

Оригинальные статьи / Original articles

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-2-57-64>
УДК 635.782:631.81.095.337:581.19

А.И. Молдован^{1*}, В.А. Харченко¹,
Н.А. Голубкина¹, Е.Г. Кекина², Д. Карузо³

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр овощеводства" (ФГБНУ ФНЦО) 143072, РФ, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д.14

² Медицинская академия постдипломного образования Москва, 123995, Россия

³ Неаполитанский государственный университет им. Федерико II 80055, Неаполь, Италия

*Адрес для переписки: nastiamoldovan@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: А.И. Молдован, В.А. Харченко, Н.А. Голубкина, Д. Карузо – разработка задач исследования, статистическая обработка результатов и написание статьи, Е.Г. Кекина – аналитические исследования и написание статьи.

Для цитирования: Молдован А.И., Харченко В.А., Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Карузо Д. Внекорневое обогащение кривеля селеном и йодом на фоне использования микроудобрения Силиплант, содержащего кремний. *Овощи России*. 2022;(2):57-64. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-2-57-64>

Поступила в редакцию: 23.03.2022

Принята к печати: 05.04.2022

Опубликована: 25.04.2022

Anastasia I. Moldovan^{*}, Viktor A. Kharchenko¹,
Nadezhda A. Golubkina¹, Elena D. Kekina²,
Gianluca Caruso³

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Vegetable Center (FSBSI FSVC) 14, Seleccionnaya str., VNISSOK, Odintsovo district, Moscow region, 143072, Russian Federation

² Department of Hygiene, Medical Postgraduate Academy 123995 Moscow, Russia

³ Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II 80055 Portici, Naples, Italy

*Correspondence: nastiamoldovan@mail.ru

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Author contributions: All authors reviewed and agreed to the published version of the manuscript.

For citations: Moldovan A.I., Kharchenko V.A., Golubkina N.A., Kekina E.D., Caruso G. Foliar bio-fortification of chervil with selenium and iodine under silicon containing fertilizer supply. *Vegetable crops of Russia*. 2022;(2):57-64. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-2-57-64>

Received: 23.03.2022

Accepted for publication: 05.04.2022

Published: 25.04.2022

Внекорневое обогащение кривеля селеном и йодом на фоне использования микроудобрения Силиплант, содержащего кремний



Резюме

Селен (Se) и йод (I) являются эссенциальными элементами для человека, дефицит которых широко распространен во всем мире. С целью получения функционального продукта питания с повышенным содержанием микроэлементов в вегетационном опыте проведено внекорневое обогащение двух сортов образцов кривеля селеном (селенат натрия 10 мг/л) и йодом (иодид калия 100 мг/л) без и на фоне использования кремний содержащего удобрения Силиплант (3 мл/л). Установлено, что совместное и раздельное применение селената, иодида и Силипланта увеличивает биомассу растений. Применение Силипланта усиливало накопление растениями йода в 1.7-1.9 раз, а применение селена – в 2.2-3.1 раз. Достоверное увеличение содержания аскорбиновой кислоты обеспечивалось совместным использованием йода и селена (1.25-1.27 раз), йода и кремния (1.46-1.87 раз) и селена, йода и кремния (1.31-1.73 раз) в то время как повышение общей антиоксидантной активности (в 1.3-1.4 раз) наблюдалось для вариантов (Se+I) и (Se+I+Si). Выявлены высокие межсортные различия в отзывчивости растений на выбранные обработки, проявляющиеся, в частности, в возрастании накопления полифенолов под действием раздельных и совместных обработок кривеля йодом и селеном в 1.26 раз в сортообразце 21-20 и отсутствии значимого эффекта у сортообразца 24-20. Показано, что, учитывая суточную потребность человека в йоде и селене, 50 г получаемых функциональных продуктов питания способны обеспечить до 79% суточной потребности человека в йоде и до 40% в селене.

Ключевые слова: *Anthriscus cerefolium* (L.), селен, йод, кремний, Силиплант, антиоксиданты, биообогащение, межсортные различия

Foliar biofortification of chervil with selenium and iodine under silicon containing fertilizer supply

Abstract

Selenium (Se) and iodine (I) are essential elements for humans, and their deficiency is widespread throughout the world. In order to obtain a functional nutritional product with an increased content of these trace elements in the vegetative experiment, foliar biofortification of two chervil varieties with selenium (sodium selenate 10 mg/l) and iodine (potassium iodide 100 mg/l) was carried out without and against the background of the use of silicon-containing fertilizers Siliplant (3 ml/l). The combined and separate application of selenate, iodide and Siliplant increased plants' biomass. Siliplant utilization increased the accumulation of iodine by 1.7-1.9 times, and selenium supply – by 2.2-3.1 times. A significant increase in ascorbic acid content was provided by the combined supplementation of iodine and selenium (1.25-1.27 times), iodine and silicon (1.46-1.87 times) and joint application of selenium, iodine, and silicon (1.31-1.73 times), while an increase in total antioxidant activity (1.3-1.4 times) was observed for (Se+I) and (Se+I+Si) treatments. High varietal differences in the responsiveness of plants to the selected treatments were manifested, particularly an increase of polyphenols accumulation under separate and joint treatments of chervil with iodine and selenium by 1.26 times in the cultivar 21-20, and the absence of a significant effect in the cultivar 24-20. Taking into account the adequate consumption levels (ACL) of iodine and selenium, 50 g of the resulting functional product can provide up to 79% of iodine ACL and up to 40% in selenium ACL.

Keywords: *Anthriscus cerefolium* (L.), selenium, iodine, silicon, Siliplant, antioxidants, biofortification, varietal differences

1. Введение

В организме человека йод и селен выполняют функции мощных природных антиоксидантов, участвуют в росте и развитии, защищают от возникновения и развития онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний, оптимизируют иммунитет и работу мозга и репродуктивных органов. Их дефицит приводит к снижению иммунитета, значительному увеличению риска возникновения и развития вирусных (включая ковид), онкологических и кардиологических заболеваний [1-3].

Суточная потребность человека в йоде составляет 120 мкг, а в селене – 70 мкг. На 2007 год более 2 млрд человек во всем мире испытывают дефицит йода [4] и от 500 млн до 1 млрд человек селена [5-7]. Большая часть территории России имеет почвы, бедные селеном [8].

Наиболее перспективным, высокоэффективным и экологически безопасным решением проблемы йодо- и селенодефицита считается обогащение сельскохозяйственных культур данными микроэлементами [9,10]. В отличие от млекопитающих, для растений йод и селен не являются эссенциальными нутриентами. Тем не менее, установлено, что селен повышает антиоксидантную защиту растений от различного рода стрессов (засухи, подтопления, засоления, заморозков, тяжелых металлов, высокой освещенности или ультрафиолетового излучения) [11]. Кроме того, в умеренных дозах йод и селен могут оказывать ростостимулирующее действие на растения и повышать уровень накопления важнейших природных антиоксидантов, в частности, витаминов, полифенолов, флавоноидов, обеспечивая получение продукции функционального назначения [12-16].

С другой стороны, сложность получения таких функциональных продуктов питания связана с низкой эффективностью совместного обогащения и токсичностью для растений высоких доз селена и йода [16]. Неясным остается механизм взаимосвязи йода и селена в растениях, данные о влиянии

совместного использования йода и селена на биохимические показатели растений крайне фрагментарны.

В последние годы кремниевые удобрения, в том числе Силиплант, приобретают все большую популярность в растениеводстве, поскольку кремний повышает устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам, стимулирует развитие корневой и надземной части растений, активизирует фотосинтез и повышает антиоксидантный статус растений [17].

Нами впервые исследовалась эффективность использования ионной формы кремния в обогащении растений кервеля йодом и селеном, а также влияние кремния на биохимические характеристики растений и уровень биообогащения растениями данными микроэлементами. Объектом исследования был выбран кервель (*Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm.) - ароматическая культура из семейства *Apiaceae*, уникальная пряность с коротким вегетационным периодом, значимыми лечебными свойствами и высоким содержанием антиоксидантов [18].

2. Материалы и методы

Эксперимент проводился в 2020 и 2021 годах в Федеральном научном центре овощеводства. Объектами исследования явились сортообразцы кервеля 21-20 и 24-20 (рис. 1).

Растения выращивали в вегетационных сосудах объемом 10 л (диаметр 20 см) на смеси торфа и перлита. Характеристика торфа: степень разложения – до 20%, влажность – не более 65%, рН – 5,5-6,2. Семена высевали 1 июля. Плотность посева 30 растений/сосуд.

Вегетационный опыт включал внекорневое обогащение сортообразцов кервеля селеном (селенат натрия 10 мг/л) и йодом (йодид калия 100 мг/л) без и на фоне обработки удобрением Силиплант (3 мл/л). Силиплант – кремнийсодержащее удобрение, в состав которого, кроме кремния Si (7%) и



a



b

Рис. 1. Внешний вид сортообразцов кервеля 21-20 (a) и 24-20 (b)

калия (1%), входят в легко доступной для растений хелатной форме микроэлементы (мг/л): Fe – 300; Mg – 100; Cu – 70-240; Zn – 80; Mn – 150; Co – 15; B – 90. Обработку растений растворами осуществили на 15 день после посева.

Эксперимент включал 8 вариантов для каждого сортообразца: 1) контроль; 2) Na_2SeO_4 в концентрации 10 мг/л; 3) KI в концентрации 100 мг/л; 4) Na_2SeO_4 + KI; 5) Силиплант в концентрации 3 мл/л; 6) Na_2SeO_4 + Силиплант; 7) KI + Силиплант; 8) Na_2SeO_4 + KI + Силиплант. Расход рабочих растворов составил 1-1,5 л/10 м². Повторность трехкратная. Растения были собраны 4 сентября.

Пробоподготовка

После уборки урожая черешки растений промыли дистиллированной водой для удаления остатков почвы, листья и черешки разделяли, взвешивали и гомогенизировали. Для определения содержания аскорбиновой кислоты и фотосинтетических пигментов использовали свежие гомогенаты. Остальную часть материала высушили при 50°C до постоянной массы для дальнейшего определения содержания нитратов, водорастворимых соединений, антиоксидантной активности, полифенолов.

Содержание сухого вещества

Содержание сухого вещества определяли гравиметрически после высушивания образцов при 50°C до постоянной массы [19].

Аскорбиновая кислота

Содержание аскорбиновой кислоты устанавливали методом визуального титрования 2,6-дихлорфенол индофенолятом натрия (реактивом Тиллманса) [20].

Полифенолы

Содержание полифенолов определяли спектрофотометрически с помощью реактива Фолина-Чиокалтеу [20]. 1 г сухого порошка кривея экстрагировали в течение часа при 80°C 20 мл 70% этанола. Раствор охлаждали до комнатной температуры, переносили количественно в 25 мл мерную колбу и доводили до метки 70% спиртом. Полученный экстракт перемешивали и фильтровали через складчатый фильтр. В мерную колбу на 25 мл добавляли 1 мл экстракта, 2,5 мл насыщенного раствора карбоната натрия Na_2CO_3 и 0,25 мл разбавленного вдвое дистиллированной водой реактива Фолина-Чиокалтеу. Полученную смесь после интенсивного перемешивания доводили до метки дистиллированной водой. Через час после окончания реакции измеряли показатель поглощения раствора при 730 нм на спектрофотометре Unicо 2804 UV (США). Содержание полифенолов рассчитывали по стандартной кривой, полученной с использованием 6 растворов галловой кислоты (Sigma) в интервале концентрации 0-90 мкг/мл. Результаты определения выражали в мг-экв галловой кислоты/г сухой массы (мг ГКЭ/г с.м.).

Антиоксидантная активность (АОА)

Для определения антиоксидантной активности использовали колориметрический метод [20], основанный на титровании раствора 0.01 N KMnO_4 в кислой среде этанольным экстрактом кривея до обесцвечивания, свидетельствующего о полном восстановлении Mn^{+6} до Mn^{+2} . В качестве внешнего стандарта использовали галловую кислоту. Результаты определения выражали в мг-экв галловой кислоты/г сухой массы (мг ГКЭ/г с.м.).

Фотосинтетические пигменты

Содержание фотосинтетических пигментов определяли спектрофотометрически на спиртовых экстрактах листьев с использованием уравнений, предложенных Lichtenthaler [21]:

$$\begin{aligned} \text{Ch-a} &= 13.36A_{664} - 5.19A_{649}; \\ \text{Ch-b} &= 27.43A_{649} - 8.12A_{664}; \\ \text{C c} &= (1000A_{470} - 2.13\text{Ch-a} - 97.63\text{C-b})/209 \end{aligned}$$

где A = абсорбция, Ch-a = хлорофилл a, Ch-b = хлорофилл b, C c = каротин
Результаты выражали в мг/г сырой массы.

Водорастворимые соединения

Уровень накопления водорастворимых соединений определяли в водных экстрактах образцов с использованием портативного кондуктометра TDS-3 (Корея).

Нитраты

Уровень нитратов регистрировали в водных экстрактах с применением ион селективного электрода на иономере Эксперт 001 (Эконикс, Россия).

Водорастворимый белок

Уровни водорастворимого белка определяли спектрофотометрически согласно методу Брэдфорда, с использованием кумасси голубого 250 при pH [22].

Определение селена

Селен определяли флуориметрическим методом [23]. Высушенные гомогенизированные образцы разлагали смесью азотной и хлорной кислот с последующим восстановлением селената (Se^{+6}) в селенит (Se^{+4}) действием 6 N HCl. Концентрацию Se определяли по величине флуоресценции комплекса (пиазоселенола) селенистой кислоты с 2,3-диаминонафталином в гексане по величине эмиссии при 519 нм при длине волны возбуждения 376 нм. Повторность трехкратная. Точность определения контролировалась путем использования в каждом определении внешнего стандарта – порошка стеблей мицубы, обогащенной Se, с концентрацией Se 1865 мкг/кг.

Определение йода

Определение йода проводили с использованием вольтамперометрического анализатора ТА-4 (Томаналит, Томск, Россия) [24], оснащенного встроенной УФ-лампой и трехэлектродной электрохимической ячейкой: вспомогательным и эталон-

ным электродами (хлориды серебра в 1 М KCl), а также рабочим электродом, т. е. модифицированным серебряным электродом. К 0,1 г высушенного гомогенизированного образца добавляли 2 мл 10% раствора едкого калия, полученную смесь минерализовали при 40-550°С. Реакционную массу охлаждали, добавляли 1 мл 10% – ного раствора сульфата цинка. Полученную пробу растворяли в 10 мл дистиллированной воды, и концентрацию йода определяли с использованием концентрированной муравьиной кислоты в качестве фонового электролита и стандартных растворов йодида калия 0,1 мг/л, 1 мг/л и 10 мг/л.

Статистический анализ

Результаты исследования подвергали статистической обработке с использованием теста Дункана и компьютерной статистической программы Excel.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Биометрические показатели

Раздельное и совместное внекорневое внесение селена и йода в концентрациях 10 мг/л и 100 мг/л соответственно с внесением и без внесения удобрения Силиплант в качестве источника кремния не оказало достоверного влияния на высоту растений и содержание сухого вещества (табл.1).

В то же время обращает внимание значительное увеличение массы листьев при комплексной обработке растений селеном и йодом (Se+I), селеном и кремнием (Se+Si) и селеном, йодом и кремнием (Se+I+Si), составившее по сравнению с контролем 1.23-1.84, 1.23-1.48 и 1.31-1.28 раз соответственно. Показательно, что более высокие уровни увеличения массы листьев были у сортообразца 24-20, что говорит о более выраженной отзывчивости сортообразца 24-20 к внесению Se+I, Se+Si и Se+I+Si. Более того, именно у сортообразца 24-20 проявлял-

Таблица 1. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на биометрические показатели кервеля и содержание сухого вещества

Table 1. Effect of selenium, iodine and silicon foliar supplementation on chervil biometric characteristics and dry matter content

Вариант Treatment	Масса листьев, г Leaves biomass, g		Высота, см Height, cm		Сухое вещество, % Dry matter, %	
	21-20	24-20	21-20	24-20	21-20	24-20
Контроль Control	213.2 ±21.0d	200.0±19.3b	33.0±3.1a	38.4±3.7a	11.4±1.2a	11.0±1.0a
Se	246.9±23.6abd	325.6±33.1a	32.6±3.2a	37.0±3.7a	11.8±1.3ab	11.8±1.2a
I	225.2±21.8cd	266.0±25.9a	36.4±3.4a	39.2±4.0a	10.9±1.1ab	12.6±1.3a
Se+I	261.4±24.7ab	368.6±35.9a	37.5±3.9a	38.7±3.9a	11.1±1.3ab	11.5±1.0a
Si	235.7±22.9bcd	276.2±26.2a	35.8±3.6a	38.6±3.9a	9.3±0.9b	12.9±1.2a
Si+Se	262.2±26.7ab	296.1±30.0a	32.7±3.1a	37.9±3.8a	10.1±0.9ab	11.8±1.2a
Si+I	244.0±23.8abcd	221.2±21.5bc	34.2±3.3a	35.2±3.4a	10.9±1.1ab	12.4±1.4a
Si+Se+I	277.8±26.2a	256.0±24.2c	36.1±3.6a	39.0±3.7a	11.4±1.2ab	11.5±1.3a

*Значения для каждого показателя с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при P<0.05
For each parameter, values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at p<0.05

Таблица 2. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление фотосинтетических пигментов (мг/г сырой массы)

Table 2. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on photosynthetic pigments accumulation by chervil (mg/g fresh weight)

Вариант Treatment	Хлорофилл а Chlorophyll a		Хлорофилл b Chlorophyll b		Каротин Carotene	
	21-20	24-20	21-20	24-20	21-20	24-20
Контроль Control	1.13±0.12a	1.36±0.14a	2.84±0.30b	3.03±0.31a	0.54±0.05a	0.50±0.05a
Se	1.14±0.13a	1.25±0.13a	2.93±0.30b	3.27±0.33a	0.55±0.0a	0.60±0.07a
I	1.00±0.09a	1.28±0.13a	2.39±0.24b	3.28±0.34a	0.42±0.04 a	0.61±0.06a
Se+I	1.36±0.14a	1.30±0.13a	3.65±0.37a	3.02±0.30a	0.82±0.09b	0.77±0.08b
Si	0.78±0.08b	1.15±0.12a	2.29±0.27b	2.70±0.28a	0.43±0.04a	0.46±0.05a
Si+Se	1.25±0.13a	1.13±0.11a	2.84±0.27b	2.74±0.26a	0.56±0.06a	0.53±0.05a
Si+I	1.00±0.11a	1.27±0.13a	3.46±0.35a	2.92±0.31a	0.59±0.09a	0.49±0.05a
Si+Se+I	1.16±0.15a	1.13±0.11a	2.84±0.29b	3.00±0.30a	0.53±0.04a	0.59±0.06a

*Значения для каждого показателя с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при P<0.05
Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at p<0.05

ся значимый ростостимулирующий эффект как селена, так и йода, и ионной формы кремния при раздельном использовании, обеспечивающий увеличение массы листьев в 1.63, 1.33 и 1.4 раза соответственно. Установленный ростостимулирующий эффект ионной формы кремния, особенно выраженный у сортообразца 24-20, оказался сходным с аналогичными данными, полученными при использовании nano частиц кремния [24], что указывает на сходный характер воздействия ионной и nano форм кремния на рост и развитие растений.

3.2. Антиоксидантный статус

3.2.1. Фотосинтетические пигменты

Интенсивность фотосинтеза в значительной степени определяет эффективность роста и развития растений. Известно, что селен стимулирует фотосинтез в растениях [26], однако интенсивность влияния этого микроэлемента на фотосинтетические пигменты в значительной степени зависит от генетических особенностей культуры [27]. Что касается йода, то согласно литературным данным влияние последнего на накопление хлорофилла и каротина носит противоречивый характер [28,29].

В настоящем исследовании используемая раздельная и совместная обработка кривеля йодом, селеном и кремнием оказывала слабое влияние на содержание фотосинтетических пигментов. Значимое возрастание содержания хлорофилла b было выявлено только на сортообразце 21-20 при внекорневой обработке растений йодом и селеном (I+Se) и йодом и кремнием (I+Si). Уровень каротина в листьях был достоверно повышен только в растениях, обработанных йодом и селеном (I+Se). Более слабое влияние селена, йода и кремния на накопление фотосинтетических пигментов, установленное в настоящей работе, по сравнению с данными, опубликованными ранее в вариантах с nano частицами кремния [25], может быть связано с меньшей используемой дозой вносимых элементов.

Согласно литературным данным образующиеся в растениях йодированные белки в наземной части растений связаны в первую очередь с хлоропластами и функционально участвуют в процессах фотосинтеза, в то время как аналогичные производные в корнях преимущественно связаны с действием различных пероксидаз [30]. Что касается кремния, то установлено, что кремний стимулирует накопление хлорофилла a и каротина, что было отмечено на ионной форме [31] и наночастицах кремния [25].

3.2.2. Антиоксиданты и полифенолы

Возможность повышения уровня природных антиоксидантов в растениях при обработке селеном, йодом и кремнием широко обсуждается в научной литературе [25, 32-34].

В настоящей работе значимое возрастание содержания аскорбиновой кислоты было выявлено в листьях кривеля при обработке растений йодом и селеном (I+Se), йодом и кремнием (I+Si) и йодом, селеном и кремнием (I+Se+Si), составившее в среднем (1.25-1.27), (1.46-1.87) и (1.31-1.73) раз соответственно (табл.3).

Возрастание общей антиоксидантной активности (AOA) растений оказалось более выраженным для сортообразца 24-10 и проявлялось в вариантах обработки растений йодом (I), йодом и селеном (I+Se), йодом селеном и кремнием (I+Se+Si), а также кремнием (Si). Средний уровень возрастания AOA в этих случаях составил 1.4 раза. Напротив, повышение уровня AOA в листьях сортообразца 21-20 наблюдалось только в вариантах обработки растений селеном и йодом (I+Se) и селеном, йодом и кремнием (I+Se+Si).

С другой стороны, следует отметить, что уровень накопления полифенолов, являясь более стабильным показателем по сравнению с общей антиоксидантной активностью [25], возрастал только в листьях сортообразца 21-20, обработанного селеном (Se), йодом (I) и селеном и йодом (Se+I).

Таблица 3. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление аскорбиновой кислоты, полифенолов и общую антиоксидантную активность
Table 3. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on ascorbic acid, polyphenols accumulation and antioxidant activity

Вариант Treatment	Аскорбиновая кислота, мг/100 г с. м. Ascorbic acid, mg/100 g d.w.		AOA, мг ГКЭ/г с.м. AOA, mg GAE/g d.w.		Полифенолы, мг ГК/г с.м. TP (total phenolics), mg GAE/g d.w.	
	21-20	24-20	21-20	24-20	21-20	24-20
Контроль Control	28.5 ± 3.0b	22.8±2.3 c	30.1±2.8a	31.4±2.9c	17.2±1.5b	19.1±1.7a
Se	30.5±0.31b	19.9±2.0c	37.3±3.1b	37.3±3.6b	22.1±2.0a	20.0±1.9a
I	30±4.2b	18.4±1.7c	35.9±3.0b	44.3±4.2a	21.7±2.1a	22.3±2.1a
Se+I	35.5±3.6ab	29±4.0a	39.4±4.0ab	44.9±4.5a	21.4±1.9a	21.6±2.2a
Si	27.9±2.8b	20.7±2.1c	34.2±2.9ab	44.2±4.1a	18.6±1.9ba	23.3±2.4a
Se+Si	29.4±3.0b	27.8±2.8b	34.3±3.2ab	38.2±3.6b	20.5±2.0ba	22.7±2.1a
I+Si	41.5±4.2a	42.7±4.1a	33.7±3.1ab	35.0±3.1bc	18.0±1.6b	20.2±2.0a
Se+I+Si	37.3±3.6ab	39.5±4.0a	41.7±3.9b	42.9±4.0a	20.6±1.8ba	22.0±2.1a

*Значения для каждого показателя с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при $P < 0.05$
Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at $p < 0.05$

3.3. Водорастворимые соединения и нитраты

Данные табл.4 свидетельствуют о том, что уровень нитратов в кервеле при всех использованных обработках не превышал предельно допустимых значений, принятых для зеленных культур (2000 мг/кг сырой массы) и находился в пределах от 5.07 до 7.00 мг/г сухой массы (558-770 мг/кг сырой массы).

Уровень накопления водорастворимых соединений, включающих содержащиеся в растении водорастворимые формы минералов, сахара, органические кислоты и т.п., в условиях эксперимента практически не различался по вариантам за исключением данных для сортообразца 21-20, обработанного йодом и селеном (I+Se), превышающих показатель для контрольных растений в 1.3 раза.

3.4. Водорастворимые белки

Известно, что положительное действие селена на рост и развитие растений часто сопровождается возрастанием интенсивности биосинтеза водорастворимых белков [35]. По данным настоящего

исследования наиболее значимое увеличение накопления водорастворимых белков имело место при обработке сортообразца 24-20 не только селеном (Se), но также кремнием (Si) и кремнием и селеном (Se+Si). Напротив, обработка сортообразца 21-20 кремнием (Si) и (Se+Si) не оказывало достоверного влияния на накопление водорастворимых белков, а внекорневое внесение селена обеспечивало лишь небольшое возрастание этого показателя, без статистической достоверности различий (табл.5).

3.5. Селен

Данные таблицы 6 свидетельствуют о том, что ионная форма кремния не влияет на уровень аккумуляирования селена кривелем, аналогично отсутствию такого эффекта также и у нано-частиц кремния, описанного ранее [25].

С другой стороны, полученные результаты указывают на возможность увеличения накопления селена при совместной обработке растений йодом и селеном, однако, эффективность такого взаимо-

Таблица 4. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление водорастворимых соединений и нитратов в кривеле

Table 4. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on chervil total dissolved solids (TDS) and nitrates accumulation

Обработки Treatment	Водорастворимые соединения, мг/г с.м. TDS (Total dissolved solids) mg/g d.w.		Нитраты, мг/г с.м. Nitrates, mg/g d.w.	
	21-20	24-20	21-20	24-20
Контроль Control	109.39±9.5 b	138.32±14.9a	5.63±0.7 a	5.45±0.8bc
Se	115.91±11.7b	127.61±13.0a	5.68±0.4a	5.22±0.4bc
I	126.23±11.9ab	132.09±12.8a	6.4±0.5a	6.22±0.6a
Se+I	145.50±13.8a	121.74±11.7a	6.96±0.7a	5.07±0.4c
Si	106.52±10.2b	126.37±12.8a	5.31±0.8a	6.72±0.7ab
Se+Si	114.15±10.9b	136.25±13.8a	6.10±0.5a	7.00±0.6a
I+Si	127.72±12.1ab	135.82±13.4a	6.19±0.5a	6.22±0.5ab
Se+I+Si	110.50±10.9a	145.50±14.7a	6.00±0.6a	6.50±0.7ab

*Значения для каждого показателя с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при P<0.05
Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at p<0.05

Таблица 5. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление водорастворимых белков в кривеле (%)
Table 5. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on chervil water soluble protein accumulation (%)

Вариант Treatment	Сортообразец Variety	
	21-20	24-20
Контроль Control	3.65±0.37bcd	3.27±0.33 cd
Se	4.28±0.4a	4.00±0.39b
I	5.01±0.50a	3.77±0.39bc
Se+I	1.99±0.20e	2.98±0.30d
Si	3.57±0.26bc	4.03±0.40b
Se+Si	3.44±0.32cd	4.18±0.42ab
I+Si	3.48±0.35bcd	3.79±0.38bc
Se+I+Si	3.75±0.38bc	3.52±0.35bcd

*Значения с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при P<0.05
Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at p<0.05

Таблица 6. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление селена (мкг/кг с.м.)
Table 6. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on Se accumulation by chervil ($\mu\text{g}/\text{kg}$ d.w.)

Вариант Treatment	Сортообразец Variety	
	21-20	24-20
Контроль Control	216 \pm 21.2	172 \pm 16.4a
Se	2522 \pm 253ab	2378 \pm 235ab
I	199 \pm 20cd	169 \pm 17d
Se+I	2817 \pm 281a	2704 \pm 208a
Si	218 \pm 21	181 \pm 18a
Se+Si	2136 \pm 212b	2097 \pm 210b
I+Si	225 \pm 21c	225 \pm 22c
Se+I+Si	2082 \pm 207b	2103 \pm 209b

*Значения с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при $P < 0.05$
Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at $p < 0.05$

Таблица 7. Влияние внекорневого внесения селена, йода и кремния на накопление йода (мг/кг с.м.)
Table 7. Effect of foliar Se, I and Si supplementation on iodine accumulation by chervil

Вариант Treatment	Йод, мг/кг с.м.; Iodine, mg/kg d.w.	
	21-20	24-20
I	8.4 \pm 0.7c	4.2 \pm 0.3d
Se+I	19.0 \pm 2.0a	13.0 \pm 1.3b
I+Si	14.0 \pm 1.7b	7.8 \pm 0.6c
Se+I+Si	12.8 \pm 1.2b	5.5 \pm 0.4d

*Значения с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно данным теста Дункана при $P < 0.05$

Values with the same letters do not differ statistically according to Duncan test at $p < 0.05$

действия сортоспецифична. Так, обработка Se+I сортообразца 24-20 привела к увеличению содержания селена в 1.7 раз по сравнению с отдельным применением селена, в то время как у сортообразца 21-20 уровень селена возрос лишь в 1.1 раз.

При рекомендуемой суточной потребности в селене (70 мкг) 25 г свежей зелени кервеля, обогащенного Se+I+Si, способно удовлетворить 85-86 % суточной потребности, что обуславливает перспективность такого метода для профилактики селенодефицита.

3.6. Йод

Все варианты обработок совместного внесения йода с селеном и/или кремнием привели к повышению уровня йода в растениях по сравнению с отдельным внесением йода (табл.7). Полученные данные указывают на эффективное взаимодействие трех микроэлементов (I, Se, Si) на уровень обогащения растениями йодом. Так, при обработке Se+I содержание йода в сортообразце 21-20 увеличилось в 2.3 раз, а в сортообразце 24-20 - в 3.1 по сравнению с отдельной обработкой йодом; при обработке I+Si - в 1.7 и 1.9 раз; а комплексное внесение йода, селена и кремния - в 1.5 и 1.3 соответственно.

При рекомендуемой суточной потребности человека в йоде (120 мкг) 50 г зелени кервеля, обогащенного Se+I+Si, способно обеспечить до 79 % суточной потребности человека в йоде и до 40% в селене (при норме 70 мкг/день).

Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что и селен, и ионная форма кремния усиливают аккумуляцию йода кервелем. С другой стороны, аккумуляция растениями селена не зависит от использования йода и кремниевых удобрений Силиплант. Установлено, что совместное использование йода и селена, йода и кремния, а также йода, селена и кремния приводит к усилению биосинтеза аскорбиновой кислоты и уровня общей антиоксидантной активности, в то время как усиление биосинтеза полифенолов характерно для вариантов без использования Силипланта только для одного сортообразца. Выявлена высокая межсортная вариабельность в отклике растений на отдельную и совместную обработку растений йодом, селеном и кремнием, что предполагает необходимость проведения дополнительных исследований для выявления оптимальных условий совместного обогащения растений йодом и селеном.

Об авторах:

Анастасия Ильинична Молдован – м.н.с. лаборатории зеленных, пряно-вкусовых и цветочных культур, аспирант, автор для переписки, nastiamoldovan@mail.ru

Виктор Александрович Харченко – кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией селекции и семеноводства зеленных, пряно-вкусовых и цветочных культур, <https://orcid.org/0000-0003-2775-9140>, kharchenkoviktor777@gmail.com

Надежда Александровна Голубкина – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник лабораторно-аналитического отдела, segolubkina45@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>

Елена Геннадьевна Кекина – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории применения агрохимических средств в семеноводстве, lena.kekina@mail.ru

Джанлука Карузо – проф., gcaruso@unina.it, <https://orcid.org/0000-0001-6981-852X>

About the authors:

Anastasia I. Moldovan – Graduate Student, Junior Researcher, laboratory of Selection And Seed Production Of Green, Spice-Flavoring and Flower Crops, Correspondence Author, nastiamoldovan@mail.ru

Viktor A. Kharchenko – Cand. Sci. (Agriculture), Head of Laboratory of Selection and Seed Production of Green, Spice-Flavoring and Flower Crops, <https://orcid.org/0000-0003-2775-9140>, kharchenkoviktor777@gmail.com

Nadezhda A. Golubkina – Doc. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of laboratory-analytical department, segolubkina45@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>

Elena G. Kekina – Cand. Sci. (Biology), Researcher laboratories for the use of agrochemicals in seed production, lena.kekina@mail.ru

Gianluca Caruso – Dr. Sci. (Agriculture), gcaruso@unina.it, <https://orcid.org/0000-0001-6981-852X>

• Литература / References

- Hirschi K. D. Nutrient biofortification of food crops. *Annu. Rev. Nutr.* 2009;(29):401-421. <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-080508-14114>
- White P. J., Broadley M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 2009;182(1):49-84. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x>
- Wu Z., Bañuelos G.S., Lin Z.Q., Liu Y., Yuan L., Yin X., et al. Biofortification and phytoremediation of selenium in China. *Front. Plant Sci.* 2015;(6):136. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00136>
- Ahmed M. Iodine deficiency - way to go yet. *Lancet.* 2008;372(9633):88. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(08\)61009-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(08)61009-0)
- Mistry H.D., Broughton Pipkin F., Redman C.W., Poston L. Selenium in reproductive health. *Am. J. Obstet. Gynecol.* 2012;206(1):21-30 <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2011.07.034>
- Winkel L., Johnson C., Lenz M., Grundl T., Leupin O., Amimi M., et al. Environmental selenium research: from microscopic processes to global understanding. *Environ. Sci. Technol.* 2012;(46):571-579. doi: 10.1021/es203434d
- Ros G., van Rotterda A., Bussink D., Bindraban P. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach. *Plant Sci.* 2016;(404):99-112. doi: 10.1007/s11104-016-2830-4
- Голубкина Н.А., Папазян Т.Т. Селен в питании. Растения, животные, человек. М., Печатный город. 2006. [Golubkina N.A., Papazyan T.T. Selenium in nutrition. Plants, animals, human beings. M., Printing town. 2006. (In Russ.)]
- Landini M., Gonzali S., Kiferle C., Tonacchera M., Agretti P., Dimida A., et al. Metabolic engineering of the iodine content in Arabidopsis. *Sci Rep.* 2012;(2):338. <https://doi.org/10.1038/srep00338>
- Ebrahimi N., Hartikainen H., Hajiboland H., Seppanen M. Uptake and remobilization of selenium in Brassica napus L. plants supplied with selenate or selenium-enriched plant residues. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 201; 182(2):196-202. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700316>
- Kolbert Z.S., Szóllósi R., Feigl G. Selenium-induced abiotic stress tolerance in plants. In *Plant Tolerance to Environmental Stress Role of Phytoprotectants*; Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Islam, M.T., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; 255-270.
- Ghasemi K., Bolandnazar S., Tabatabaei S.J., Pirdashti H., Arzanlou M., Ebrahimzadeh M.A., Fathi H. Antioxidant properties of garlic as affected by selenium and humic acid treatments. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 2015;43(3):173-181. <https://doi.org/10.1080/01140671.2014.991743>
- Madrano-Macias J., Leija-Martinez P., Gonzales-Morales S., Juarez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Front. Plant Sci.* 2016;(7):1146. doi: 10.3389/fpls.2016.01146
- Gonzali S., Kiferle C., Perata, P. Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Curr. Opin. Plant Biotechnol.* 2017;(44):16-26. doi: 10.1016/j.copbio.2016.10.004
- Haghighi M., Ramezani M.R., Rajaii N. Improving oxidative damage, photosynthesis traits, growth and flower dropping of pepper under high temperature stress by selenium. *Mol. Biol. Rep.* 2019;46(1):497-503. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4502-3>
- Golubkina N., Moldovan A., Kekina H., Kharchenko V., Sekara A., Vasileva V., Skrypnik L., Tallarita A., Caruso G. Joint Biofortification of Plants with Iodine and Selenium: A New Field of Discoveries. *Plants.* 2021;10(7):1352. <https://doi.org/10.3390/plants10071352>
- Badawy S.A., Zayed B.A., Bassiouni S.M.A., Mahdi A.H.A., Majrashi A., Ali E.F., Seleiman M.F. Influence of Nano Silicon and Nano Selenium on Root Characters, Growth, Ion Selectivity, Yield, and Yield Components of Rice (*Oryza sativa* L.) under Salinity Conditions. *Plants.* 2021;10(8):1657. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>
- Харченко В.А., Молдован А.И., Голубкина Н.А., Гинс М.С., Шафигуллин Д.Р. Сравнительная оценка содержания ряда биологически активных соединений в *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. и садовом кривеле *Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm. Овощи России. 2020;(5):81-87. [Kharchenko V.A., Moldovan A.I., Golubkina N.A., Gins M.S., Shafigullin D.R. Comparative evaluation of several biologically active compounds content in *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm. and *Anthriscus cerefolium* (L.) Hoffm. *Veg. Crop. Russ.* 2020;(5):81-87]. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-81-87>
- ГОСТ 31640-2012 Межгосударственный стандарт «Корма. Методы определения содержания сухого вещества». ["Feeds. Methods for determination of dry matter content"]
- Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Молчанова А.В., Антошкина М.С., Надежкин С.М., Солдатенко А.В. Антиоксиданты растений и методы их определения. М., Инфра-М. 2020. [Golubkina N.A., Kekina H.G., Molchanova A.V., Antoshkina M.S., Nadezhkin S.M., Soldatenko A.V. Plant antioxidants and methods for their determination. M., Infra-M. 2020. (In Russ.)]
- Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods of Enzymology.* 1987;(148):350-382 doi:10.1016/0076-6879(87)48036-1
- Bradford M.M. A rapid sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilising the principle of protein-Dye Binding. *Anal Biochem.* 1976;(72):248-254. doi:10.1006/abio.1976.9999
- Alfthan G.V. A micromethod for the determination of selenium in tissues and biological fluids by single-test-tube fluorimetry. *Anal. Chim. Acta.* 1984;(165):187-194. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)85199-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)85199-5)
- Баранов В.И., Солдатенкова И.А., Кекина Е.Г. Определение йода в морепродуктах методом инверсионной вольтамперометрии. *Гигиена и санитария.* 2008; 3: 87-89. [Baranov V.I., Soldatenkova I.A., Kekina H.G. Iodine determination in marine products using inversion voltamperometry. *Hygiene and Sanitary*, 2008;(3):87-89].
- Golubkina N., Moldovan A., Fedotov M., Kekina H., Kharchenko V., Folmanis G., Alpatov A., Caruso G. Iodine and Selenium Biofortification of Chervil Plants Treated with Silicon Nanoparticles. *Plants.* 2021;10(11):2528. <https://doi.org/10.3390/plants10112528>
- Yao X., Chu J., Wang G. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress. *Biol. Trace Elem. Res.* 2009;(130):283-290. DOI 10.1007/s12011-009-8328-7
- Hartikainen H., Xue T. The Promotive Effect of Selenium on Plant Growth as Triggered by Ultraviolet Irradiation. *J. Environ. Qual.* 1999;(28):1372-1375. <https://doi.org/10.2134/jeq1999.00472425002800040043x>
- Dobosy P., Vetési V., Sandil S., Endrédi A., Óvári M., Takács T., Rékási M., Záray G. Effect of Irrigation Water Containing Iodine on Plant Physiological Processes and Elemental Concentrations of Cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) and Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivated in Different Soils. *Agronomy.* 2020;10(5):720. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050720>
- Incrocci, L.; Carmassi, G.; Maggini, R.; Poli, C.; Saidov, D.; Tamburini, C.; Kiferle, C.; Perata, P.; Pardossi, A. Iodine Accumulation and Tolerance in Sweet Basil (*Ocimum basilicum* L.) with Green or Purple Leaves Grown in Floating System Technique. *Front. Plant Sci.* 2019;(10):1494. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01494>
- Kiferle C., Martinelli M., Salzano A. M., Gonzali S., Beltrami S., Salvadori P.A., Hora K., Holweder H.T., Scaloni A., Perata P. Evidences for a Nutritional Role of Iodine in Plants. *Front. Plant Sci.*, 2021;(12):616868. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868>
- Barbosa M.A.M., la Silva M.H.L., Viana G.D.M., Ferreira T. R., de Carvalho Souza C.L.F., Lobato E.M.S.G., da Silva Lobato A.K. Beneficial repercussion of silicon (Si) application on photosynthetic pigments in maize plants. *Aust. J. Crop Sci.* 2015;9(11):1113-1118.
- Salim B.B.M., El-Yazied A.A., Salama Y.A.M., Raza A., Osman H.S. Impact of silicon foliar application in enhancing antioxidants, growth, flowering and yield of squash plants under deficit irrigation condition. *Ann. Agric. Sci.* 2021;66(2):176-183. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2021.12.003>
- Krzepiłko A., Święcilo A., Zych-Żężyk I. The Antioxidant Properties and Biological Quality of Radish Seedlings Biofortified with Iodine. *Agronomy.* 2021;(11):2011. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102011>
- Skrypnik L., Styran T., Savina T., Golubkina N. Effect of Selenium Application and Growth Stage at Harvest on Hydrophilic and Lipophilic Antioxidants in Lamb's Lettuce (*Valerianella locusta* L. Laterr.). *Plants.* 2021;10(12):2733; <https://doi.org/10.3390/plants10122733>
- Gupta M., Gupta S. An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. *Front Plant Sci.* 2016;(7):2074. doi: 10.3389/fpls.2016.02074