

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-198-212

EDN: XSSDXL

УДК 546.28:633.358:661.691.1:669.73:669.71

Научная статья / Research article

Оценка изменения содержания кадмия и алюминия в растениях гороха посевного под влиянием селена и кремния на ранней фазе вегетации

Я.В. Пухальский^{1,2}, А.И. Ковальчук¹, С.И. Лоскутов²,
Н.И. Воробьев¹, А.И. Осипов³, Ю.В. Косильников¹,
А.П. Кожемяков¹, Ю.В. Лактионов¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, г. Пушкин, Российская Федерация

²Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

puhalskyuan@gmail.com

Аннотация. Большое количество сельскохозяйственных угодий находится в непосредственной близости к крупным городам, а значит, промышленным предприятиям и магистральным дорогам, что приводит к неизбежному загрязнению почв тяжелыми металлами, из которых наиболее токсичным является кадмий. Также в связи со снижением темпов известкования и применения минеральных удобрений в кислых почвах происходит накопление ионов алюминия. В настоящее время ведутся поиски среди различных видов растений, проявляющих устойчивость к воздействию токсикантов и способных к постепенному выносу (фитоэкстракции) их из окружающей среды. В качестве потенциальных кандидатов, наравне со злаками (*Poáceae*) и Капустными (*Brassicáceae*), могут рассматриваться представители из семейства Бобовых (*Fabaceae*). Исследования, проведенные в данной работе с разными по толерантности генотипами гороха посевного (дикая чувствительная линия SGE и созданный на ее основе устойчивый мутант SGECdt), показали, что предпосевная обработка семян микроэлементами в виде селена и кремния по-разному подействовала на выбранные генотипы. Кремний обладал более выраженным стресс-протекторным действием, стимулирующим рост обоих видов. Однако в отдельных вариантах он снижал степень выноса и закрепления токсикантов в биомассе, что не подходит для использования его в технологии фитоэкстракции. Селен,

© Пухальский Я.В., Ковальчук А.И., Лоскутов С.И., Воробьев Н.И., Осипов А.И., Косильников Ю.В., Кожемяков А.П., Лактионов Ю.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

напротив, еще больше ингибировал урожайность, но способствовал большей аккумуляции алюминия в побегах. Биметаллический тип загрязнения проявился в снижении аккумуляции токсикантов в биомассе у обоих генотипов в среднем на 14,0 % в сравнении с моноэлементным типом. Обработка селеном и кремнием в целом не изменила картину, наблюдаемую нами в сравнении с моноэлементным типом загрязнения.

Ключевые слова: тяжелые металлы, *Pisum sativum*, SGE, SGECDt, загрязнение почв

Благодарности. Статья выполнена при поддержке Госзадания FGEW-2024-0009. Авторы признательны доктору биологических наук А.А. Белимову за предоставление семенного материала. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой статьи.

Вклад авторов. Пухальский Я.В., Лоскутов С.И. – концептуализация исследований, выполнение лабораторных опытов и сбор данных; Воробьев Н.И., Кожемяков А.П., Осипов А.И., Лактионов Ю.В. – критический анализ текста; Ковальчук А.И., Косульников Ю.В. – анализ данных и их интерпретация.

История статьи: поступила в редакцию 10.06.2023; доработана после рецензирования 12.11.2023; принята к публикации 15.01.2024.

Для цитирования: Пухальский Я.В., Ковальчук А.И., Лоскутов С.И., Воробьев Н.И., Осипов А.И., Косульников Ю.В., Кожемяков А.П., Лактионов Ю.В. Оценка изменения содержания кадмия и алюминия в растениях гороха посевного под влиянием селена и кремния на ранней фазе вегетации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 198–212. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-198-212>

Assessment of changes in the accumulation of cadmium and aluminum in pea plants under the influence of selenium and silicon in the early phase of vegetation

Jan V. Puhalsky^{1,2}, Anastasia I. Kovalchuk¹,
Svyatoslav I. Loskutov², Nikolay I. Vorobyov¹, Anatoly I. Osipov³,
Yuri V. Kosulnikov¹, Andrey P. Kozhemyakov¹, Yuriy V. Laktionov¹

¹All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Pushkin, Russian Federation

²Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatoва,
Russia Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

³Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, St. Petersburg,
Russian Federation

puhalskyan@gmail.com

Abstract. A large number of agricultural lands are located in close proximity to large cities, and therefore industrial enterprises and highways, which leads to inevitable soil contamination with heavy metals, of which cadmium is the most toxic. Also, due to a decrease in the rate of liming and the use of mineral fertilizers, aluminum ions accumulate in acidic soils. Currently, a search is underway among various plant species that exhibit resistance to the effects of toxicants and are capable of their gradual removal (phytoextraction) from the environment. Representatives from the legume family (*Fabaceae*) can be considered as potential candidates along with Cereals (*Poaceae*) and Brassicas (*Brassicaceae*). Studies conducted in this work

with different tolerant genotypes of common pea (the wild sensitive line SGE, and the resistant mutant SGECDt created on its basis) showed that pre-sowing treatment of seeds with microelements in the form of selenium and silicon had a different effect on the selected genotypes. Silicon had a more pronounced stress-protective effect, stimulating the growth of both species. However, in some variants it reduced the degree of removal and fixation of toxicants in biomass, which is not suitable for use in phytoextraction technology. Selenium, on the contrary, further inhibited yield, but promoted greater accumulation of aluminum in shoots. The bimetallic type of pollution manifested itself in a decrease in the accumulation of toxicants in biomass in both genotypes by an average of 14.0%, compared with the monoelement type. Treatment with selenium and silicon here generally did not change the picture we observed in comparison with the monoelement type of pollution.

Keywords: heavy metals, *Pisum sativum*, SGE, SGECDt, soil pollution

Acknowledgments: The article was supported by State Assignment FGEW-2024-0009. The authors are grateful to Dr. A.A. Belimov for providing seed material. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Authors' contributions. Puhalsky J.V., Loskutov S.I. – conceptualization of research, laboratory experiments and data collection; Vorobyov N.I., Kozhemyakov A.P., Osipov A.I., Laktionov Yu.V. – critical analysis of the text; Kovalchuk A.I., Kosulnikov Y.V. – data analysis and interpretation.

Article history: received 10.06.2023; revised 12.11.2023; accepted 15.01.2024.

For citation: Puhalsky JV, Kovalchuk AI, Loskutov SI, Vorobyov NI, Osipov AI, Kosulnikov YuV, Kozhemyakov AP, Laktionov YuV. Assessment of changes in the accumulation of cadmium and aluminum in pea plants under the influence of selenium and silicon in the early phase of vegetation. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(2):198–212. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-2-198-212>

Введение

Антропогенная нагрузка на окружающую среду приводит к повышению содержания поллютантов в компонентах биосферы, в частности к постепенному накоплению в почвах токсичных концентраций тяжелых металлов (ТМ)¹. Наиболее часто встречается полиэлементное загрязнение [1]. Для сельскохозяйственных земель это, прежде всего, связано с нерациональным применением минеральных удобрений, особенно фосфорных.

В последние годы особое внимание уделяется токсичному воздействию кадмия (Cd) на многие виды растений [2–5]. Согласно ранжированию ТМ по классам опасности для почв, элемент занимает одно из первых мест [6]. Согласно исследованиям, его содержание в почвах России варьирует в пределах от 0,01 до 1,0 мг/кг и может достигать 11 мг/кг. По оценкам ВОЗ, за последние 100 лет техногенное загрязнение окружающей среды кадмием выросло примерно в 5 раз. В РФ 185 тыс. га почв различного назначения необратимо загрязнены Cd. Сократить его валовое содержание в них

¹ См.: Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.; Алексеенко В.А., Алёшкин Л.В., Беспалько Л.Е. Цинк и кадмий в окружающей среде. М.: Наука, 1992. 200 с.; Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

невозможно ввиду закрепления почвенными коллоидами [7]. Среди прочих токсикантов также можно выделить алюминий (Al), который хотя и не относится к типичным представителям ТМ, однако как металлоид тоже проявляет токсические эффекты по отношению к произрастающим растениям² [8], особенно на кислых почвах [9], где содержание алюминия колеблется от 30 до 200 мг/кг. В нашей стране вопрос токсичности ионов алюминия не был актуален вплоть до конца XX в. в связи с широкомасштабным известкованием почв. Однако в настоящее время интенсивность известкования снижается из-за дороговизны метода. Проблема решается путем селекции кислотоустойчивых сортов, чему также способствует создание экспресс-методик оценки внутривидовой вариабельности сортов по признаку алюмотолерантности культур в водной среде. Такие методики просты в исполнении, не требуют значительного времени, обладают большой пропускной способностью и позволяют диагностировать генотипы и индивидуальные растения на ранних этапах онтогенеза. Это дает им преимущества перед вегетационными и полевыми методами, где возможна сильная вариабельность pH, содержание ионов алюминия в почвенном растворе и влияние других неконтролируемых факторов [10].

В качестве потенциальных кандидатов для фитосанации загрязненных почв, наравне со Злаками (*Poáceae*) и Капустными (*Brassicáceae*), могут рассматриваться Бобовые (*Fabaceae*). Среди бобовых наиболее распространенной культурой в нашей стране является горох посевной (*Pisum sativum*), занимающий более 80 % площади бобовых культур, что составляет около 1 млн га [10]. Важно отметить, что в зависимости от их видовой принадлежности влияние различных ТМ по-разному сказывается на урожайности бобовых культур [11]. В исследованиях на примере сои было показано, что ионы Al и Cd проявляют синергетическое ингибирующее действие на рост и развитие данных растений [12]. Оба ксенобиотика вызывали значительное торможение роста и снижение активности антиоксидантных ферментов, подавление процессов транспирации, ингибирование синтеза хлорофилла в листьях, а также снижение скорости поступления биофильных веществ в биомассу.

В последнее время все больший интерес представляет практический прием биообогащения растений различными биогенными микроэлементами, которые используются в качестве средств защиты и повышения устойчивости молодых проростков к биотическим и абиотическим стресс-факторам. Среди последних часто выделяют селен (Se) и кремний (Si) – элементы, регулирующие антиоксидантную активность растений. Выяснено, что оба элемента проявляют синергию в отношении смягчения абиотических стрессов [13]. Вместе с тем аспекты проявления адаптационной лабильности в условиях полиметаллического стресса пока еще остаются дискуссионными. Обычно исследования по изучению Si-Se-Cd-Al взаимодействий проводят в сильнозагрязненных почвах.

² Зонн С.В., Травлев А.П. Алюминий. Роль в почвообразовании и влияние на растения. Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1992. 224 с.

Целью текущего исследования была оценка накопления Cd и Al в биомассе различных по металл-устойчивости генотипов гороха посевного, а также изменение баланса их выноса (фитоэкстракции) на ранней фазе вегетации под влиянием предпосевной обработки семян соединениями Se и Si.

Научная новизна. Показана эффективность применения в методике адаптации различных по устойчивости генотипов гороха посевного 0,002%-го раствора селена и 0,2%-го раствора кремния путем предпосевной обработки его семян.

Материалы и методы

Объектами для исследования послужили два генотипа гороха посевного из коллекции ФГБНУ ВНИИСХМ: дикая линия SGE и созданный на ее основе в результате мутагенеза этилметансульфонатом Cd-устойчивый генотип SGECDt [14], сопоставимый по толерантности и накоплению ионов кадмия с индийской горчицей (*Brassica juncea* L. Czern.) VIR263 [15]. Растения выращивали в закрытом помещении в течение 3 недель при температуре воздуха 28 °С, влажности воздуха 60 % и искусственном освещении светильником ДНАТ 400 Вт с фотопериодом 16/8 ч.

Для выявления механизмов положительного действия селена и кремния на рост и развитие растений в условиях загрязнения почвы кадмием был проведен модельный опыт. Для закладки опыта использовали пахотный горизонт залежной дерново-подзолистой почвы слабой степени окультуренности, отобранной с сельскохозяйственного поля в Ленинградской области (рис. 1).

Агрохимическая характеристика почвы проведена стандартными методами: рН_{KCl} 4,63 ± 0,62; рН_{H₂O} 5,43 ± 0,32; содержание гумуса 1,47 ± 0,01 %; гидролитическая кислотность 4,89 ± 0,02 мг-экв/100 г; сумма обменных оснований 7,30 ± 0,70 мг-экв/100 г; К₂O 82,7 ± 7,3 мг/кг; P₂O₅ 93,9 ± 4,9 мг/кг.

Семена высевали в пластиковые сосуды с кассетами на 18 ячеек (в двукратной повторности) на вариант. При набивке смешанного образца почвы вносили минеральные удобрения в форме сложного комплекса с содержанием N₅₀P₁₆K₁₆, азофоску N₁₆P₁₆K₁₆ сразу при посеве и аммиачную селитру N₃₄ по вегетации [16]. Негативное влияние кадмия в дозе 10 мг/кг – 3,0 г/м² и алюминия в дозе 30 мг/кг – 9 г/м² оценивали по результатам внесения в почвенный субстрат их солей в виде хлоридов CdCl₂ и AlCl₃. Анион солей ТМ был выбран неслучайно, поскольку на примере кадмия показано, что солённость хлоридов усиливает поглощение его растениями из почвенного раствора даже при очень низком содержании [17]. За день до посева проводили обработку семян селенитом натрия (Na₂SeO₃) и силикатом натрия (Na₂SiO₃·9H₂O) путем их замачивания в чашках Петри растворами соответствующих соединений в концентрациях 20 ppm (0,002 %) Se [18] и 2000 ppm (0,2 %) Si [19] соответственно. В качестве контроля семена обрабатывали дистиллированной водой (рис. 2).



Рис. 1. Участок с точками отбора почвенных проб: № 1 – 59°25'06.1"N 30°02'12.5"E; № 2 – 59°25'05.9"N 30°02'13.5"E; № 3 – 59°25'05.5"N 30°02'12.5"E; № 4 – 59°25'05.9"N 30°02'11.5"E; № 5 – 59°25'05.9"N 30°02'12.4"E

Источник: составлено авторами /

Figure 1. Area with soil sampling points: No. 1 – 59°25'06.1"N 30°02'12.5"E; No. 2 – 59°25'05.9"N 30°02'13.5"E; No. 3 – 59°25'05.5"N 30°02'12.5"E; No. 4 – 59°25'05.9"N 30°02'11.5"E; No. 5 – 59°25'05.9"N 30°02'12.4"E

Source: compiled by the authors



Рис. 2. Визуальное представление постановки опыта с горохом на загрязненной металлами дерново-подзолистой почве

Источник: составлено авторами /

Figure 2. Visual representation of an experiment with peas on metal-contaminated soddy-podzolic soil

Source: compiled by the authors

По окончании опыта зеленую биомассу побегов высушивали, взвешивали на аналитических весах РА 214С (Ohaus, США) и измельчали в лабораторной мельнице до состояния порошка для последующего химического анализа аккумуляции элементов Cd^{2+} и Al^{3+} в надземной части растений. Для этого небольшую навеску (0,1 г) помещали во фторопластовый сосуд для разложения, добавляли 2,0 мл концентрированной азотной кислоты (HNO_3), 2,0 мл 30 %-го пероксида водорода (H_2O_2) и проводили мокрое озоление в системе разложения проб Digiblock ED36S (LabTech, Италия) в течение 4 ч при температуре 170 °С. Азотную кислоту, используемую для разложения, предварительно очищали в системе очистки кислот subClean. Разложение и последующие операции осуществляли для двух одинаковых навесок анализируемой пробы. Одновременно готовили холостой раствор с использованием тех же самых реактивов. Полученные после терморазложения суспензии сливали в мерные полиэтиленовые сосуды на 50 мл, доводили до метки 25 мл дистиллированной водой и оставляли на сутки для лучшего осаждения и отбора верхнего супернатанта. Содержание токсикантов определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе AAnalyst 200 (Perkin Elmer, США) в соответствии с методикой производителя.

Обработку полученных данных производили с помощью программы Excel 2016 (Microsoft Corp., США).

Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента показали, что повышенная концентрация кадмия (20 ПДК) и алюминия в почве незначительно повлияла на урожайность зеленой биомассы мутантного генотипа гороха SGECdt. Ингибирование в среднем по вариантам составило 17,0 % на кадмии и 21,0 % на алюминии в сравнении с контролем. Совместное внесение токсикантов в среднем снижало биомассу на 24,0 %. Для чувствительного генотипа SGE эти показатели составили 47,0, 30,0 и 49,0 % соответственно. На контроле предпосевная обработка семян кремнием увеличивала прибавку в весе побегов для SGECdt на 53,0 и 27,0 % для SGE; тогда как селен, напротив, незначительно ее снижал: на 2,8 % у SGECdt и на 9,0 % у SGE. Совместная обработка семян показала следующий результат: увеличение веса побегов для SGECdt на 25,0 и 9,0 % для SGE. На загрязненных кадмием и алюминием почве положительный эффект по увеличению биомассы от предпосевной обработки наблюдался только в тех вариантах, где применялось соединение кремния – от 7,0 до 78,0 % в сравнении с контролем без обработок на SGE и от 9,0 до 44,0 % на SGECdt (рис. 3).

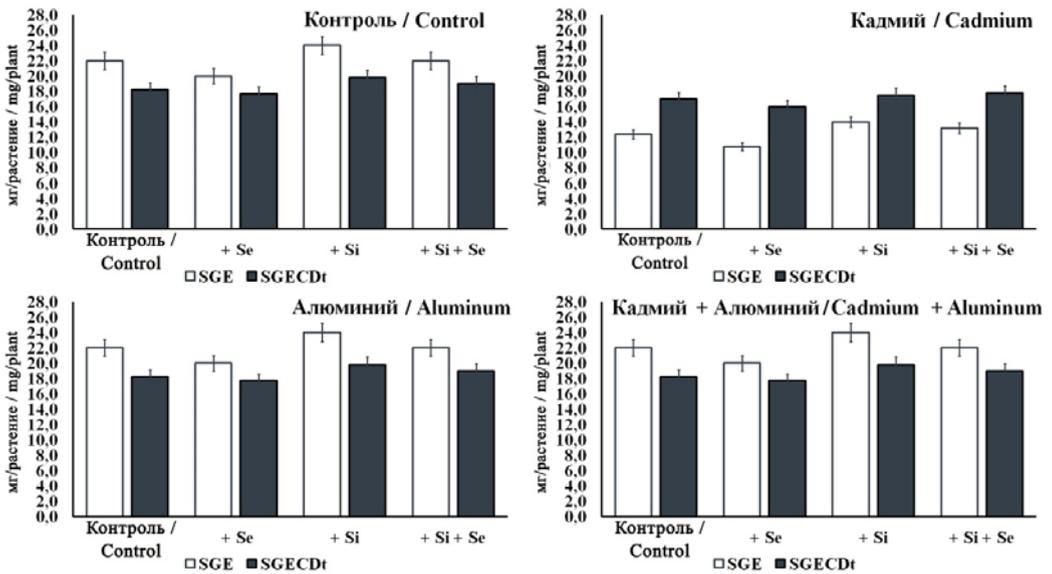


Рис. 3. Влияние предпосевной обработки семян гороха посевного селеном и кремнием на урожайность ювенильных побегов при повышенной концентрации кадмия и алюминия в почве

Источник: составлено авторами /

Figure 3. Effect of pre-sowing treatment with selenium and silicon on the yield of juvenile shoots of peas at elevated concentrations of cadmium and aluminum in the soil

Source: compiled by the authors

Как и ожидалось, мутантный генотип в 2 раза больше аккумулировал в биомассе ионы кадмия и алюминия по сравнению с дикой линией как при моно-, так и при биэлементном типе загрязнения (табл. 1). При сравнении вы-

носа металлов при монозагрязнении почв с биэлементным типом, без дополнительной обработки семян микроэлементами было отмечено снижение аккумуляции токсикантов на последнем как у дикого вида, так и у мутанта. В сравнении с контрольными растениями обработка селеном способствовала повышению выноса токсикантов в побегах: на 23,0 % Cd и 92,0 % Al для SGE, на 11,5 % Cd и 84,3 % Al для SGECdt отдельно по кадмию на 92,0 % для SGE и на 84,3% для SGECdt отдельно по алюминию. Кремний, напротив, показал снижение аккумуляции токсикантов у обоих генотипов. При совместной обработке результат в накоплении у обоих генотипов проявился только на металлоиде, однако он был ниже, чем на варианте при воздействии отдельно селена. Увеличение по Al здесь составило 44,0 и 20,0 % по алюминию.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов и металлоидов в сухой биомассе побегов гороха посевного

Обработка				Содержание Cd, мг/г сухой массы		Содержание Al, мг/г сухой массы	
				Генотип			
Cd, мг/кг	Al, мг/кг	Se, ppm	Si, ppm	SGE	SGECdt	SGE	SGECdt
10	–	0	–	13,50	24,58	н/о	н/о
10	–	20	–	16,60	27,40	н/о	н/о
10	–	–	2000	10,44	15,97	н/о	н/о
10	–	20	2000	14,76	23,45	н/о	н/о
0	30	–	–	н/о	н/о	0,25	0,51
0	30	20	–	н/о	н/о	0,48	0,94
0	30	0	2000	н/о	н/о	0,22	0,59
0	30	20	2000	н/о	н/о	0,36	0,61
10	30	–	–	11,44	21,82	0,22	0,43
10	30	20	–	17,78	21,02	0,47	0,70
10	30	–	2000	11,08	16,95	0,26	0,58
10	30	20	2000	15,13	18,51	0,41	0,60

Примечание: н/о – не обнаружено.

Источник: составлено авторами.

Table 1. Content of heavy metals in dry biomass of pea shoots

Treatment				Cd content, mg/g dry weight		Al content, mg/g dry weight	
				Genotype			
Cd, mg/kg	Al, mg/kg	Se, ppm	Si, ppm	SGE	SGECdt	SGE	SGECdt
10	–	0	–	13.50	24.58	n/d	n/d
10	–	20	–	16.60	27.40	n/d	n/d
10	–	–	2000	10.44	15.97	n/d	n/d
10	–	20	2000	14.76	23.45	n/d	n/d
0	30	–	–	n/d	n/d	0.25	0.51
0	30	20	–	n/d	n/d	0.48	0.94
0	30	0	2000	n/d	n/d	0.22	0.59
0	30	20	2000	n/d	n/d	0.36	0.61
10	30	–	–	11.44	21.82	0.22	0.43
10	30	20	–	17.78	21.02	0.47	0.70
10	30	–	2000	11.08	16.95	0.26	0.58
10	30	20	2000	15.13	18.51	0.41	0.60

Note: n/d – not detected.

Source: compiled by the authors.

Биметаллический тип загрязнения проявился в снижении аккумуляции токсикантов в биомассе у обоих генотипов в среднем на 14,0 % в сравнении с моноэлементным типом. Обработка селеном и кремнием здесь в целом не изменила картину в сравнении с моноэлементным типом загрязнения.

Заключение

В среднем, исходя из опытных данных, можно заключить, что обработка семян кремнием и селеном повышала вынос алюминия у обоих генотипа вне зависимости от типа загрязнения. Снижение выноса токсикантов на контроле на 14,0 % без дополнительных добавок Se/Si может означать то, что, поступив в почву в виде водных растворов солей, ионы Cd и Al по-разному связываются с органическими лигандами (почвенными коллоидами). В результате взаимного влияния на сорбцию друг друга происходит межфазное смещение и других катионов (в частности кальция, магния и натрия) [12], которые могут выступать в роли антагонистов данных элементов при их транслокации через корневую зону в надземные органы и ткани. Кинетика данного процесса может носить достаточно долговременный характер [20–21]. За счет влияния обоих токсикантов на понижение кислотности, восстановление целостного состояния нарушенной среды и адаптацию культуры может уходить до 4 недель, что выходило за временные рамки, установленные в данном опыте. Тем не менее выявленные эффекты взаимного влияния ионов Cd и Al проявляются уже на первых минутах внесения в субстрат, что позволяет уже на раннем этапе онтогенеза растений оценить уровень лабильности двух выбранных генотипов по устойчивости к токсикантам и оценить различия в процессе их выноса с биомассой, обусловленных также дополнительным фактором влияния добавок микроэлементов.

Вероятно, степень негативного влияния селена на снижение биомассы растений SGE и закрепление в ней ионов алюминия будет и дальше сохраняться в вегетации культуры. Кремний обладал более стресс-протекторным действием, стимулируя рост обоих растений, в отдельных вариантах даже снижая степень выноса и закрепления токсикантов, что не подходит для использования его в фитоэкстракции.

Список литературы

- [1] *Елькина Г.Я.* Реакция растений на полиэлементное загрязнение подзолистых почв тяжелыми металлами // *Агрохимия*. 2017. № 7. С. 78–85. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29394888>.
- [2] *Hasan S.A., Fariduddin Q., Ali B., Hayat S., Ahmad A.* Cadmium: toxicity and tolerance in plants // *Journal of Environmental Biology*. 2009. Vol. 30, no. 2. P. 165–174. https://www.researchgate.net/publication/41396456_Cadmium_Toxicity_and_tolerance_in_plants
- [3] *Haider F.U., Liqun C., Coulter J.A., Cheema S.A., Wu J., Zhang R., Wenjun M., Farooq M.* Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. 211 p. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.

- [4] *Abou Seeda M.A., Abou El-Nour E.A.A., Maha M.S. Abdallah, Hala M.S. El-Bassiouny, Abd El-Monem A.A.* Physiological Effects of Cadmium on Plants: A review // Middle East Journal of Agriculture Research. 2023. Vol. 12, no. 2. P. 267–362. <https://doi.org/10.36632/mejar/2023.12.2.19>.
- [5] *Zulfiqar U., Jiang W., Xiukang W., Hussain S., Ahmad M., Maqsood M.F., Ali N., Ishfaq M., Kaleem M., Haider F.U., Farooq N., Naveed M., Kucerik J., Brtnicky M., Mustafa A.* Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>
- [6] *Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Пономарева С.В.* Ранжирование химических элементов по их экологической опасности для почвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 1. С. 27–29. <https://elibrary.ru/item.asp?id=12975273>
- [7] *Лапушкина А.А., Аленичева А.Д., Верниченко И.В., Щуклина О.А., Ворончихина И.Н.* Агроэкологическая оценка изменения содержания кадмия в растениях ярового ячменя под влиянием селена и кремния // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2021. Т. 29, № 2. С. 138–146. <https://elibrary.ru/item.asp?id=47814864>
- [8] *Neenu S., Karthika K.S.* Aluminium toxicity in soil and plants // Harit Dhara. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 15–19.
- [9] *Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A.* Molecular basis of aluminium toxicity in plants: a review // American Journal of Plant Sciences. 2013. Vol. 4, no. 12. P. 21–37. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.412A3004>.
- [10] *Вишнякова М.А., Семенова Е.В., Косарева И.А., Кравчук Н.Д., Лоскутов С.И., Пухальский Я.В., Шапошников А.И., Сазанова А.Л., Белимов А.А.* Метод экспресс-оценки алюмотолерантности у гороха посевного (*Pisum sativum* L.) // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 3. P. 353–360. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23651341>.
- [11] *Belimov A.A., Safronova V.I., Tsyganov V.E., Borisov A.Y., Kozhemyakov A.P., Stepanok V.V., Martenson A., Gianinazzi' Pearson V., Tikhonovich I.A.* Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.). Euphytica. 2003. Vol. 131, no. 1. P. 25–35. <https://doi.org/10.1023/A:1023048408148>.
- [12] *Shamsi I.H., Wei K., Jilani G., Zhang G.P.* Interactions of cadmium and aluminum toxicity in their effect on growth and physiological parameters in soybean // Journal of Zhejiang University SCIENCE B. 2007. Vol. 8, no. 3. P. 181–188. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0181>.
- [13] *Cunha L.O., Prado R.M.* Synergy of Selenium and Silicon to Mitigate Abiotic Stresses: a Review // Gesunde Pflanzen. 2023. Vol. 75, no. 14. P. 1461–1474. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00826-9>.
- [14] *Tsyganov V.E., Belimov A.A., Borisov A.Y., Safronova V.I., Georgi M., Dietz K.-J., Tikhonovich I.A.* A Chemically Induced New Pea (*Pisum sativum* L.) Mutant SGECdt with Increased Tolerance to, and Accumulation of Cadmium // Annals of Botany. 2007. Vol. 99, no. 2. P. 227–237. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl261>.
- [15] *Belimov A.A., Shaposhnikov A.I., Azarova T.S., Makarova N.M., Safronova V.I., Litvinskiy V.A., Nosikov V.V., Zavalin A.A., Tikhonovich I.A.* Microbial Consortium of PGPR, Rhizobia and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Makes Pea Mutant SGECdt Comparable with Indian Mustard in Cadmium Tolerance and Accumulation // Plants. 2020. Vol. 9, no. 8. P. 975. <https://doi.org/10.3390/plants9080975>.

- [16] *Сабитов М.М.* Влияние предшественников и удобрений на продуктивность и экономическую эффективность гороха в условиях лесостепи Поволжья // Пермский аграрный вестник. 2017. Т. 3. № 19. С. 106–113. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30009686>.
- [17] *López-Chuken U.J., López-Domínguez U., Parra-Saldivar R., Moreno-Jiménez E., Hinojosa-Reyes L., Guzmán-Mar J.L., Olivares-Sáenz E.* Implications of chloride-enhanced cadmium uptake in saline agriculture: modeling cadmium uptake by maize and tobacco // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 9. P. 69–77. <https://doi.org/10.1007/s13762-011-0018-2>
- [18] *Shedeed S.I., Fawzy Z.F., El-Bassiony A.M.* Nano and mineral selenium foliar application effect on pea plants (*Pisum sativum* L.) // *Bioscience Research*. 2018. Vol. 15, no. 2. P. 645–654.
- [19] *Новикова Н.Е., Самсонова Н.Е.* Влияние соединений кремния на процесс прорастания семян гороха и защиту проростков от окислительных повреждений // *Вестник аграрной науки*. 2020. Т. 2. № 83. С. 21–28. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42808951>.
- [20] *Ладонин Д.В.* Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами // *Почвоведение*. 2000. № 10. С. 1285–1293.
- [21] *Polcaro A.M., Mascia M., Palmas S., Vacca A., Tola G.* Competitive Sorption of Heavy Metal Ions by Soils // *Environmental Engineering Science*. 2003. Vol. 20, no. 6. P. 607–616. <https://doi.org/10.1089/109287503770736122>

References

- [1] *Elkina GYa.* Plant response to polyelement contamination of podzolic soils with heavy metals. *Agrochemistry*. 2017;(7):78–85. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=29394888>.
- [2] *Hasan SA, Fariduddin Q, Ali B, Hayat S, Ahmad A.* Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*. 2009;30(2):165–174. https://www.researchgate.net/publication/41396456_Cadmium_Toxicity_and_tolerance_in_plants.
- [3] *Haider FU, Liqun CC, Coulter JA, Cheema SA, Wu J, Zhang R, Wenjun M, Farooq M.* Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;211:111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.
- [4] *Abou Seeda MA, Abou El-Nour EAA, Maha MS Abdallah, Hala MS El-Bassiouny, Abd El-Monem AA.* Physiological Effects of Cadmium on Plants: A review. *Middle East Journal of Agriculture Research*. 2023;12(02):267–362. <https://doi.org/10.36632/mejar/2023.12.2.19>.
- [5] *Zulfiqar U, Jiang W, Xiukang W, Hussain S, Ahmad M, Maqsood MF, Ali N, Ishfaq M, Kaleem M, Haider FU, Farooq N, Naveed M, Kucerik J, Brtnicky M, Mustafa A.* Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.773815>.
- [6] *Kolesnikov SI, Kazeev KSh, Valkov VF, Ponomareva SV.* Ranking of chemical elements according to their environmental hazard for the soil. *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2010;(1):27–29. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=12975273>.
- [7] *Lapushkina AA, Alenicheva AD, Vernichenko IV, Shchuklina OA, Voronchikhina IN.* Agroecological assessment of changes in cadmium content in spring barley plants under

- the influence of selenium and silicon. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2021;29(2):138–146. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=47814864>.
- [8] Neenu S, Karthika KS. Aluminium toxicity in soil and plants. *Harit Dhara*. 2019;2(1):15–19.
- [9] Gupta N, Gaurav SS, Kumar A. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: a review. *American Journal of Plant Sciences*. 2013;4(12C):21–37. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.412A3004>.
- [10] Vishnyakova MA, Semenova EV, Kosareva IA, Kravchuk ND, Loskutov SI, Pukhalsky JV, Shaposhnikov AI, Sazanova AL, Belimov AA. Method for rapid assessment of aluminum tolerance in pea (*Pisum sativum* L.). *Agricultural biology*. 2015;50(3):353–360. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=23651341>.
- [11] Belimov AA, Safronova VI, Tsyganov VE, Borisov AY, Kozhemyakov AP, Stepanok VV, Martenson A, Gianinazzi' Pearson V, Tikhonovich IA. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.). *Euphytica*. 2003;131(1):25–35. <https://doi.org/10.1023/A:1023048408148>.
- [12] Shamsi IH, Wei K, Jilani G, Zhang GP. Interactions of cadmium and aluminum toxicity in their effect on growth and physiological parameters in soybean. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*. 2007;8(3):181–188. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0181>.
- [13] Cunha LO, Prado RM. Synergy of Selenium and Silicon to Mitigate Abiotic Stresses: a Review. *Gesunde Pflanzen*. 2023;75(14):1461–1474. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00826-9>.
- [14] Tsyganov VE, Belimov AA, Borisov AY, Safronova VI, Georgi M, Dietz K-J, Tikhonovich IA. A Chemically Induced New Pea (*Pisum sativum* L.) Mutant SGECdt with Increased Tolerance to, and Accumulation of Cadmium. *Annals of Botany*. 2007;99(2):227–237. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl261>.
- [15] Belimov AA, Shaposhnikov AI, Azarova TS, Makarova NM, Safronova VI, Litvinskiy VA, Nosikov VV, Zavalin AA, Tikhonovich IA. Microbial Consortium of PGPR, Rhizobia and Arbuscular Mycorrhizal Fungus Makes Pea Mutant SGECdt Comparable with Indian Mustard in Cadmium Tolerance and Accumulation. *Plants*. 2020;9(8):975. <https://doi.org/10.3390/plants9080975>.
- [16] Sabitov MM. The influence of precursors and fertilizers on the productivity and economic efficiency of peas in the forest-steppe conditions of the Volga region. *Perm Agrarian Bulletin*. 2017;3(19):106–113. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=30009686>.
- [17] López-Chuken UJ, López-Domínguez U, Parra-Saldivar R, Moreno-Jiménez E, Hinojosa-Reyes L, Guzmán-Mar JL, Olivares-Sáenz E. Implications of chloride-enhanced cadmium uptake in saline agriculture: modeling cadmium uptake by maize and tobacco. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2012;9:69–77. <https://doi.org/10.1007/s13762-011-0018-2>
- [18] Shedeed SI, Fawzy ZF, El-Bassiony AM. Nano and mineral selenium foliar application effect on pea plants (*Pisum sativum* L.). *Bioscience Research*. 2018; 15(2):645–654.
- [19] Novikova NE, Samsonova NE. The influence of silicon compounds on the process of germination of pea seeds and the protection of seedlings from oxidative damage. *Bulletin of Agrarian Science*. 2020;2(83):21–28. (In Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=42808951>.
- [20] Ladonin DV. Competitive relationships of ions during soil contamination with heavy metals. *Soil science*. 2000;10:1285–1293. (In Russ.).
- [21] Polcaro AM, Mascia M, Palmas S, Vacca A, Tola G. Competitive Sorption of Heavy Metal Ions by Soils. *Environmental Engineering Science*. 2003;20(6):607–616. <https://doi.org/10.1089/109287503770736122>

Сведения об авторах:

Пухальский Ян Викторович, инженер-микробиолог 1-й категории, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Российская Федерация, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, 3; инженер-исследователь ВНИИ пищевых добавок – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова, 191014, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 55. ORCID: 0000-0001-5233-3497. E-mail: puhalskyyan@gmail.com

Ковальчук Анастасия Игоревна, техник 1-й категории, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Российская Федерация, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, д. 3. ORCID: 0009-0005-7206-2395. E-mail: k.nastya4321@gmail.com

Лоскутов Святослав Игоревич, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ВНИИ пищевых добавок – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова, 191014, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 55. ORCID: 0000-0002-8102-2900. E-mail: lislosk@mail.ru

Воробьев Николай Иванович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, 196608, Российская Федерация, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, д. 3. ORCID: 0000-0001-8300-2287. E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru

Осипов Анатолий Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14. ORCID: 0009-0003-3181-3792. E-mail: aosipov2006@mail.ru

Косульников Юрий Витальевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Российская Федерация, 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, д. 3. ORCID: 0000-0003-1134-3503. E-mail: kullavayn@gmail.com

Кожемяков Андрей Петрович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Российская Федерация, 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, д. 3. ORCID: 0000-0002-9657-2454. E-mail: kojemyakov@rambler.ru

Лактионов Юрий Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Российская Федерация, 196608, Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, д. 3. ORCID: 0000-0001-6241-0273. E-mail: laktionov@list.ru

Bio notes:

Jan V. Puhalsky, engineer-microbiologist 1 category, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg - Pushkin, 196608, Russian Federation, Research Engineer of VNIIPD – a Branch of the Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatoва, Russia Academy of Sciences, 55 Liteiny prosp., Saint-Petersburg, 191014, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5233-3497. E-mail: puhalskyyan@gmail.com

Anastasia I. Kovalchuk, research engineer, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg, Pushkin, 196608, Russian Federation. ORCID: 0009-0005-7206-2395. E-mail: k.nastya4321@gmail.com

Svyatoslav I. Loskutov, Ph.D. Agricultural Sciences, Senior Researcher, VNIIPD – a Branch of the Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Center for Food Systems named after V.M. Gorbatoва”, Russia Academy of Sciences, 55 Liteiny prosp, St. Petersburg, 191014, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-8102-2900. E-mail: lislosk@mail.ru

Nikolay I. Vorobyov, Ph.D. Tech. Sciences, Leading Researcher, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg, Pushkin, 196608, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-8300-2287. E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru

Anatoly I. Osipov, Doctor of Agriculture Sciences, Chief Scientific of the Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, 14 Grazhdansky pr., St. Petersburg, 195220, Russian Federation. ORCID: 0009-0003-3181-3792. E-mail: aosipov2006@mail.ru

Yuri V. Kosulnikov, Ph.D. Tech. Sciences, Researcher All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg, Pushkin, 196608, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-1134-3503. E-mail: kullavayn@gmail.com

Andrey P. Kozhemyakov, Ph.D. Biol. Sciences, Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg, Pushkin, 196608, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-9657-2454. E-mail: kojemyakov@rambler.ru

Yuriy V. Laktionov, Ph.D. Biol. Sciences, Head of the Laboratory of Ecology of Symbiotic and Associative Rhizobacteria of the All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3 Highway Podbelskogo, St. Petersburg, Pushkin, 196608, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6241-0273. E-mail: laktionov@list.ru