



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 2 (56). Июнь, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 631.81

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ СЕЛЕНА В РАСТЕНИЯХ СВЕКЛЫ И МОРКОВИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ БИОФОРТИФИКАЦИИ ЙОДОМ И СЕЛЕНОМ

МАНГУТОВА ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, Анна Константиновна г. Тюмень, ул. Володарского, 6, annamangutova@gmail.com

СИНДИРЕВА доктор биологических наук, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6, sindireva72@mail.ru
Анна Владимировна

КОСОЛАПОВ ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, Радмир Маратович г. Тюмень, ул. Володарского, 6, stud0000265202@utmn.ru

Ключевые слова:
селен
биофортификация
свекла Бордо 237
морковь Витаминная 6
дерново-подзолистые
почвы
юг Тюменской области

Аннотация: В данном исследовании изучалось влияние биофортификации растений моркови (*Daucus carota*) и свеклы (*Beta vulgaris*) с использованием микроэлементов йода и селена, представленных в виде KI и Na₂SeO₃. Биофортификация проводилась двумя методами: фоллиарной обработкой (опрыскиванием) с концентрациями 0.005 % и 0.01 %, а также корневым внесением в дозировках 12 и 24 кг/га для селена и 6.5 и 13 кг/га для йода. Дополнительно было изучено сочетанное воздействие данных микроэлементов в концентрациях Na₂SeO₃ 12 кг/га + KI 6.5 кг/га и Na₂SeO₃ 24 кг/га + KI 13 кг/га для корневого внесения, Na₂SeO₃ 0.005 % + KI 0.005 % и Na₂SeO₃ 0.01 % + KI 0.01 % для фоллиарного опрыскивания. Результаты эксперимента показали, что основное внесение микроэлементов оказывало стимулирующее влияние на биометрические показатели растений моркови, тогда как у свеклы наблюдалось угнетающее воздействие, особенно при внесении йода. В большинстве вариантов с фоллиарной обработкой свеклы также отмечалось снижение биометрических показателей. Изучение накопления селена в растениях (ботве и корнеплодах) выявило ряд специфических закономерностей. У моркови максимальное содержание селена в ботве наблюдалось при фоллиарной обработке с концентрацией 0.01 %, где его уровень превышал контрольный в 31.9 раза. Сочетанное внесение селена и йода (Se + I) также способствовало значительному увеличению накопления селена в ботве – в 26 раз по сравнению с контролем. У свеклы наибольшее накопление селена в корнеплодах (в 12.2 раза) и ботве (в 16.2 раза) отмечалось при корневом внесении селена. При фоллиарной обработке с использованием комбинации Se + I (концентрация 0.005 %) накопление селена в корнеплодах и ботве увеличивалось в 12.9 и 10 раз соответственно по сравнению с контрольным вариантом. При этом содержание селена в сухой массе растений на контрольном варианте не

превышало у свеклы 0.9 мг/кг, у моркови – 0.5 мг/кг. Полученные результаты демонстрируют различия в эффективности методов биофортификации для различных культур. В отличие от ряда предыдущих исследований, где наблюдалась линейная зависимость между дозировкой микроэлементов и их накоплением в растениях, в данном эксперименте выявлены переменные эффекты в зависимости от метода внесения и концентрации микроэлементов. Для оптимизации биофортификации растений йодом и селеном необходимы дальнейшие исследования, направленные на уточнение наиболее эффективных методов и условий применения.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: В. В. Вапиров

Получена: 01 марта 2025 года

Подписана к печати: 21 июня 2025 года

Введение

Обогащение сельскохозяйственных культур микроэлементами, такими как селен и йод, является одной из актуальных задач современной агрономии и биологии. Это связано как с необходимостью повышения питательной ценности продуктов питания, так и с решением проблемы дефицита эссенциальных микроэлементов в организме человека. Селен, как известно, поступает в организм исключительно через пищу или биологически активные добавки, а его недостаток может приводить к серьезным последствиям для здоровья, включая снижение иммунитета, повышение риска сердечно-сосудистых заболеваний и даже онкологических процессов (Chen et al., 2023). В этой связи растения играют ключевую роль в цепи передачи селена от почвы к человеку.

Проведенные исследования на различных овощных культурах, таких как морковь (Rakozky-Lelek et al., 2021; Smolen et al., 2016), сельдерей, мангольд, редис и зеленый лук (Baset, 2024), продемонстрировали неоднозначные результаты в отношении эффективности биофортификации. Например, в экспериментах на моркови изучались различные сорта (Smolen et al., 2019), что позволило выявить различия в накоплении селена и йода в корнеплодах в зависимости от генотипа растений. Однако не во всех случаях применение удобрений с селеном и йодом оказывало значительное влияние на урожайность. В частности, иногда наблюдалось снижение урожая корнеплодов при внесении Na_2SeO_4 и Na_2SeO_3 (Голубкина и др., 2015), тогда как в другие годы показатели оставались стабильными. Это указывает на необходимость учета не только состава удобрений, но и погодных условий, типа почвы и других факторов.

Исследования на других овощах, таких как сельдерей, мангольд и редис (Baset, 2024), также показали вариативность результатов.

Различные методы внесения микроэлементов (корневое внесение, внекорневое опрыскивание) и использование различных соединений селена приводили к различным эффектам на биометрические показатели растений и содержание микроэлементов в съедобных частях. Это подчеркивает сложность процесса биофортификации и необходимость дальнейших исследований для оптимизации технологий.

Особое значение имеет изучение обогащения растений селеном в регионах с низким содержанием этого элемента в почвах. Например, в Тюменской области России отмечается дефицит селена в почвенном покрове (Синдирева и др., 2021). Это требует активного внедрения технологий биофортификации для обеспечения населения региона продуктами с достаточным содержанием селена. Подобный опыт был успешно реализован в Финляндии: начиная с 1985 г. применение удобрений с селеном позволило удвоить его потребление населением (Alfthan, Aro, 2005). Однако важно учитывать региональные особенности почвенно-климатических условий при разработке подобных программ.

Несмотря на значительные успехи в области биофортификации растений селеном и йодом, существует множество нерешенных вопросов, например:

- выбор метода применения микроэлементов (корневой или внекорневой), наиболее эффективного для определенных культур;
- разработка оптимальной дозы селена и йода для достижения максимального накопления микроэлементов без ущерба для урожайности и качества культур;
- оценка влияния генотипических особенностей растений на их способность к накоплению селена и йода.

Кроме того, необходимо учитывать экологическую безопасность таких методов. Избыточное внесение микроэлементов может

привести к их накоплению в окружающей среде и негативным последствиям для экосистем.

Результаты проведенных исследований согласуются с данными предыдущих работ (Hossain et al., 2021), подтверждающих эффективность биофортификации для увеличения содержания селена в растениях. Однако данное исследование уточняет влияние различных методов внесения микроэлементов и их комбинаций на конкретные овощные культуры. Таким образом, работа вносит важный вклад в развитие технологий обогащения растений.

В будущем требуется продолжение исследований для оценки долгосрочного влияния биофортификации на урожайность, качество продукции и здоровье потребителей. Важно также разработать регионально адаптированные технологии обогащения растений микроэлементами для обеспечения их максимальной эффективности и экологической безопасности.

Цель работы – оценить влияние различных методов биофортификации йодом и селеном на биометрические показатели растений свеклы и моркови, а также содержание селена в их ботве и корнеплодах.

Материалы

В статье использованы материалы биометрических измерений и химического анализа столовой свеклы Бордо 237 и моркови Витаминной 6, выращенных на дерново-подзолистых почвах юга Тюменской области. Микрополевой опыт проводился на научной базе Тюменского государственного университета «Озеро Кучак» в Нижнетавдинском районе Тюменской области.

Климат Нижнетавдинского района Тюменской области является умеренно-континентальным, с холодной продолжительной зимой и теплым, относительно коротким летом. За вегетационный период средняя температура воздуха составляла 18.1 °С. Минимальное значение – 4 °С (28 августа и 7

сентября). Максимальное значение – 37 °С (3 июня, 11 июля, 12 июля). Среднее значение атмосферного давления, приведенное к среднему уровню моря, составило 758.1 мм рт. ст. Средний показатель относительной влажности – 67 %.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая, образована в условиях умеренно-континентального климата при избыточном увлажнении и вымывании питательных веществ. Почва участка слабо-кислая (рН = 5.87), среднесуглинистая. Содержание нитратного азота 10.5 мг/кг, подвижных соединений калия 226 мг/кг, подвижных соединений фосфора >250 мг/кг, сумма поглощенных оснований 15.8 ммоль/100 г, содержание гумуса 3.8–4.5 %. Содержание селена в почве до посева составляло 0.16 мг/кг.

Методы

В начале мая 2023 г. был заложен микрополевой опыт с целью изучения эффективности методов биофортификации селеном и йодом. Уборка урожая была произведена в середине сентября 2023 г. Участок был разделен на две части для применения различных методов биофортификации: фолиарная обработка (опрыскивание) на стадии вегетации 6–8 листьев и корневое (основное) внесение солей селена и йода в почву перед посевом.

Селен вносили в форме селенита натрия (Na_2SeO_3) в двух дозах: 24 кг/га и 12 кг/га при корневом внесении и при опрыскивании 0.01 % Se и 0.005 % Se. Йод вносили в форме йодида калия (KI) также в двух дозах: 13 кг/га и 6.5 кг/га при корневом внесении и при опрыскивании 0.01 % I и 0.005 % I. Подбор и выбор дозировок микроэлементов был осуществлен на основе предыдущих опытов исследователей с этими же микроэлементами без учета сочетанного действия селена и йода (Sindireva et al., 2023; Степанова и др., 2020). Площадь делянки 1 м². Повторность каждого варианта 3-кратная. Опыт заложен по следующей схеме:

Вариант	Корневое внесение, доза микроэлемента	Фолиарная обработка, концентрация микроэлемента
1	Контроль	Контроль
2	Na_2SeO_3 12 кг/га	Na_2SeO_3 0.005 %
3	KI 6.5 кг/га	KI 0.005 %
4	Na_2SeO_3 12 кг/га + KI 6.5 кг/га	Na_2SeO_3 0.005 % + KI 0.005 %
5	KI 13 кг/га	KI 0.01 %
6	Na_2SeO_3 24 кг/га	Na_2SeO_3 0.01 %
7	Na_2SeO_3 24 кг/га + KI 13 кг/га	Na_2SeO_3 0.01 % + KI 0.01 %

Закладка опытов и их проведение осуществлялись в соответствии с Методикой полевого опыта (Доспехов, 1985). Исследования проводились на опытных делянках с соблюдением принципов повторности, рандомизации и систематического контроля условий выращивания. Особое внимание уделялось учету биометрических показателей, которые являются ключевыми для оценки роста и развития растений, а также их продуктивности. Для измерений отбирались растения из центральной части делянки, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Количество растений для учета составляло 12 экземпляров на каждую повторность. Биометрические замеры проводились в трехкратной повторности для повышения достоверности данных, в строго определенный срок, соответствующий фазе технической спелости, чтобы обеспечить сопоставимость результатов. Растения выкапывались вручную из почвы с минимальным повреждением корнеплода и ботвы. Сначала измерялась общая масса растения, затем отдельно масса корнеплода и масса ботвы. Для точности измерений использовались лабораторные весы с точностью до 0.01 г. Длина корнеплода измерялась от основания до кончика (максимальная продольная ось). Длина ботвы измерялась от основания корнеплода до верхушки самого длинного листа. Измерения проводились с использованием измерительной линейки с точностью до 1 мм. Диаметр измерялся в самой широкой части корнеплода с использованием штангенциркуля. Подготовка проб для химического анализа проводилась согласно ГОСТ РЕН 13804–2010. Содержание селена в почве и растительных образцах определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по УФО» по Тюменской области с использованием метода спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11–98 (Количественный химический анализ..., 2005). Метод заключается в возбуждении атомов и ионов анализируемых элементов в высокотемпературной индуктивно-связанной плазме, а затем измерении излучения света, испускаемого этими атомами и ионами на определенных длинах волн. Каждая длина волны соответствует определенному элементу, что позволяет количественно определить его содержание. Математическая обработка полученных данных осуществлялась с применением стандартных статистических методов с использованием программного пакета MS Excel.

Во всех процедурах статистического анализа рассчитывали достигнутый уровень значимости (p), при этом критическим уровнем значимости принимали $p \leq 0.05$.

Результаты

При исследовании биометрических показателей были измерены следующие параметры: масса ботвы и корнеплода, длина ботвы и корнеплода, диаметр корнеплода (рис. 1).

Морковь. В проведенном исследовании преимущественно стимулирующее действие микроэлементов на биометрические показатели растений отмечены у моркови при основном внесении. Наибольшие показатели по массе ботвы и ее длине, по массе корнеплода, его длине и диаметру отмечены на варианте «Se 24 кг/га + I 13 кг/га», они превышали уровень контроля на 58.33, 11.63, 95.26, 15.20 и 27.27 % соответственно.

Согласно данным рис. 1, на варианте «I 13 кг/га» стимулирующее действие микроэлемента было отмечено в отношении показателей массы ботвы и корнеплода, его длины и диаметра на 33.33, 64.82%, 13.60 и 18.18 % больше контрольного варианта соответственно. На варианте «Se 12 кг/га» масса корнеплода и его диаметр превышали на 44.66 и 13.64 % эти же показатели на контрольном варианте. При увеличении дозы на варианте «Se 24 кг/га» показатели массы ботвы и корнеплода, его диаметра были больше на 20.83, 90.12 и 13.64 %, чем на контрольном варианте. Масса ботвы и корнеплода варианта «Se 12 кг/га + I 6.5 кг/га» была больше на 49.17 и 19.76 % контрольного варианта. При основном внесении угнетающий эффект был отмечен лишь на варианте «I 13 кг/га» по массе ботвы на 38.33 % относительно этого же показателя контрольного варианта.

У моркови при опрыскивании отмечено меньше стимулирующих действий микроэлементов на биометрические показатели растений. Наиболее стимулирующее действие отмечено на варианте «Se + I 0.005 %», здесь показатели массы ботвы и корнеплода, его диаметра больше на 20.67, 20.60 и 16.67 %, чем на контрольном варианте, однако по длине ботвы зафиксирован угнетающий эффект на 21.78 %. При применении опрыскивания отмечено больше угнетающих эффектов по массе ботвы и корнеплодов на следующих вариантах: «Se + I 0.005 %» на 46.00 и 34.22 %; «Se + I 0.01 %» на 52.00 и 37.54 %; «Se 0.01 %» на 22.00 и 24.25 %; «I

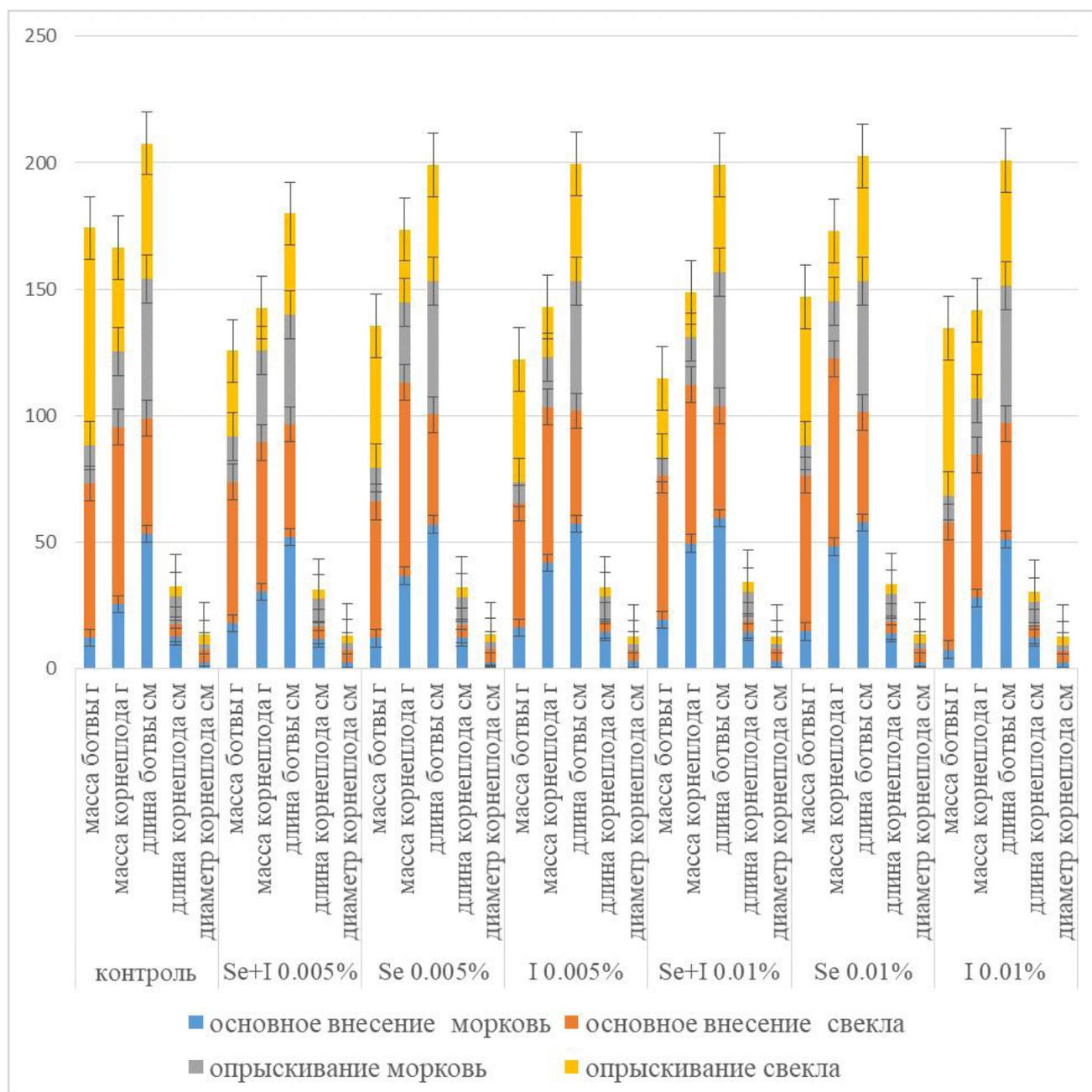


Рис. 1. Биометрические параметры корнеплодов при биофортификации селеном и йодом разными методами

Fig. 1. Biometric parameters of root crops under biofortification with selenium and iodine by different methods

0.01 %» на 29.33 и 25.91 %.

Свекла. При основном внесении микроэлементов было отмечено угнетающее действие на массу ботвы и корнеплодов растений свеклы на варианте: «I 6.5 кг/га» на 19.31 и 12.00 %; «I 13 кг/га» на 17.51 и 19.14 % относительно тех же показателей контрольного варианта. Угнетающее действие на массу корнеплода отмечено на варианте «Se 12 кг/га + I 6.5» на 15.71 % и на массу ботвы на варианте «Se 12 кг/га» на 11.78 % относительно контрольных растений.

Угнетающих эффектов на биометрические показатели было зафиксировано больше при опрыскивании, чем при основном внесении. Так, на вариантах «Se + I 0.005 %» и «I 0.005 %» было зафиксировано угнетение всех биометрических показателей: массы ботвы на 60.86 и 43.44 %, массы корнеплода на 58.39 и 51.82 %, длины ботвы на 25.14 и 13.59 %, длины корнеплода на 17.07 и 12.20 %, диаметра корнеплода на 18.42 и 21.05 % соответственно. На варианте «Se + I 0.01 %» угнетение зафиксировано по четы-

рем показателям: масса ботвы на 63.65 %, масса корнеплода на 59.93 %, длина ботвы на 20.86 % и диаметр корнеплода на 21.05 %. На вариантах «Se 0.005 %» и «Se 0.01 %» угнетение зафиксировано по двум одинаковым биометрическим показателям: масса ботвы на 34.84 и 31.59 %, масса корнеплода на 30.17 и 32.60 %. Так же на варианте «Se 0.005 %» зафиксировано угнетение длины ботвы на 14.71 %, а на варианте «Se 0.01 %» угнетение диаметра корнеплода на 13.16 % соответственно относительно контрольного варианта. На варианте «I 0.01 %» отмечено угнетение только по двум параметрам: масса ботвы на 23.23 % и масса корнеплода на 15.09 %.

Разные методы биофортификации растений микроэлементами продемонстрировали неоднородные результаты по биометрическим показателям. При основном внесении более стимулирующий эффект микроэлементов на исследуемые биометрические показатели отмечен у растений моркови; при этом же методе зафиксированы угнетающие эффекты на некоторые показатели растений свеклы. При опрыскивании у растений моркови отмечены как положительные эффекты, так и отрицательные, тогда как у растений свеклы – только отрицательные эффекты на всех вариантах.

Методы биофортификации могут оказывать как стимулирующее, так и угнетающее влияние на ростовые характеристики растений в зависимости от вида культуры и способа внесения микроэлементов. При этом эффективность накопления селена в тканях растений не всегда коррелирует с биометрическими параметрами. Например, у столовой свеклы некорневое внесение оказалось более результативным для накопления селена, несмотря на угнетающий эффект на биометрические показатели. Так, в проведенном исследовании было установлено, что наибольшее накопление селена в ботве и корнеплодах столовой свеклы наблюдается при некорневом внесении по сравнению с основным внесением в почву (рис. 2).

Это свидетельствует о более эффективном применении данного метода биофортификации. При этом на вариантах с отдельным внесением йода отмечено снижение накопления селена по сравнению с контрольной группой. В данном случае это может быть связано как с явлением антагонизма, так и с синергизмом в паре «селен – йод», влиянием йода на антиоксидантную систему растений, что может уменьшать их потреб-

ность в селене. Так, в последних исследованиях выявлено влияние йода на экспрессию генов, кодирующих стресс-регулирующие белки, что может снижать потребность растений в селене как антиоксиданте (Kiferle et al., 2021).

Максимальное накопление селена при опрыскивании как в ботве, так и в корнеплодах свеклы зафиксировано на варианте «Se + I» в концентрации 0.005 %, что в 10.0 и 12.9 раза больше контрольного варианта. При увеличении концентрации до 0.01 % содержание селена выше в 4.5 и 6.3 раза контрольного варианта, что может быть связано с ингибирующим эффектом избыточных концентраций микроэлементов на их накопление в растениях. На вариантах с отдельным внесением «Se 0.005 %» и «Se 0.01 %» выявлена тенденция к снижению содержания селена в ботве при увеличении дозы, тогда как в корнеплодах наблюдается противоположная зависимость. Наибольшее накопление селена при корневом внесении отмечено на варианте «Se 24 кг/га» что в 12.2 раза больше, чем в корнеплодах и в 16.2 раза больше, чем в ботве растений контрольного варианта. В то же время при отдельном внесении йода отмечено большее накопление селена: в 2.4 раза в корнеплодах и в 3.9 раза в ботве по сравнению с контрольным вариантом, что указывает на возможные синергетические взаимодействия между йодом и селеном на этапе поглощения растениями. При корневом внесении Se с увеличением дозы с 12 до 24 кг/га также увеличивается содержание селена в ботве, что больше в 16.2 раза, и корнеплодах – в 12.2 раза относительно контрольного варианта. Однако более высокое накопление селена отмечено при отдельном внесении селена по сравнению с сочетанным внесением Se и I. В отличие от предыдущего синергетического взаимодействия здесь может быть отмечено конкурирующее взаимодействие микроэлементов между йодом и селеном в процессе поглощения и транспорта, а также с возможным влиянием йода на микробиологическую активность почвы или ее pH, что может косвенно влиять на доступность селена для растений. Кроме того, йод может активировать антиоксидантные ферменты через экспрессию генов, кодирующих стресс-регулирующие белки растений, что снижает уровень окислительного стресса. В этом случае растения могут меньше нуждаться в селене как антиоксиданте, что объясняет снижение его накопления (Kiferle et al., 2021; Blasco et al., 2013).

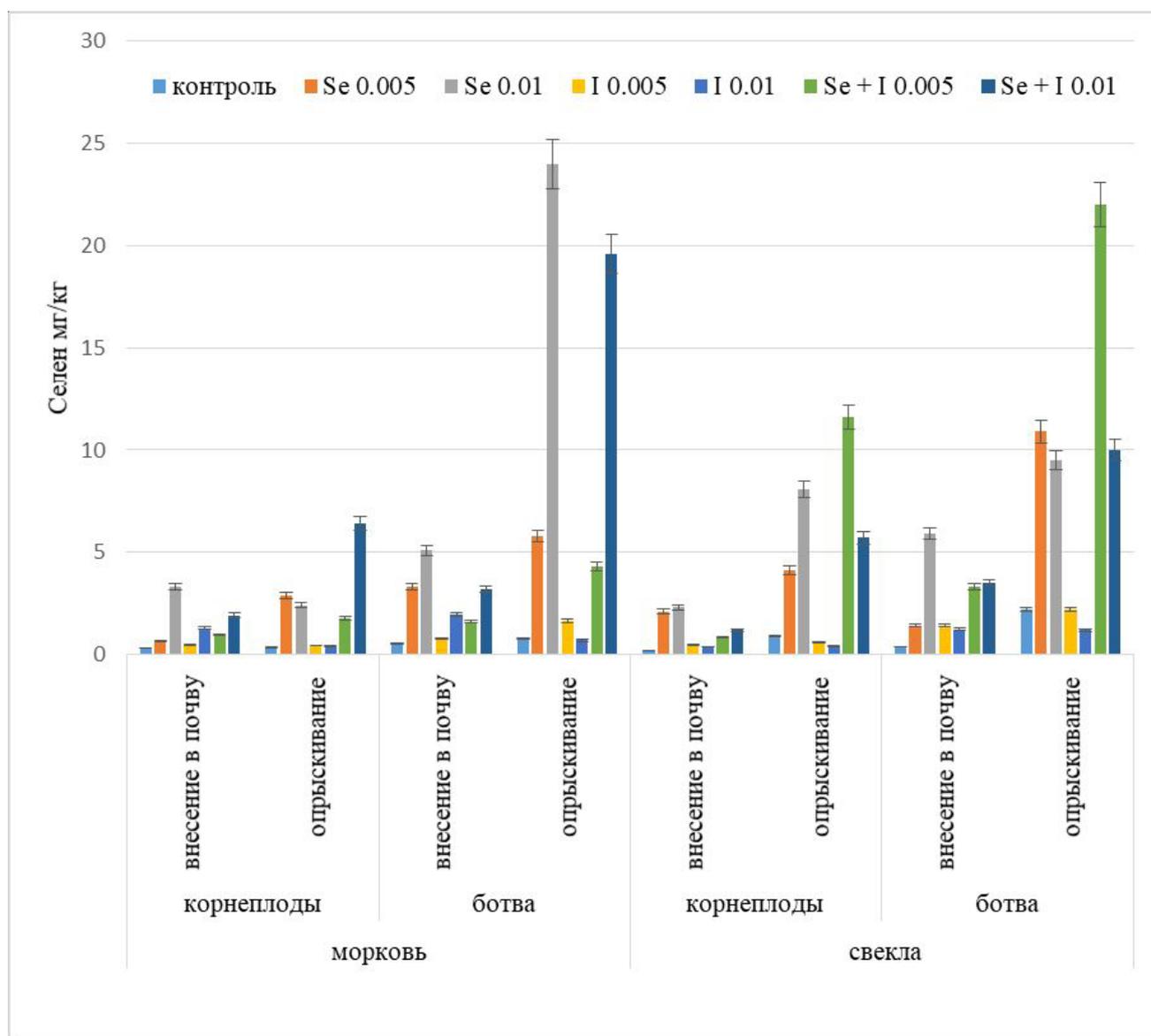


Рис. 2. Содержание селена в ботве и корнеплодах растений при разных методах биофортификации

Fig. 2. Selenium content in haulm and root crops of plants under different biofortification methods

Из-за генетических различий между морковью и свеклой процессы накопления селена в ботве и корнеплодах этих растений протекают по-разному. Однако прослеживаются некоторые закономерности накопления селена в растениях при внесении различных концентраций солей микроэлементов. Наибольшее содержание селена в растениях моркови наблюдается на вариантах «Se + I 0.01 %» для корнеплодов, что в 18.3 раза больше контрольного варианта, и «Se 0.01 %» для ботвы при опрыскивании, что в 31.9 раза больше контрольного варианта. Отмечается тенденция к большему накоплению селена в ботве при опрыскивании по сравнению с основным внесением в почву.

Аналогичная тенденция отмечена и в надземной части растений при опрыскивании по сравнению с внесением в почву. При отдельном внесении йода, как методом основного внесения в почву, так и опрыскиванием, наблюдается увеличение содержания селена в надземной части и корнеплодах по сравнению с растениями контрольного варианта. Это может свидетельствовать о синергетических взаимодействиях микроэлементов, влияющих как на процесс поглощения микроэлементов растениями, так и на косвенные факторы, такие как изменение pH и микробиологическое состояние почвы.

При изолированном действии Se в дозе 0.005 % по сравнению с сочетанным приме-

нением Se + I в той же концентрации наблюдается более высокое содержание селена в надземной части и корнеплодах, что может указывать на антагонистические взаимодействия между этими микроэлементами и ингибирование поглощающей способности селена растениями. В условиях высоких доз «Se 24 кг/га» и «Se 24 кг/га + I 13 кг/га» наблюдается аналогичная картина при основном внесении в почву. Однако при опрыскивании накопление селена выше в корнеплодах при сочетанном действии с йодом, чем при отдельном внесении, что может указывать на избыточные поступления микроэлементов в растения и их угнетение.

Обсуждение

Несмотря на применение различных методов биофортификации для обеих культур, основным местом аккумуляции селена оказалась надземная часть растений – ботва, а не корнеплоды. Преимущественную аккумуляцию селена в листьях можно объяснить несколькими факторами: после поглощения корнями селен транспортируется вверх по ксилеме, что способствует его перемещению к листьям. Он поглощается в виде ионов селената или селенита, которые легко транспортируются и могут превращаться в менее подвижные органические соединения, такие как селенометионин, в листьях. Листья, как основное место фотосинтеза и метаболической активности, способствуют накоплению селена из-за интенсивного преобразования веществ. Кроме того, селен может выполнять защитные функции против стрессов, таких как ультрафиолетовое излучение или патогены, что делает его большое накопление особенно важным в листьях. Транспорт селена обратно в корни или другие части растения может быть ограничен, особенно если органические формы селена менее подвижны в флоэме. Когда селен применяется в виде опрыскивания, он непосредственно попадает на поверхность листьев и быстро поглощается через кутикулу и устьица. Листья, как основное место метаболической активности и фотосинтеза, обладают высокой способностью к поглощению и преобразованию селена. Кроме того, поскольку опрыскивание осуществляется непосредственно на листья, большая часть селена остается и аккумулируется в них (Duborská et al., 2022; Молдован и др., 2022; Hossain et al., 2021; Smolen, 2019).

В исследованиях (Smolen, 2016) подтверждаются данные о накоплении селена в

растениях моркови при отдельном внесении I. Однако есть и противоречащие данные о накоплении селена при отдельном внесении Se и сочетанном Se + I, так, в нашем исследовании при низких дозировках на вариантах Se + I наблюдается меньшее накопление микроэлемента, чем на варианте с Se. Тогда как для свеклы такой эффект наблюдается только при повышенных дозах Se и Se + I, а на вариантах с меньшими дозами обратный эффект, когда накопление селена в растениях на варианте Se + I больше, чем на Se. В исследовании (Rakozky-Lelek et al., 2021) представлена прямая зависимость накопления селена от внесенных дозировок: чем больше дозировка микроэлементов, тем больше накопление селена в ботве и корнеплодах, подтверждаются данные о синергетическом взаимодействии Se + I и большее накопление микроэлемента в растениях, чем при отдельном внесении.

В целом результаты нашего исследования подтверждают сложный характер накопления селена в растениях в зависимости от культуры, метода биофортификации и сочетания микроэлементов. Наблюдаемая тенденция к накоплению селена в надземной части растений, особенно в листьях, согласуется с физиологическими и биохимическими особенностями транспорта и метаболизма этого микроэлемента. Однако различия между культурами (морковью и свеклой) подчеркивают необходимость более глубокого изучения механизмов взаимодействия селена с другими микроэлементами, такими как йод, а также влияния дозировок на эффективность их усвоения.

Морковь, как показали наши данные, обладает более низкой способностью к накоплению селена по сравнению со свеклой. Это может быть связано как с особенностями анатомического строения корнеплодов, так и с различиями в метаболической активности тканей. Важно отметить, что основной аккумуляцией селена отличается ботва, что подтверждается как нашими экспериментальными данными, так и результатами других исследований (Duborská et al., 2022; Smolen et al., 2016). Этот факт имеет важное значение для практической агрономии, поскольку ботва часто остается неиспользуемой частью урожая, тогда как обогащение корнеплодов селеном имеет более высокую ценность для питания человека.

Синергетическое или антагонистическое взаимодействие селена и йода при их сочетанном применении требует особого вни-

мания. В нашем исследовании выявлены интересные закономерности: для моркови при низких дозировках сочетание Se + I приводит к меньшему накоплению селена по сравнению с его отдельным внесением, тогда как для свеклы при низких дозах наблюдается противоположный эффект. При высоких дозировках микроэлементов для свеклы проявляется снижение накопления селена при их сочетанном внесении. Эти результаты указывают на сложный характер взаимодействия микроэлементов в зависимости от дозировки и культуры растений. Исследование (Rakozky-Lelek et al., 2021) подтверждает прямую зависимость накопления селена от дозировки, а также синергетический эффект Se + I при определенных условиях. Однако наши данные показывают, что эта зависимость может быть нелинейной и варьироваться в зависимости от культуры и метода биофортификации.

Заключение

В ходе исследования была изучена эффективность различных методов биофортификации сельскохозяйственных культур селеном и йодом на морковь и свеклу, в частности на их биометрические показатели и накопление селена.

Морковь:

- Основное внесение микроэлементов оказало преимущественно стимулирующее действие на биометрические показатели. Наиболее эффективным оказался вариант «Se 24 кг/га + I 13 кг/га», где показатели массы ботвы, массы, длины и диаметра корнеплода превысили контрольный вариант на 58.33, 95.26, 15.20 и 27.27 % соответственно.

- Опрыскивание показало меньшее стимулирующее действие и больше угнетающих эффектов на рост и развитие растений. Наиболее благоприятный результат зафиксирован на варианте «Se + I 0.005 %» (увеличение массы ботвы и корнеплода на 20.67 и 20.60 %), однако отмечено снижение длины ботвы на 21.78 %.

Свекла:

- При основном внесении микроэлементов преобладало угнетающее действие на рост и развитие растений. Наибольшее снижение массы ботвы и корнеплода отмечено на вариантах «I 6.5 кг/га» (на 19.31 и 12 %) и «I 13 кг/га» (на 17.51 и 19.14 %).

- Опрыскивание вызвало более выраженное угнетение всех биометрических показателей. На вариантах «Se + I 0.005 %» и «I 0.005 %» масса ботвы снизилась на 60.86

и 43.44 %, масса корнеплода – на 58.39 и 51.82 %.

Общие выводы:

- Морковь положительно реагирует на основное внесение микроэлементов, особенно на комбинацию «Se 24 кг/га + I 13 кг/га».

- Свекла проявляет высокую чувствительность к микроэлементам с преобладанием угнетающего эффекта, особенно при опрыскивании.

- Для моркови рекомендуется основное внесение микроэлементов, а для свеклы требуется дальнейшая оптимизация дозировок и методов внесения. На процессы аккумуляции селена влияют следующие факторы:

Накопление селена при различных методах внесения:

- Некорневое внесение (опрыскивание) оказалось более эффективным методом биофортификации селеном, чем основное внесение в почву. Это подтверждается значительным увеличением содержания селена как в ботве, так и в корнеплодах столовой свеклы.

- Максимальное накопление селена при опрыскивании наблюдалось на варианте «Se + I 0.005 %», где содержание микроэлемента превысило контрольный вариант в 10.0 раз в ботве и в 12.9 раза в корнеплодах. Однако увеличение концентрации до 0.01 % привело к снижению содержания селена, что указывает на возможный ингибирующий эффект высоких доз микроэлементов на их накопление в растениях.

- При корневом внесении максимальное накопление селена зафиксировано на варианте «Se 24 кг/га», где содержание селена в ботве увеличилось в 16.2 раза, а в корнеплодах – в 12.2 раза по сравнению с контрольным вариантом.

Влияние йода на накопление селена:

- На вариантах с отдельным внесением йода наблюдалось снижение содержания селена по сравнению с контролем. Это может быть связано с влиянием йода на антиоксидантную систему растений, что снижает их потребность в селене.

- При сочетанном внесении Se и I отмечено конкурирующее взаимодействие между микроэлементами, что могло ограничивать поглощение и транспорт селена растениями. Это проявилось в меньшем накоплении селена по сравнению с вариантами с отдельным внесением селена.

- При корневом внесении йода выяв-

лено большее накопление селена (в 2.4 раза в корнеплодах и в 3.9 раза в ботве) по сравнению с контрольным вариантом. Это указывает на возможность синергетического взаимодействия между йодом и селеном на этапе поглощения растениями.

Дозозависимые эффекты:

- При некорневом внесении увеличение концентрации Se с 0.005 до 0.01 % приводило к снижению содержания селена как в ботве, так и в корнеплодах. Это может быть связано с угнетающим действием избыточных концентраций микроэлементов.

- В случае корневого внесения увеличение дозы Se привело к росту содержания селена как в ботве (в 16.2 раза больше контроля), так и в корнеплодах (в 12.2 раза больше контроля), что свидетельствует о положительном влиянии повышенных доз при данном способе внесения.

Библиография

- Синдирева А. В., Котченко С. Г., Гурьев Н. Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38.
- Голубкина Н. А., Кекина Е. Г., Надежкин С. М. Перспективы обогащения сельскохозяйственных растений йодом и селеном (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2015. Т. 16, № 3. С. 12–19.
- Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) . 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98 . М., 1998 (издание 2005). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf>
- Молдован А. И., Харченко В. А., Голубкина Н. А., Кекина Е. Г., Карузо Д. Внекорневое обогащение кривея селеном и йодом на фоне использования микроудобрения Силиплант, содержащего кремний // Овощи России. 2022. Т. 2. С. 57–64.
- Степанова О. В., Синдирева А. В., Вешкурцева С. С., Вранеско В. С. Экологическая оценка действия йода на начальные показатели роста и развития зерновых культур // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 33–38.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Карапетян Т. А., Доршакова Н. В., Тарасова В. Н. Роль селена в жизнедеятельности растений, животных и человека // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 5. С. 443–456.
- Alfthan G., Aro A. Environmental effects of selenium fertilization – Is there a potential risk? // Proc. "Twenty Years of selenium Fertilization" Is Here a potential risk? Proc. "Twenty Years of selenium Fertilization" – sept. 8–9. Helsinki, 2005. P. 33–35.
- Blasco B., Leyva R., Romero L., Ruiz J. M. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress // J. Agric. Food Chem. 2013. Vol. 61 (11). P. 2591–2596.
- Chen Z., Lu Y., Dun X., Wang X., Wang H. Research Progress of Selenium-Enriched Foods // Nutrients. 2023. Vol. 15 (19). P. 4189.
- Duborska E., Sebesta M., Matulova M., Zverina O., & Urik M. Current Strategies for Selenium and Iodine Biofortification in Crop Plants // Nutrients. 2022. Vol. 14 (22). P. 4717.
- Hossain A., Skalicky M., Brestic M., et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects // Molecules. 2021. Vol. 26 (4). P. 881.
- Kiferle C., Martinelli M., Salzano A. M., et al. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants // Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 616868.
- Rakoczy-Lelek R., Smoleń S., Grzanka M., et al. Effectiveness of Foliar Biofortification of Carrot With Iodine and Selenium in a Field Condition // Front Plant Sci. 2021. Vol. 12. P. 656283. DOI: 10.3389/fpls.2021.656283
- Sindireva A., Golubkina N., Bezuglova H., Fedotov M., Alpatov A., Erdenotsogt E., Şekara A., Murariu O. C., Caruso G. Effects of High Doses of Selenate, Selenite and Nano-Selenium on Biometrical Characteristics, Yield and Biofortification Levels of *Vicia faba* L. Cultivars // Plants. 2023. Vol. 12

(15). P. 2847.

Smoleń S., Baranski R., Ledwożyw-Smoleń I., Skoczylas Ł., Sady W. Combined biofortification of carrot with iodine and selenium // Food Chem. 2019. Vol. 300. P. 125202. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125202

Smoleń S., Skoczylas Ł., Ledwożyw-Smoleń I., et al. Biofortification of Carrot (*Daucus carota* L.) with Iodine and Selenium in a Field Experiment // Front Plant Sci. 2016. Vol. 7. P. 730. DOI: 10.3389/fpls.2016.00730

BIOMETRIC INDICES AND SELENIUM CONTENT IN BEET AND CARROT PLANTS USING DIFFERENT METHODS OF BIOFORTIFICATION WITH IODINE AND SELENIUM

MANGUTOVA
Anna Konstantinovna

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Tyumen State University”, 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, annamangutova@gmail.com

SINDIREVA
Anna Vladimirovna

D.Sc., Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Tyumen State University”, 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, sindireva72@mail.ru

KOSOLAPOV
Radmir Maratovich

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Tyumen State University”, 6 Volodarsky St. Tyumen Russia 625003, stud0000265202@utmn.ru

Keywords:

selenium
biofortification
Bordeaux 237 beets
Vitaminsnaya 6 carrots
sod-podzolic soils
south of the Tyumen Region

Summary: The effect of biofortification of carrot (*Daucus carota*) and beet (*Beta vulgaris*) plants was investigated using trace elements of iodine and selenium presented as KI and Na_2SeO_3 . Biofortification was carried out by two methods: foliar treatment (spraying) with concentrations of 0.005 % and 0.01 %, as well as root application in dosages of 12 and 24 kg/ha for selenium and 6.5 and 13 kg/ha for iodine. Additionally, the combined effects of these micronutrients were studied at concentrations of Na_2SeO_3 12 kg/ha + KI 6.5 kg/ha and Na_2SeO_3 24 kg/ha + KI 13 kg/ha for root application, and Na_2SeO_3 0.005 % + KI 0.005 % and Na_2SeO_3 0.01 % + KI 0.01 % for foliar spraying. The experimental results showed that the main application of micronutrients had a stimulating effect on the biometric parameters of carrot plants, whereas beet plants showed a depressing effect, especially when iodine was applied. In most variants with foliar processing of beet plants, a decrease in biometric indicators was also noted. The study of selenium accumulation in plants (tops and root crops) revealed a number of specific patterns. In carrots, the maximum selenium content in tops was observed during foliar treatment with a concentration of 0.01 %, where its level exceeded the control level by 31.9 times. Combined application of selenium and iodine (Se + I) also contributed to a significant increase in selenium accumulation in the tops – by 26 times compared with the control. In beets, the highest accumulation of selenium in root crops (12.2 times) and tops (16.2 times) was observed with root application of selenium. In foliar treatment using a combination of Se + I (concentration 0.005 %) the accumulation of selenium in root crops and tops increased by 12.9 and 10 times, respectively, compared with the control variant. At the same time, the selenium content in the dry mass of plants in the control variant did not exceed 0.9 mg/kg in beets and 0.5 mg/kg in carrots. The obtained results demonstrate the differences in the efficiency of biofortification methods for different crops. In contrast to a number of previous studies, where a linear relationship was observed between the dosage of micronutrients and their accumulation in plants, this experiment revealed variable effects depending on the method of application and concentration of micronutrients. To optimize biofortification of plants with iodine and selenium, further studies are needed to clarify the most effective methods and conditions of application.

Reviewer: V. V. Vapirov

Received on: 01 March 2025

Published on: 21 June 2025

References

- Alfthan G., Aro A. Environmental effects of selenium fertilization – Is there a potential risk?, Proc. «Twenty Years of selenium Fertilization» Is Here a potential risk? Proc. «Twenty Years of selenium Fertilization» – sept. 8–9. Helsinki, 2005. P. 33–35.
- Blasco B., Leyva R., Romero L., Ruiz J. M. Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress, *J. Agric. Food Chem.* 2013. Vol. 61 (11). P. 2591–2596.
- Chen Z., Lu Y., Dun X., Wang X., Wang H. Research Progress of Selenium-Enriched Foods, *Nutrients*. 2023. Vol. 15 (19). P. 4189.
- Dosphehov B. A. Methodology of field experiment (with basics of statistical processing of research results). 5-e izd., dop. i pererab. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p.
- Duborska E., Sebesta M., Matulova M., Zverina O., & Urik M. Current Strategies for Selenium and Iodine Biofortification in Crop Plants, *Nutrients*. 2022. Vol. 14 (22). P. 4717.
- Golubkina N. A. Kekina E. G. Nadezhkin S. M. Prospects of agricultural plants biofortification with iodine and selenium (review), *Mikroelementy v medicine*. 2015. T. 16, No. 3. P. 12–19.
- Hossain A., Skalicky M., Brestic M., et al. Selenium Biofortification: Roles, Mechanisms, Responses and Prospects, *Molecules*. 2021. Vol. 26 (4). P. 881.
- Kiferle C., Martinelli M., Salzano A. M., et al. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants, *Front Plant Sci.* 2021. Vol. 12. P. 616868.
- Methodology for Measurements of Metal Content in Solid Objects by Inductively Coupled Plasma Spectrometry. M., 1998 (izdanie 2005). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf>
- Moldovan A. I. Harchenko V. A. Golubkina N. A. Kekina E. G. Karuzo D. Foliar biofortification of chervil with selenium and iodine under silicon containing fertilizer supply, *Ovoschi Rossii*. 2022. T. 2. P. 57–64.
- Rakoczy-Lelek R., Smoleń S., Grzanka M., et al. Effectiveness of Foliar Biofortification of Carrot With Iodine and Selenium in a Field Condition, *Front Plant Sci.* 2021. Vol. 12. P. 656283. DOI: 10.3389/fpls.2021.656283
- Sindireva A. V. Kotchenko S. G. Gur'ev N. E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region, *Problemy regional'noy ekologii*. 2021. No. 3. P. 32–38.
- Sindireva A., Golubkina N., Bezuglova H., Fedotov M., Alpatov A., Erdenotsogt E., Sękara A., Murariu O. C., Caruso G. Effects of High Doses of Selenate, Selenite and Nano-Selenium on Biometrical Characteristics, Yield and Biofortification Levels of *Vicia faba* L. Cultivars, *Plants*. 2023. Vol. 12 (15). P. 2847.
- Smoleń S., Baranski R., Ledwożyw-Smoleń I., Skoczylas Ł., Sady W. Combined biofortification of carrot with iodine and selenium, *Food Chem.* 2019. Vol. 300. P. 125202. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125202
- Smoleń S., Skoczylas Ł., Ledwożyw-Smoleń I., et al. Biofortification of Carrot (*Daucus carota* L.) with Iodine and Selenium in a Field Experiment, *Front Plant Sci.* 2016. Vol. 7. P. 730. DOI: 10.3389/fpls.2016.00730
- Stepanova O. V. Sindireva A. V. Veshkurceva S. S. Vranesko V. S. Environmental assessment of iodine for initial cereal growth and development, *Problemy regional'noy ekologii*. 2020. No. 2. P. 33–38.
- Titov A. F. Kaznina N. M. Karapetyan T. A. Dorshakova N. V. Tarasova V. N. The Role of Selenium in the Life of Plants, Animals and Human, *Uspehi sovremennoy biologii*. 2021. T. 141, No. 5. P. 443–456.