире около одного миллиарда человек сталкивается с дефицитом селена. Основной причиной является употребление продуктов, содержащих недостаточное количество данного микроэлемента. Пища, в основном растительного происхождения, является источником важных минералов, микро- и макроэлементов, поэтому важно регулярно придерживаться правильного и сбалансированного питания, которое может обеспечить достаточное количество нутриентов. Обогащение культурных растений полезными для здоровья человека соединениями и минеральными элементами может рассматриваться как стратегия борьбы с дефицитом нутриентов [4, 5].

Растущий интерес к обогащению агрокультур минеральными элементами стимулировал интенсивную исследовательскую деятельность,

направленную на разработку различных методов биофортификации.

Цель исследования – провести сравнительный анализ современных методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном; оценить их эффективность, перспективы и ограничения.

Задачи: проанализировать биохимические механизмы поглощения, транслокации и метаболизма селена в растениях; провести сравнительную оценку эффективности современных агрономических и биотехнологических методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном; выявить перспективы и ограничения применения различных методов биофортификации в зависимости от почвенно-климатических условий и целевых культур.

Объекты и методы. Объектом исследования являлись сельскохозяйственные культуры, рассматриваемые в научных публикациях, а также применяемые к ним агрономические, биотехнологические и интегрированные методы биофортификации селеном. Предмет исследования – сравнительные количественные характеристики эффективности данных методов (коэффициент усвоения селена, STPTF, доля органических форм селена в урожае, влияние на урожайность и качество продукции). Информационной базой послужили данные научных публикаций в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах [1–50].

Сравнительный анализ эффективности методов проведен на основе систематизации количественных показателей, включая коэффициент усвоения селена (soil-to-plant transfer factor, STPTF) и долю органических форм селена в урожае. Ретроспективный анализ развития агрономических и биотехнологических подходов выполнен за период 2000–2024 гг. Информацию для оценки современных тенденций и перспектив получали из баз данных Scopus, Web of Science, РИНЦ и официальных отчетов профильных научных учреждений.

Результаты и их обсуждение. *Биохимия селена.* Селен (Se) – это микроэлемент, играющий сложную роль в физиологии растений, начиная от полезных эффектов при низких концентрациях и заканчивая токсичностью при более высоких уровнях. Его биохимическая судьба в растениях в значительной степени определяется его химическим сродством с серой (S), что позволяет селену проникать в пути усвоения.

Хотя селен для человека и животных является эссенциальным микроэлементом, его необходимость для высших растений остается неподтвержденной [6].

Содержание селена в почвах определяется геологическим происхождением материнских пород, климатом, гидрологическим режимом и деятельностью микроорганизмов [7]. Среднее содержание этого микроэлемента в земной коре оценивается в 0,05 мг/кг, но в почвах этот показатель колеблется от 0,01 до 2,0 мг/кг в зависимости от региона. В селенодефицитных зонах (например в некоторых районах Китая, Новой Зеландии, Финляндии) концентрация в почвах может быть ниже 0,1 мг/кг, что приводит к низкому содержанию селена в сельхозпродукции [8]. В селенонасыщенных регионах (например в некоторых районах США, Канады, России) содержание микроэлемента в почвах может превышать 5 мг/кг, что иногда вызывает токсичность у растений и животных. Селеновый статус почвы формируется из неорганических соединений микроэлемента и органических форм, поступающих в почву вместе с разложением остатков растений и животных. Под действием микрофлоры происходит, с одной стороны, образование форм, доступных для растений, а с другой – высвобождение селена в атмосферу в результате реакции метилирования. Антропогенное воздействие, прежде всего сжигание ископаемого топлива, значительно увеличивает долю атмосферного селена, в результате чего такой селен, наряду с запасенными в почве формами, становится важным источником селена для растений [9].

Селен и сера принадлежат к одной группе периодической системы (VI A), имеют схожий атомный радиус, валентность и электроотрицательность. Благодаря этому растения воспринимают селен как «серу-двойника» и используют те же транспортные системы и ферментативные пути. Это объясняет, почему селен может замещать серу в аминокислотах (цистеин → селеноцистеин, метионин → селенометионин), что при низких концентрациях может быть полезно, а при избытке – токсично [12].

Наиболее значимыми для питания растений являются растворимые формы селена – селенат (SeO_4^{2-}) и селенит (SeO_3^{2-}), различающиеся по подвижности в почве, механизму поглощения и метаболической судьбе (рис. 1).

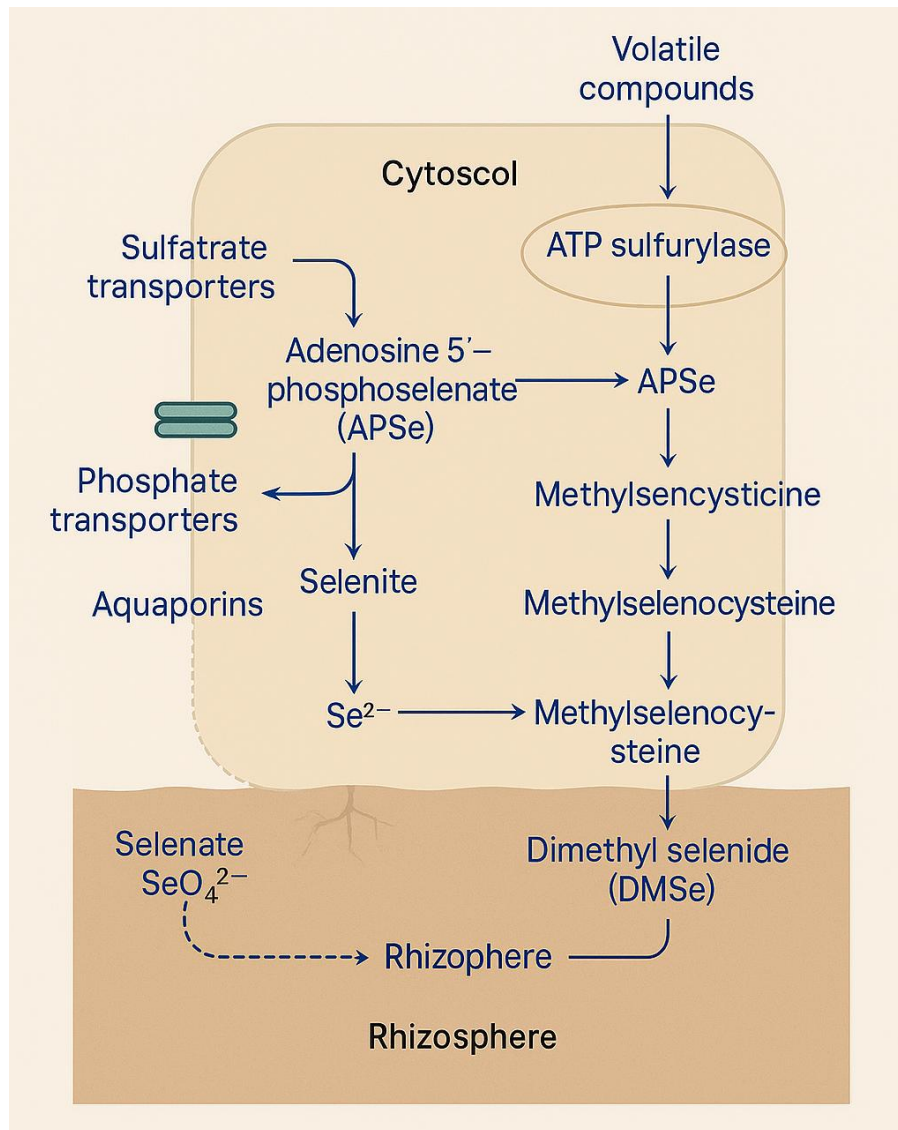


Рис. 1. Метаболизм селена в клетках растений [6, 9–12]
Selenium metabolism in plant cells

В аэробных и щелочных почвах преобладает селенат, который проникает в клетки корневого эпидермиса и корневых волосков через сульфатные транспортеры семейства SULTR, используя протонный градиент, создаваемый H^+ АТ Фазой. После поступления в цитоплазму он активируется АТФ-сульфуриазой с образованием аденозин-5'-фосфоселерата (APSe), который в хлоропластах восстанавливается APS-редуктазой до селенита. Далее селенит подвергается глутатион-зависимому восстановлению до селенида, который включается в аминокислотный обмен с образованием селеноцистеина под действием О-ацетилсерин(тиол)лиазы, а затем может превращаться в селенометионин. Селенит, преобладающий в кислых и восстано-

вительных почвах, усваивается преимущественно через фосфатные транспортеры и аквапорины, а в некоторых случаях может проникать пассивно. В отличие от селената, он в основном задерживается в корнях, где быстро восстанавливается до селенида, минуя стадию APSe, и далее включается в те же аминокислотные пути. Оба пути сходятся на стадии образования селенцистеина и селенометионина, которые могут неспецифически встраиваться в белки, замещая серосодержащие аминокислоты, что при низких концентрациях селена может быть нейтральным или полезным, а при избытке – вызывать токсические эффекты. Для предотвращения токсичности растения метилируют селенцистеин до метилселенцистеина с участием селен-

цистеин-метилтрансферазы, а также преобразуют органические формы в летучие соединения, такие как диметилселенид и диметилдиселенид, которые выделяются в атмосферу через устьица, снижая накопление селена в тканях и защищая клеточные структуры от его избыточного вмешательства в метаболизм [4, 10, 11].

По способности накапливать Se в своих тканях растения можно разделить на неаккумуляторы (содержат менее 100 мг/кг), большинство видов покрытосеменных растений включены в эту категорию, аккумуляторы (содержат 100–1000 мг Se/кг при выращивании на почве, богатой селеном), к таким растениям относят *Brassica juncea*, *Brassica napus*, *Broccoli*, *Helianthus*, *Aster*, *Camelina*, *Medicago sativa* и гипераккумуляторы селена (концентрации Se в тканях в диапазоне 1000–15 000 мг/кг), к таким растениям относят *Stanleya*, *Astragalus*, *Conopsis*, *Neptunia*, *Xylorhiza*. Растения-аккумуляторы Se способны концентрировать Se, активно поглощая его из почвы [21].

Большинство сельскохозяйственных культур имеют значительно более низкую переносимость селена – менее 50 мг/кг сухой массы растительной ткани, однако представители семейства капустных, а также лук, чеснок и некоторые грибы характеризуются высокой концентрацией Se благодаря высокому содержанию соединений серы. Селен по своим свойствам близок к сере и может выполнять аналогичные функции в биохимических системах. Поглощение, транслокация и метаболизм селена аналогичны процессам, характерным для серы, поэтому замена серы селеном приводит к образованию селенсодержащих аналогов соединений, что повышает содержание Se в растениях [22, 23].

Бобовые, особенно чечевица, содержат высокие концентрации селена, однако наибольшее его количество обнаружено в орехах, богатых белком, таких как фисташки, грецкие и бразильские орехи. Во фруктах содержание селена, как правило, низкое, что, вероятно, связано с низким содержанием белка и высоким содержанием воды [24].

Необходимость селена для растений в настоящее время активно изучается. Установлено его участие в реакциях образования хлорофилла, синтеза трикарбоновых кислот, метаболизма длинноцепочечных жирных кислот. Одной из важнейших функций селена в растительном ор-

ганизме считается его способность активизировать антиоксидантную защиту клеток за счет усиления активности ферментов супероксиддисмутазы, каталазы и глутатионпероксидазы, а также стимулирования синтеза неферментных антиоксидантов, таких как аскорбат, флавоноиды, алкалоиды и каротиноиды. В форме селеноцистеина селен входит в состав активных центров Se-зависимой глутатионпероксидазы. Предполагается, что участие селена в регуляции активности компонентов антиоксидантной системы определяет его важную роль в защите растений от стрессовых факторов [15].

Методы биофортификации. Биофортификация культурных растений селеном представляет собой комплекс агрономических, биотехнологических и селекционных приемов, направленных на повышение содержания этого микроэлемента в съедобных частях растений с целью улучшения их пищевой ценности и профилактики селенодефицита у человека и животных. Актуальность данной стратегии обусловлена тем, что значительная часть сельскохозяйственных угодий мира характеризуется низким содержанием биодоступного селена, что напрямую отражается на его концентрации в урожае и, как следствие, в рационе населения [13]. Основным источником селена для человека являются растения, поэтому агрономические и биотехнологические подходы к его накоплению в урожае имеют ключевое значение для здоровья населения [14].

Современные обзоры подчеркивают, что «почва → растение → человек» остается самым безопасным и эффективным каналом обеспечения потребностей в селене, при этом успех вмешательств опирается на управление формами селена в почве, транспортом и метаболизмом в растениях, а также факторами среды, влияющими на переход селена из почвы в урожай [15]. За последние несколько десятилетий были разработаны растения, обогащенные селеном (Se), с целью уменьшения проблем дефицита этого микроэлемента у населения, проживающего в регионах с низким содержанием Se.

Методы биофортификации условно делятся на агрономические, биотехнологические и интегрированные, при этом каждый из них имеет свои преимущества, ограничения и области применения. Агрономические методы основаны на управлении условиями выращивания и при-

менении удобрений, содержащих селен, что позволяет относительно быстро и технологически просто обогащать растения. Биотехнологические подходы связаны с изменением генетических и метаболических характеристик культур для повышения их способности усваивать и накапливать Se, обеспечивая долговременный эффект. Интегрированные и другие методы сочетают элементы агрономии, биотехнологии и экологических технологий, позволяя достигать высокой эффективности при минимизации экологических рисков [24–26].

Агрономические методы. К агрономическим методам биофортификации относят почвенное внесение минеральных или органических форм селена, внекорневую подкормку (лиственное опрыскивание), замачивание семян в растворах Se перед посевом, а также гидропонное и беспочвенное выращивание с контролируемым составом питательного раствора. Эти подходы основаны на прямом управлении доступностью селена для растений и позволяют относительно быстро повышать его содержание в съедобных органах культур [15].

Почвенное внесение Se-удобрений является одним из наиболее распространенных способов обогащения большого количества сельскохозяйственной продукции и повышения содержания селена в почвах с его низким естественным уровнем. Однако для достижения концентраций, сопоставимых с другими методами, требуется внесение значительных доз, что связано с низким коэффициентом усвоения – растения поглощают лишь часть внесенного элемента. Повысить содержание селена в почве можно как за счет внесения минеральных солей (селената или селенита), так и путем добавления в почву растительного материала гипераккумуляторов Se. Показано, что использование обогащенных селеном растений *Stanleya pinnata* дает хорошие результаты при биофортификации моркови и брокколи, совмещая задачи фиторемедиации почв с высоким содержанием Se и их целенаправленного обогащения [13, 15].

Внекорневая подкормка (лиственное опрыскивание) применяется для широкого спектра культур – картофеля, риса, соевых бобов, гречихи, тыквы, чеснока, моркови, брокколи, капусты, редиса, базилика, томатов, персиков, груш и винограда. Эффективность метода зависит от морфологических и химических характеристик

поверхности листьев и плодов, включая наличие волосков, структуру эпикарпия, состав эпикуткулярного воска и наличие восковых пластинок [16–19]. В опытах с *Chicorium intybus* L. внекорневое опрыскивание обеспечивало более высокие концентрации Se в растениях по сравнению с гидропонным выращиванием в питательном растворе с селеном. Этот метод предпочтителен перед почвенным внесением, так как требует меньших доз, не оставляет остаточных эффектов в почве и обеспечивает высокую эффективность при минимальном потреблении солей Se [22].

Замачивание семян в растворах селена пока изучено недостаточно, однако уже показало хорошие результаты для зерновых культур. Несмотря на то, что концентрации Se в таких растениях обычно ниже, чем при использовании почвенного внесения или листовых обработок, метод отличается простотой, низкими затратами и возможностью применения в условиях ограниченных ресурсов [19].

Гидропонное и беспочвенное выращивание с обогащением питательного раствора селеном является высокоэффективным способом получения овощей с повышенным содержанием Se. Исследования на салате, базилике, цикории, шпинате, мангольде и томатах показали, что плавающие системы позволяют точно контролировать концентрацию селена в питательной среде, адаптировать его подачу к фазам роста растений и минимизировать потери соли. В тепличных условиях управляемое дозирование микроконцентраций Se в питательном растворе в сочетании с листовыми микродозами позволяет смещать видовой состав (специацию) соединений селена в растительных тканях в пользу органических форм (SeMet, SeCys, MeSeCys), обладающих более высокой биодоступностью для человека [20].

Важным преимуществом внекорневой подкормки и гидропонных технологий является возможность избежать накопления селена в почве, что особенно актуально, поскольку высокие его уровни могут быть опасны для здоровья человека и снижать урожайность культур, вызывая как явные симптомы токсичности, так и скрытые нарушения.

Садовые культуры, включая овощи и фрукты, составляют значительную часть рациона человека, и для повышения содержания селена

в питании они часто обогащаются этим элементом с использованием различных форм (селенат, селенит, органические соединения) и методов внесения (листовая подкормка, почвенное внесение, гидропонные растворы). Контролируемое культивирование, включая беспочвен-

ные системы и особенно плавающие установки, является удобным инструментом для регулирования доступности микроэлементов и оптимизации их усвоения растениями. Сравнительная характеристика агрономических методов биофортификации представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика агрономических методов биофортификации культурных растений селеном [19, 20, 26, 27]
Comparative characteristics of agronomic methods of biofortification of cultivated plants with selenium

Метод	Формы селена	Преимущества	Недостатки	Примеры культур
Почвенное внесение	Na_2SeO_4 , Na_2SeO_3	Интеграция с NPK, пролонгированность	Фиксация, вымывание, зависимость от pH/Eh	Пшеница, ячмень, кукуруза
Внекорневая подкормка	Na_2SeO_4 , органо-Se, nano-Se	Высокая эффективность передачи в съедобные органы	Погодные риски, кратность обработок	Рис, пшеница, овощи
Фертигация / гидропоника	Na_2SeO_4 (низкие дозы)	Равномерность, точное дозирование	Нужна инфраструктура, контроль токсичности	Овощи, ягоды
Органоминеральные / биоудобрения	Органо-Se, биосинтезированные	Высокая доля органических форм	Стоимость, стандартизация	Овощи, бобовые

Систематические обзоры показывают, что листовые обработки в среднем обеспечивают более высокую эффективность переноса селена в съедобные органы по сравнению с почвенными внесениями, особенно на почвах с высоким потенциалом фиксации селенита. При этом фертигация (внесение удобрений с поливом) и гидропонные системы дают максимальный контроль доз и равномерность распределения элемента в растении, что делает их перспективными для высокоточной биофортификации.

Биотехнологические методы биофортификации. Биотехнологическая биофортификация объединяет молекулярно-генетические методы, микробиологические технологии и управляемые системы культивирования для повышения накопления и безопасной специации селена в съедобных органах растений. В отличие от чисто агрохимических подходов, биотехнологические решения позволяют целенаправленно усиливать транспорт, метаболизм и перераспределение селена, повышая долю органических форм

(SeMet, SeCys, MeSeCys), качество урожая и устойчивость к стрессам при меньших дозах внесения и лучшей экологической управляемости [29, 30].

Базовая предпосылка биотехнологических программ – управление узкими «окнами» доступности селена: в почве биоусвояемы в основном селенат и селенит, тогда как элементарный Se и селениды малодоступны; на это существенно влияют pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), влага, органическое вещество и конкурирующие ионы (S, P). Отсюда следуют ключевые рычаги: редокс-менеджмент, настройка pH, оптимизация питания, стимулирование полезной микробиоты ризосферы и селективное усиление путей поглощения и метаболизма селена у растений [31, 32].

Генетическая модификация и селекция с использованием маркеров нацелены на компоненты серного и фосфатного путей, через которые растение захватывает и метаболизирует селен. Усиление транспортеров сульфата (SULTR) по-

вышает поглощение селената, модификация фосфатных транспортеров (PHT) – утилизацию селенита; на «узком горлышке» серного пути ключевую ролью обладает АТФ-сульфурилаза (активация SeO_4), далее – ферменты восстановления и метилтрансферазы, переводящие SeCys в менее токсичный MeSeCys . В совокупности это увеличивает общий поток Se и долю органических форм в семенах, плодах и листьях, что непосредственно важно для питательной ценности и постуборочной устойчивости [33, 34].

В обзорах подчеркивается, что для злаков предпочтительна направленная селекция/инженерия под SeMet (основная пищевая форма в зерне), тогда как для *Allium/Brassica* – усиление ветви метилирования (MeSeCys), связанной с антиоксидантной активностью и качественными признаками. Технологически это сочетается с «тонкой настройкой» доз селена и фенологических окон, чтобы генетические преимущества реализовались в поле/теплице без токсичности и потерь [34].

Использование ризосферных микроорганизмов для биофортификации селена основывается на их способности трансформировать малоусвояемые неорганические формы в органические, мобилизовать селен из труднорастворимых соединений и тем самым увеличивать его поступление в растение.

Во-первых, бактерии-протективы рода *Bacillus* и *Pseudomonas* вырабатывают редуктазы и сидерофоры, которые восстанавливают Se(VI) и Se(IV) и образуют комплексные органические соединения, доступные для корней. В полевых опытах на пшенице инокуляция штаммом

Bacillus subtilis при почвенном внесении селена увеличила концентрацию общего Se в зерне на 25–30 % по сравнению с контролем, при этом доля SeMet выросла на 15 % [35].

Во-вторых, арбускулярная микориза (*Glomus intraradices*, *Rhizophagus irregularis*) расширяет зону поглощения селена и способствует его транслокации из корней в надземные органы. В опытах на горохе микоризный партнер обеспечил увеличение содержания Se в стеблях на 40 % и в семенах на 22 % при одновременной инокуляции *Pseudomonas fluorescens* [15].

Наконец, консорциумы фосфатмобилизующих бактерий (например *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas putida*) снижают конкуренцию между селенитом и фосфатом за транспортеры PHT, что повышает поглощение SeO_3^{2-} на кислых почвах. В контролируемых условиях для риса такая микробная смесь увеличивала Se(IV) захват в корнях на 35 % и в зерне на 28 % при стандартном поле внесения селена [36].

Таким образом, микробиологические технологии обеспечивают экологичную биофортификацию селена за счет:

- биотрансформации неорганических форм в органические;
- расширения корневой системы и зоны поглощения;
- ослабления конкуренции с другими анионами;
- усиления устойчивости растений к абиотическим и биотическим стрессам.

Сводная характеристика ключевых групп микроорганизмов приведена в таблице 2.

Таблица 2

Микробиологическая биофортификация [37–40] Microbiological biofortification

Группа микроорганизмов	Основные механизмы	Эффекты для растений
<i>Bacillus</i> (PGPR)	Редукция $\text{SeO}_4^{2-}/\text{SeO}_3^{2-}$; синтез сидерофоров	↑Общий Se на 25–30 %; ↑ SeMet на 15 %
<i>Pseudomonas</i> (PGPR)	Выделение органических кислот; снижение токсичных As/Cd	↑Поглощение SeO_4^{2-} на нейтральных почвах на 20 %
Арбускулярная микориза	Расширение поглощающей зоны; редокс-модуляция	↑ Se в стеблях на 40 %; ↑ Se в семенах на 22 %
Фосфатмобилизующие бактерии	Мобилизация P ; конкурентное взаимодействие с SeO_3^{2-}	↑Поглощение SeO_3^{2-} в корнях на 35 %; в зерне на 28 %

Применение беспочвенных систем культивирования и инновационных носителей селена позволяет достичь точного дозирования, непрерывного контроля параметров среды и направленного формирования желаемого видового состава селена в растительных тканях.

В гидропонических и аэропонных системах Se вводят в виде селената натрия или селено-содержащих комплексных удобрений в концентрациях от 1 до 5 мкмоль/л. Четко настроенный pH (5,5–6,5) и Eh раствора минимизируют образование недоступных форм и позволяют управлять переходом Se в органические метаболиты. Например, при выращивании базилика в гидропонном кулере с добавлением 2 мкмоль/л Na_2SeO_4 и аэрозольном орошении *Trichoderma harzianum* содержание SeMet в листьях выросло на 80 % по сравнению с контрольным растением без Se и микробной инокуляции. Плавающие системы (raft hydroponics) продемонстрировали эффективность при культивировании салата: регулирование SeO_4^{2-} в питательном растворе от 1 до 3 мкмоль/л обеспечивало стабильный рост общего Se в листьях на уровне 1,5–2,0 мг/кг свежей массы без признаков фитотоксичности [41, 42].

Наноразмерные формы селена (SeNPs) и органоселеновые конъюгаты активно исследуются как средство повышения эффективности биофортификации при минимальных дозах. Биогенные SeNPs, синтезированные с помощью штамма *Bacillus subtilis*, характеризуются узким распределением частиц (~ 50 нм), высокой реакционной способностью и способностью постепенно высвобождать SeO_4^{2-} в ризосфере. В опытах с томатом добавление SeNPs в питательный субстрат (10 мг/л) обеспечивало рост общего Se в плодах на 75 % и увеличение доли SeMet на 35 % без изменения урожайности [43].

Органо-селеновые удобрения, получаемые с помощью экстракции Se из растений-гипераккумуляторов и последующей комплексной стабилизации с полисахаридами, демонстрируют повышенную стабильность в почвенных и водных средах, меньшие потери при вымывании и равномерное усвоение растениями [44].

Сравнительный анализ эффективности, перспектив и ограничений. Сравнительная оценка различных методов биофортификации растений селеном демонстрирует, что выбор оптимальной стратегии определяется сочета-

нием агрономических, биохимических, экономических и экологических факторов. Агрохимические подходы, включающие почвенное внесение и внекорневые подкормки, характеризуются технологической простотой и высокой воспроизводимостью результатов. Почвенное внесение селенатов эффективно на нейтральных и щелочных почвах, обеспечивая коэффициент усвоения (soil-to-plant transfer factor, STPTF) до 0,6–0,7, однако на кислых и восстановительных субстратах значительная часть селена фиксируется в трудноусвояемых формах, что требует увеличения доз и повышает риск вымывания в грунтовые воды. Внекорневые подкормки позволяют миновать почвенные барьеры и достичь быстрого накопления селена в надземных органах (STPTF 0,6–0,8), при этом доля органических форм в урожае превышает 50 %. Ограничениями остаются кратковременность эффекта и зависимость от погодных условий [45–47].

Биологические методы, основанные на использовании ризосферных микроорганизмов и гипераккумуляторов, обеспечивают более медленное, но устойчивое повышение содержания селена, сопровождающееся ростом доли органических форм до 85 % и улучшением физиологического состояния растений. Эффективность таких подходов варьирует в зависимости от состава почвенной микробиоты и климатических факторов, что требует адаптации консорциумов к локальным условиям. Генетические и селекционные подходы позволяют формировать сорта с повышенной способностью к накоплению селена в форме SeMet или MeSeCys, обеспечивая долговременный эффект без необходимости регулярного внесения высоких доз удобрений, однако длительность селекционного цикла, высокие затраты и регуляторные ограничения сдерживают их широкое внедрение [48].

Управляемые системы культивирования, такие как гидропоника, аэропоника и плавающие установки, обеспечивают высокий уровень контроля над дозированием и формой селена, позволяя достигать STPTF 0,9 при минимальных дозах и высокой равномерности распределения элемента в растении. Эти технологии особенно эффективны для культур с коротким вегетационным периодом и высокой добавленной стоимостью, однако их масштабирование в открытом грунте ограничено высокими капитальными затратами и необходимостью постоянного тех-

нического обслуживания. Применение наноматериалов и органоселеновых носителей открывает перспективы пролонгированного и адресного высвобождения селена, что позволяет снижать дозы на 30–50 % при сохранении или

увеличении накопления элемента в урожае, но недостаточная изученность долгосрочных экологических последствий и необходимость стандартизации ограничивают их широкое использование [49–50].

Таблица 3

**Сравнение методов биофортификации селена [45–50]
Comparison of selenium biofortification methods**

Метод	Коэффициент усвоения	Доля органического селена в урожае (%)	Влияние на урожайность	Перспективы
Почвенное внесение	0,2–0,7	40–60	+5–10 % при оптимальных дозах	Пролонгированные формы, интеграция с биоудобрениями
Внекорневая подкормка	0,6–0,8	50–70	+5–15 %	Использование наноразмерных форм
Фертигация / гидропоника	0,7–0,9	60–80	+10–20 %	Автоматизация
Микробиологическая инокуляция	+0,2–0,4 к базовому	60–85	+5–12 %	ГМ штаммы, устойчивые консорциумы
Генетика / селекция	0,5–0,8	70–90	+10–15 %	CRISPR/Cas, ускоренная селекция
Наноматериалы / органический Se	0,6–0,85	65–90	+8–15 %	Биоразлагаемые носители, «умные» системы доставки

Сопоставление этих данных позволяет заключить, что наибольший потенциал имеют интегрированные схемы, сочетающие агрохимические и биологические приемы с элементами управляемых технологий и инновационных носителей. Такой подход позволяет компенсировать слабые стороны отдельных методов, повысить стабильность результата и обеспечить баланс между эффективностью, безопасностью и экономической целесообразностью. Перспективы развития связаны с внедрением систем точного земледелия, автоматизированного мониторинга спекциации селена в растениях, использованием биоразлагаемых наноматериалов и созданием сортов с генетически закрепленной способностью к накоплению биодоступных форм элемента.

Заключение. Сравнительный анализ методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном показал, что:

1. Почвенное внесение обеспечивает коэффициент усвоения селена (STPTF) на уровне 0,2–0,7 и долю органических форм в урожае 40–60 %. Метод технологически прост и пригоден для масштабного применения, однако чувстви-

телен к кислотности и окислительно-восстановительным свойствам почвы, что ограничивает эффективность на кислых и восстановительных субстратах.

2. Внекорневые подкормки и гидропонные системы позволяют обойти почвенные барьеры: при листовых обработках STPTF достигает 0,6–0,8, а в гидропонике – 0,7–0,9 при доле органического селена 60–80 %. Эти подходы обеспечивают более быстрый и управляемый перенос селена в съедобные органы, но требуют точного контроля доз и условий среды.

3. Микробиологическая инокуляция и использование гипераккумуляторов способствуют росту доли органических форм селена до 70–85 % и повышают устойчивость растений к стрессам, при этом прирост общего Se в урожае по сравнению с базовым уровнем составляет в среднем 0,2–0,4 единицы STPTF. Ограничением является необходимость подбора штаммов и консорциумов с учетом местных почвенно-климатических условий.

4. Генетические и селекционные подходы формируют сорта с повышенной способностью к накоплению селена преимущественно в форме SeMet или MeSeCys при STPTF 0,5–0,8 и доле органических форм 70–90 %. Эти технологии обеспечивают долговременный эффект, но связаны с высокой стоимостью, длительными циклами разработки и регуляторными ограничениями.

5. Инновационные носители селена (наноразмерные частицы, органоселеновые удобрения) позволяют снизить дозы внесения на 30–50 % при сохранении или увеличении накопления элемента в урожае, однако требуют дальнейшей оценки долгосрочной экологической безопасности.

Полученные данные свидетельствуют, что наибольший практический потенциал имеют интегрированные схемы, сочетающие агрохимические приемы (почвенное внесение и листовые обработки) с микробиологической инокуля-

цией и элементами управляемых технологий (гидропоника, фертигация, контролируемое дозирование Se). Такие комбинированные стратегии позволяют одновременно:

– повысить коэффициент усвоения селена до 0,8–0,9;

– увеличить долю органических форм в урожае до 80–90 %;

– минимизировать риски токсичности и потерь элемента из агроэкосистем.

В перспективе ключевыми направлениями развития селеновой биофортификации являются: внедрение систем точного земледелия для дифференцированного внесения селена, разработка сортов с генетически закрепленной способностью к накоплению биодоступных форм элемента и создание биоразлагаемых «умных» носителей, обеспечивающих адресное и пролонгированное высвобождение селена в ризосфере.

Список источников

1. Тутельян В.А., Княжев В.А., Хотимченко С.А., и др. Селен в организме человека: метаболизм, антиоксидантные свойства, роль в канцерогенезе. М.: Изд-во РАМН, 2002. 219 с.
2. Кригер П.О., Мохова Е.В. Биологическая роль селена в питании сельскохозяйственных животных и птицы. В сб.: XIX Международная научно-практическая студенческая конференция «Химия и жизнь». Новосибирск, 14 мая 2020 г. Новосибирск, 2020 С. 58–62.
3. Hossain A., Skalicky M., Brestic M., et al. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects // *Molecules*. 2021. Vol. 26, N 4. Art. 881. DOI: 10.3390/molecules26040881.
4. Евстафьева Е.В., Голубкина Н.А., Бояринцева Ю.А., и др. Обеспеченность селеном городских жителей на территории Крымского полуострова // *Гигиена и санитария*. 2021. Т. 100, № 2. С. 147–153.
5. Buturi C.V., Mauro R., Fogliano V., et al. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet // *Foods*. 2021. Vol. 10, N 2. Art. 223. DOI: 10.3390/foods10020223.
6. Gupta M., Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants // *Frontiers in plant science*. 2017. Vol. 7. Art. 2074. DOI: 10.3389/fpls.2016.02074.
7. Pan Z., Feng Ya., Wang M., et al. Geochemical characteristics of soil selenium and evaluation of selenium-rich land resources in Guiyang area // *Frontiers in Geochemistry*. 2023. Vol. 1. Art. 1094023.
8. Zhao X., Lu Y., Dai L., et al. Selenium spatial distribution and bioavailability of soil-plant systems in China: A comprehensive review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2024. Vol. 46, N 9. Art. 341.
9. Winkel L., Vriens B., Jones G., et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: a critical review // *Nutrients*. 2015. Vol. 7, N 6. P. 4199–4239.
10. Zhou Y., Nie K., Geng L., et al. Selenium's role in plant secondary metabolism: regulation and mechanistic insights // *Agronomy*. 2024. Vol. 15, N 1. Art. 54.
11. Jiang H., Lin W., Jiao H., et al. Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: A review // *Metallomics*. 2021. Vol. 13, N 7. DOI: 10.1093/mtomcs/mfab040.
12. Trippe R.C., Pilon-Smits E.A.H. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 404. С. 124178. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124178.

13. Newman R., Waterland N., Moon Y., et al. Selenium biofortification of agricultural crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention – a review // *Plant Foods for Human Nutrition*. 2019. Т. 74, № 4. С. 449–460. DOI: 10.1007/s11130-019-00769-z.
14. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Особенности содержания селена в системе почва-растение (обзор) // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 11. С. 98–105.
15. Zhou X., Yang J., Kronzucker H.J., et al. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. Art. 586421. DOI: 10.3389/fpls.2020.586421.
16. Голубкина Н.А., Заячковский В.А. Сравнительная оценка эффективности защиты *Raphanus sativus* var. lobo от крестоцветной галлицы (*Contarinia nasturtii*), используя внекорневое внесение селената натрия, ионной формы кремния и экстракта чеснока // *Овощи России*. 2024. № 4. С. 23–27.
17. Бакаева Н.П., Салтыкова О.Л. Антистрессовое воздействие органоминеральных удобрений в агротехнологии озимой пшеницы // *Вестник КрасГАУ*. 2020. № 4. С. 65–72.
18. Воронин С.П., Гуменюк А.П., Дубгорина Е.О., Тугарова А.В., Евсеева Н.В., Ярошенко Т.М., Еськов И.Д., Денисов К.Е., Рязанцев Н.В. Органоминеральное удобрение и способы его применения для сельскохозяйственных культур. Патент РФ на изобретение № 2757604 С1. 2021. Бюл. № 17. 14 с.
19. Liao Q., Xing Y., Li A-M., et al. Enhancing selenium biofortification: strategies for improving soil-to-plant transfer // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024. Vol. 11, N 1. Art. 148. DOI: 10.1186/s40538-024-00672-z.
20. Danso O.P., Asante-Badu B., Zhang Z., et al. Selenium biofortification: Strategies, progress and challenges // *Agriculture*. 2023. Vol. 13, N 2. Art. 416. DOI: 10.3390/agriculture13020416.
21. Перфильева А.И. Селеносодержащие наноструктуры: синтез, свойства, агрохимические аспекты применения // *Российские нанотехнологии*. 2022. Т. 17, № 2. С. 185–195.
22. Puccinelli M., Malorgio F., Pezzarossa B. Selenium enrichment of horticultural crops // *Molecules*. 2017. Vol. 22, N 6. Art. 933. DOI: 10.3390/molecules22060933.
23. Пономарева С.М., Семенова Л.И., Протункевич И.В. Исследование содержания селена в отечественных пищевых продуктах // *Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд*. 2020. № 13. С. 183–193.
24. Антошкина М.С., Голубкина Н.А., Бондарева Л.Л. Влияние внекорневого обогащения капусты цветной селенатом натрия на урожайность, пищевую ценность и антиоксидантный статус растений // *Овощи России*. 2020. № 3. С. 63–68.
25. Шмыкова Н.А., Супрунова Т.П., Пивоваров В.Ф. Биотехнологические и молекулярно-генетические методы в селекции овощных культур (к 95-летию ВНИИССОК) // *Сельскохозяйственная биология*. 2015. № 5. С. 561–570.
26. Удинцев С.Н., Жилиякова Т.П. Современные методы повышения пищевой ценности сельскохозяйственной продукции // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2012. № 2. С. 81–91.
27. Guo Q., Ye J., Zeng J., et al. Selenium species transforming along soil–plant continuum and their beneficial roles for horticultural crops // *Horticulture research*. 2023. Vol. 10, N 2. Art. uhac270. DOI: 10.1093/hr/uhac270.
28. Shangguan Y., Zhu J., Ye J., et al. Selenium Phytofortification: Enhanced Stress Resistance and Nutraceutical Enrichment in Horticultural Crops // *Horticulture Research*. 2025. Vol. 12, N 12. Art. 236. DOI: 10.1093/hr/uhaf236.
29. Tangjaidee P., Swedlund P., Xiang J., et al. Selenium-enriched plant foods: Selenium accumulation, speciation, and health functionality // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 9. Art. 962312. DOI: 10.3389/fnut.2022.962312.
30. Oancea A.O., Gaspar A., Seciu A-M., et al. Development of a new technology for protective biofortification with selenium of Brassica crops // *AgroLife Scientific Journal*. 2015. Vol. 4, N 2.
31. Schiavon M., Nardi S., Vecchia D., et al. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition // *Plant and soil*. 2020. Vol. 453, N 1. P. 245–270. DOI: 10.1007/s11104-020-04635-9.

32. Deng G., Fan Zh., Wang Zh., et al. Dynamic role of selenium in soil–plant-microbe systems: Mechanisms, biofortification, and environmental remediation // *Plant and Soil*. 2025. Vol. 515. P. 1085-1105. DOI: 10.1007/s11104-025-07661-7.
33. Пивоваров В.Ф., Солдатенко И.В., Пышная О.Н., и др. Современные тенденции развития селекции овощных и бахчевых культур // *Овощи России*. 2022. № 3. С. 5–15. DOI: 10.18619/2072-9146-2022-3-5-15.
34. Huang J., Chen Y., Lang D., et al. Research progress on novel selenium biofortification technologies in agricultural soil-plant systems // *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*. 2025. Vol. 31, N 9. P. 1848–1861. DOI: 10.11674/zwf.2024544.
35. Li L., Liu Q.H., Yin C.Y. Selenium biofortification in plants and application potential of microorganisms in selenium biofortification // *Chinese Journal of Plant Ecology*. 2023. Vol. 47, N 6. Art. 756.
36. Khakimova L.R., Vershinina Z.R., Mslennikova D.R., et al. Effects of *Pseudomonas* sp. OBA 2.4. 1 on Growth and Tolerance to Cadmium Stress in *Pisum sativum* L // *BioTech*. 2023. Vol. 12, N 1. Art. 5. DOI: 10.3390/biotech12010005.
37. Abadin Z.U., Faisal M. Selenium resistant bacilli and pseudomonas as potential candidate for selenium and iron biofortification in maize plants // *BioScientific Review*. 2022. Vol. 4, N 1. P. 43–58.
38. Chen X., Zhang Z., Gu M., et al. Combined use of arbuscular mycorrhizal fungus and selenium fertilizer shapes microbial community structure and enhances organic selenium accumulation in rice grain // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 748. Art. 141166. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141166.
39. Kuzmina L.Y., Gilvanova E., Galimzyanova N.F., et al. Characterization of the novel plant growth-stimulating strain *Advenella kashmirensis* IB-K1 and evaluation of its efficiency in saline soil // *Microbiology*. 2022. Vol. 91, N 2. P. 173–183. DOI: 10.1134/S0026261722020072.
40. Puccinelli M., Molorgio F., Incrocci L., et al. Effects of individual and simultaneous selenium and iodine biofortification of baby-leaf lettuce plants grown in two different hydroponic systems // *Horticulturae*. 2021. Vol. 7, N 12. Art. 590. DOI: 10.3390/horticulturae7120590.
41. Голубкина Н.А., Середин Т.А., Баранова Е.В., и др. Перспективы получения проростков семян луковых культур, обогащенных селеном // *Овощи России*. 2018. № 6. С. 50–54. DOI: 10.18619/2072-9146-2018-6-50-54.
42. Ullah A., Yin X., Wang F., et al. Biosynthesis of selenium nanoparticles (via *Bacillus subtilis* BSN313), and their isolation, characterization, and bioactivities // *Molecules*. 2021. Vol. 26, N 18. Art. 5559. DOI: 10.3390/molecules26185559.
43. Li J., Gurijala H., Wu L., et al. Hyperaccumulator plants from China: a synthesis of the current state of knowledge // *Environmental science & technology*. 2018. Vol. 52, N 21. P. 11980–11994. DOI: 10.1021/acs.est.8b01060.
44. Синдирева А.В., Голубкина Н.А., Эрдэнэцогт Э. Комплексный подход к оценке действия селена в системе почва-растение. Омск: Издательский центр КАН, 2022. 28 с.
45. Zhang M., Xing G., Tang Sh., et al. Improving soil selenium availability as a strategy to promote selenium uptake by high-Se rice cultivar // *Environmental and Experimental Botany*. 2029. Vol. 163. P. 45–54. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.04.008.
46. Tsioubri M., Gasparatos D., Economou-Eliopoulos M. Selenium uptake by Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) as affected by the application of sodium selenate, soil acidity and organic matter content // *Plants*. 2020. Vol. 9, N 5. Art. 605.
47. Shiryaev A., Pezzarossa B., Rosellini I., et al. Efficacy and comparison of different strategies for selenium biofortification of tomatoes // *Horticulturae*. 2022. Vol 8, N 9. Art. 800. DOI: 10.3390/horticulturae8090800.
48. Sabatino L., Ntatsi G., Lapichino G., et al. Effect of selenium enrichment and type of application on yield, functional quality and mineral composition of curly endive grown in a hydroponic system // *Agronomy*. 2019. Vol. 9, N 4. Art. 207. DOI: 10.3390/agronomy9040207.
49. Puccinelli M., Malorgio F., Maggini R., et al. Biofortification of *Ocimum basilicum* L. plants with selenium. In: III International Symposium on Horticulture in Europe-SHE2016. 2016. P. 663–670. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1242.98.
50. Амагова З.А., Голубкина Н.А. Эффективность использования селената натрия при выращивании томата в условиях оксидантного стресса // *Овощи России*. 2018. № 1. С. 79–81.

References

1. Tutelyan VA, Knyazhev VA, Khotimchenko SA, et al. *Selen v organizme cheloveka: metabolizm, antioksidantnye svoystva, rol' v kancerogeneze*. Moscow: Izd-vo RAMN; 2002. 219 p. (In Russ.).
2. Kriger PO, Mohova EV. Biologicheskaya rol' selena v pitanii sel'skoxozyajstvennyh zhivotnyh i pticy. In.: *XIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya studencheskaya konferenciya «Himiya i zhizn'»*. Novosibirsk, 14 May 2020. 2020:58-62. (In Russ.).
3. Hossain A, Skalicky M, Brestic M, et al. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects. *Molecules*. 2021;26(4):881. DOI: 10.3390/molecules26040881.
4. Evstaf'eva EV, Golubkina NA, Boyarinceva YuA, et al. Obespechennost' selenom gorodskih zhitelej na territorii Krymskogo poluostrova. *Gigiena i sanitariya*. 2021;100(2):147-153. (In Russ.).
5. Buturi CV, Mauro R, Fogliano V, et al. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods*. 2021;10(2):223. DOI: 10.3390/foods10020223.
6. Gupta M, Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontiers in plant science*. 2017;7:2074. DOI: 10.3389/fpls.2016.02074.
7. Pan Z, Feng Ya, Wang M, et al. Geochemical characteristics of soil selenium and evaluation of selenium-rich land resources in Guiyang area. *Frontiers in Geochemistry*. 2023;1:1094023. DOI: 10.3389/fgeoc.2023.1094023.
8. Zhao X, Lu Y, Dai L, et al. Selenium spatial distribution and bioavailability of soil-plant systems in China: A comprehensive review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2024;46(9):341. DOI: 10.1007/s10653-024-02126-9.
9. Winkel L, Vriens B, Jones G, et al. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: a critical review. *Nutrients*. 2015;7(6):4199-4239. DOI: 10.3390/nu7064199.
10. Zhou Y, Nie K, Geng L, et al. Selenium's role in plant secondary metabolism: regulation and mechanistic insights. *Agronomy*. 2024;15(1):54. DOI: 10.3390/agronomy15010054.
11. Jiang H., Lin W., Jiao H., et al. Uptake, transport, and metabolism of selenium and its protective effects against toxic metals in plants: A review. *Metallomics*. 2021;13(7). DOI: 10.1093/mtomcs/mfab040.
12. Trippe III RC, Pilon-Smits EAH. Selenium transport and metabolism in plants: Phytoremediation and biofortification implications. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;404:124178. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124178.
13. Newman R, Waterland N, Moon Y, et al. Selenium biofortification of agricultural crops and effects on plant nutrients and bioactive compounds important for human health and disease prevention—a review. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2019;74(4):449-460. DOI: 10.1007/s11130-019-00769-z.
14. Pobilat AE, Voloshin EI. Osobennosti soderzhaniya selena v sisteme pochva-rastenie (obzor). *Bulletin of KSAU*. 2020;11:98-105. (In Russ.).
15. Zhou X, Yang J, Kronzucker HJ, et al. Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: a review. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:586421. DOI: 10.3389/fpls.2020.586421.
16. Golubkina NA, Zayachkovsky VA. Sravnitel'naya ocenka effektivnosti zashchity *Raphanus sativus* var. lobo ot krestocvetnoj gallicy (*Contarinia nasturtii*), ispol'zuya vnekornevoe vnesenie selenata natriya, ionnoj formy kremniya i ekstrakta chesnoka. *Ovoshchi Rossii*. 2024;(4):23-27. (In Russ.).
17. Bakaeva NP, Saltykova OL. Antistressovoe vozdejstvie organomineral'nyh udobrenij v agrotehnologii ozimoj pshenicy. *Bulletin of KSAU*. 2020;4:65-72. (In Russ.).
18. Voronin SP, Gumenyuk AP, Dubgorina EO, Tugarova AV, Evseeva NV, Yaroshenko TM., Es'kov ID, Denisov KE, Ryazancev NV. Organomineral'noe udobrenie i sposoby ego primeneniya dlya sel'skoxozyajstvennyh kul'tur. Patent RUS N2757604.2021. Byul. N 17. (In Russ.).
19. Liao Q, Xing Y, Li A-M, et al. Enhancing selenium biofortification: strategies for improving soil-to-plant transfer. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024;11(1):148. DOI: /10.1186/s40538-024-00672-z.
20. Danso OP, Asante-Badu B, Zhang Z, et al. Selenium biofortification: Strategies, progress and challenges. *Agriculture*. 2023;13(2):416. DOI: 10.3390/agriculture13020416.
21. Perfil'eva AI. Selensoderzhashchie nanostruktury: sintez, svoystva, agrohimicheskie aspekty primeneniya. *Rossijskie nanotekhnologii*. 2022;17(2):185-195. (In Russ.).

22. Puccinelli M, Malorgio F, Pezzarossa B. Selenium enrichment of horticultural crops. *Molecules*. 2017;22(6):933. DOI: 10.3390/molecules22060933.
23. Ponomareva SM, Semenova LI, Protunkevich IV. Issledovanie sodержaniya selena v otechestvennykh pishchevykh produktah. *Innovacionnye tekhnologii proizvodstva i hraneniya material'nyh cennostej dlya gosudarstvennykh nuzhd*. 2020;(13):183-193. (In Russ.).
24. Antoshkina MS, Golubkina NA, Bondareva LL. Vliyaniye vnekornevogo obogashcheniya kapusty cvetnoy selenatom natriya na urozhajnost', pishchevuyu cennost' i antioksidantnyj status rastenij. *Ovoshchi Rossii*. 2020;(3):63-68. (In Russ.).
25. Shmykova NA, Suprunova TP, Pivovarov VF. Biotekhnologicheskie i molekulyarno-geneticheskie metody v selekcii ovoshchnykh kul'tur (k 95-letiyu VNISSOK). *Sel'skohozyajstvennaya biologiya*. 2015;(5):561-570. (In Russ.).
26. Udincev SN, Zhilyakova TP. Sovremennyye metody povysheniya pishchevoj cennosti sel'skohozyajstvennoy produkcii. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. Biologiya. 2012;2:81-91. (In Russ.).
27. Guo Q, Ye J, Zeng J, et al. Selenium species transforming along soil–plant continuum and their beneficial roles for horticultural crops. *Horticulture research*. 2023;10(2):uhac270. DOI: 10.1093/hr/uhac270.
28. Shangguan Y, Zhu J, Ye J, et al. Phytofortification: Enhanced Stress Resistance and Nutraceutical Enrichment in Horticultural Crops. *Horticulture Research*. 2025;12(12):236. DOI: 10.1093/hr/uhaf236.
29. Tangjaidee P, Swedlund P, Xiang J, et al. Selenium-enriched plant foods: Selenium accumulation, speciation, and health functionality. *Frontiers in Nutrition*. 2023;9:962312. DOI: 10.3389/fnut.2022.962312
30. Oancea AO, Gaspar A, Seciu A-M, et al. Development of a new technology for protective biofortification with selenium of Brassica crops. *AgroLife Scientific Journal*. 2015;4(2).
31. Schiavon M, Nardi S, Vecchia D, et al. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and soil*. 2020;453(1):245-270. DOI: 10.1007/s11104-020-04635-9.
32. Deng G, Fan Zh, Wang Zh, et al. Dynamic role of selenium in soil–plant–microbe systems: Mechanisms, biofortification, and environmental remediation. *Plant and Soil*. 2025:1-21. DOI: 10.1007/s11104-025-07661-7.
33. Pivovarov VF, Soldatenko IV, Pyshnaya ON, et al. Sovremennyye tendencii razvitiya selekcii ovoshchnykh i bahchevykh kul'tur. *Ovoshchi Rossii*. 2022;(3):5-15. (In Russ.).
34. Huang J, Chen Y, Lang D, et al. Research progress on novel selenium biofortification technologies in agricultural soil–plant systems. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*. 2025. DOI: 10.11674/zwyf.2024544.
35. Li L, Liu QH, Yin CY. Selenium biofortification in plants and application potential of microorganisms in selenium biofortification. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 2023;47(6):756. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0163
36. Khakimova L, Vershinina ZR, Mslennikova DR, et al. Effects of *Pseudomonas* sp. OBA 2.4. 1 on Growth and Tolerance to Cadmium Stress in *Pisum sativum* L. *BioTech*. 2023;12(1):5. DOI: 10.3390/biotech12010005.
37. Abadin ZU, Faisal M. Selenium resistant bacilli and pseudomonas as potential candidate for selenium and iron biofortification in maize plants. *BioScientific Review*. 2022;4(1):43-58. DOI: 10.32350/BSR.0401.03.
38. Chen X, Zhang Z, Gu M, et al. Combined use of arbuscular mycorrhizal fungus and selenium fertilizer shapes microbial community structure and enhances organic selenium accumulation in rice grain. *Science of the Total Environment*. 2020;748:141166. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141166.
39. Kuzmina LY, Gilvanova E, Galimzyanova NF, et al. Characterization of the novel plant growth-stimulating strain *Advenella kashmirensis* IB-K1 and evaluation of its efficiency in saline soil. *Microbiology*. 2022;91(2):173-183. DOI: 10.1134/S0026261722020072.
40. Puccinelli M, Molorgio F, Incrocci L, et al. Effects of individual and simultaneous selenium and iodine biofortification of baby-leaf lettuce plants grown in two different hydroponic systems. *Horticulturae*. 2021;7(12):590. DOI: 10.3390/horticulturae7120590.
41. Golubkina NA, Seredin TA, Baranova EV, et al. Perspektivy polucheniya prorostkov semyan lukovykh kul'tur, obogashchennykh selenom. *Ovoshchi Rossii*. 2018;(6):50-54. (In Russ.). DOI: 10.18619/2072-9146-2018-6-50-54.

42. Ullah A, Yin X, Wang F, et al. Biosynthesis of selenium nanoparticles (via *Bacillus subtilis* BSN313), and their isolation, characterization, and bioactivities. *Molecules*. 2021;26(18):5559. DOI: 10.3390/molecules26185559.
43. Li J, Gurijala H, Wu L, et al. Hyperaccumulator plants from China: a synthesis of the current state of knowledge. *Environmental science & technology*. 2018;52(21):11980-11994. DOI: 10.1021/acs.est.8b01060.
44. Sindireva AV, Golubkina NA, Erdenedogot E. *Kompleksnyj podhod k ocenke dejstviya selena v sisteme pochva-rastenie*. Omsk: Publishing center KAN; 2022. 28 p. (In Russ.).
45. Zhang M, Xing G, Tang Sh, et al. Improving soil selenium availability as a strategy to promote selenium uptake by high-Se rice cultivar. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;163:45-54. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.04.008
46. Tsioubri M, Gasparatos D, Economou-Eliopoulos M. Selenium uptake by Lettuce (*Lactuca sativa* L.) and Berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) as affected by the application of sodium selenate, soil acidity and organic matter content. *Plants*. 2020;9(5):605. DOI: 10.3390/plants9050605.
47. Shiriaev A, Pezzarossa B, Rosellini I, et al. Efficacy and comparison of different strategies for selenium biofortification of tomatoes. *Horticulturae*. 2022;8(9):800. DOI: 10.3390/horticulturae8090800.
48. Sabatino L, Ntatsi G, Lapichino G, et al. Effect of selenium enrichment and type of application on yield, functional quality and mineral composition of curly endive grown in a hydroponic system. *Agronomy*. 2019;9(4):207. DOI: 10.3390/agronomy9040207.
49. Puccinelli M, Malorgio F, Maggini R, et al. Biofortification of *Ocimum basilicum* L. plants with selenium. In: *III International Symposium on Horticulture in Europe-SHE2016*. 2016:663-670. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1242.98.
50. Amagova ZA, Golubkina NA. Effektivnost' ispol'zovaniya selenata natriya pri vyrashchivanii tomata v usloviyah oksidantnogo stressa. *Ovoshchi Rossii*. 2018;(1):79-81. (In Russ.).

Статья принята к публикации 13.01.2026 / The article accepted for publication 13.01.2026

Информация об авторах:

Александр Сергеевич Жигайлов, ассистент кафедры бионанотехнологии

Елена Александровна Вечтомова, профессор кафедры технологии продуктов питания из растительного сырья, доктор технических наук

Дмитрий Михайлович Руссаков, младший научный сотрудник лаборатории углеродных наноматериалов

Владимир Петрович Юстратов, профессор кафедры общей и неорганической химии, доктор химических наук, профессор

Information about the authors:

Alexander Sergeevich Zhigaylov, Assistant at the Department of Bionanotechnology

Elena Aleksandrovna Vechtomova, Professor at the Department of Technology of Food Products from Plant Raw Materials, Doctor of Technical Sciences

Dmitry Mikhailovich Russakov, Junior Researcher at the Laboratory of Carbon Nanomaterials

Vladimir Petrovich Yustratov, Professor at the Department of General and Inorganic Chemistry, Doctor of Chemical Sciences, Professor

