

## Дефицит селена в почвах и способы его коррекции

© 2026. Н. В. Сырчина<sup>1</sup>, к. х. н., с. н. с., Л. В. Пилип<sup>2</sup>, к. в. н., доцент,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,3</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,  
Д. В. Демидов<sup>4</sup>, к. т. н., начальник Центра инноваций,  
Дирекция по маркетингу и развитию,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
<sup>2</sup>Вятский государственный агротехнологический университет,  
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,  
<sup>3</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
<sup>4</sup>Группа «ФОСАГРО» ОП АО «Апатит»,  
119333, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 55/1, стр. 1,  
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip\_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Специфическими особенностями микроэлемента (МЭ) Se являются чрезвычайно низкие физиологические нормы потребления и узкий интервал между дефицитом и токсичностью. Недостаток селена в организме приводит к нарушению здоровья и сокращению продолжительности жизни. Основным источником Se для растений является почва, далее этот элемент передаётся по пищевым цепям. Концентрация Se в почвах обычно варьирует в пределах от 0,01 до 2,0 мг/кг при среднем глобальном значении 0,4 мг/кг. Большинство почв сельскохозяйственного назначения характеризуются выраженным дефицитом Se. Обогащение почв этим МЭ позволяет не только повысить содержание Se в сельскохозяйственной продукции, но и увеличить продуктивность агроценозов, снизить патогенную нагрузку на растения, повысить их стрессоустойчивость. Для обогащения почв могут найти применение Se-содержащие удобрения. Наиболее безопасными считаются удобрения, содержащие Se в виде органических соединений или биоформ, однако производство таких удобрений сопряжено с относительно высокими затратами. Чаще всего в качестве источника Se для растений применяют селенат натрия, его недостатком является высокая токсичность, ограничивающая возможность использования в сельском хозяйстве. Более безопасными считаются обогащённые Se комплексные удобрения. Производство и вывод на рынок доступных и эффективных Se-удобрений имеют большое социальное значение, однако технологические аспекты производства таких удобрений в научных публикациях не нашли должного отражения. Вопросы, касающиеся оптимальных норм внесения Se в почвы, до настоящего времени также не получили однозначного решения. В разных публикациях приводятся данные о достижении положительного эффекта при внесении от 4 до 200 г Se на га под одну и ту же культуру. Дискуссионными являются вопросы, касающиеся оценки экологических рисков от масштабного использования Se-удобрений, однако в ряде публикаций приводятся сведения о том, что Se, благодаря образованию летучих соединений, не аккумулируется почвами и практически не мигрирует в подземные воды.

**Ключевые слова:** селен, микроэлементы, почвы, удобрения, биодоступность селена.

## Selenium deficiency in soils and methods for its correction

© 2026. N. V. Syrchina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760, L. V. Pilip<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9695-7146,  
T. Ya. Ashikhmina<sup>1,3</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047, D. V. Demidov<sup>4</sup> ORCID: 0009-0002-0971-9110,  
<sup>1</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>2</sup>Vyatka State Agrotechnological University,  
133, Oktyabrskiy Ave., Kirov, Russia, 610017,  
<sup>3</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
<sup>4</sup>PHOSAGRO GROUP, Company Apatit,  
55/1, Bldg. 1, Leninskiy Ave., Moscow, Russia, 119333,  
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip\_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Micronutrient Se is characterized by extremely low physiological requirements and a narrow threshold between deficiency and toxicity. Selenium deficiency leads to poor health and shortened lifespan. Soil is the primary source of Se for plants, and this element is then passed along the food chain. Most agricultural soils are characterized by a significant Se deficiency. Enriching soils with this micronutrient not only increases Se-content in agricultural products but also enhances the productivity of agrocenoses, reduces pathogen load on plants, and improves their stress resistance. Se-containing fertilizers can be used to enrich soils. Fertilizers containing Se in organic form or bioform are considered the safest, however, the production of such fertilizers is relatively expensive. Sodium selenate is most often used as a source of Se for plants. High toxicity is its disadvantage limiting its use in agriculture. Commercial forms of combined fertilizers enriched with Se are considered safer. The production and marketing of affordable and effective Se fertilizers is of great social importance. However, the technological aspects of their production have not been adequately addressed in scientific publications. Questions regarding optimal Se application rates to soils have not yet received an acceptable answer. Various publications report positive effects with Se applications ranging from 4 to 200 g/ha for the same crop. Assessing the environmental risks of large-scale Se-fertilizer use is controversial. However, there is evidence that due to volatile compounds formed, Se does not accumulate in soils and virtually does not migrate into groundwater.

**Keywords:** selenium, micronutrients, soils, fertilizers, selenium bioavailability.

Селен входит в число микроэлементов (МЭ), играющих важную роль в поддержании метаболического, иммунного, эндокринного и клеточного гомеостаза. Это единственный обнаруженный в белках МЭ, который генетически закодирован в форме 21-й нестандартной аминокислоты (АК) селеноцистеина (SeCys), образующей активные центры белков селенопротеинов [1, 2]. Основной пищевой формой Se, обеспечивающей потребность человека в этом МЭ, считается биологически активный L-энантиомер Se-метионин (SeMet). Соответствующая АК обычно встречается в сое, зерновых, пастбищных бобовых, бразильских орехах [3]. Направление воздействия Se на организм (вред/польза) определяется уровнем его потребления, при этом взаимосвязь между продолжительностью жизни и содержанием МЭ в рационе имеет чёткую U-образную форму. В отличие от большинства других МЭ, для Se характерен чрезвычайно узкий интервал между дефицитом и токсичностью, что обуславливает необходимость тщательного регулирования потребления этого МЭ с пищей и водой [4]. Физиологическая потребность в Se для женщин (мкг/сутки) составляет 55, для мужчин – 70, для детей – от 10 до 50 (в зависимости от возраста) [5]. Снижение содержания Se в суточном рационе взрослого человека до 40 мкг приводит к развитию селенодефицитных состояний, а превышение безопасного уровня вызывает хроническую токсичность. Научный комитет по пищевым продуктам (Scientific Committee on Food, SCF) в 2000 г. установил верхнюю безопасную норму потребления Se из всех источников пищи, включая пищевые добавки, для взрослого населения на уровне 300 мкг/день. Позднее эти нормативы были скорректированы в сторону увеличения (до 400–450 мкг в день) [6].

Вариабельность селенового статуса населения в значительной мере определяется геохимической неоднородностью территории в сочетании с антропогенным влиянием на распределение этого МЭ в окружающей среде (ОС) и комплексом социальных факторов (в частности, характером питания) [7, 8]. Согласно данным Российской академии медицинских наук, более половины жителей России имеют явный дефицит Se. В экологически неблагоприятных по этому показателю районах глубина дефицита достигает 95–100 % [9–11]. Дефицит Se приводит к снижению иммунитета, нарушению метаболизма, репродуктивных и когнитивных функций, мышечной слабости, развитию онкологических заболеваний, патологий печени, сердечно-сосудистой системы, щитовидной железы, ухудшению состояния кожи. Выраженный дефицит Se на фоне дисбаланса других МЭ является причиной развития опасных эндемических заболеваний сердца (болезнь Кешана), костей и суставов (болезнь Кашина-Бека), мышц (беломышечная болезнь животных) [12–14].

Не менее разрушительно для здоровья и избыточное потребление Se, вызывающее нарушение иммунитета, репродуктивной функции, нормальной работы желудочно-кишечного тракта, выпадение волос, неврологические расстройства, развитие сахарного диабета, сокращение продолжительности жизни [15–19]. Разные формы Se проявляют различную токсичность. Неорганические соединения более токсичны, чем органические. Токсичность протеиногенного SeCys выше, чем характерного для растений SeMet. Наименее токсичными считаются наночастицы Se [20].

Узкий интервал между дефицитом и токсичностью существенно затрудняет возможность использования обогащённых Se

биологически-активных добавок для коррекции недостатка МЭ в питании населения. Более перспективным может стать подход, базирующийся на обогащении бедных Se почв с помощью удобрений. Соответствующие технологии успешно апробированы в ряде стран и регионов. Накопленный в этом отношении опыт заслуживает тщательного изучения и критической оценки. Всестороннее исследование и понимание региональных и глобальных закономерностей распределения Se в ОС и транслокации его в экосистемах имеет решающее значение для успешного решения проблем общественного здравоохранения, обусловленных дисбалансом этого МЭ.

Цель работы – выявить достигнутый уровень научных знаний и отразить актуальное состояние проблемы восполнения дефицита Se в почвах сельскохозяйственного назначения, а также рассмотреть и критически оценить опубликованные данные, касающиеся экологических аспектов использования Se-содержащих удобрений.

#### Объекты и методы исследования

Статья представляет собой систематизированный обзор русскоязычных и англоязычных научных публикаций, посвящённых вопросам дефицита Se в почвах, сельскохозяйственном сырье и пищевых продуктах, а также перспективным способам коррекции соответствующего дефицита. Основное внимание уделено таким вопросам, как содержание Se в почвах, его биодоступность, особенности Se-содержащих удобрений. В обзор включены монографии и статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях в период с 1993 по 2026 гг. Для поиска информации использовали сервисы Академия Google, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Scholar.ru, КиберЛенинка, eLIBRARY. Поиск источников охватывал такие дисциплины, как медицина, ветеринария, агрохимия, растениеводство, экология, химия продовольственного сырья и пищевых продуктов. Структурирование информационного поля и классификацию данных выполняли на основе результатов контентного анализа источников. Для отбора публикаций применяли ключевые слова: селен, микроэлементы, почвы, дефицит селена, удобрения с селеном, микроудобрения, транслокация селена, а также ключевые слова из научных публикаций близкой тематики. Для поиска глобальных данных ключевые слова вводили в поисковые системы на английском языке, для

поиска локальной информации – на русском. Работа с источниками включала определение релевантности, сопоставление и критический анализ опубликованных данных из разных источников, группировку информации по темам, объединение данных в единую картину.

#### Селен в почвах

Почвы являются основным источником Se для растений [21]. По пищевым цепям этот элемент передается животным и человеку. В живых организмах Se преимущественно входит в состав белков селенопротеинов, Se-содержащих АК и пептидов, незначительная доля присутствует в виде неорганических селенидов ( $Se^{2-}$ ), селенитов ( $SeO_3^{2-}$ ) и селенатов ( $SeO_4^{2-}$ ) [22, 23]. В почвах, в зависимости от условий, Se может находиться в форме селенатов, селенитов, селенидов, органических соединений, а также элементарного селена ( $Se^0$ ) [24]. Согласно экотоксикологическим характеристикам, содержащийся в почве Se является сильноопасным элементом [25], однако значения ПДК этого элемента в почвах РФ до настоящего времени не установлены (СанПиН 1.2.3685-21).

Селен относится к числу рассеянных элементов, он содержится в виде примесей в сульфидных, фосфоритных, урановых, молибденовых рудах и не образует собственных крупных месторождений. Минералы Se встречаются очень редко и обычно представляют собой селениды меди, никеля, серебра, ртути [26, 27]. Среднее содержание Se в верхней части континентальной коры оценивается в  $1,5 \cdot 10^{-5} \%$  (150 мкг/кг). Наиболее богаты этим элементом породы осадочного происхождения, содержащие в среднем  $2,7 \cdot 10^{-5} \%$  (270 мкг/кг) Se [28].

Накопление Se в почвах происходит благодаря естественным процессам выветривания материнских пород и атмосферного осаждения вулканических шлейфов [29]. Значительное влияние на содержание этого элемента в почве оказывает деятельность человека. К антропогенным источникам, увеличивающим содержание Se в почве и атмосфере, можно отнести металлургию, угольную промышленность, электронику, производство стекла, сельское хозяйство (применение кормовых добавок, Se-содержащих пестицидов и удобрений). По имеющимся оценкам в результате хозяйственной деятельности в атмосферу попадает около 37–40 % от общего объема выбросов селена [30, 31]. Сочетанное воздействие естественных

и антропогенных факторов приводит к весьма неоднородному распределению данного химического элемента в ОС.

Концентрация Se в почвах обычно варьирует в пределах от 0,01 до 2,0 мг/кг при среднем глобальном значении 0,4 мг/кг, однако некоторые территории характеризуются аномально высоким содержанием этого элемента (более 5 мг/кг) [32]. Почвы таких территорий в основном образуются на богатых Se материнских породах. Повышенное содержание Se характерно для углеродистых и кремнистых сланцев, природных фосфатов, ископаемых углей, сульфидных руд. Содержание Se в самородной сере и сульфидных минералах может достигать 200 мг/кг. Почвы с низким содержанием Se чаще всего формируются на кислых материнских породах. Дефицитные по Se почвы распространены значительно шире, чем почвы с высоким содержанием этого элемента [33].

Накоплению Se в почве способствуют процессы сорбции, осаждения, образования малоподвижных комплексных соединений и биоаккумуляции. Количество почвенного Se обычно положительно коррелирует с количеством органического вещества. Высокое содержание органических веществ способствует аккумуляции и снижению мобильности данного МЭ. В бедных органикой дерново-подзолистых почвах и почвах песчаного состава концентрация Se, как правило, не превышает 0,1 мг/кг. В суглинистых и глинистых почвах его содержание выше. При увеличении количества гумуса на 1 % валовое содержание Se возрастает на 9,8 мкг/кг. [29]. В относительно богатом органическими соединениями поверхностном слое почвы концентрация Se выше, чем в более глубоких слоях. Следует отметить, что концентрация данного элемента имеет выраженную положительную корреляцию не только с содержанием органического углерода, но и с содержанием серы. Связь между накоплением Se и pH почвы весьма незначительна [34].

Для характеристики уровня Se в почвах приняты следующие пороговые значения концентрации: менее 125 мкг/кг – область селенодефицита; 125–175 мкг/кг – маргинальная недостаточность; 175–3000 мкг/кг – область оптимума; более 3000 мкг/кг – область избытка [35–37]. Более детальный подход к градации Se в верхних горизонтах почвы предлагают китайские учёные: <0,125 мг/кг – дефицит; 0,125–0,175 мг/кг – потенциальный дефицит; 0,175–0,300 мг/кг – достаточное

содержание; 0,3–0,4 мг/кг – потенциальное обогащение; 0,4–3,0 мг/кг – обогащение; >3 мг/кг – токсичность. Целесообразность соответствующей детализации обусловлена тем, что содержание Se >0,3 мг/кг обеспечивает стабильную урожайность богатого этим элементом риса [38].

### Биодоступность селена в почвах

Взаимосвязь между содержанием Se в почве и сельскохозяйственных культурах весьма сложна и неоднозначна. Накопление Se в конкретных сельскохозяйственных культурах зависит не столько от общего содержания этого элемента в субстрате, сколько от его подвижности и биодоступности. Выявление факторов, оказывающих влияние на мобильность Se в почве и доступность для растений, позволяет регулировать его содержание в растениеводческой продукции и обеспечивать необходимый результат в стратегиях биофортификации и фиторемедиации. Водорастворимые, ионообменные и связанные с оксидами железа/марганца формы Se отличаются наибольшей биодоступностью [39, 40].

Значительное влияние на подвижность и биодоступность Se оказывают такие характеристики почвы, как гранулометрический состав, влажность, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), содержание и состав органического вещества, содержание полуторных оксидов, оксидов Mn, тяжёлых металлов (ТМ), концентрация ионов-конкурентов ( $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ), а также почвенная микробиота [41–44]. Сочетанное воздействие комплекса различных факторов существенно затрудняет возможность корректной оценки вклада каждого из них в процессы иммобилизации/мобилизации Se.

К характерным особенностям Se относится выраженная способность активно участвовать в окислительно-восстановительных процессах. По строению внешнего электронного уровня Se аналогичен S, однако валентные электроны этого элемента связаны с ядром значительно слабее, что облегчает процесс окисления. Вместе с тем, благодаря ограниченной способности к образованию  $\pi$ -связей, окисленные формы Se оказываются менее стабильными, чем окисленные формы S и в восстановительной среде степень окисления Se легко уменьшается [45, 46]. В результате протекающих в природных средах химических, физических и биологических процессов данный элемент активно переходит из одного

валентного состояния в другое. Динамика глобального круговорота, формы и общее содержание Se в ОС в настоящее время являются предметом пристального интереса учёных [47]. Согласно опубликованным данным, в щелочных и нейтральных почвах, характеризующихся высокими значениями ОВП (окислительные условия), преобладающей формой Se является селенат. Селенаты хорошо растворимы в воде, проявляют низкую способность к адсорбции и осаждению и быстро усваиваются растениями [48]. В интервале умеренных значений ОВП основной формой Se в почвах является селенит, подвижность которого определяется процессами сорбции/десорбции на различных твёрдых поверхностях, в частности, на оксидах и гидроксидах металлов, глинистых частицах, органических материалах. Следует отметить, что благодаря пирамидальной форме с положительно поляризованным атомом Se в вершине, способность к адсорбционному связыванию и комплексообразованию у селенитов выражена значительно сильнее, чем у селенатов, имеющих форму тетраэдра с положительно поляризованным атомом Se внутри иона [49]. В сильно-восстановительной среде (высокие значения pH и низкий ОВП) Se существует в форме Se (0) или Se (-II) [50].

Значительное влияние на биодоступность и биологические функции Se оказывают ризосферные и микробиологические процессы. Установлено, что корневые экссудаты (в частности комплекс органических кислот), контактирующие с оксидами марганца, способствуют окислению селенитов до селенатов [51]. Почвенные микроорганизмы принимают непосредственное участие в окислении, восстановлении, метилировании и деметилировании Se, активизируя глобальный круговорот данного МЭ. К ключевым микробным таксонам, оказывающим влияние на мобильность Se, продуктивность и здоровье экосистем, следует отнести представителей *Pseudomonas* и *Bacillus* [52].

Метаболическая необходимость Se для высших растений до настоящего времени является предметом активных дискуссий. Установлено, что высокие дозы этого элемента губительны для большинства видов, однако оптимизация селенового статуса позволяет повысить стрессоустойчивость растений, вызванную неблагоприятными факторами ОС (засуха, повышенное содержание солей, воздействие ТМ, патогенных микроорганизмов, ультрафиолетового излучения и др.), улуч-

шить минеральное питание, увеличить общую продуктивность и качество урожая [53, 54]. Разные виды растений характеризуются различной способностью к биоаккумуляции Se. Оценка накопления данного элемента в некоторых сельскохозяйственных культурах показала, что по способности поглощать Se из почв изученные культуры можно расположить в следующий ряд: просо > горох > гречиха > овёс [55]. Существуют виды-гипераккумуляторы Se (*Stanleya pinnata*, *Astragalus bisulcatus* и др.), которые активно накапливают данный элемент в своих органах и тканях (до 0,1–1,5 % сухого веса) в количествах, токсичных для других организмов. Высокий уровень токсичного Se защищает растения от поедания травоядными животными, поражения вредителями и патогенными микроорганизмами. Опадшая листва с высоким содержанием Se может подавлять рост соседних неустойчивых к данному элементу видов и стимулировать развитие толерантной к Se биоты [56, 57]. Высокая устойчивость растений-гипераккумуляторов к Se в определённой степени объясняется их способностью накапливать МЭ в виде непротеиновой АК метил-SeCys. Соответствующая АК не входит в состав белков, поэтому и не нарушает их функции, кроме того, метил-SeCys, может быть метаболизирован в растительных клетках до летучего диметилдиселенида и удалён в атмосферу [58].

Существенный вклад в поглощение, распределение и накопление Se в органах и тканях растений вносят некоторые обитающие в ризосфере грибы. Соответствующие аспекты взаимодействия растений с грибами представляют большой научный интерес, так как открывают новые возможности практического использования грибов в биофортификации [59, 60]. Опубликованы результаты исследований, согласно которым комбинированное внесение Se и гриба триходермы (*Trichoderma* spp.) повышает урожайность фасоли обыкновенной *Phaseolus vulgaris* L. [61]. Совместное внесение Se и грибов арбускулярной микоризы оказывает положительное влияние на урожайность и качество лука-шалота *Allium ascalonicum* L. [62].

Поскольку Se является химическим аналогом S, механизмы поглощения и метаболизма этих элементов у большинства растений одинаковы. Неорганические формы Se могут ассимилироваться растениями по пути ассимиляции сульфатов и включаться в состав SeCys, SeMet и некоторых других соединений, аналогичных сероорганическим веществам.

Соответствующий биохимический процесс может быть реализован как в корнях, так и в надземных органах растений. Чрезмерная замена S на Se в цистеине и метионине приводит к нарушению нормальной структуры и функций белков. Снижение токсичного воздействия Se достигается за счёт способности многих растений метаболизировать SeMet в летучий диметилселенид. Вторым возможным механизмом детоксикации Se является расщепление SeCys на элементарный Se и аланин [63, 64].

### Se-содержащие удобрения

Биофортификация основных сельскохозяйственных культур (злаков, бобовых, овощных, плодовых, лекарственных) за счёт применения тех или иных форм Se становится одним из трендов современного растениеводства [65, 66]. Устранение дефицита Se в почвах позволяет оптимизировать концентрацию этого МЭ в растительной продукции и, соответственно, в рационе человека, повысить качество урожая, увеличить продуктивность и экологическое состояние агроценозов. Применение Se-содержащих удобрений приводит не только к обогащению продукции этим МЭ, но и к снижению накопления в растениях опасных ТМ, включая Cd и Hg [67–70]. Участие Se в подавлении биоаккумуляции ТМ обусловлено такими механизмами, как образование малорастворимых селенидов, комплексообразование, трансформация ризосферной микробиоты, регуляция внутриклеточного транспорта и накопления ТМ, укрепление корневого барьера за счёт изменения морфологии, снижения проницаемости клеточной стенки и индукции образования железистых отложений на поверхности корней [71]. Использование Se-удобрений повышает устойчивость растений к солевому стрессу и дефициту воды [72, 73].

Несмотря на доказанную эффективность, производство и применение Se-содержащих удобрений сопряжено с определёнными проблемами, обусловленными неравномерным распределением данного элемента в почвенном покрове, узким интервалом между дефицитом и токсичностью, разным уровнем аккумуляции различными культурами, низкими нормами внесения Se, составляющими несколько десятков грамм действующего вещества на га, высокой токсичностью селеновых добавок, необходимостью систематического мониторинга содержания Se в почве и растениеводческой

продукции [74]. Как правило, соединения Se включают в состав комплексных минеральных или органоминеральных удобрений в качестве МЭ. Такая практика имеет большой недостаток, поскольку нормы внесения удобрений рассчитываются на основе содержания в них основных элементов питания (N, P, K), а не МЭ. Немаловажное значение имеют и такие проблемы, как стандартизация Se-удобрений, нормативно-правовые и экономические рамки, регулирующие их использование, оценка рисков безопасности и надзор за обогащённой Se сельскохозяйственной продукцией, разработка системы стандартов для сельскохозяйственных предприятий, использующих Se-содержащие агрохимикаты. Успешное решение этих проблем имеет решающее значение для раскрытия потенциала биофортификации селеном [75–79].

Для обогащения комплексных удобрений Se обычно применяют селениты и селенаты натрия или используют соответствующие соли в качестве самостоятельных микроудобрений. Следует отметить, что агрохимическая эффективность селенатов, включённых в состав гранулированных комплексных удобрений, значительно (в 2–15 раз) ниже, чем эффективность селенатов без добавок. При этом эффективность фолиарных подкормок селеном повышается при их совместном внесении с азотными удобрениями [80]. Внесение селена в форме селенитов или селенатов приводит к повышению уровня подвижного Se в почвах, однако эти формы различаются по характеру иммобилизации, распределению в почвенных фракциях, доступности и накоплению в тканях и органах растений. Экспериментальные исследования показали, что селенаты по сравнению с селенитами способствуют более значительному повышению концентрации биодоступных форм Se и более интенсивному накоплению этого МЭ в растениях [81, 82]. Опыт использования разных соединений Se для подкормки трав на пастбищах в Новой Зеландии показал, что селенат натрия в 4–20 раз менее токсичен для животных, чем селенит, а нормы его внесения для достижения необходимого эффекта в 5 раз меньше, чем для селенита [83]. Вместе с тем для подкормки томатов предпочтительнее использовать селенит натрия, поскольку данная культура более отзывчива именно на эту форму Se [84].

В последние годы был опубликован ряд работ, обосновывающих возможность и целесообразность использования в качестве селеновых удобрений наночастиц элементарного се-

лена (н-Se). К преимуществам данной формы можно отнести высокую эффективность при низких уровнях внесения, пролонгированный период действия, меньшую токсичность для почвенной микробиоты [85–88]. Согласно экспериментальным данным, н-Se, используемый при выращивании пшеницы, превосходит традиционные ионные формы селеновых удобрений по биодоступности на 39,93 %, повышению урожайности на 27,13 %, накоплению крахмала на 20,94 %, концентрации Se в зерне – в 32 раза. При этом эффективность н-Se-удобрений, содержащих более крупные (~210 нм) наночастицы (НЧ) на 59 % выше, чем эффективность удобрений, содержащих мелкие (~60 нм) НЧ [89]. н-Se-удобрения обогащают микробиом ризосферы полезными для растений таксонами и способствуют созданию консорциумов микроорганизмов, подавляющих патогены [90]. Опубликованы данные, согласно которым внекорневое применение н-Se снижает вредоносность *Alternaria solani* на томатах [91], двукратное внесение н-Se-удобрения на стадии рассады значительно снижает индекс поражения картофеля паршой [92], а комбинированное применение н-Se и глутатиона повышает устойчивость огурцов к серой гнили (*Botrytis cinerea*) [93]. Несмотря на растущий интерес к наноудобрениям, остаётся много вопросов к подтверждению безопасности и оценке возможных рисков для здоровья, связанных с употреблением растительных продуктов, обогащённых н-Se [94].

Высокая агрохимическая эффективность и относительная безопасность характерна для селеновых удобрений, содержащих Se в форме органических соединений, например, селеноцистеина, метилселенизированной глюкозы или метилселенизированного лактида. Согласно результатам исследований, агрохимический эффект от применения дешёвой метилселенизированной глюкозы на пшенице в 2–4 раза выше, чем эффект от применения  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  [95, 96]. Органические формы Se содержатся и в обогащённых этим элементом биоматериалах (навоз, птичий помёт, солома, ряска, выращенная в воде, загрязнённой Se, и т. п.). Соответствующие материалы в настоящее время оцениваются как перспективное и относительно безопасное сырьё для производства удобрений [97, 98].

Ещё одной интересной и перспективной формой Se-удобрений могут стать био-нано-удобрения, НЧ Se с биоудобрениями. Для их биосинтеза применяют бактерии, водоросли, дрожжи, грибы, актиномицеты, растения (в

частности, растительные экстракты). Включение НЧ в биоматрицу может быть реализовано за счёт инкапсулирования, химического связывания и/или сорбции НЧ на поверхности клеток микроорганизмов. Согласно имеющимся оценкам, биологические методы производства н-Se-удобрений открывают новые возможности для экономии ресурсов, повышения эффективности использования питательных веществ, снижения затрат на охрану ОС. Вместе с тем следует иметь в виду, что хотя био-нано-удобрения и позиционируются как экологически безопасную альтернативу традиционным минеральным удобрениям, возможные экологические риски воздействия НЧ на экосистемы всё ещё находятся в стадии изучения и оценки [99–101].

### Нормы внесения и эффективность Se-удобрений

Значительный опыт долговременного применения Se-содержащих удобрений для восполнения дефицита этого МЭ в питании населения был получен в Финляндии. Обогащение коммерческих удобрений Se было начато в стране с 1 июля 1984 г., согласно решению Государственного совета. С 1985 г. практически все используемые в Финляндии удобрения содержат Se. Применяемая технология обогащения включает растворение  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  в суспензии минерального удобрения с последующим гранулированием. Проведённые в Финляндии исследования показали, что ежегодное внесение  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  в норме примерно 10 г/га под зерновые культуры и 2 г/га под кормовые травы было достаточным для повышения концентрации Se с исходного уровня 10–20 мкг/кг до целевого уровня 100 мкг на кг сухого вещества. Регламентируемый уровень Se в удобрениях несколько раз пересматривался и корректировался в зависимости от результатов мониторинга концентрации этого элемента в сыворотке крови человека, продуктах питания, кормах, а также уровня суточного потребления. В 2007 г. содержание Se в удобрениях составляло 15 мкг/кг, а годовая норма внесения – около 5 г/га. Благодаря использованию обогащённых Se удобрений, среднесуточное потребление этого элемента населением было увеличено до оптимального уровня 60–80 мкг [102–104].

Целесообразность внесения Se в почву в более высокой норме, чем принято в Финляндии, была выявлена в горшечных опытах (полурегулируемые условия) на гречихе обычно-

венной *Fagopyrum esculentum*. Исследования проводили в 2022–2023 гг. в центральноевропейском агрономическом регионе. Согласно опубликованным данным, внесение  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  в дозе 150 г/га и  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  в дозах 150 г/га и 300 г/га оказало положительное влияние на урожайность семян данной культуры. Повышение нормы внесения  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  до 600 г/га вызвало снижение урожайности семян на 23,87 % [105].

Позитивные результаты применения Se-содержащих удобрений были получены и в РФ. В 2015–2017 гг. в Кировской области (Северо-Восточное Нечерноземье), для почв которой характерен выраженный дефицит Se, были проведены полевые испытания различных доз и способов внесения  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  в комплексе с NPK-удобрениями. Удобрения вносили под яровую пшеницу. Средняя прибавка урожая от внесения NPK составила 8,3 ц/га (48,5 %), от  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  – 0,6–2,9 ц/га (2,4–11,4 %). Из всех изученных способов применения  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  (предпосевная обработка семян, основное внесение в почву, некорневые подкормки) наибольший эффект был получен от внесения Se в почву в дозе 180 г действующего вещества на га [106].

Биодоступность внесённых форм неорганического Se в почвах достаточно быстро снижается, поэтому соответствующие удобрения желательно применять в весенний период в фазу активного роста растений. Подкормка пшеницы  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  в этот период в норме 20 г Se/га позволяет увеличить содержание МЭ в зерне с 0,03 мг/кг (контроль) до 0,4–0,5 мг/кг [107]. Внесение полностью растворимых форм Se под пшеницу предпочтительнее, чем внесение пролонгированных удобрений, поскольку малорастворимые компоненты не оказывают заметного влияния на накопление данного элемента в урожае. Повышение нормы внесения с 5 до 20 г Se/га приводит к линейному увеличению концентрации этого элемента в зерне. На орошаемых полях эффективность Se-удобрений ниже, чем на неорошаемых [108]. Оценка фитотоксичности Se для пшеницы показала, что внесение этого элемента в норме 4–200 г Se/га в виде селената не оказывает угнетающего воздействия на растения [109].

Изучение влияния высоких норм  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  (200 г Se/га) на фракционирование этого элемента в почве и накопление в растениях (на примере кукурузы) показало, что растения кукурузы усваивают не более 1 % внесённого Se. Данный элемент не накапливается в поч-

ве, что, скорее всего, обусловлено его потерей в результате образования летучих форм. Выщелачивание Se в грунтовые воды предотвращается благодаря адсорбционным процессам, связыванию с органическим веществом почвы и улетучиванию. Таким образом, внесение разумных доз Se в почву может повысить питательную ценность растений без явных негативных последствий для ОС [110].

## Заключение

Анализ опубликованных источников показал устойчивый рост научного интереса к проблеме оптимизации селенового статуса населения за счёт использования Se-содержащих удобрений. Изучение влияния Se на продуктивность, стрессоустойчивость и биологическую ценность пищевых и кормовых растений становится центральным направлением современных исследований в соответствующей области. Для обогащения почв могут быть использованы неорганические вещества (селениты, селенаты, n-Se), органические соединения (селеноцистеин, метилселенизированная глюкоза, метилселенизированный лактид) и биоформы этого элемента. В настоящее время чаще всего в качестве микроудобрения используется хорошо растворимый и агрохимически эффективный  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ . Основным недостатком данного удобрения является высокая токсичность. Применение  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  для подкормки растений требует строгого соблюдения техники безопасности и тщательного контроля норм внесения, при этом вопросы агрохимического нормирования Se-удобрений на разных почвах и под разные культуры до настоящего времени остаются открытыми. Отсутствие научно обоснованных норм внесения Se приводит к получению нестабильных результатов.

Успешная селенизация бедных почв невозможна без вывода на рынок специализированных гранулированных удобрений, содержащих Se в доступной для растений форме. Информация о технологии производства соответствующих удобрений в научных публикациях практически отсутствует. Ассортимент выпускаемых отечественными предприятиями Se-содержащих удобрений, пригодных для использования в крупных растениеводческих хозяйствах, крайне ограничен.

Применение высокотоксичных соединений Se в качестве удобрений сопряжено с определёнными экологическими рисками, однако восполнение дефицита этого важного

МЭ в почве может оказать положительное влияние на общую продуктивность искусственных и естественных биоценозов. Недостаточная изученность вопроса пока не позволяет сделать однозначных выводов о возможных экологических последствиях селенизации почв в масштабах такой большой и разнообразной по почвенно-климатическим условиям страны, как Россия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УРО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», ЕГИСУ № 125021402208-5.*

### References

1. Yang L., Jiang Y., Wu H., Sun J., Huang X., Hong J., Zheng B., Zhu J. Metabolic functions and mechanisms of selenium, selenocysteine, and GPX4 mediated immune regulation through autophagy in solid tumors // *Food Sci. Nutr.* 2025. V. 13. No. 12. Article No. e71230. doi: 10.1002/fsn3.71230
2. Duntas L.H., Benvenga S. Selenium: an element for life // *Endocrine.* 2015. V. 48. No. 3. P. 756–775. doi: 10.1007/s12020-014-0477-6
3. Aktaş İ., Bilgiç S. Human health and selenium // *Ejons International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences.* 2025. V. 9. No. 2. P. 153–169. doi: 10.5281/zenodo.15761884
4. Rayman M.P. Selenium intake, status, and health: a complex relationship // *Hormones.* 2020. V. 19. No. 1. P. 9–14. doi: 10.1007/s42000-001125-5
5. MR 2.3.1.0253-21. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation: methodological recommendations [Internet resource] <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/> (Accessed: 15.01.2026).
6. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA); Turck D., Bohn T., Castenmiller J., de Henauw S., Hirsch-Ernst K.I., Knutsen H.K., Maciuk A., Mangelsdorf I., McArdle H.J., Peláez C., Pentieva K., Siani A., Thies F., Tsabouri S., Vinceti M., Aggett P., Crous Bou M., Cubadda F., Ciccolallo L., de Sesmaisons Lecarré A., Fabiani L., Titz A., Naska A. Scientific opinion on the tolerable upper intake level for selenium // *EFSA J.* 2023. V. 21. No. 1. Article No. e07704. doi: 10.2903/j.efsa.2023.7704
7. Belov M.A., Sindireva A.V. Assessment of selenium content in the soil–plant system in the forest-steppe and steppe zone of the Chelyabinsk region // *Environment and Human: Ecological Studies.* 2024. V. 14. No. 4. P. 496–511 (in Russian). doi: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511
8. Sun W., Huang B., Zhao Y., Shi X., Darilek J.L., Deng X., Wang H., Zou Z. Spatial variability of soil selenium as affected by geologic and pedogenic processes and its effect on ecosystem and human health // *Geochem. J.* 2009. V. 43. No. 4. P. 217–225. doi: 10.2343/geochemj.1.0019
9. Golubkina N.A., Papazyan T.T. Selenium in nutrition: plants, animals, humans. Moskva, 2006. 254 p. (in Russian).
10. Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. Human microelementoses. Moskva: Meditsina, 1991. 496 p. (in Russian).
11. Shirshova T.I., Beshley I.V., Golubkina N.A. The content of selenium in soils of some regions of the Komi Republic // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2018. No. 2 (34). P. 43–48 (in Russian).
12. Kamboj M., Bajpai S., Pandey G., Banic B.K. Effect of selenium and its compounds on human health // *Trace Metals Selenium, Chromium and Vanadium: Chemistry, Biology and Human Health / Eds. Banic B.K., Bajpai S., Kamboj M., Pandey G.* CRC Press, 2025. P. 169–197.
13. Goroshnikova G.A., Drozdova L.I., Belousov A.I. Features metabolic profile of cows in selene deficit zone // *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2015. No. 3 (133). P. 15–17 (in Russian).
14. Souza L.S.L., Campos R.O., Braga J.S. Filho, Jesus J.D.S., Anunciação S.M., Cassemiro J.F., Rende P.R.F., Hecht F., Ramos H.E. Selenium nutritional status and thyroid dysfunction // *Arch. Endocrinol. Metabol.* 2025. V. 69. No. 1. Article No. e230348. doi: 10.20945/2359-4292-2023-0348
15. Barchielli G., Capperucci A., Tanini D. The role of selenium in pathologies: an updated review // *Antioxidants.* 2022. V. 11. No. 2. Article No. 251. doi: 10.3390/antiox11020251
16. Medeiros D.M. Copper, iron, and selenium dietary deficiencies negatively impact skeletal integrity: A review // *Exp. Biol. Med.* 2016. V. 241. No. 12. P. 1316–1322. doi: 10.1177/1535370216648805
17. Cardoso B.R., Cominetti C., Seale L.A. Selenium, human health and chronic disease // *Front. Nutr.* 2022. V. 8. Article No. 827759. doi: 10.3389/fnut.2021.827759
18. Raisbeck M.F. Selenosis // *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 2000. V. 16. No. 3. P. 465–480. doi: 10.1016/s0749-0720(15)30081-5
19. Tinggi U. Selenium toxicity and its adverse health effects // *Reviews in Food and Nutrition Toxicity.* V. 4. / Eds. V.R. Preedy, R.R. Watson. CRC Press, 2005. P. 29–56.
20. Lv Q., Liang X., Nong K., Gong Z., Qin T., Qin X., Wang D., Zhu Y. Advances in research on the toxicological effects of selenium // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2021. V. 106. No. 5. P. 715–726. doi: 10.1007/s00128-020-03094-3
21. Temmerman L.D., Waegeneers N., Thiry C., Laing G.D., Tack F., Ruttens A. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 468–469. P. 77–82. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.016

22. Hou X., Wang Z., Peng M. Selenium compounds and their bioactivities: molecular mechanisms and prospects for functional food and therapeutic applications // *Plants*. 2025. V. 14. No. 17. Article No. 2622. doi: 10.3390/plants14172622
23. Mangiapane E., Pessione A., Pessione E. Selenium and selenoproteins: an overview on different biological systems // *Curr. Protein Pept. Sci.* 2014. V. 15. No. 6. P. 598–607. doi: 10.2174/1389203715666140608151134
24. Coppin F., Chabroulet C., Martin-Garin A., Balesdent J., Gaudet J.P. Methodological approach to assess the effect of soil ageing on selenium behaviour: first results concerning mobility and solid fractionation of selenium // *Biol. Fertil. Soils*. 2006. V. 42. No. 5. P. 379–386. doi: 10.1007/s00374-006-0080-y
25. Vodyanitskii Yu.N. Standards for the contents of heavy metals and metalloids in soils // *Eurasian Soil Sc.* 2012. V. 45. P. 321–328. doi: 10.1134/S1064229312030131
26. Plemenkov V.V. Natural connections of selenium and health of men // *IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences*. 2007. No. 1. P. 51–63 (in Russian).
27. Syrchina N.V., Bogatyryova N.N., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Tailings of enrichment of phosphorites of the Vyatka-Kama deposit as secondary material resources for the production of natural fertilizers // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 107–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114
28. Grigorev N.A. Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS Publ., 2009. 190 p. (in Russian).
29. Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Guryev N.E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region // *Problems of regional ecology*. 2021. No. 3. P. 32–38 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-3-32-38
30. El-Ramady H., Abdalla N., Alshaal T., Domokos-Szabolcsy É., Elhawat N., Prokisch J., Sztrik A., Fári M., El-Marsafawy S., Shams M.S. Selenium in soils under climate change, implication for human health // *Environ. Chem. Lett.* 2015. V. 13. No. 1. P. 1–19. doi: 10.11648/j.ijaas.20170301.11
31. Syrchina N.V., Pilip L.V. The effect of acidification on the sulfide hydrogen emissions in the organic waste of pig farms // *Problems of regional ecology*. 2021. No. 4. P. 102–106 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
32. Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: a review // *Int. J. Appl. Agric. Sci.* 2017. V. 3. No. 1. P. 1–18. doi: 10.11648/j.ijaas.20170301.11
33. Fordyce F.M. Selenium deficiency and toxicity in the environment // *Essentials of medical geology / Ed. O. Selenus*. Dordrecht: Springer, 2012. P. 375–416. doi: 10.1007/978-94-007-4375-5\_16
34. Pan Z., He S., Li C., Men W., Yan C., Wang F. Geochemical characteristics of soil selenium and evaluation of Se-rich land resources in the central area of Guiyang City, China // *Acta Geochim.* 2017. V. 36. No. 2. P. 240–249. doi: 10.1007/s11631-016-0136-0
35. Sindireva A.V., Golubkina N.A., Erdenetsogt E. An integrated approach to assessing the effect of selenium in the soil-plant system: methodological recommendations. Omsk: KAN Publ. Centre, 2022. 28 p. (in Russian).
36. Belov M.A., Sindireva A.V., Puzanov D.O., Veshkurtseva S.S. Selenium content in environmental objects and in the hair of the population in the territory of the Oktyabrsky district of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2025. No. 3. P. 157–162 (in Russian). doi: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/157-162
37. Tan J., Zhu W., Wang W., Li R., Hou S., Wang D., Yang L. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 284. No. 1–3. P. 227–235. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00889-0
38. Cheng L., Nazir N., Li X., Zhang J., Zhu Y. Spatial distribution of surface soil selenium and its influencing factors in China: A literature-based analysis // *Environ. Pollut.* 2025. Article No. 126962. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126962
39. Dinh Q.T., Wang M., Tran T.A.T., Zhou F., Wang D., Zhai H. Peng Q., Xue M., Du Z., Bañuelos G.S., Lin Z.Q., Liang D. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 49. No. 6. P. 443–517. doi: 10.1080/10643389.2018.1550987
40. Winkel L.H.E., Vriens B., Jones G.D., Schneider L.S., Pilon-Smits, Bañuelos G.S. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: a critical review // *Nutrients*. 2015. V. 7. No. 6. P. 4199–4239. doi: 10.3390/nu7064199
41. Roca-Perez L., Gil C., Cervera M.L., González A., Ramos-Miras J., Pons V., Bech J., Boluda R. Selenium and heavy metals content in some Mediterranean soils // *J. Geochem. Explor.* 2010. V. 107. No. 2. P. 110–116. doi: 10.1016/j.gexplo.2010.08.00
42. Liu N., Wang M., Zhou F., Zhai H., Qi M., Liu Y., Li Y., Zhang N., Ma Y., Huang J., Ren R., Liang D. Selenium bioavailability in soil-wheat system and its dominant influential factors: A field study in Shaanxi province, China // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 770. Article No. 144664. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144664
43. Zhao C., Ren J., Xue C., Lin E. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake // *Plant and Soil*. 2005. V. 277. No. 1. P. 197–206. doi: 10.1007/s11104-005-7011-9
44. El-Ramady H., Omara A.E.D., El-Sakhawy T., Prokisch J., Brevik E.C. Sources of selenium and nano-selenium in soils and plants // *Selenium and Nano-Selenium in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement / Eds. M.A. Hossain, G.J. Ahammed, Z. Kolbert, H. El-Ramady, T. Islam, M. Schiavon*. Cham: Springer, 2022. P. 1–24. doi: 10.1007/978-3-031-07063-1\_1

45. Cupp-Sutton K.A., Ashby M.T. Biological chemistry of hydrogen selenide // *Antioxidants*. 2016. V. 5. No. 4. Article No. 42. doi: 10.3390/antiox5040042
46. Jacob C., Giles G.I., Giles N.M., Sies H. Sulfur and selenium: the role of oxidation state in protein structure and function // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2003. V. 42. No. 39. P. 4742–4758. doi: 10.1002/anie.200300573
47. Sharma V.K., McDonald T.J., Sohn M., Anquandah G.A.K., Pettine M., Zboril R. Biogeochemistry of selenium. A review // *Environ. Chem. Lett.* 2015. V. 13. No. 1. P. 49–58. doi: 10.1007/s10311-014-0487-x
48. Zhang L., Fan J., Liang Q., Zhan T., Liu T., Wang G. Impact of land use changes on selenium distribution and bioavailability in Mollisol of Sanjiang Plain // *Environ. Pollut.* 2025. V. 376. Article No. 126374. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126374
49. Fernández-Martínez A., Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: a structural chemist point of view // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. V. 8. No. 1. P. 81–110. doi: 10.1007/s11157-009-9145
50. Zhai H., Kleawsampanjai P., Wang M., Qi M., Liu Y., Liu N., Zhou F., Wang M., Liang D. Effects of soil moisture on aging of exogenous selenate in three different soils and mechanisms // *Geoderma*. 2021. V. 390. No. 9. Article No. 114966. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.114966
51. Blaylock M.J., James B.R. Redox transformations and plant uptake of selenium resulting from root–soil interactions // *Plant Soil*. 1994. V. 158. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1007/BF00007911
52. Jiang Z., Wang Z., Zhao Y., Peng M. Unveiling the vital role of soil microorganisms in selenium cycling: a review // *Front. Microbiol.* 2024. V. 15. Article No. 1448539. doi: 10.3389/fmicb.2024.1448539
53. Wang Z., Huang W., Pang F. Selenium in soil–plant–microbe: a review // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2022. V. 108. No. 2. P. 167–181. doi: 10.1007/s00128-021-03386-2
54. Germ M., Stibilj V., Kreft I. Metabolic importance of selenium for plants // *European Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2007. V. 1. No. 10. P. 91–97.
55. Kovalevich Z.S., Golovaty S.E. Accumulation of selenium in cereals grains when using different forms of selenium fertilizers // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*. 2010. No. 3. P. 49–55 (in Russian).
56. Montanari S., Salinitro M., Simoni A., Ciavatta C., Tassoni A. Foraging for selenium: A comparison between hyperaccumulator and non-accumulator plant species // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. No. 1. Article No. 10661. doi: 10.1038/s41598-023-37249-z
57. El Mehdawi A.F., Pilon-Smits E.A.H. Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation // *Plant Biol.* 2012. V. 14. No. 1. P. 1–10. doi: 10.1111/j.1438-8677.2011.00535.x
58. Lindblom S.D., Fakra S.C., Landon J., Schulz P., Tracy B., Pilon-Smits E.A.H. Inoculation of *Astragalus racemosus* and *Astragalus convallarius* with selenium-hyperaccumulator rhizosphere fungi affects growth and selenium accumulation // *Planta*. 2013. V. 237. No. 3. P. 717–729. doi: 10.1007/s00425-012-1789-5
59. Patharajan S., Raaman N. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and selenium uptake by garlic plants // *Arch. Phytopathol. Plant Prot.* 2012. V. 45. No. 2. P. 138–151. doi: 10.1080/03235408.2010.501166
60. Kaur T., Vashisht A., Prakash N.T., Reddy M.S. Role of selenium-tolerant fungi on plant growth promotion and selenium accumulation of maize plants grown in seleniferous soils // *Water Air Soil Pollut.* 2022. V. 233. No. 1. Article No. 17. doi: 10.1007/s11270-021-05490-9
61. Bandeira V.M., Pereira L.T., Cunha Sousa P.F., Alves A.F., de Sousa T.P., da Silva C.M., da Silva W.A., Machado D.C., Viana J.S., Araújo R.A. Increased yield of common bean during interaction between organic selenium and *Trichoderma* spp. // *Revista Aracê*. 2025. V. 7. No. 3. P. 13259–13270. doi: 10.56238/arev7n3-181
62. Golubkina N., Zamana S., Seredin T., Poluboyarino P., Sokolov S., Baranova H., Krivenkov L., Pietrantonio L., Caruso G. Effect of selenium biofortification and beneficial microorganism inoculation on yield, quality and antioxidant properties of shallot bulbs // *Plants*. 2019. V. 8. No. 4. Article No. 102. doi: 10.3390/plants8040102
63. Pilon-Smits E.A.H. Selenium in plants // *Progress in Botany*. V. 76 / Eds. U. Lüttge, W. Beyschlag. Cham: Springer, 2015. P. 93–107. doi: 10.1007/978-3-319-08807-5\_4
64. Van Hoewyk D., Garifullina G.F., Ackley A.R., Abdel-Ghany S.E., Marcus M.A., Fakra S., Ishiyama K., Inoue E., Pilon M., Takahashi H., Pilon-Smits E.A.H. Overexpression of AtCpNifS enhances selenium tolerance and accumulation in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2005. V. 139. No. 3. P. 1518–1528. doi: 10.1104/pp.105.068684
65. Ghosh D., Roy S. Role of selenium in agriculture under climate change // *Selenium in sustainable agriculture: a soil to spoon prospective* / Eds. D. Moulick, S. Choudhury. Cham: Springer, 2025. P. 315–336. doi: 10.1007/978-3-031-93957-0\_13
66. Sychev V.G., Aristarkhov A.N., Yakovleva T.A., Panasin V.I., Busygin A.S. Problem of selenium and its solution by agrochemical means. The current state of research on the problem of selenium in agroecosystems (report 1) // *Plodorodie*. 2015. No. 4. P. 2–5 (in Russian).
67. Huang Q., Xu Y., Liu Y., Qin X., Huang R., Liang X. Selenium application alters soil cadmium bioavailability and reduces its accumulation in rice grown in Cd-contaminated soil // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. No. 31. P. 31175–31182. doi: 10.1007/s11356-018-3068-x
68. Li Y., Pei G., Zhang Y., Guan S., Lv Y., Li Z., Li H. Development and evaluation of selenium-enriched compound fertilizers for remediation of mercury-contaminated agricultural soil // *Agronomy*. 2025. V. 15. No. 8. Article No. 1842. doi: 10.3390/agronomy15081842

69. Pilip L.V., Syrchina N.V. Effect of meliorants on cadmium mobility in soils // Russian journal of applied ecology. 2023. No. 4. P. 60–66 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.4.60.66
70. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn) // Principles of the Ecology. 2023. No. 1. P. 82–89 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2023.13182
71. Guan Q. Selenium-Mediated Rhizosphere Blocking and Control Network: Multidimensional Mechanisms for Regulating Heavy Metal Bioavailability. 2026. doi: 10.20944/preprints202601.0556.v1
72. Kaur S., Nayyar H. Selenium fertilization to salt-stressed mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) plants reduces sodium uptake, improves reproductive function, pod set and seed yield // Sci. Hortic. 2015. V. 197. P. 304–317. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.048
73. Ahmad R., Waraich E., Nawaz F., Ashraf M.Y., Khalid M. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? // J. Sci. Food Agric. 2016. V. 96. No. 2. P. 372–380. doi: 10.1002/jsfa.7231
74. Garousi F. Toxicity of selenium, application of selenium in fertilizers, selenium treatment of seeds, and selenium in edible parts of plants // Acta Univ. Sapientiae: Alimentaria. 2017. V. 10. No. 1. P. 61–74. doi: 10.1515/ausal-2017-0004
75. Estarriaga-Navarro S., Goicoechea N., Plano D., Sanmartín C. Selenium biofortification: integrating one health and sustainability // J. Sci. Food Agric. 2026. V. 106. No. 4. P. 1955–1967. doi: 10.1002/jsfa.70103
76. Gebreyessus G.D., Zewge F. A review on environmental selenium issues // SN Appl. Sci. 2019. V. 1. Article No. 55. doi: 10.1007/s42452-018-0032-9
77. Ros G.H., van Rotterdam A.M.D., Bussink D.W., Bindraban P.S. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach // Plant Soil. 2016. V. 404. No. 1. P. 99–112. doi: 10.1007/s11104-016-2830-4
78. Preda C., Vasiliu I., Bredeteau O., Gabriela C.D., Ungureanu M.C., Leustean E.L., Grigorovici A., Oprisa C., Vulpoi C. Selenium in the environment: essential or toxic to human health? // Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ). 2016. V. 15. No. 4. P. 913–924. doi: 10.30638/eemj.2016.099
79. Ren X., Wang Y., Sun J., Liang K., Zhu H., Li Y., Gao J., Zhang Y., Huang S., Zhu D. Legal standards for selenium enriched foods and agricultural products: domestic and international perspectives // Nutrients. 2024. V. 16. No. 21. Article No. 3659. doi: 10.33390/nu16213659
80. Wang G., Bohe G., Filley S.J., Pirelli G., Bohle M.G., Davis T.Z., Bañuelos G.L., Hall J.A. Effects of springtime sodium selenate foliar application and NPKS fertilization on selenium concentrations and selenium species in forages across Oregon // Anim. Feed Sci. Technol. 2021. V. 276. Article No. 114944. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.114944
81. Ali F., Peng Q., Wang D., Cui Z., Huang J., Fu D., Liang D. Effects of selenite and selenate application on distribution and transformation of selenium fractions in soil and its bioavailability for wheat (*Triticum aestivum* L.) // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. No. 9. P. 8315–8325. doi: 10.1007/s11356-017-8512-9
82. Cartes P., Gianfreda L., Mora M.L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms // Plant Soil. 2005. V. 276. No. 1. P. 359–367. doi: 10.1007/s11104-005-5691-9
83. Loganathan P., Hedley M.J. Spatial and time-dependent patterns of selenium (Se) release from selected Se fertiliser granules // Aust. J. Soil Res. 2006. V. 44. No. 2. P. 155–163. doi: 10.1071/SR05139
84. Xu X., Wang J., Wu H., Yuan Q., Wabg J., Cui J., Lin A. Effects of selenium fertilizer application and tomato varieties on tomato fruit quality: a meta-analysis // Sci. Hortic. 2022. V. 304. Article No. 111242. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111242
85. Liu J., Qi W.Y., Chen H., Song C., Li Q., Wang S.G. Selenium nanoparticles as an innovative selenium fertilizer exert less disturbance to soil microorganisms // Front. Microbiol. 2021. V. 12. Article No. 746046. doi: 10.3389/fmicb.2021.746046
86. Gudkov S.V., Shafeev G.A., Glinushkin A.P., Shkirin A.V., Barmina E.V., Rakov I.I., Simakin A.V., Kislov A.V., Astashev M.E., Vodeneev V.A., Kalinichenko V.P. Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers // ACS Omega. 2020. V. 5. No. 28. P. 17767–17774. doi: 10.1021/acsomega.0c02448
87. Song J., Yu S., Yang R., Xiao J., Liu J.F. Opportunities for the use of selenium nanoparticles in agriculture // NanoImpact. 2023. V. 31. Article No. 100478. doi: 10.1016/j.impact.2023.100478
88. Fang Q., Liu Z., Wang K. Selenium nanoparticles vs selenite fertilizers: implications for toxicological profiles, antioxidant defense, and ferroptosis pathways // J. Agric. Food Chem. 2025. V. 73. No. 19. P. 11634–11646. doi: 10.1021/acs.jafc.5c02034
89. Wang X., Hussain B., Xin X., Zou T., Huang X., Cheng L., Wu Z., Yang Y., Li Y., He Z., Lian J., White J.C., Yang X. Fate and physiological effects of foliar selenium nanoparticles in wheat // ACS Nano. 2025. V. 19. No. 23. P. 21792–21806. doi: 10.1021/acsnano.5c05670
90. Zhang Z., Zhou T., Pan C., Li M., Wang J., Wang X., Wang S., Hu Z., Sun R., Li D. Nanoselenium-driven reduction in chemical fungicide usage: Eco-safety enhancement in pepper *Phytophthora capsici* control // Pestic. Biochem. Physiol. 2025. V. 215. Article No. 106639. doi: 10.1016/j.pestbp.2025.106639
91. Quiterio-Gutiérrez T., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Hernández-Fuentes A.D., Sandoval-Rangel A., Benavides-Mendoza A., Cabrera-de la Fuente M., Juárez-Maldonado A. The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria solani* // Int. J. Mol.

Sci. 2019. V. 20. No. 8. Article No. 1950. doi: 10.3390/ijms20081950

92. Liu H., Zhang Y., Zhang L., Liu Y., Chen Y. Shi Y. Nano-selenium strengthens potato resistance to potato scab induced by *Streptomyces* spp., increases yield, and elevates tuber quality by influencing rhizosphere microbiomes // Front. Plant Sci. 2025. V. 16. No. 3. Article No. 1523174. doi: 10.3389/fpls.2025.1523174

93. Jia Y., Kang L., Wang P., Wu T., Fu X., Wan X., Huang T., Wei X., Wang X., Bi Y., Pan C. Application of nano-selenium and glutathione with pyrimethanil enhance cucumber resistance to *Botrytis cinerea* by boosting root secretion and recruiting beneficial microorganisms // Chem. Eng. J. 2025. V. 528. Article No. 172174. doi: 10.1016/j.cej.2025.172174

94. Garza-García J.J.O., Hernández-Díaz J.A., Zamudio-Ojeda A., León-Morales J.M., Guerrero-Guzmán A., Sánchez-Chiprés D.R., López-Velázquez J.C., García-Morales S. The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology // Biol. Trace Elem. Res. 2022. V. 200. No. 5. P. 2528–2548. doi: 10.1007/s12011-021-02847-3

95. Xian L., Li Q., Li T., Yu L. Methylselenized glucose: an efficient organoselenium fertilizer enhancing the selenium content in wheat grains // Chin. Chem. Lett. 2023. V. 34. No. 5. Article No. 107878. doi: 10.1016/j.ccl.2022.107878

96. Qian R., Shen J., Yu L. Recent advances in agricultural selenium chemistry // J. Agric. Food Chem. 2026. V. 74. No. 4. P. 3283–3289. doi: 10.1021/acs.jafc.5c13028

97. Li J., Otero-Gonzalez L., Parao A., Tack P., Folens K., Ferrer I., Lens P.N.L., Du Laing G. Valorization of selenium-enriched sludge and duckweed generated from wastewater as micronutrient biofertilizer // Chemosphere. 2021. V. 281. Article No. 130767. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130767

98. Wang D., Dinh Q.T., Anh Thu T.T., Zhou F., Yang W., Wang M., Song W., Liang D. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil // Chemosphere. 2018. V. 199. P. 417–426. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.007

99. El-Ghamry A., El-Khateeb A.Y., Mosa A.A., El-Ramady H.R. Bio-nano fertilizers preparation using a fully-automated apparatus: a case study of nano-selenium // Env. Biodiv. Soil Security. 2021. V. 5. P. 171–183. doi: 10.21608/jenvbs.2021.88095.1139

100. El-Ghamry A., Mosa A.A., Alshaal T.A., El-Ramady H.R. Nanofertilizers vs. biofertilizers: new insights // Env. Biodiv. Soil Security. 2018. V. 2. No. 1. P. 40–50. doi: 10.21608/jenvbs.2018.3880.1029

101. Sholkamy E.N., Abdelhamid M.A.A., Mekawy A.M.M., El-Sheekh M., Pack S.P. Nano-biofertilizer formulations for sustainable agriculture: potential and limitations // Plant–microbe interactions for environ-

mental and agricultural sustainability / Eds. A. Pandey, K. Choure, M. El-Sheekh, A.N. Yadav. Cham: Springer, 2025. P. 661–693.

102. Keskinen R., Rätty M., Yli-Halla M. Selenium fractions in selenate-fertilized field soils of Finland // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2011. V. 91. No. 1. P. 17–29. doi: 10.1007/s10705-011-9435-3

103. Alftan G., Aspila P., Ekholm P., Euro M., Hartikainen H., Hero H., Hietaniemi V., Root T., Salminen P., Venäläinen E.-R., Aro A. Nationwide supplementation of sodium selenate to commercial fertilizers: history and 25-year results from the Finnish selenium monitoring programme // Combating micronutrient deficiencies: food-based approaches. Wallingford UK: CABI, 2011. P. 312–337. doi: 10.1079/9781845937140.0312

104. Mäkelä A.L., Nantö V., Mäkelä P., Wang W. The effect of nationwide selenium enrichment of fertilizers on selenium status of healthy Finnish medical students living in south western Finland // Biol. Trace Elem. Res. 1993. V. 36. No. 2. P. 151–157. doi: 10.1007/BF02783174

105. Zapletalová A., Kolenčík M., Ducsay L., Vareniová M., Vician T., Černý I., Bušo R. Approach to selenium application in different soil concentrations for encouraged yield, distribution, and biofortification of common buckwheat seeds (*Fagopyrum esculentum* Moench) // Agriculture. 2025. V. 15. No. 8. Article No. 891. doi: 10.3390/agriculture15080891

106. Aristarkhov A.N., Busygin A.S., Yakovleva T.A. Efficiency of different application methods and rates of selenium fertilizers for spring wheat in the soil-climatic conditions of Northeastern Nonchernozemic zone // International agricultural journal. 2018. No. 2. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.24411/2587-6740-2018-12023

107. Curtin D., Hanson R., Lindley T.N., Butler R.C. Selenium concentration in wheat (*Triticum aestivum*) grain as influenced by method, rate, and timing of sodium selenate application // N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 2006. V. 34. No. 4. P. 329–339. doi: 10.1080/01140671.2006.9514423

108. Curtin D., Hanson R., Van Der Weerden T.J. Effect of selenium fertiliser formulation and rate of application on selenium concentrations in irrigated and dryland wheat (*Triticum aestivum*) // N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 2008. V. 36. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1080/01140670809510216

109. Lyons G.H., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels // Plant Soil. 2005. V. 270. No. 1. P. 179–188. doi: 10.1007/s11104-004-1390-1

110. De Feudis M., D'Amato R., Businelli D., Guiducci M. Fate of selenium in soil: a case study in a maize (*Zea mays* L.) field under two irrigation regimes and fertilized with sodium selenite // Sci. Total Environ. 2019. V. 659. P. 131–139. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.200