
АГРОХИМИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЭКОЛОГИЯ

**Защитное действие солей ультрамикрорезлементов
в условиях дефицита воды (на примере растений гречихи, выращенной
в условиях разного содержания подвижного фосфора в почве)**

Анастасия Андреевна Лапушкина[✉], Всеволод Михайлович Лапушкин

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉] **Автор, ответственный за переписку:** alapushkina@rgau-msha.ru

Аннотация

В статье изложены результаты трехлетнего вегетационного опыта, направленного на исследование протекторного действия предпосевного смачивания семян растворами солей селена, ванадия, вольфрама и йода на биометрические характеристики гречихи и ее урожайность, а также на показатели качества зерна опытной культуры. Часть растений в начале бутонизации подвергалась искусственно созданному дефициту воды. Исследования проводились на двух почвах одного подтипа, но отличающихся содержанием подвижного фосфора. Для обеспечения бездефицитного уровня минерального питания в каждый сосуд вносились N150 мг/кг и K₂O 100 мг/кг почвы. Согласно результатам, полученным по структуре урожая опытных растений, установлено отсутствие достоверного влияния используемых солей на количество соцветий и массу 1000 зерен. Наиболее отчетливо протекторные свойства ультрамикрорезлементов проявлялись в условиях засухи при слабом уровне фосфорного питания растений: применение селенита натрия снизило потери зерна на 32%, ванадата аммония – на 20%, вольфрамата аммония – на 14%, йодида аммония – на 25%. В отсутствие обработки семян солями ультрамикрорезлементов на урожайность сильно повлияло наличие повышенного содержания подвижного фосфора в почве: в условиях оптимального влагообеспечения гречиха сформировала на 40% больше зерна, а после перенесенной засухи – на 70% в сравнении с группой опытных растений, вегетировавших в тех же условиях, но на почве с низким содержанием фосфора. Значимых изменений в химическом составе полученного зерна в зависимости от условий выращивания (применения солей ультрамикрорезлементов, разной обеспеченности почвы подвижным фосфором и растений водой) выявлено не было.

Ключевые слова

гречиха, дефицит воды, предпосевная обработка семян, селенит натрия, ванадат аммония, вольфрамат аммония, йодид аммония

Благодарности

Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования

Лапушкина А.А., Лапушкин В.М. Защитное действие солей ультрамикрорезлементов в условиях дефицита воды (на примере растений гречихи, выращенной в условиях разного содержания подвижного фосфора в почве) // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2026. № 1. С. 24–35.

Protective effects of ultramicroelement salts under water deficit: a case study of buckwheat grown at varying soil available phosphorus levels

Anastasiya A. Lapushkina✉, Vsevolod M. Lapushkin

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russia

✉Corresponding author: alapushkina@rgau-msha.ru

Abstract

This paper presents the findings of a three-year pot experiment investigating the protective effects of pre-sowing seed treatment with solutions of selenium, vanadium, tungsten, and iodine salts on the biometric characteristics, yield, and grain quality of buckwheat. During the early budding stage, a subset of plants was subjected to an artificially induced water deficit. The study was conducted on two soils of the same subtype but with differing levels of available phosphorus. To ensure adequate mineral nutrition, all pots were amended with N (150 mg/kg) and K₂O (100 mg/kg of soil). Analysis of the yield components revealed that the salts used had no significant effect on the number of inflorescences or the thousand-kernel weight. The protective properties of these ultramicroelements were most pronounced under drought conditions combined with low phosphorus availability: the application of sodium selenite reduced grain yield losses by 32%, ammonium vanadate by 20%, ammonium tungstate by 14%, and ammonium iodide by 25%. In the absence of seed treatment, yield was strongly influenced by an increased content of soil available phosphorus; under optimal moisture, buckwheat produced 40% more grain, and after drought, 70% more compared to plants grown on low-phosphorus soil. No significant changes in the chemical composition of the grain were identified across the various growing conditions (application of ultramicroelement salts, varying soil available phosphorus levels, or water availability).

Key words

buckwheat, water deficit, pre-sowing seed treatment, sodium selenite, ammonium vanadate, ammonium tungstate, ammonium iodide

Acknowledgments

The research was funded by the University Development Program as part of the “Priority 2030” Strategic Academic Leadership Program.

For citation

Lapushkina A.A., Lapushkin V.M. Protective effects of ultramicroelement salts under water deficit: a case study of buckwheat grown at varying soil available phosphorus levels. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2026;(1):24–35.

Введение Introduction

Вопрос эффективности микроэлементов как протекторов растений от ряда абиотических стрессов, в том числе засухи, остается актуальным и открытым. Направленность действия того или иного элемента зависит от множества составляющих (форма соединения, которая на первоначальном этапе доступна для усвоения растениями,

доза элемента, наличие или отсутствие самих стрессовых условий) и, конечно, от вида самого растения [1–3].

В обзорной статье [4] говорится, в частности, о защитных механизмах селена, когда растения испытывают дефицит воды: он повышает активность антиоксидантных ферментов в растениях и улучшает неферментативное расщепление супероксидных радикалов, тем самым уменьшая накопление избыточных активных форм кислорода (АФК) и смягчая окислительное повреждение клеточных мембран. Также в опытах [5, 6] с ячменем было показано, что наличие селена в питании растений, подверженных засухе, приводило к повышению урожайности на 10–40% в зависимости от условий выращивания. Недавние исследования сообщают о защитном эффекте ванадия в модельном опыте с *Arabidopsis thaliana*, подвергшимся окислительному стрессу под действием H_2O_2 . Так, при использовании $1 \cdot 10^{-6}$ М раствора оксиацетатных комплексов оксида ванадия (IV) растения, столкнувшиеся с окислительным стрессом, смогли пройти весь жизненный цикл с возникновением надлежащей морфологической и цитологической организации тканей листьев и корней [7]. Воздействие вольфрама на растительные организмы весьма противоречиво: наиболее часто в литературе встречаются данные об угнетении растений (уменьшение длины корней и высоты побегов, снижение сырой массы [8, 9], об избыточном накоплении АФК [10]). Гораздо реже встречаются исследования, показывающие стимулирующую роль данного элемента на растения. Так, в опытах [11] низкая концентрация вольфрама в почве (3 и 9 мг/кг) приводила к увеличению сухой массы корней на 35 и 45%, а сухой надземной массы – на 12 и 14% соответственно. При этом если содержание вольфрама в почве достигало 27 мг/кг, авторы отмечали снижение данных показателей на 33 и 12%. Действие йода на растительный организм также сильно зависит от его дозы. Но говоря о его положительном влиянии, можно привести данные работы [12], где замечено, что в условиях водного стресса растения, обработанные слабыми растворами (10 и 20 мкМ) йодида калия, имели более низкое содержание MDA в сравнении с контрольными, что свидетельствует о большей антиоксидантной ферментативной активности, обеспечивающей более интенсивный рост в условиях дефицита воды.

Таким образом, интерес к проблеме негативного воздействия абиотических стрессов на продуктивность сельскохозяйственных культур возрастает, чем была продиктована цель исследований.

Цель исследований: изучение влияния предпосевной обработки семян солями селена, ванадия, вольфрама и йода на адаптацию растений гречихи к дефициту влаги.

Методика исследований

Research method

Для постановки вегетационных опытов (2022–2024 гг.) на базе кафедры агрономической, биологической химии и радиологии ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева была привезена дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва, которую отбирали с разных по обеспеченности подвижным фосфором полей Центральной опытной станции ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова.

В соответствии с требованиями к постановке эксперимента перед набивкой сосудов почву тщательно перемешивали и просеивали через грохот, параллельно удаляя крупные твердые включения: камни, корни растений [13]. Усредненные (за 3 года) данные агрохимического анализа представлены в таблице 1.

Агрохимическая характеристика почвы (2022–2024 гг.)

Table 1

Agrochemical soil characteristics (2022–2024)

Почва (класс по содержанию P ₂ O ₅)	Орг. в-во	pHКCl	Hг	S	T	V	P ₂ O ₅	K ₂ O
	%	Ед.	мг-экв/100 г			%	мг/кг	
II	1,90	5,1	1,83	12,1	13,9	86	46	133
V	2,03	5,9	1,27	14,5	15,8	92	195	153

Данные параметры почвы определялись по методикам ГОСТов: Органическое вещество – ГОСТ 26213–2021; pHКCl – ГОСТ 26483–85; Hг – ГОСТ 26212–2021; S – ГОСТ 27821–2020; P₂O₅ и K₂O – ГОСТ Р 54650–2011. ЕКО и степень насыщенности почвы основаниями рассчитывались по следующим формулам:

$$T = Hг + S;$$

$$V = (S/T) * 100\%.$$

С целью определения качества проводимых аналитических работ были использованы образцы контроля СО дерново-подзолистой почвы, разработанные ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова [14].

В опытах использовались сосуды Митчерлиха, рассчитанные на 5 кг абсолютно сухой почвы. Для обеспечения бездефицитного уровня минерального питания в каждый сосуд вносились N150 мг/кг и K₂O 100 мг/кг почвы в виде растворов аммиачной селитры и сульфата калия.

В качестве опытной культуры была выбрана гречиха (*Fagopyrum esculentum Moench*) сорта Дикуюль.

За день до закладки опытов готовились слабые растворы солей: селенита натрия (0,01% д.в.), ванадата аммония (0,1% д.в.), вольфрамата аммония (0,005% д.в.) и йодида аммония (0,02% д.в.). С целью обеспечения растений ультрамикрорезементами семена гречихи смачивались таким образом, чтобы объем раствора был равен 5% от массы навески зерна. Затем семена тщательно перемешивались и высыпались на стекло для просушки. В качестве контрольного варианта была выбрана дистиллированная вода, которой также смачивалось зерно.

После набивки сосудов в каждый из них было высеяно по 20 шт. зерен. В течение вегетационного периода растения, отличающиеся от остальных по размеру и форме, удалялись, и ко дню уборки урожая сохранилось по 12 растений. Повторность опыта – четырехкратная.

В фазу начала цветения, когда закладываются основы потенциального урожая, для формирования стрессовых условий часть опытных растений прекращали поливать. Когда влажность почвы опускалась до критического значения 14% от массы сухой почвы, полив возобновляли. Контрольным вариантом были условия с оптимальным и своевременным поливом.

Гречиху убирали в фазу полной спелости, высушивали и определяли структуру полученного урожая, после чего методом БИК-спектрометрии анализировали качество зерна. После размола семян оболочка была отброшена, для анализа использовались ядра.

Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась посредством двухфакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016 [15]. В рамках статистического анализа были определены и изучены эффекты двух независимых переменных, оказанные на биометрические показатели растений гречихи:

Фактор А – воздействие водного стресса.

Фактор Б – влияние предпосевной обработки семян (ПОС).

Методология статистического анализа позволила оценить, как изолированное влияние каждого фактора, так и их совместное воздействие на исследуемые параметры, что обеспечило комплексный подход к интерпретации полученных результатов эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

В таблице 2 представлены усредненные за 3 года данные исследований по воздействию солей селена, ванадия, вольфрама и йода на морфо-биометрические показатели гречихи в зависимости от условий выращивания.

Для начала следует оценить эффект от применения ультрамикроэлементов. Согласно результатам двухфакторного дисперсионного анализа, на длину опытных растений так или иначе влияние оказали все изучаемые соли, но направленность их действия зависела от обеспеченности почвы подвижным фосфором. Так, при выращивании гречихи в условиях низкого (II класс) содержания фосфатов в условиях как оптимального полива, так и дефицита влаги, ванадат аммония, вольфрамат аммония и йодид аммония достоверно увеличили длину растений в среднем на 5–14% в сравнении с контрольной обработкой семян дистиллированной водой, в то время как растения, выращенные в условиях стресса на почве V класса, наоборот, имели меньшую длину растений. В частности, смачивание семян растворами Na_2SeO_3 , NH_4VO_3 и NH_4I снижало этот показатель на 6–11%. Это может быть связано с тем, что растения, выращиваемые в условиях низкой обеспеченности почвы подвижным фосфором, не смогли образовать большую биомассу к моменту вступления в засуху, и вносимое количество микроэлементов оказалось недостаточным для раскрытия своего защитного действия. В то же время для растений, имеющих большую массу на почве, высокообеспеченной фосфором, исследуемого вещества не хватило для полноценного эффекта. Смачивание семян растворами солей ультрамикроэлементов не привело к статистически значимым изменениям таких показателей, как число соцветий и масса 1000 зерен.

При рассмотрении последствий от испытанной опытной культурой засухи следует отметить, что наибольший ущерб был нанесен растениям, не получившим на старте вегетации какой-либо микроэлемент и слабо обеспеченным на протяжении всей вегетации доступным фосфором в почве. Дефицит воды в течение нескольких дней (из года в год их количество было неодинаковым ввиду особенностей климата) способствовал уменьшению длины растений на 6%, количества соцветий – на 19%, массы 1000 зерен – на 11%. В то же время у гречихи, также не получившей микроэлементов, однако высокообеспеченной доступным фосфором, было отмечено лишь снижение длины растений на 4%.

Высокая обеспеченность почвы подвижным фосфором всегда положительно сказывалась на состоянии растений. Например, при ПОС дистиллированной водой длина растений, выращенных на почве V класса, и в контрольных условиях, и в стрессовых была больше на 23 и 26%, чем у растений, вегетировавших на почве II класса, соответственно. При оценке влияния высокого содержания фосфора в почве на количество соцветий и массу 1000 зерен была выявлена следующая тенденция: в условиях

достаточного увлажнения эти 2 показателя практически не изменялись, но у растений, перенесших засуху, фосфор способствовал увеличению количества соцветий на 32%, а массы 1000 зерен – на 15% по сравнению с растениями, убранными с почвы II класса. Такая разница по численным значениям показателей может быть обусловлена защитной ролью этого элемента от травмирующего растения дефицита воды: благодаря фосфору усиливается рост корней, что способствует более продуктивному поглощению влаги из почвы, а также удерживается большее количество воды в листьях [16, 17].

Таблица 2

Влияние ультрамикрорезлементов на биометрию гречихи, выращенной на разной почве, 2022–2024 гг.

Table 2

Effect of ultramicroelements on the biometrics of buckwheat grown on different soils, 2022–2024

Условия выращивания	Фактор Б ↓	Фактор А →					
		Длина растений, см		Количество соцветий, шт/растение		Масса 1000 зерен, г	
		Контроль	Засуха	Контроль	Засуха	Контроль	Засуха
II класс по P ₂ O ₅	H ₂ O	83	78	7,0	5,7	29,3	26,0
	Se	81	86	6,2	6,1	28,5	28,8
	V	87	89	6,2	5,9	28,0	27,2
	W	89	87	6,5	5,7	29,8	26,6
	I	92	86	6,0	5,9	28,7	26,7
НСП ₀₅ А		3		0,3		0,9	
НСП ₀₅ Б		5		0,5		1,4	
НСП ₀₅ частные различия		8		0,7		2,0	
V класс по P ₂ O ₅	H ₂ O	102	98	7,2	7,5	29,3	29,9
	Se	105	87	6,8	7,3	30,3	29,3
	V	101	90	6,6	7,3	28,9	30,6
	W	103	93	7,2	7,2	29,8	28,4
	I	100	92	7,6	7,5	29,0	30,9
НСП ₀₅ А		2		0,3		0,7	
НСП ₀₅ Б		4		0,5		1,1	
НСП ₀₅ частные различия		5		0,7		1,6	

Значительно более интересными для рассмотрения могут быть такие параметры, как масса соломы и масса зерна (табл. 3). В условиях засухи благоприятный эффект от предпосевной обработки семян гречихи растворами солей ультрамикрорезлементов проявился значительно сильнее на почве, где фосфор был на уровне II класса. Действительно, масса соломы увеличилась на 6–11%, а масса зерна – на 14–33%, причем для обоих показателей лучше всего проявил себя селенит натрия. При высокой обеспеченности почвы подвижным фосфором протекторное действие элементов против дефицита воды существенно снижается. Так, только применение йодида аммония стимулировало накопление массы соломы на 12%, а массы зерна – на 11% относительно

Таблица 3

Влияние ультрамикрорезлементов на массу побочной и основной продукции гречихи, выращенной на разной почве, 2022–2024 гг.

Table 3

Effect of ultramicroelements on the mass of by-products and primary products of buckwheat grown on different soils, 2022–2024

Условия выращивания	Фактор Б↓	Фактор А→			
		Масса соломы, г/сосуд		Масса зерна, г/сосуд	
		Контроль	Засуха	Контроль	Засуха
II класс по P ₂ O ₅	H ₂ O	14,7	12,5	16,4	12,5
	Se	13,6	13,9	14,1	16,6
	V	14,9	13,5	16,6	15,0
	W	14,8	13,5	16,5	14,3
	I	14,5	13,3	15,8	15,7
НСР ₀₅ А		0,6		0,8	
НСР ₀₅ Б		0,9		1,2	
НСР ₀₅ частные различия		1,2		1,7	
V класс по P ₂ O ₅	H ₂ O	18,6	16,6	23,1	21,2
	Se	17,7	16,2	21,4	21,6
	V	20,5	17,0	21,5	21,5
	W	20,3	17,5	21,0	21,5
	I	18,3	18,6	21,2	23,5
НСР ₀₅ А		1,0		1,0	
НСР ₀₅ Б		1,5		1,5	
НСР ₀₅ частные различия		2,2		2,1	

обработки семян дистиллированной водой. Остальные соли микроэлементов не оказали ни положительного, ни отрицательного действия на опытные растения.

Искусственно созданная засуха в фазу цветения, когда растения требуют максимально благоприятных условий окружающей среды, безусловно, пагубно сказалась на полученном урожае. Очевидно, растения на контрольном варианте (ПОС H₂O) были в той или иной степени травмированы недостатком воды. Сильнее всего отсутствие полива отразилось на гречихе, вегетировавшей на низкообеспеченной фосфором почве: масса соломы была снижена на 15%, а масса зерна – на 24%. Меньший ущерб засуха нанесла растениям, выращиваемым на почве V класса по фосфору. В данном случае масса соломы снизилась на 11%, а масса зерна – на 8%.

Самые высокие прибавки урожая побочной и основной продукции были зафиксированы от достаточного количества фосфора в почве вне зависимости от наличия или отсутствия стресса. Если масса соломы на контроле увеличилась на 27%, на засухе – на 33%, то масса зерна возросла на 41 и 70% соответственно.

Оценивая действие ультрамикроэлементов, дефицита воды и наличия высокого количества доступного фосфора в почве на качество полученного зерна, необходимо отметить, что эти 3 фактора не оказали существенного влияния на накопление или, наоборот, уменьшение основных показателей (рис. 1).

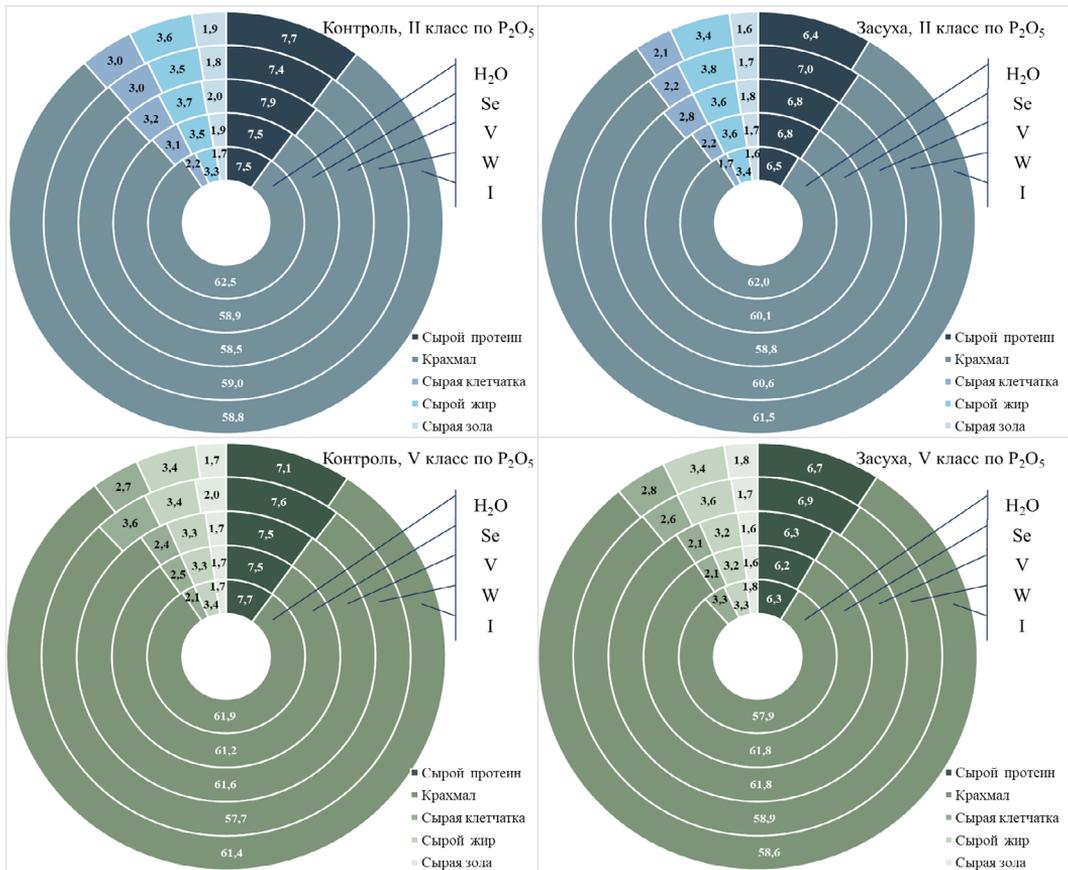


Рис. 1. Влияние ультрамикроэлементов на качество зерна гречихи, выращенной на разной почве, 2022–2024 гг., % от а.с.в.

Figure 1. Effect of ultramicroelements on the grain quality of buckwheat grown on different soils, 2022–2024, % of absolute dry matter (ADM)

Несмотря на то, что химический состав зерна на разных вариантах оставался практически неизменным, сбор сырого протеина с сосуда различался в зависимости от условий выращивания (рис. 2).

Такой контраст полученных значений обуславливается главным образом за счет разности полученных урожаев: чем больше зерна получено, тем выше сбор сырого протеина с единицы площади. В условиях засухи и низкой обеспеченности почвы фосфором все ультрамикронэлементы способствовали повышению показателя на 24–39% относительно контрольной ПОС. При высоком содержании фосфора в почве применение только вольфрамата аммония и йодида аммония повысило данный показатель на 11 и 18% соответственно.

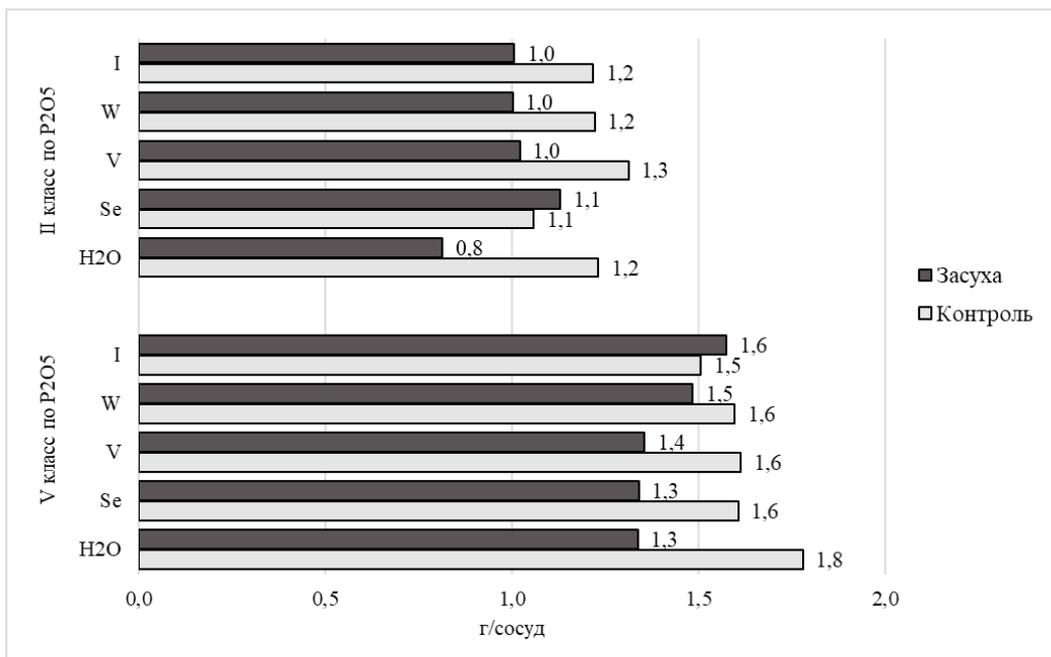


Рис. 2. Влияние ультрамикронэлементов на сбор сырого протеина, 2022–2024 гг.

Figure 2. Effect of ultramicroelements on crude protein yield, 2022–2024

Выводы Conclusions

Как показывают многолетние исследования, защитные свойства ультрамикронэлементов зависят от совокупности условий окружающей среды. Так, в наших опытах была показана эффективность изучаемых элементов только на почве с низкой обеспеченностью подвижным фосфором и в условиях, когда растения испытывают окислительный стресс. С помощью предпосевной обработки семян солью селенита натрия удалось снизить потери зерна на 32%, ванадата аммония – на 20%, вольфрамата аммония – на 14%, йодида аммония – на 25%. При высокой обеспеченности почвы подвижным фосфором только заблаговременное применение йодида аммония способствовало сохранению урожая на уровне контрольного варианта в условиях оптимального полива, обеспечив прибавку в 11% относительно обработки водой семян растений, которые перенесли засуху.

Был установлен значительный положительный эффект от наличия доступного фосфора в почве, оказанный на биометрические показатели опытных растений

при различном уровне увлажнения, то есть оптимальном и при дефиците доступной воды в период бутонизации. В контрольных условиях гречиха, выращенная на почве 5 класса по содержанию фосфора, смогла дать в 1,4 раза больше зерна по сравнению с растениями, вегетировавшими на почве 2 класса. В условиях засухи урожайность повысилась еще более значительно: в 1,7 раза больше зерна смогли дать опытные растения, имеющие хорошее фосфорное питание.

Несмотря на довольно существенные изменения в массе зерна за счет применения ультрамикроэлементов, на определенные нами показатели качества зерна изучаемые соли не оказали никакого влияния.

Список источников

1. Головацкая И.Ф., Кулагина Ю.М., Крахалева А.В. Влияние селенита и селената натрия на рост и продуктивность пшеницы Иргина в зависимости от способов обработки // *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 2012. № 7 (122). С. 111–115. EDN: PCEUHB
2. Dobosy P., Nguyen H.T.P., Zaray G., Strelci C. et al. Effect of iodine species on biofortification of iodine in cabbage plants cultivated in hydroponic cultures. *Sci Rep*. 2024;14(1):15794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66575-z>
3. Hanus-Fajerska E., Wiszniewska A., Kamin'ska 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>
4. Liu H., Xiao C., Qiu T., Deng J. et al. Selenium Regulates Antioxidant, Photosynthesis, and Cell Permeability in Plants under Various Abiotic Stresses: A Review. *Plants (Basel)*. 2022;12(1):44. <https://doi.org/10.3390/plants12010044>
5. Верниченко И.В., Осипова Л.В., Курносова Т.Л., Быковская И.А. и др. Влияние селена и кремния на устойчивость растений ячменя к засухе и наличие в почве алюминия при внесении меченого $^{15}\text{NO}_3^-$ // *Плодородие*. 2018. № 5 (104). С. 12–15. EDN: YLGLCH
6. Лапушкина А.А., Верниченко И.В., Осипова Л.В. Влияние селена и кремния на устойчивость растений ячменя к почвенной засухе // *Инновационные технологии в АПК: теория и практика: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза: РИО ПГАУ, 2018. С. 128–131. EDN: XNQEJN
7. Rojek J., Kozieradzka-Kiszkurno M., Kapusta M., Aksamann A. et al. The effect of vanadium (IV) complexes on development of *Arabidopsis thaliana* subjected to H_2O_2 -induced stress. *Funct. Plant Biol.* 2019;46:942-961. <https://doi.org/10.1071/FP18262>
8. Li Q., Zheng X., Chen M. Ecotoxicological effects of tungsten on celery (*Apium graveolens* L) and pepper (*Capsicum* spp.). *PeerJ*. 2024;12: e17601. <https://doi.org/10.7717/peerj.17601>
9. Adamakis I.D., Panteris E., Eleftheriou E.P. Tungsten Toxicity in Plants. *Plants (Basel)*. 2012;1(2):82-99. <https://doi.org/10.3390/plants1020082>
10. Beisekova M., Zhagazin S., Kurmanbayeva A., Masalimov Z. et al. Influence of tungsten and molybdenum on H_2O_2 accumulation in *n.benthamiana* plant. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2022;4:58-62. <https://doi.org/10.11134/btp.4.2022.7>
11. Kumar A., Aery N.C. Effect of tungsten on growth, biochemical constituents, molybdenum and tungsten contents in wheat. *Plant Soil Environ.* 2011;57:519-525. <https://doi.org/10.17221/345/2011-PSE>
12. Zhang Y., Cao H., Wang M., Zou Z. et al. A review of iodine in plants with biofortification: Uptake, accumulation, transportation, function, and toxicity. *Sci Total Environ.* 2023;878:163203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163203>

13. Журбицкий З.И. *Теория и практика вегетационного метода*. Москва: Наука, 1968. 266 с.
14. Ступакова Г.А., Игнатъева Е.Э., Деньгина С.А. Стандартные образцы в обеспечении лабораторий АПК. Коллекция стандартных образцов состава разных типов почв, растениеводческой продукции ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» // *Плодородие*. 2021. № 5 (122). С. 84–90. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.21>
15. Афанасьев Р.А. К методике дисперсионного анализа результатов многолетних полевых опытов // *Агрохимия*. 2004. № 5. С. 85–91. EDN: ONKVNХ
16. Jin J., Lauricella D., Armstrong R., Sale P. et al. Phosphorus application and elevated CO₂ enhance drought tolerance in field Pea Grown in a phosphorus-deficient vertisol. *Ann. Bot.* 2015;116:975-985. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu209>
17. Mamnabi S., Nasrollahzadeh S., Ghassemi-Golezani K., Raei Y. Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi J. Biol. Sci.* 2020;27:797-804. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.01.008>

References

1. Golovatskaya I.F., Kulagina J.M., Krahaleva A.V. The influence of selenite and selenate sodium on growth and productivity of wheat of variety Irgina depending on methods of processing. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin*. 2012;(7(122)):111-115. (In Russ.)
2. Dobosy P., Nguyen H.T.P., Zaray G., Strelci C. et al. Effect of iodine species on biofortification of iodine in cabbage plants cultivated in hydroponic cultures. *Sci Rep.* 2024;14(1):15794. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66575-z>
3. Hanus-Fajerska E., Wiszniewska A., Kamin'ska 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>
4. Liu H., Xiao C., Qiu T., Deng J. et al. Selenium Regulates Antioxidant, Photosynthesis, and Cell Permeability in Plants under Various Abiotic Stresses: A Review. *Plants (Basel)*. 2022;12(1):44. <https://doi.org/10.3390/plants12010044>
5. Vernichenko I.V., Osipova L.V., Kurnosova T.L., Bikovskaya I.A. et al. Influence of selenium and silicon on the stability of barley plants to drought and the presents in the soil of aluminium under applying of labelled with ¹⁵N nitrate nitrogen. *Plodородie*. 2018;(5(104)):12-15. (In Russ.)
6. Lapushkina A.A., Vernichenko I.V., Osipova L.V. The influence of selenium and silicon on the stability of barley plants to soil drought. *VI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya 'Innovatsionnye tekhnologii v APK: teoriya i praktika'. March 28-29, 2018*. Penza, Russia: Penza State Agrarian University, 2018:128-131. (In Russ.)
7. Rojek J., Kozieradzka-Kiszkurno M., Kapusta M., Aksmann A. et al. The effect of vanadium (IV) complexes on development of Arabidopsis thaliana subjected to H₂O₂-induced stress. *Funct. Plant Biol.* 2019;46:942-961. <https://doi.org/10.1071/FP18262>
8. Li Q., Zheng X., Chen M. Ecotoxicological effects of tungsten on celery (*Apium graveolens* L) and pepper (*Capsicum* spp.). *PeerJ*. 2024;12: e17601. <https://doi.org/10.7717/peerj.17601>
9. Adamakis I.D., Panteris E., Eleftheriou E.P. Tungsten Toxicity in Plants. *Plants (Basel)*. 2012;1(2):82-99. <https://doi.org/10.3390/plants1020082>
10. Beisekova M., Zhangazin S., Kurmanbayeva A., Masalimov Z. et al. Influence of tungsten and molybdenum on H₂O₂ accumulation in n.benthamiana plant. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2022;4:58-62. <https://doi.org/10.11134/btp.4.2022.7>

11. Kumar A., Aery N.C. Effect of tungsten on growth, biochemical constituents, molybdenum and tungsten contents in wheat. *Plant Soil Environ.* 2011;57:519-525. <https://doi.org/10.17221/345/2011-PSE>
12. Zhang Y., Cao H., Wang M., Zou Z. et al. A review of iodine in plants with biofortification: Uptake, accumulation, transportation, function, and toxicity. *Sci Total Environ.* 2023;878:163203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163203>
13. Zhurbitsky Z.I. *Theory and practice of the vegetative method.* Moscow, USSR: Nauka, 1968:266. (In Russ.)
14. Stupakova G.A., Ignatyeva E.E., Dengina S.A. Reference materials in providing of laboratories of the agro-industrial complex. Collection of reference materials of different types of soils and crop production of the Pryanishnikov Institute of Agrochemistry. *Plodorodie.* 2021;(5(122)):84-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.122.21>
15. Afanas'ev R.A. The variance analysis of the results of long-term field experiments. *Agrochemistry.* 2004;(5):85-91. (In Russ.)
16. Jin J., Lauricella D., Armstrong R., Sale P. et al. Phosphorus application and elevated CO₂ enhance drought tolerance in field Pea Grown in a phosphorus-deficient vertisol. *Ann. Bot.* 2015;116:975-985. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu209>
17. Mamnabi S., Nasrollahzadeh S., Ghassemi-Golezani K., Raei Y. Improving yield-related physiological characteristics of spring rapeseed by integrated fertilizer management under water deficit conditions. *Saudi J. Biol. Sci.* 2020;27:797-804. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.01.008>

Сведения об авторах

Анастасия Андреевна Лапушкина, канд. биол. наук, доцент кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: alapushkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3541-7300>

Всеволод Михайлович Лапушкин, канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: lapushkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9773-2077>

Information about the authors

Anastasiya A. Lapushkina, CSc (Bio), Associate Professor at the Department of Agronomic, Biological Chemistry and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: alapushkina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3541-7300>

Vsevolod M. Lapushkin, CSc (Bio), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Agronomic, Biological Chemistry and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation; e-mail: lapushkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9773-2077>