

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-37-42>
УДК: 635.52:581.19:631.531

В.А. Харченко¹, Н.А. Голубкина*²,
Л.Н. Скрыпник³, О.К. Мурариу³, Д. Карузо⁴

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

²Балтийский университет им. Иммануила Канта 236040, Россия, Калининград

³Ясский Университет Естественных Наук Иона Ионеску де ла Брада 700440, Румыния, Ясси

⁴Неаполитанский университет им. Федерико II 80055, Италия, Неаполь

*Корреспонденция: segolubkina45@gmail.com

Вклад авторов: В.А. Харченко – концептуализация, редактирование рукописи. Н.А. Голубкина – концептуализация, проведение биохимических исследований, написание и редактирование рукописи. Скрыпник Л.Н. – проведение биохимических исследований, валидация. Мурариу О.К. – валидация, методология. Д. Карузо – концептуализация, валидация, редактирование рукописи.

Конфликт интересов. Голубкина Н.А. (с 2008 года) и Джанлука Карузо (с 2017 года) являются членами редакционной коллегии журнала «Овощи России», но они не имеют никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляют.

Благодарности: Авторы выражают признательность Институту Медико-Биологических Проблем за предоставленную возможность подвергнуть селена салата длительному хранению на МКС.

Для цитирования: Харченко В.А., Голубкина Н.А., Скрыпник Л.Н., Мурариу О.К., Карузо Д. Особенности биохимических показателей и элементного состава сортов салата *Lactuca sativa* L., выращенных из семян после длительного хранения на МКС. *Овощи России*. 2024;(2):37-42. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-37-42>

Поступила в редакцию: 17.02.2024

Принята к печати: 12.03.2024

Опубликована: 25.03.2024

Viktor A. Kharchenko¹, Nadezhda A. Golubkina*², Liubov N. Skrypnik³, Otilia Cristina Murariu³, Gianluca Caruso⁴

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

²Institute of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University 236040 Kaliningrad, Russia

³"Ion Ionescu de la Brad" Iasi University of Life Sciences Iasi, Romania, 700440

⁴Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II Naples, Italy, 80055

*Correspondence: segolubkina45@gmail.com

Authors Contribution: Kharchenko V.A. – conceptualization and manuscript revision; Golubkina N.A. – conceptualization, conceived the experimental protocol, writing the draft and final version of the manuscript; Murariu O.K. – validation, methodology; Caruso G. – conceptualization, validation and manuscript revision.

Conflict of interest. Golubkina N.A. (since 2008) and Gianluca Caruso (since 2017) have been a member of the editorial board of the Journal "Vegetable crops of Russia", but had nothing to do with the decision to publish this manuscript. The manuscript passed the journal's peer review procedure. The authors declare no other conflicts of interest.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the Institute of Medical and Biological Problems for the opportunity to subject lettuce selenium to long-term storage on the International Space Station.

For citation: Kharchenko V.A., Golubkina N.A., Skrypnik L.N., Murariu O.C., Caruso G. Peculiarities of biochemical and mineral composition of lettuce *Lactuca sativa* L. grown from seeds after long-term storage in the International Space Station. *Vegetable crops of Russia*. 2024;(2):37-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-37-42>

Received: 17.02.2024

Accepted for publication: 12.03.2024

Published: 25.03.2024

Особенности биохимических показателей и элементного состава сортов салата *Lactuca sativa* L., выращенных из семян после длительного хранения на МКС

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Хранение семян сельскохозяйственных растений в условиях космических станций является эффективным методом осуществления быстрой селекции растений на повышенную адаптационную способность, накопление биологически активных соединений и продуктивность. Изучены особенности биохимического и минерального состава (ИСП-МС) салата, выращенного в пленочной теплице из семян, хранившихся в течение года на Международной Космической Станции (МКС). Показана высокая межсортовая вариабельность в отзывчивости салата на воздействие микрогравитации и космического излучения по показателям урожая, биометрических показателей, антиоксидантного статуса и минерального состава растений. Так, среди сортов Петрович, Синтез, Московский парниковый, Пикник, Кавалер и Bouquet, опытные семена только первых 4х сортов оказались всхожими. Урожайность достоверно повышалась у сорта Московский парниковый, а для сортов Петрович, Синтез и Пикник наблюдалась тенденция к снижению урожайности. Возрастание накопления фотосинтетических пигментов под действием космического стресса было выявлено у сорта Московский парниковый, и именно этот сорт отличался повышенным уровнем пролина в листьях и наименьшим содержанием МДА. Достоверного изменения других показателей антиоксидантного статуса растений, выращенных из космических семян, не наблюдалось, однако, под действием микрогравитации и радиации значительно изменялся минеральный состав взрослых растений. Среди исследованных 23 элементов выявлено достоверное увеличение уровней ванадия, селена, железа и хрома по сравнению с контрольными растениями. Установлены достоверные взаимосвязи между Ca, Sr, Cd, Co, Mg, Mo и Pb ($r>0.9$; $p<0.001$).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Lactuca sativa L., семена, микрогравитация, радиация, селен, ванадий, хром, железо, антиоксиданты

Peculiarities of biochemical and mineral composition of lettuce *Lactuca sativa* L. grown from seeds after long-term storage in the International Space Station

ABSTRACT

Seed storage of agricultural crops in the conditions of International Space Station (ISS) is an effective method of quick plant breeding aimed to enhance the adaptability, and improve the biologically active compound accumulation and crop yield. Biochemical and mineral composition (ICP-MS) of lettuce grown in greenhouse from seeds stored for one year at the ISS was assessed. High varietal differences in lettuce tolerance to the effect of micro-gravity and radiation were evaluated using the values of yield, biometrical parameters, antioxidant status and plant mineral composition. Among the cultivars studied, i.e. Petrovich, Synthesis, Moskovsky parnikovoy, Picnic, Cavalier and Bouquet, only the cvs. Retrovich, Synthesis, Moskovsky parnikovoy and Picnik retained seed viability. Significant yield increase was recorded for the cv. Moskovsky parnikovoy, while the cvs. Petrovich, Synthesis and Picnic demonstrated a tendency to the yield decrease. Improvement of photosynthetic pigment accumulation due to seed space storage was recorded for the cv. Moskovsky parnikovoy and, particularly, the latter cultivar differed from the other cvs. due to the significantly higher proline level and lower MDA levels in leaves. Though space stress did not cause any significant decrease in antioxidant accumulation of plants, the latter demonstrated valuable changes in mineral composition. Among the 23 elements tested, V, Se, Fe and Cr showed higher concentrations compared to those in the control plants. Positive correlations between Ca, Sr, Cd, Cp, Mg, Mo and Pb were recorded ($r>0.9$; $p<0.001$).

KEYWORDS:

Lactuca sativa L., seeds, space stress, productivity, selenium, vanadium, chromium, iron, antioxidants

Введение

В процессе освоения космоса значительное внимание уделяется влиянию микро- гравитации и космического излучения на рост и развитие растений, а также возможности использования семян, хранившихся на МКС, для ускорения селекции и получения растений, отличающихся повышенным урожаем, высокими адаптационной способностью и качеством продукции [1]. Многочисленные исследования, проведенные на семенах более чем 140 видов растений [2-4], позволили выделить более 200 сортов, получивших вследствие хранения семян в условиях космической станции повышенные показатели устойчивости к заболеваниям, урожайности и качества продукции [5]. Установлено, что микрогравитация и космическое излучение являются важнейшими стрессовыми факторами для растений, приводя к значительным генетическим изменениям [6]. Длительность воздействия этих факторов на растения непосредственно определяет интенсивность мутаций [7]. Отмечается высокая межвидовая и межсортовая вариабельность в отклике растений на воздействие микрогравитации и радиации [7]. Изменению подвержены такие показатели растений, как накопление белка [8], моно- и дисахаров, полифенолов, витаминов и других природных антиоксидантов, а также показателя стрессоустойчивости пролина [9] и уровня перекисного окисления липидов [10]. Отдельные исследования указывают на возможность изменения минерального состава растений под действием этих специфических факторов [10,11]. В то же время следует отметить, что хранение семян в условиях космической станции может иметь разнонаправленный характер, ускоряя или ингибируя рост и развитие растений, выращенных из этих семян.

Целью настоящего исследования было установление межсортовых особенностей изменения растений салата в результате длительного хранения семян в условиях Международной Космической Станции.

2. Материалы и методы

Семена 6 сортов салата (Синтез, Кавалер, Петрович, Пикник, Московской парниковый, Букет) хранили в запаянных фольгированных пакетах на МКС с 05.10.2021 по 10.10.2022. Температура воздуха составила 22...23°C, влажность внутри пакетов – 25%. В качестве контрольных образцов использовали семена салата в аналогичной упаковке, хранившиеся в этот же период в Федеральном научной центре овощеводства.

Посев семян осуществляли в теплице 20 апреля 2023 года в пластиковые контейнеры объемом 7.5 л из расчета 6 растений/контейнер при трехкратной повторности. Урожай собирали 15 мая 2023 года.

После сбора урожая немногочисленные частицы почвы удаляли с листьев, при необходимости листья промывали водой и высушивали, используя фильтровальную бумагу. После оценки биометрических показателей листья гомогенизировали и использовали для определения содержания сухого вещества, фотосинтетических пигментов, аскорбиновой кислоты. Часть гомогената высушивали при 70°C до постоянной массы, повторно гомогенизировали с получением порошка, используемого в дальнейшем для установления содержания антиоксидантов и минерального состава.

Содержание сухого вещества устанавливали гравиметрически путем высушивания образцов при 70°C до постоянной массы.

Уровень накопления фотосинтетических пигментов листьями салата оценивали на спектрофотометре по величинам поглощения спиртовых экстрактов листьев при 664, 649 и 470 нм согласно эмпирическим формулам, разработанным Lychtentailler [12].

Уровень аскорбиновой кислоты определяли титрометрически, используя реактив Тиллманса [13].

Содержание полифенолов в экстрактах салата в 70% этаноле устанавливали спектрофотометрически с использованием реактива Фолина-Чиокалтеу, величину общей антиоксидантной активности спиртовых жэкстрактов – титрометрически согласно [13].

Концентрацию пролина в растворе 3% сульфосалициловой кислоты определяли по стандартной методике на спектрофотометре по величине поглощения экстракта после нагревания последнего с раствором нингидрина при 505 нм [14].

Интенсивность перекисного окисления липидов оценивали по содержанию малонового диальдегида (МДА), используя реакцию с тиобарбитуровой кислотой [15].

Минеральный состав образцов анализировали методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Nexion 300D (Perkin Elmer, США) в ООО Микронутриенты с использованием внутреннего стандарта (Merck IV, полиэлементный стандартный раствор) и стандартные растворы P, Si и V производства Perkin-Elmer).

Статистическую обработку результатов проводили с использованием критерия Стьюдента, используя компьютерную программу Excel.

3. Результаты и обсуждения

Урожай и биометрические показатели

Проведенные исследования выявили высокую межсортовую специфичность к воздействию космического стресса у салата. Так, из 6 исследованных сортов только 4 проявили высокую всхожесть семян, в то время как семена сортов Кавалер и Букет не дали всходов после одного года хранения на МКС. Известно, что длительность воздействия микрогравитации и космической радиации в условиях МКС определяет интенсивность генетических изменений, что в ряде случаев может отрицательно сказываться на жизнеспособности семян [16]. Так, ранее было описано ингибирование всхожести семян руколы после хранения семян в течение года на МКС [17]. С другой стороны, данные биометрического анализа растений, полученных из контрольных и опытных образцов семян салата выявили увеличение роста салата сортов Синтез и Московский парниковый в 1.37 и 1.16 раз соответственно, в то же время для сортов Пикник и Петрович достоверных различий по этому показателю выявлено не было (табл. 1). При этом, указанные сорта салата статистически не отличались по содержанию сухого вещества в листьях, высоте растений и площади листовой поверхности. Показательно, что в предыдущем исследовании площадь листовой поверхности растений руколы и горчицы сарептской, выращенных из семян, побывавших в космосе, была достоверно выше, чем у контрольных растений [10]. Данные таблицы 1 свидетельствуют также о незначительных изменениях содержания сухого вещества во всех исследованных сортах салата.

Таблица 1. Урожайность и биометрические характеристика контрольных и опытных растений салата
Table 1. Yield and biometrical characteristics of control and experimental lettuce plants

Показатель Parameter	Петрович cv. Petrovich		Синтез cv. Synthesis		Московский парниковый cv. Moskovsky parnikovy		Пикник cv. Picnic	
	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.
Масса, г/сосуд Weight, g/pot	305a	275a	168b	230a	191a	221a	174a	154a
Высота, см Height, cm	23a	23a	23b	27a	18b	22a	25a	23a
Площадь листа, см ² Leaf area, cm ²	0.75a	0.80a	0.91a	0.90a	0.76a	0.80a	0.88a	0.84a
Сухое вещество, % Dry weight, %	4.7a	4.7a	4.9a	4.7a	5.8a	5.5a	5.9a	5.6a

Для каждого сорта значения в рядах с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно тесту Дункана при $p < 0.05$

For each cultivar values in lines with similar indexes do not differ statistically according to Duncan test at $p < 0,05$

Антиоксидантный статус

Изменение уровня фотосинтетических пигментов в результате воздействия космического стресса на семена салата (табл. 2) оказались значимыми только для сортов Московский парниковый и Петрович, что хорошо коррелировало с возрастанием массы опытных растений по сравнению с контрольными. Значимое снижение уровня фотосинтетических пигментов наблюдалось у сорта Пикник: общего хлорофилла в 1.28 раз и каротина – в 1.75 раза.

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что изменение содержания хлорофиллов и особенно каротиноидов в растениях под действием космического стресса сортоспецифично, что косвенно указывает на изменение в опытных образцах показателей, непосредственно связанных с эффективностью фотосинтеза: усвоения световой энергии, уровня антиоксидантной защиты, интенсивности биосинтеза фитогормонов

[18,19] и стабилизации фотосинтетического аппарата [20]. Согласно полученным данным взаимосвязь между накоплением хлорофилла и каротина в листьях опытных и контрольных образцов салата характеризуется высоким коэффициентом корреляции, достигающим 0.952 при $p < 0.001$.

С другой стороны, следует отметить, что такие показатели антиоксидантного статуса, как общая антиоксидантная активность, содержание аскорбиновой кислоты, полифенолов, пролина и малонового диальдегида (показателя интенсивности перекисного окисления липидов) изменялись незначительно в результате космического стресса (табл.3). Была отмечена только тенденция к возрастанию общей антиоксидантной активности и накопления пролина салатом, выращенным из семян, побывавших в космосе, однако, достоверных различий между контрольными и опытными образцами листьев выявлено не было.

Таблица 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях контрольных и опытных растений (мг/г сырой м.)
Table 2. Content of photosynthetic pigments in leaves of control and space treated plants (mg/g f.w.)

Показатель Parameter	Петрович cv. Petrovich		Синтез cv. Synthesis		Московский парниковый cv. Moskovsky parnikovy		Пикник cv. Picnic	
	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.
Хлорофилл а Chlorophyll a	0.51b	0.62a	0.59a	0.57a	0.51a	0.60a	0.82a	0.62b
Хлорофилл b Chlorophyll b	0.32a	0.34a	0.35a	0.34a	0.30b	0.38a	0.45a	0.37b
Общий хлорофилл Total Chlorophyll	0.83a	0.96a	0.94a	0.91a	0.81b	0.98a	1.27a	0.99b
Каротин Carotene	0.09b	0.13a	0.12a	0.11a	0.11a	0.13a	0.21a	0.12b
Хлорофилл а/ хлорофилл b Chlorophyll a/ Chlorophyll b	1.59	1.82	1.69	1.68	1.70	1.58	1.82	1.68
Хлорофилл/каротин Chlorophyll/carotene	9.22	7.38	7.83	8.27	7.36	7.54	5.05	8.25

Для каждого сорта значения в рядах с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно тесту Дункана при $p < 0.05$

For each cultivar values in lines with the same letters do not differ significantly according to Duncan test at $p < 0.05$

Таблица 3. Показатели антиоксидантного статуса листьев контрольных и опытных образцов салата
Table 3. Antioxidant status of control and experimental plant leaves

Показатель	Петрович cv. Petrovich		Синтез cv. Synthesis		Московский парниковый cv. Moskovsky parnikovy		Пикник cv. Picnic	
	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт
АК, мг/100 г сух.м. AA. mg/100 g d.w.	208.5a	236.2a	242.9a	276.6a	339.7a	321.8a	189.8a	162.5a
Пролин, мг/г сух.м. Prolin. Mg/g d.w.	0.96a	0.95a	0.99a	1.05a	1.11a	1.25a	0.85a	0.96a
МДА, мкм/г сух.м. MDA. mcM/g	0.42a	0.40a	0.53a	0.48a	0.42a	0.41a	0.46a	0.48a
АОА, мг-экв ГК/г сух.м. AOA. mg-eq GA/g d.w.	29a	31.0a	28.7a	31.1a	29.5a	29.5a	26.8a	27.4a
ТР, мг-экв ГК/г сух.м. TP. mg-eq GA/ g d.w.	19.2a	18.8a	20.7a	21.1a	18.8a	18.8a	17.5a	18.2a

АК: аскорбиновая кислота; АОА: общая антиоксидантная активность; ТР: Полифенолы; МДА: малоновый диальдегид. Для каждого сорта значения в рядах с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно тесту Дункана при $p < 0.05$

AA - ascorbic acid; AOA - total antioxidant activity; TP - polyphenols; MDA - malonic dialdehyde.

For each cultivar values in lines with the same letters do not differ significantly according to Duncan test at $p < 0.05$

Элементный профиль растений

Известно, что многие химические элементы активно участвуют в защите растений от воздействия оксидантно-го стресса. В этой связи особенно важным представляются данные изменения элементного состава растений под

действием космического стресса на семена. Высокая сортоспецифичность салата к воздействию космического стресса определила возможность установления общих закономерностей лишь для нескольких элементов (табл.4): Se, V, и в меньшей степени Fe и Cr (рис. 1).

Таблица 4. Минеральный состав листьев опытных и контрольных образцов салата (мг/кг с.м.)
Table 4. Mineral composition of control and experimental lettuce (mg/kg d.w.)

Показатель Parameter	Петрович cv. Petrovich		Синтез cv. Synthesis		Московский парниковый cv. M.parnikovy		Пикник cv. Picnic	
	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.	Контроль Control	Опыт Exper.
Зола, Ash, %	8.43a	9.55a	8.65a	6.62b	8.44a	7.60a	8.88b	11.5a
Ca	7222a	8428a	5384a	5917 a	10725a	8090b	5943a	5576a
K	64394a	73598a	69683a	49991b	60939a	58027a	74870a	81600a
Mg	2288a	2264a	1698a	1521a	2897a	2009b	1937a	1756a
Na	608a	685a	745a	526b	787a	565b	639a	551a
P	9327a	9937a	8685a	7919a	8618a	7868a	5160a	5120a
B	15.7b	19.2a	15.2a	13.5a	17.6a	15.8a	16.3a	16.7a
Co	0.082a	0.096a	0.052a	0.061a	0.100a	0.072b	0.051a	0.054a
Cu	3.86b	4.73a	3.44a	3.43a	4.21a	3.16b	2.86a	3.32a
Fe	119b	171a	72.8b	90.2a	122a	143a	81.0a	91.1a
Li	0.58a	0.64a	0.53a	0.47a	0.81a	0.57b	0.67a	0.57a
Mn	14.9a	17.6a	11.1b	16.4a	18.4a	14.2b	21.4a	19.4a
Mo	2.09a	2.47a	1.66a	1.74a	3.05a	2.64a	1.65a	1.86a
Se	0.060b	0.078a	0.054b	0.081a	0.060b	0.090a	0.059b	0.128a
Zn	26.2a	32.4a	25.4a	23.8a	35.9a	27.2b	28.2a	25.8a
Al	61.7b	125a	41.2b	58.8a	76.9a	71.7a	65.2a	58.4a
As	0.12b	0.15a	0.11a	0.079b	0.097a	0.12a	0.086b	0.13a
Cd	0.14a	0.15a	0.11a	0.10a	0.20a	0.14b	0.10a	0.098a
Cr	0.36b	0.51a	0.23b	0.35a	0.32a	0.34a	0.18b	0.24a
Ni	0.52a	0.46a	0.27b	0.42a	0.49b	0.71a	0.23a	0.27a
Pb	0.51a	0.59a	0.31a	0.38a	0.59a	0.44b	0.29a	0.34a
Sr	29.8b	43.5a	28.5a	30.5a	52.7a	39.4b	24.6a	24.9a
V	0.21b	0.39a	0.14b	0.20a	0.20b	0.26a	0.12b	0.24a

Для каждого сорта значения в рядах с одинаковыми индексами статистически не различаются согласно тесту Дункана при $p < 0.05$

For each cultivar values in lines with the same letters do not differ significantly according to Duncan test at $p < 0.05$

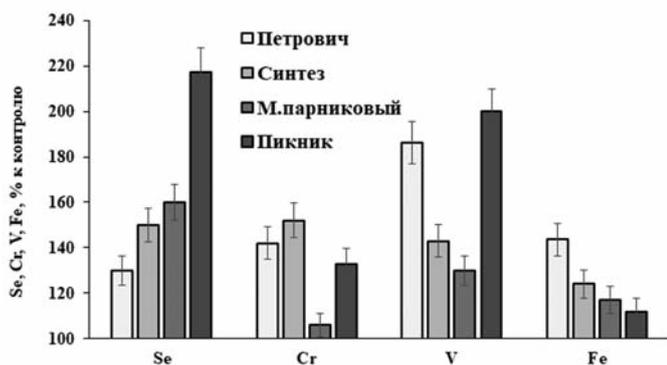


Рис. 1. Влияние космического стресса на накопление салата селена, хрома и ванадия по отношению к данным для контрольных растений

Figure 1. Effect of space stress on Se, Cr, V and Fe accumulation by lettuce, % to the control values

В настоящее время эссенциальность селена для растений не установлена, однако, хорошо известно, что повышенные концентрации микроэлемента способны значительно повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды, стимулировать накопление фотосинтетических пигментов, белков, моносахаров, активировать антиоксидантную систему защиты растений [21] и, как следствие, повысить урожайность сельскохозяйственных растений и качество получаемой продукции [22]. В этой связи особенно примечательным представляется установление значимого повышения уровня селена в салате, выращенного из семян, побывавших в космосе. Интенсивность различий с контрольными растениями разных сортов возрастала в ряду: Петрович > Синтез > Московской парниковый > Пикник. Показательно, что аналогичная закономерность повышения уровня селена в растениях, выращенных из космических семян была также установлена для представителей других семейств растений: *Apiaceae*, *Brassicaceae* и *Solanaceae* [10,11]. Следует отметить, что салат не является аккумулятором селена.

Положительное или отрицательное действие ванадия [23], также как хрома [24], зависит от концентрации элементов. Высокие уровни ванадия могут ингибировать рост растений, в то время как низкие концентрации обладают ростостимулирующим действием [23]. При низких концентрациях ванадий способствует накоплению хлорофилла, аминокислот, сахаров и других антиоксидантов [23], что предполагает возможность проявление защитного эффекта микроэлемента при воздействии космического стресса на семена салата. Интересно отметить, что увеличение способности космических растений к накоплению ванадия проявляется только на салате и не выявлено у томата [11] и представителей семейства *Apiaceae* и *Brassicaceae* [10]. С другой стороны,

следует отметить, что изменение содержание хрома и железа под действием космического стресса сорто- и видоспецифично. Так, в исследовании на укропе и кориандре отмечали снижение накопления железа и хрома [10], в то время как на томате выявлено существенное возрастание уровня железа в мякоти и снижение концентрации в кожуре плодов [11]. В настоящем исследовании превышение концентрации железа в опытных образцах салата по сравнению с контрольными составило 112-144%.

Корреляционные взаимосвязи

Для исследованных элементов наиболее значимые корреляционные взаимосвязи были выявлены между эссенциальными и токсичными для растений элементами: Ca, Sr, Mg, Mo, Co и Pb (рис. 2). Выявленные взаимосвязи определяют показатели элементного статуса растений салата и представляются важными в осуществлении селекции.

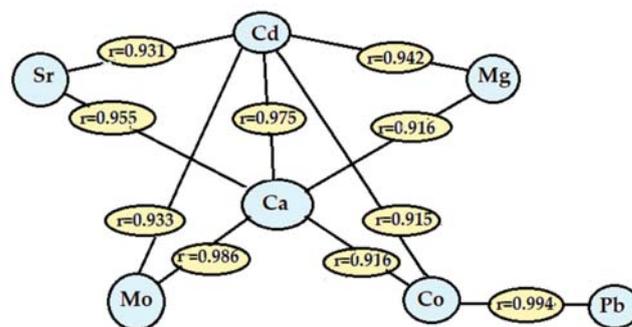


Рис. 2. Наиболее значимые корреляционные взаимосвязи между элементами в салате ($p < 0.001$)

Figure 2. The most significant relationships between elements in lettuce ($p < 0.001$)

Среди установленных взаимосвязей макро- и микроэлементов в листьях салата наиболее известной взаимосвязью является корреляция между Ca и Sr, проявляющаяся как в почвах, так и в растениях благодаря химическому сходству элементов [25]. Известно, что Ca активно участвует в усвоении Cd, ингибируя аккумуляцию последнего корнями растения, но стимулируя перенос кадмия из корней в наземную часть [26]. Положительные корреляционные взаимосвязи между Co - Pb и Co - Cd в растениях были описаны ранее в условиях Индии [27]. Взаимосвязь эссенциального молибдена и токсичного кадмия определяет защитный эффект Mo, проявляющийся в стимулировании фотосинтеза, накоплении пролина и водорастворимых белков [28]. Действительно, нами была выявлена прямая корреляция между содержанием молибдена в листьях салата и уровнем накопления пролина ($r = 0.966$, $p < 0.001$).

4. Заключение

Проведенное исследование влияния длительного хранения семян салата в условиях МКС на показатели качества и минеральный состав салата позволило впервые выявить специфические особенности отклика растений салата на воздействие космического стресса: высокие межсортовые различия в устойчивости семян к такому воздействию, низкий уровень влияния на показатели антиоксидантного статуса растений (общую антиоксидантную активность, содержание полифенолов, аскорбиновой кислоты, фотосинтетических пигментов и пролина), специфическое повышенное накопление растениями селена, ванадия и в меньшей степени хрома и железа, а также установить корреляционные взаимосвязи между элементами в растениях. Результаты работы свидетельствуют о необходимости осуществления более расширенного исследования по выявлению перспективных видов и сортов семян различных растений к воздействию микрогравитации и космического излучения в условиях МКС.

• Литература / References

- Musgrave M.E. Seeds in space. *Seed Sci. Res.* 2002;(12):1–16.
- Xianfang W., Long Z., Weixu D., Chunhua L. Study of space mutation breeding in China. *Appl. Life Sci.* 2004;(18):241–246.
- He X., Liu M., Lu J., Xue H., Pan Y. Space mutation breeding: a brief Introduction of screening New floricultural, vegetable and medicinal varieties from earth-grown plants returned from China's satellites and spaceships. In Teixeira da Silva JA (ed.), *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: Advances and Topical Issues*. 2006. 1st Edn. Isleworth: Global Science Books, pp. 266–271.
- Liu L.X., Guo H.J., Zhao L., Gu J., Zhao S. Advances in crop improvement by space mutagenesis in China. *ICSC.* 2008;(4):274.
- Prasad B., Richter P., Vadakedath N., Haag F.W.M., Strauch S.M., Mancinelli R., Schwarzwälder A., Etcheparre E., Gaume N., Lebert M. How the space environment influences organisms: an astrobiological perspective and review. *Int. J. Astrobiol.* 2021;(20):159–177. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000057>.
- Ferl R.J., Koh J., Denison F., Paul A.L. Spaceflight induces specific alterations in the proteomes of *Arabidopsis*. *Astrobiol.* 2015;(15):32–56. <https://doi.org/10.1089/ast.2014.1210>.
- Caplin N.M. Developmental, morphological and physiological effects of chronic low doses of ionizing radiation on plants on Earth and in space. Ph. Dr Thesis, University of the West of England, Bristol, England, 2019.
- Deyong Z., Jie C., Yishu Y., Meng Z., Shan S., Xin G. Effects of space flight on expression of key proteins in rice leaves. *Rice Sci.* 2020;(27):423–433. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2019.12.011>.
- Hayat S., Hayat Q., Alyemeni M.N., Wani A.S., Pichtel J., Ahmad A. Role of proline under changing environments: a review. *Plant Signal Behav.* 2012;7(11):1456–66. <https://doi.org/10.4161/psb.21949>.
- Kharchenko V., Golubkina N., Skrypnik L., Murariu O.C., Vecchietti L., Caruso G. The Effect of One-year Seed Spaceflight Storage on Biochemical and Mineral Characteristics of Mature Leafy Vegetables Belonging to *Brassicaceae*, *Apiaceae* and *Asteraceae* Families Horticulturæ. 2023;(9):535. <https://doi.org/10.3390/horticulturæ9050535>.
- Djoss H., Golubkina N., Kondratyeva I., Koshevarov A., Shkaplerov A., Zavarikina T., Nechitailo G., Caruso G. Effect of spaceflight on tomato seed quality and biochemical characteristics of mature plants *Horticulturæ.* 2021;7(5):89. <https://doi.org/10.3390/horticulturæ7050089>.
- Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic bio- membranes. *Methods of Enzymology.* 1987;(148):350–382.
- Голубкина Н.А., Кекина Е.Г., Молчанова А.В., Антошкина М.С., Надежин С.М., Солдатенко А.В. Антиоксиданты растений и методы их определения. Москва, 2020, Инфра-М. <https://doi.org/10.12737/1045420>. [Golubkina N.A., Kekina H.G., Molchanova A.V., Antoshkina M.S., Nadezhkin S.M., Soldatenko A.V. Plant antioxidants and methods of their determination. Moscow 2020. Infra-M. (In Russ.)]
- Ouertani R.N., Abid G., Karmous C., Chikha M.B., Boudaya O., Mahmoudi H., Mejri S., Jansen K., Ghorbel A. Evaluating the contribution of osmotic and oxidative stress components on barley growth under salt stress. *AoB Plants.* 2021;13(4):plab034. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab034>.
- Heath R.L., Parker L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch. Biochem. Biophys.* 1968;(125):189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
- Levine H.G. The Influence of Microgravity on Plants. NASA ISS Research Academy and Pre Application Meeting, 3- 5th August 2010. At url: <https://www.nasa.gov/pdf/478076main>.
- Chandler J.O., Haas F.B., Khan S., Bowden L., Ignatz M., Enfissi E.M.A., Gawthrop F., Griffiths A., Fraser P.D., Rensing S.A., Leubner-Metzger G. Rocket science: the effect of spaceflight on germination physiology, ageing, and transcriptome of *Eruca sativa* seeds. *Life.* 2020;10(4):49. <https://doi.org/10.3390/life10040049>.
- Maoka T. Carotenoids as natural functional pigments. *J. Nat. Med.* 2020;74(1):1–16. <https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x>.
- Jia C.-Z., Wang J.-J., Chen D.-L., Hu X.-W. Seed Germination and Seed Bank Dynamics of *Eruca sativa* (*Brassicaceae*): A Weed on the Northeastern Edge of Tibetan Plateau. *Front. Plant Sci.* 2022;(13):820925. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.820925>.
- Hashioto H., Uragami C., Cogdell R.J. Carotenoids and photosynthesis, in Carotenoids in Nature (Cham, Switzerland: Springer). 2016. P. 111–139.
- Khan Z., Thounaojam T.C., Chowdhury D. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. *Plant Growth Regul.* 2023;(100):409–433. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>.
- 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. Moscow, Pechatnyy gorod, 2006. (In Russ.)]
- Hanus-Fajerska E., Wiszniewska A., Kaminska I. A dual role of vanadium in environmental systems—beneficial and detrimental effects on terrestrial plants and humans. *Plants.* 2021;(10):1110. <https://doi.org/10.3390/plants10061110>.
- López-Bucio J.S., Ravelo-Ortega G., López-Bucio J. Chromium in plant growth and development: Toxicity, tolerance and hormesis. *Environ. Pollut.* 2022;(312):120084. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120084>.
- Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. 2011, CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Zhang S., Li Q., Nazir M.M., Ali S., Ouyang Y., Ye S., Zeng F. Calcium Plays a Double-Edged Role in Modulating Cadmium Uptake and Translocation in Rice. *Int J Mol Sci.* 2020;29,21(21):8058. <https://doi.org/10.3390/ijms21218058>.
- Aslam M., Verma D.K., Dhakery R., Rais S., Alam M., Ansari F.A. Bioindicator: A Comparative Study on Uptake and Accumulation of Heavy Metals in Some Plant's Leaves of M.G. Road, Agra City, India. *Res. J. Environ. Earth Sci.* 2012;64(12):1060–1070.
- Han Z., Wei X., Wan D., He W., Wang X., Xiong Y. Effect of Molybdenum on Plant Physiology and Cadmium Uptake and Translocation in Rape (*Brassica napus* L.) under Different Levels of Cadmium Stress. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020;(17):2355. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072355>.

Об авторах:

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>, SPIN-код: 7149-9572, kharchenkoviktor777@gmail.com

Надежда Александровна Голубкина – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник лабораторно-аналитического отдела, SPIN-код: 9284-3454, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>, автор для переписки, segolubkina45@gmail.com

Любовь Николаевна Скрыпник – доцент ОНК «Институт медицины и наук о жизни», кандидат биол. наук, SPIN-код: 1488-3109, <https://orcid.org/0000-0001-6280-1194>, luba.skrypnik@gmail.com

Отилия Кристина Мурариу – кандидат с.-х. наук, доцент, факультет пищевой технологии, Университет Естественных Наук Иона Ионеску де ла Брада, <https://orcid.org/0000-0002-9612-6198>, otiliamurariu@uaiasi.ro

Джанлука Карузо – доктор с.-х. наук, факультет сельскохозяйственных наук, Неаполитанский университет им. Федерика II, <https://orcid.org/0000-0001-6981-852X>, gcaruso@unina.it

About the Authors:

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>, SPIN-code: 7149-9572, kharchenkoviktor777@gmail.com

Nadezhda A. Golubkina – Dr. Sci. (Agriculture), Head Researcher of Laboratory-Analytical Department, Correspondence Author, segolubkina45@gmail.com, SPIN-code: 9284-3454, <https://orcid.org/0000-0003-1803-9168>

Liubov N. Skrypnik – Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor, SPIN-code: 1488-3109, <https://orcid.org/0000-0001-6280-1194>, luba.skrypnik@gmail.com

Otilia Cristina Murariu – PhD, Assistant Professor, Department of food technology, University of Life Sciences Ion Ionescu de la Brad of Iasi, <https://orcid.org/0000-0002-9612-6198>, otiliamurariu@uaiasi.ro

Gianluca Caruso – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of vegetable crops, Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II, <https://orcid.org/0000-0001-6981-852X>, gcaruso@unina.it