

**АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ/AGROCHEMISTRY,
AGROSOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE**

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4>

**ПРОДУКЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЛЕНИТА
НАТРИЯ ПРИ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИИ ПОЧВЫ**

Научная статья

Серегина И.И.^{1,*}, Забненкова С.О.², Лановая М.С.³

¹ORCID : 0000-0002-2400-4159;

^{1, 2, 3} Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (seregina.i[at]inbox.ru)

Аннотация

В исследованиях изучено влияние различных технологий внесения биселенита натрия на продукционный процесс яровой пшеницы сортов Эстер и Злата при переувлажнении почвы. Установлено, что при переувлажнении почвы в критический период роста растений пшеницы происходит снижение их урожайности. Выявлено, что использование селенсодержащего соединения обеспечивало регулирование условий формирования конуса нарастания растений при возникновении окислительного состояния растений. При этом увеличивалось количество цветочных зачатков, сформировавшихся в фазу выхода в трубку и доля их реализации в зерновки. Прирост зерновой продуктивности пшеницы сорта Эстер показан в 1,4–1,8 раз, сорта Злата — в 1,3 раза в сравнении с контролем. Выявлена различная реакция сортов яровой пшеницы на использование селенистокислого натрия. Наиболее отзывчивым оказался сорт пшеницы Эстер, который проявил наибольшую отзывчивость на предпосевную и вегетационную обработку в благоприятных условиях возделывания растений и при переувлажнении почвы.

Ключевые слова: способы применения селена, урожайность, яровая пшеница, переувлажнение.

**PRODUCTIVE PROCESS OF SPRING WHEAT, DEPENDING ON APPLICATION OF SODIUM SELENITE AT
SOIL OVERWATERING**

Research article

Seregina I.I.^{1,*}, Zabnenkova S.O.², Lanovaya M.S.³

¹ORCID : 0000-0002-2400-4159;

^{1, 2, 3} Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (seregina.i[at]inbox.ru)

Abstract

The influence of different technologies of sodium biselenite application on the production process of spring wheat of Esther and Zlata varieties under soil overwatering was studied. It was found that in case of soil overwatering in the critical period of growth of wheat plants, there is a decrease in their yield. It was discovered that the use of selenium-containing compound provided regulation of the conditions of plant growth cone formation at the occurrence of oxidative state of plants. At the same time, the number of floral rudiments formed in the tube emergence phase and the share of their realisation into grains increased. Increase in grain productivity of wheat of Esther variety was shown in 1.4–1.8 times, Zlata variety – in 1.3 times in comparison with control. Different response of spring wheat varieties to the use of selenitic acid sodium was detected. The most responsive wheat variety was Ester, which showed the greatest responsiveness to pre-sowing and vegetative treatment in favourable conditions of cultivation and soil overwatering.

Keywords: selenium application methods, yield, spring wheat, overwatering.

Введение

В течение всего периода вегетации на растения действуют абиотические и биотические факторы окружающей среды, что вызывает образование активных форм кислорода. Активные формы кислорода синтезируются в клетках растений в результате реакций частичного восстановления молекул кислорода.

Среди часто возникающих в клетках и тканях растений АФК выделяют супероксидный радикал $O_2^{\cdot-}$, гидропероксидный радикал $HO_2^{\cdot}$, пероксид водорода H_2O_2 , гидроксильный радикал $HO^{\cdot}$, а также синглетный кислород O_2 и озон O_3 . По результатам многочисленных исследований особенно активным отмечают гидроксильный радикал $HO^{\cdot}$. Несмотря на его краткое время существования он наносит существенный вред клеткам растений, приводя к их гибели. Супероксид-радикал $O_2^{\cdot-}$ близок по активности к гидроксильному радикалу, но обладает более длительным сроком существования. Его отрицательному действию в первую очередь подвергаются фотосинтетические процессы, в результате нарушения функционирования хлорофиллового комплекса растений. Наиболее стойкой формой АФК является пероксид водорода H_2O_2 , который также обладает высокой реакционной способностью. Действие пероксида водорода зависит от интенсивности его образования в клетках растений. В ряде исследований показано, что низкие концентрации перекиси водорода вызывает стимулирование адаптивных реакций в растениях. В результате активного синтеза пероксида водорода происходит отмирание клеток и тканей растений [1], [3], [7], [8], [9] и др.

Образование активных форм кислорода в клетках растений вызывает возникновение окислительного стресса, что обуславливается действием экстремальных абиотических условий, как например, засуха, почвенное засоление, низкие и высокие температуры, ультрафиолетовое излучение, недостаток элементов минерального питания, загрязнение радиоактивными элементами и т.д. [5], [6], [11]. Стрессовые факторы окружающей среды вызывают изменения макромолекул (белки, липиды, ДНК), превращая их в гидропероксиды. Окислительные модификации макромолекул по своей структуре сходны пероксиду водорода, а это означает, что они обладают высокой реакционной способностью [2].

Многочисленные исследования показывают значение селена как биогенного элемента, оказывающего существенное влияние на растения. В то же время недостаточно изучено значение селена в регулировании продукционного процесса и механизмах формирования адаптивных способностей растений в изменяющихся условиях влагообеспечения. В связи с этим в задачи наших исследований входило изучение влияния технологий внесения селенсодержащего соединения на реализацию потенциала продуктивности растений яровой пшеницы при выращивании в стрессовых условиях, вызванных избытком обеспечения влагой почвы. Проведение исследований в этом направлении позволят управлять продукционным процессом яровой пшеницы и получать продукцию улучшенными качественными показателями при переувлажнении почвы.

Цель — оценка эффективности двух способов применения соли селена при выращивании яровой пшеницы при переувлажнении почвы.

Методы и принципы исследования

Проводили вегетационные опыты с яровой пшеницей сортов Эстер и Злата. Исследования проводили в условиях вегетационного домика ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева. При проведении исследований использовали общепринятые методики [4]. Растения яровой пшеницы выращивали в пластиковых сосудах Вагнера вместимостью 6 кг сухой почвы. Для опыта использовали пахотный горизонт окультуренной дерново-неглубокоподзолистой профильноглееватой глубокопахатной легкосуглинистой почвы, привезенной с полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Агрохимическая характеристика почвы: рН KCl — 5,6; Нг — 1,6 мг-экв/100 г почвы (по Каппену); S — 12,0 мг-экв/100 г почвы (по Каппену-Гильковицу), V — 88,2%, Нг — 80 мг/кг почвы (I класс), Se — 80 мкг/кг, содержание подвижных форм P_2O_5 составляло 253 мг/кг почвы (VI класс по Кирсанову), содержание подвижных форм K_2O составляло 118 мг/кг почвы (III класс по Кирсанову).

При закладке опыта вносили NH_4NO_3 и KCl во всех вариантах из расчета 150 мг/кг почвы, калий из расчета 100 мг/кг почвы. Создавали благоприятные условия водообеспечения (60% ПВ) и кратковременное переувлажнение почвы в течение 10 суток.

Селен вносили двумя способами: обработка семян перед посевом и фолиарная обработка растений, которая проводилась в фазу начала выхода в трубку. Обработку семян и опрыскивание растений проводили 0,01%-ным раствором биселенита натрия. При посеве сухие семена сеяли по 30 шт. на сосуд. В фазу кущения прореживали до 15 растений в каждом сосуде. В опыте использовали 4-х кратное повторение.

В фазу выхода в трубку проводили определение количества цветочных зачатков на конусе нарастания пшеницы. Для этого использовали микроскоп МБС-19.

Уборку урожая проводили при достижении растений пшеницы полной спелости путем срезания растений в сосуде ножницами на высоте 1–2 см от корневой шейки. Затем считали количество растений в сосуде, После этого определяли длину стебля, длину колоса и укладывали в пакеты из крафтовой бумаги, подписывали номер варианта и повторности. Затем пакеты с растениями подвешивали для послеуборочного дозревания. Через месяц послеуборочного дозревания анализировали структуру растений (массу 1000 зерен (г), количество зерен в главном колосе (шт), количество колосков (шт), определяли урожайность растений (масса зерна, г/сосуд), а также коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза (%) [10].

Математическую сопровождающую обработку проводили по общепринятой методике с помощью дисперсионного анализа однофакторных опытов [4].

Основные результаты

Как показывают результаты исследований (рис. 1, 2), применение селена при оптимальном водообеспечении растений в течение всего вегетационного периода оказало положительное влияние воздействие на зерновую продуктивность растений пшеницы. Получено также достоверное более увеличение урожайности растений пшеницы изыскание растений сорта места Эстер на 13% (до 10,8 г/сосуд против 9,6 г/сосуд в контроле) при использовании обработки семян перед посевом селеном и на 9% (до 10,5 г/сосуд против 9,6 г/сосуд в контроле) при внесении селена путем обработки вегетирующих растений и растений пшеницы сорта Злата на элементы 13% (до 10,5 г /сосуд против 9,3 г/сосуд в контроле) и на 6% (до 9,9 г/сосуд против 9, г/сосуд в контроле) соответственно.

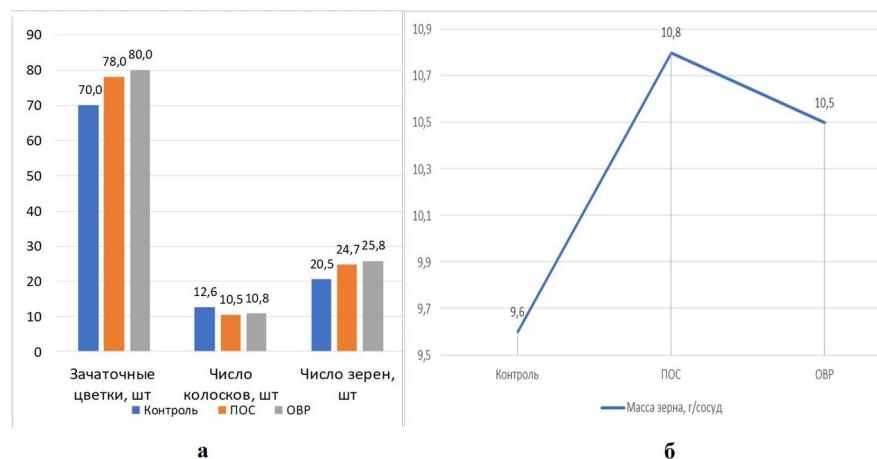


Рисунок 1 - Влияние различных способ обработки селеном на элементы продуктивности (а) и урожайности (б) яровой пшеницы сорта Эстер при оптимальном увлажнении почвы
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.1>

Примечание: а – элементы продуктивности растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (зачаточные цветки) 1,9 шт; НСР₀₅ (число колосков) 0,5 шт; НСР₀₅ (число зерен) 1,1 шт; б – урожайность растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (урожайность сорт Эстер) 0,6 г/сосуд

Оценка более действия селена на элементы продуктивности показала неодинаковую отзывчивость сортов на применение микроэлемента. При применении селена у растений сорта Эстер полученная прибавка урожая зерна (рис. 1б) обусловлена возрастанием количества зерен в колосе на 21% (до 24,8 шт против 20,5 шт в контроле) при применении обработки семян селеном и на 26% (до 25,8 шт против 20,5 шт в контроле) при использовании опрыскивания вегетирующих растений солью селена в сравнении с контролем (рис. 1а). Высокая прибавка зерновой продуктивности при применении обработки семян перед посевом обусловлена помимо увеличением озерненности колоса также и возрастанием выполненности зерен. Получен прирост массы 1000 зерен на 15,9% (до 29,2 г против 25,2 г), что также внесло свой вклад в формирование урожайности растений пшеницы сорта Эстер. При использовании опрыскивания вегетирующих растений селенитом натрия масса 1000 зерен возраста на 7,5% (до 27,2 г против 25,2 г в контроле) (рис. 3а).

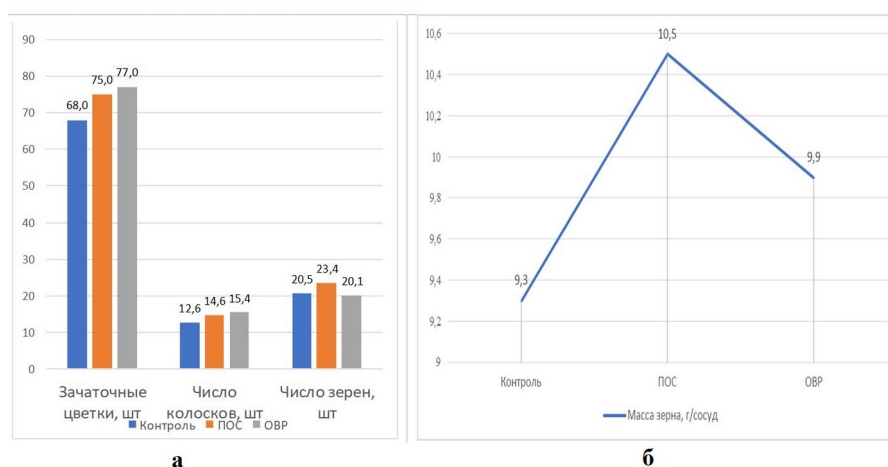


Рисунок 2 - Влияние различных способ обработки селеном на элементы продуктивности (а) и урожайности (б) яровой пшеницы сорта Злата при оптимальном увлажнении почвы
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.2>

Примечание: а – элементы продуктивности растений пшеницы сорта Злата: НСР₀₅ (зачаточные цветки) 2 шт; НСР₀₅ (число колосков) 0,7 шт; НСР₀₅ (число зерен) 1,1 шт; б – урожайность растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (урожайность сорт Эстер) 0,7 г/сосуд

У пшеницы сорта Злата направление действия микроэлемента на слагаемые продуктивности в целом отличалось и зависело от технологии его внесения (рис. 2 а, 2б). Так, при внесении селенита натрия путем обработки семян перед посевом высокий урожай (рис. 2б) определялся увеличением озерненности колоса, которая возросла на 14% (до 23,2 шт против 20,5 шт в контроле) (рис. 2а). При применении foliarной обработки прибавка урожайности растений сорта Злата получена в основном только за счет роста выполненности зерновок, которая возросла на 10% в сравнении с контролем (32,7 г против 24,1 в контроле) (рис. 3а). Количество колосков в колосьях также имеет существенное значение в продукционном процессе пшеницы. Среднее количество колосков в колосьях пшеницы сорта Эстер снизилось на 14–16% (до 10,4 шт при обработке семян перед посевом и до 10,8 шт при опрыскивании вегетирующих растений против 12,6 в контрольном варианте) (рис. 1а), у пшеницы сорта Злата возросло на 16–22% (до 14,6 шт и до 15,4 шт против 12,6 шт в контроле соответственно) (рис. 2а), что вносит определенный вклад в формирование продуктивности растений. Вероятно, это связано с усилением под действием селена аттрагирующей способности колоса у сорта Эстер в результате формирования меньшего количества развивающихся колосков и создания более лучших условий закладки зерновок, что и послужило причиной роста озерненности колоса. У сорта Злата существенный рост количества колосков, особенно при foliarной обработке растений позволил получить прибавку урожая зерна, что возможно обусловлено сортовыми различиями по этому показателю.

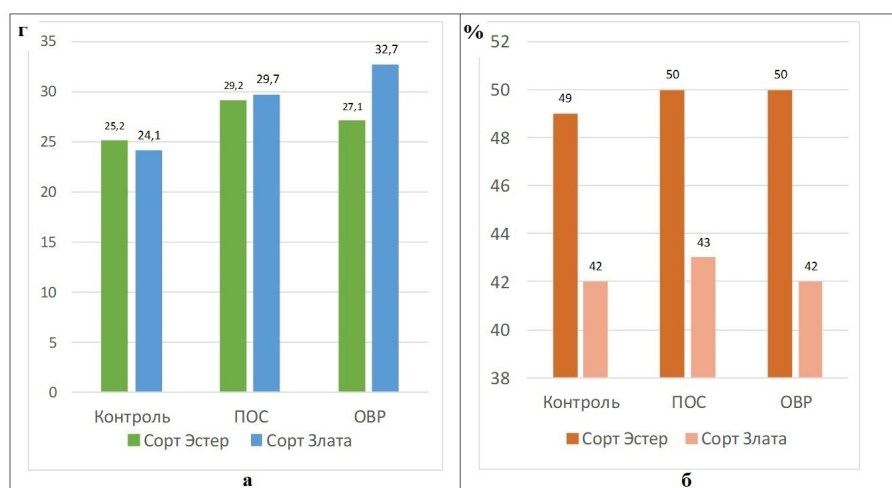


Рисунок 3 - Влияние различных способов обработки селеном на массу 1000 зерен (а) и коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза (б) яровой пшеницы при оптимальном увлажнении почвы

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.3>

Примечание: а – масса 1000 зерен: НСР₀₅ (сорт Эстер) 1,2 г; НСР₀₅ (сорт Злата) 1,6 шт; б – коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза

Морфофизиологический контроль, проведенный в фазу выхода в трубку, позволил изучить влияние селена при использовании разных технологий внесения на процессы закладки генеративных органов и оценить потенциальные возможности изучаемых сортов пшеницы. Использование селена оказало достоверное влияние на количество цветков, заложившееся на конусе нарастания в фазу выхода в рубку (рис. 1а, рис. 2 а). Отмечено существенное увеличение их числа на 10–11% (до 78 шт у пшеницы сорта Эстер против 70 шт в контроле, и до 75 шт у растений сорта Злата против 68 шт в контроле) при обработке семян перед посевом и на 13–14 % (до 80 шт против 70 шт в контроле и до 77 шт против 68 шт в контроле) при опрыскивании вегетирующих растений, что отразилось на количестве зерен в колосе. Показана высокая эффективность селена в регулировании потенциального уровня урожайности растений пшеницы в оптимальных условиях выращивания.

Выявлено, что в условиях оптимального водообеспечения почвы влагой пшеница сорта Эстер оказалась более отзывчивой на применение селена, чем пшеница сорта Злата, что связано с сортовыми особенностями растений пшеницы. Об этом же свидетельствует и изменение величины коэффициента хозяйственной эффективности фотосинтеза ($K_{хоз}$) (рис. 3б). У растений пшеницы сорта Эстер коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза оставил 50%, у растений пшеницы сорта Злата – 43%.

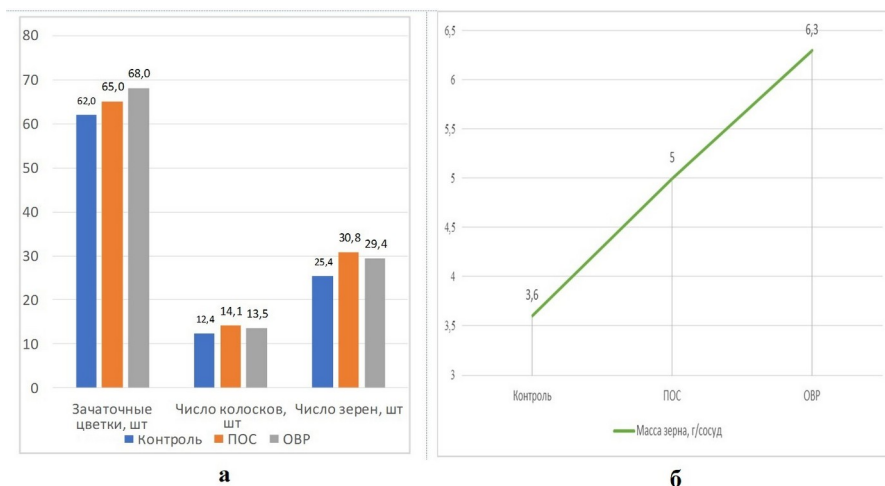


Рисунок 4 - Влияние различных способ обработки селеном на элементы продуктивности (а) и урожайности (б) яровой пшеницы сорта Эстер при оптимальном переувлажнении почвы

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.4>

Примечание: а – элементы продуктивности растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (зачаточные цветки) 2,9 шт; НСР₀₅ (число колосков) 0,7 шт; НСР₀₅ (число зерен) 1,5 шт; б – урожайность растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (урожайность сорт Эстер) 0,4 г/сосуд

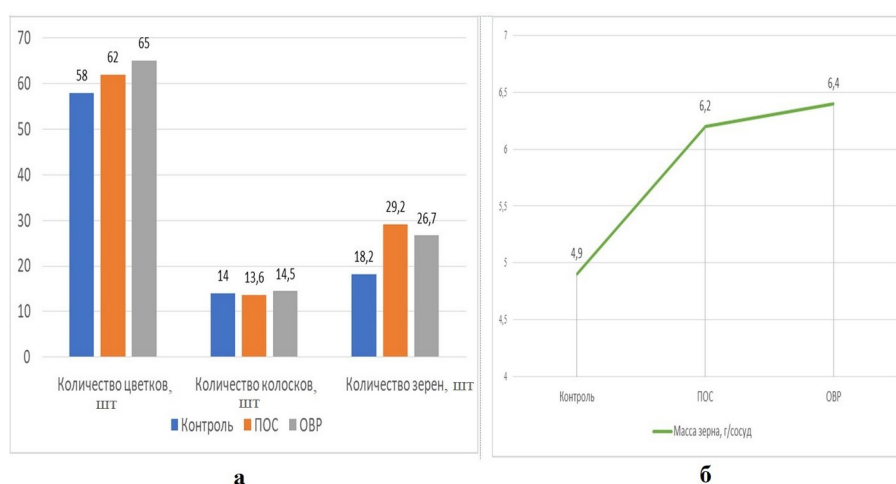


Рисунок 5 - Влияние различных способ обработки селеном на элементы продуктивности (а) и урожайности (б) яровой пшеницы сорта Злата при оптимальном переувлажнении почвы

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.5>

Примечание: а – элементы продуктивности растений пшеницы сорта Злата: НСР₀₅ (зачаточные цветки) 3 шт; НСР₀₅ (число колосков) 0,7 шт; НСР₀₅ (число зерен) 1,2 шт; б – урожайность растений пшеницы сорта Эстер: НСР₀₅ (урожайность сорт Эстер) 0,2 г/сосуд

Как свидетельствуют результаты исследований (рис. 4, 5) при переувлажнении почвы получено резкое снижение урожайности растений обоих сортов пшеницы в сравнении с благоприятными условиями водообеспечения почвы. Получено снижение урожайности пшеницы сорта Эстер на элементы 63% (до 3,6 г/сосуд против 9,6 г/сосуд в контроле при оптимальном поливе растений), сорта Злата на 47% (до 4,9 г/сосуд против 9,3 г/сосуд в контроле), что произошло в результате отличительным резкого уменьшения массы 1000 зерен до 9,5 г против 25,2 г в контроле (при оптимальной поливе растений) и 17,9 г против 24,1 г в контроле (при оптимальном поливе растений) соответственно (рис. 6а). При этом озерненность колоса изменилась у сортов по-разному, что, вероятно, обусловлено сортовыми различиями. Так, в условиях переувлажнения почв у растений пшеницы сорта Эстер число зерен возросло до 25,4 шт, против 20,5 шт в контроле (рис.4а), в то время как масса 1000 зерен уменьшилась в 3,3 раза (с 31,2 до 9,5 г) (рис.6а). У

пшеницы сорта Злата отмечено снижение количества зерен до 18,2 шт (против 20,5 шт при оптимальном увлажнении почвы) (рис.5а), масса 1000 зерен уменьшилась до 17,9 г (против 30,1 г в контроле) (рис.6а).

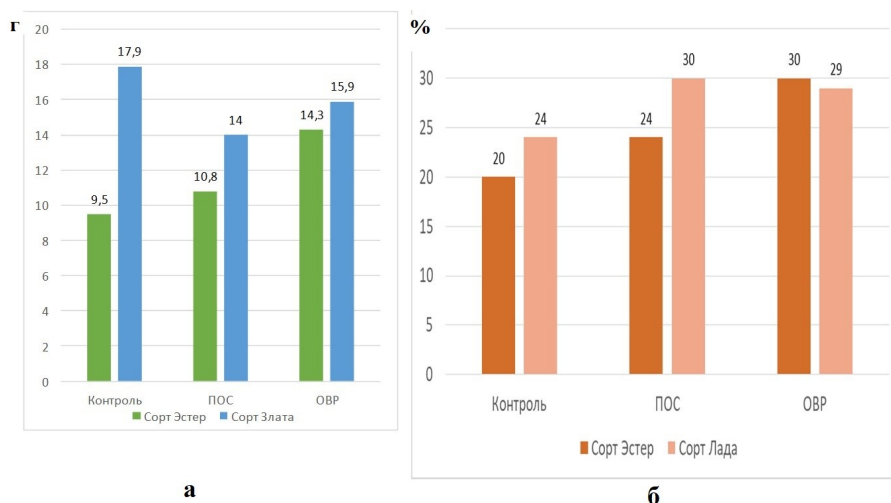


Рисунок 6 - Влияние различных способов обработки селеном на массу 1000 зерен (а) и коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза (б) яровой пшеницы при оптимальном увлажнении почвы в избыточных условиях увлажнения почвы

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.6>

Примечание: а – масса 1000 зерен: НСР₀₅ (сорт Эстер) 0,7 г; НСР₀₅ (сорт Злата) 0,8 шт; б – коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза

При переувлажнении почвы применение селена коммерческая разными способами привело к возрастанию массы зерна пшеницы сорта Эстер в 1,4 раза (до 5,0 г/сосуд против 3,6 г/сосуд в контроле без селена) при обработке семян перед посевом и в 1,8 раз (до 6,3 г/сосуд против 3,6 г/сосуд в контроле без селена) при опрыскивании вегетирующих растений (рис. 4б), сорта системы Злата — в 1,3 раза (до 6,2 г/сосуд при обработке семян перед посевом и до 6,4 г/сосуд при опрыскивании вегетирующих растений) в сравнении с вариантами без его применения (рис.5б). Селен оказывал существенное влияние на механизмы формирования репродуктивных органов. Положительное действие селенита натрия в данных условиях возделывания проявлялось в результате регулирования процессов развития зачаточных цветков в фазу выхода в трубку. Показано увеличение числа цветков, сформировавшихся в фазу выхода в трубку. Вероятно, что это связано с антиоксидантными свойствами элемента, так как селен предотвращал накопление в тканях свободных радикалов, индуцирующих перекисное окисление липидов, нуклеиновых кислот и белков. Сделано предположение о влиянии селена на аттрагирующую способность колоса, которая определялась способом внесения соли селена и сортовой спецификой пшеницы. Было выявлено возрастание количества колосков до 14,1 шт против 12,4 шт в контроле (в 1,13 раз), количества зерен до 24,7 шт против 20,5 шт в контроле (в 1,21 раз) и массы 1000 зерен до 10,8 г против 9,5 г в контроле (в 1,13 раз) у пшеницы сорта Эстер. При фоллиарной обработке растений сорта Эстер изменения также были положительными (в 1,08; 1,15 и 1,5 раз соответственно). В тех же условиях у пшеницы сорта Злата (рис. 5а) количество колосков в колосе изменилось не существенно при обоих способах внесения селена, однако резко возросла озерненность колосьев (в 1,55 раз при обработке семян посевом (до 29,2 шт против 18,2 шт) и в 1,47 раз при фоллиарной обработке растений (до 26,7 шт против 18,2 шт в контроле). Отмечено, что у пшеницы сорта Злата, значительный рост количества зерен в колосьях привел, вероятно, к дефициту ассимилятов и одновременно с нарушением процессов налива зерновок определил снижение массы 1000 зерен до 14,0 г против 17,5 г в контроле) (рис.6а), что не позволило растениям в этих условиях сформировать больший урожай зерна, по сравнению с пшеницей сорта Эстер.

Также стоит отметить, что коэффициент хозяйственной эффективности фотосинтеза (рис. 6б) возрастал при применении селена по сравнению с вариантами контроля как при обработке семян у пшеницы сорта Эстер до 24% против 20% в контрольном варианте, у сорта Злата до 30% против 24% в контрольном варианте. При опрыскивании вегетирующих растений Кхоз повысился до 30% против 20 в контроле и до 29% против 24 % в кортале соответственно. При этом у пшеницы сорта Эстер селен проявил высокую эффективность при опрыскивании вегетирующих растений на все показатели элементов продуктивности. Это и привело к наибольшему приросту урожайности при опрыскивании вегетирующих растений. У растений сорта Злата селен обладает одинаково высокой эффективностью как при обработке семян, так и при опрыскивании вегетирующих растений. Таким образом, при переувлажнении растений в период выращивания проявились сортовые особенности изучаемых сортов пшеницы.

Закключение

В исследованиях выявлена положительная роль селена при благоприятных условиях водообеспечения. Урожайность изучаемых сортов пшеницы значительно увеличилась при применении селена. Результаты показывают,

что растения сорта Эстер и растения сорта Злата реагируют по-разному на внесение микроэлемента. У растений сорта Эстер увеличение урожая зерна определялось технологией внесения селенита натрия. При обработке семян перед посевом возрастали количество зерен в колосе и масса 1000 зерен. При фоллиарной обработке семян — только масса 1000 зерен. У сорта Злата обработке семян селеном изменилось среднее количество зерен в колосках, при фоллиарной обработке выполненность зерен.

Также на основании проведенных исследований сделан вывод о положительном действии различных способов внесения селена на процессы закладки генеративных органов пшеницы, в итоге увеличивая ее урожайность. Особенно эффективным оказалось внесение селена в условиях благоприятного водообеспечения при выращивании пшеницы сорта Эстер.

Отмечено, что переувлажнение почвы вызывает негативные реакции растений. Происходит резкое снижение зерновой продуктивности растений пшеницы изучаемых сортов. Снижение урожайности определялось нарушением процессов синтеза ассимилятов, а также ингибированием механизмов их передвижения и акцепторной способности зерновок их накапливать. Следовательно, необходимо принимать меры по предотвращению отрицательных реакций растений при переувлажнении почвы, чтобы сохранить такое состояние растений пшеницы, когда можно получить максимально возможный в данных условиях урожай растений. В данных условиях использование селенита натрия способствует снижению негативных реакций растений на переувлажнение почвы, особенно сорта Эстер. Селен сохраняет достаточный уровень функционирования генеративных органов, что обеспечивает прохождение этапов развития зачаточных цветков, увеличения тем самым доли их реализации в зерна и возрастание их выполненности. В результате происходит возрастание урожайности пшеницы. Важно отметить, что эффективность применения селена может определяться сортовой спецификой пшеницы и способом внесения элемента.

Финансирование

Исследования выполнены за счет средств программы развития университета в рамках программы стратегического академического лордства «Приоритет 2030».

Благодарности

Авторы выражают слова благодарности Ректору ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Академику РАН, доктору сельскохозяйственных наук, профессору Трухачеву В.И., доктору сельскохозяйственных наук, профессору кафедры химии Белоухову С.Н. за помощь и поддержку научных исследований.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Абдулаев С.С., Чеченский государственный университет имени А. А. Кадырова, Грозный Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.7>

Funding

The research was carried out using funds from the university development program within the framework of the strategic academic leadership program “Priority 2030”.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the Rector of Timiryazev FSBEI HE RSAU-MAA, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Professor Trukhachev V.I., Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Faculty of Chemistry Belopukhov S.N. for their help and support of scientific research.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Abdulaev S.S., Chechen State University named after A.A. Kadyrov, Grozny Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.59.4.7>

Список литературы / References

1. Ардакова Э.А. Активные формы кислорода и антиоксидантная система растений / Э.А. Ардакова, Т.М. Ергалиев // Экология и география растений и растительных сообществ: материалы IV Междунар. науч. конф. (Екатеринбург, 16—19 апр. 2018 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 32–36.
2. Биохимия оксидативного стресса : учеб.-метод. пособие. — Москва : Изд-во РНИМУ им. Н.И. Пирогова, 2018. — 60 с.
3. Загоскина Н.В. Активные формы кислорода и антиоксидантная система растений / Н.В. Загоскина, Л.В. Назаренко // Вестн. Моск. гор. пед. ун-та. Сер.: Естеств. науки. — 2016. — № 2(22). — С. 9–23.
4. Кобзаренко В.И. Агрохимические методы исследований : учебник / В.И. Кобзаренко, В.Ф. Волобуева, И.И. Серегина [и др.]. — Москва : РГАУ-МСХА, 2015. — 309 с.
5. Рудакова А.С. Антиоксидантный статус растений в период водного и солевого стресса (обзор) / А.С. Рудакова, А.М. Кердиварз, С.В. Рудаков // Агрофизика. — 2024. — № 4. — С. 30–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.04.04.
6. Хозеева Е.В. Окислительный стресс растений / Е.В. Хозеева, Ю.А. Зимина, Г.А. Срослова // Природ. системы и ресурсы. — 2020. — Т. 10, № 4. — С. 30–43.
7. Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology / V. Demidchik // Environ. Exp. Bot. — 2015. — Vol. 109. — P. 212–228. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.06.021.
8. Никерова К.М. Активные формы кислорода и компоненты антиоксидантной системы — участники метаболизма растений. Взаимосвязь с фенольным и углеводным обменом / К.М. Никерова, Н.А. Галибина, О.В. Чирва [и др.] // Тр. Карел. науч. центра РАН. — 2021. — № 3. — С. 5–20. DOI: 10.17076/eb1312.
9. Лубянова А.Р. Взаимодействие сигнальных путей при формировании защитных реакций растений в ответ на стрессовые факторы окружающей среды / А.Р. Лубянова, М.В. Безрукова, Ф.М. Шакирова // Физиол. растений. — 2021. — Т. 68, № 6. — С. 563–578.

10. Ниловская Н.Т. Методика проведения морфофизиологического контроля за состоянием зерновых культур : метод. указания / Н.Т. Ниловская, Н.В. Остапенко. — Москва, 1999. — 24 с.
11. Dvorák P. Signaling Toward Reactive Oxygen Species-Scavenging Enzymes in Plants / P. Dvorák, Y. Krasylenko, A. Zeiner [et al.] // *Front. Plant Sci.* — 2021. — Vol. 11. — Art. 618835. DOI: 10.3389/fpls.2020.618835.
12. Noctor G. The metabolomics of oxidative stress / G. Noctor, C. Lelarge-Trouverie, A. Mhamdi // *Phytochemistry.* — 2015. — № 112. — P. 33–53. DOI: 10.1016/j.phytochem.2014.09.002.
13. Карпун Н.Н. Механизмы формирования неспецифического индуцированного иммунитета у растений при биогенном стрессе (обзор) / Н.Н. Карпун, Э.Б. Янушевская, Е.В. Михайлова // *С.-х. биология.* — 2015. — Т. 50, № 5. — С. 540–549. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.540rus.
14. Reactive oxygen species and antioxidant systems in plants: role and regulation under abiotic stress. — Singapore : Springer, 2017. — 328 p.
15. Chen R. Droughts and Thermo-Priming Enhance Acclimation to Later Drought and Heat Stress in Maize Seedlings by Improving Leaf Physiological Activity / R. Chen, X. Hu, D. Chen [et al.] // *Agronomy.* — 2023. — Vol. 13. — P. 1124. DOI: 10.3390/agronomy13041124.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ardakova E.A. Aktivnye formy kisloroda i antioksidantnaya sistema rasteniy [Reactive oxygen species and plant antioxidant system] / E.A. Ardakova, T.M. Ergaliyev // *Ekologiya i geografiya rasteniy i rastitel'nykh soobshchestv* [Ecology and geography of plants and plant communities] : proceedings of the IV International Scientific Conference (Yekaterinburg, April 16–19, 2018). — Yekaterinburg : Publishing House of the Ural University, 2018. — P. 32–36. [in Russian]
2. Biokhimiya oksidativnogo stressa [Biochemistry of oxidative stress] : study guide. — Moscow : Publishing House of RNIMU named after N.I. Pirogov, 2018. — 60 p. [in Russian]
3. Zagorskina N.V. Aktivnye formy kisloroda i antioksidantnaya sistema rasteniy [Reactive oxygen species and plant antioxidant system] / N.V. Zagorskina, L.V. Nazarenko // *Vestn. Mosk. gor. ped. un-ta. Ser.: Estestv. nauki* [Bulletin of Moscow City Pedagogical University. Series: Natural Sciences]. — 2016. — № 2(22). — P. 9–23. [in Russian]
4. Kobzareno V.I. Agrokhimicheskie metody issledovaniy [Agrochemical research methods] / V.I. Kobzareno, V.F. Volobueva, I.I. Seregina [et al.]. — Moscow : RGAU-MSHA, 2015. — 309 p. [in Russian]
5. Rudakova A.S. Antioksidantnyy status rasteniy v period vodnogo i solevogo stressa (obzor) [Antioxidant status of plants during water and salt stress (review)] / A.S. Rudakova, A.M. Kerdivare, S.V. Rudakov // *Agrofizika* [Agrophysics]. — 2024. — № 4. — P. 30–39. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.04.04. [in Russian]
6. Khozeeva E.V. Okislitel'nyy stress rasteniy [Oxidative stress in plants] / E.V. Khozeeva, Yu.A. Zimina, G.A. Sroslova // *Prirod. sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources]. — 2020. — Vol. 10, № 4. — P. 30–43. [in Russian]
7. Demidchik V. Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology / V. Demidchik // *Environ. Exp. Bot.* — 2015. — Vol. 109. — P. 212–228. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.06.021.
8. Nikerova K.M. Aktivnye formy kisloroda i komponenty antioksidantnoy sistemy — uchastniki metabolizma rasteniy. Vzaimosvyaz' s fenol'nym i uglevodnym obmenom [Reactive oxygen species and components of the antioxidant system as participants in plant metabolism. Relationship with phenolic and carbohydrate metabolism] / K.M. Nikerova, N.A. Galibina, O.V. Chirva [et al.] // *Tr. Karel. nauch. tsentra RAN* [Transactions of Karelian Research Centre of RAS]. — 2021. — № 3. — P. 5–20. DOI: 10.17076/eb1312. [in Russian]
9. Lubyanova A.R. Vzaimodeystvie signal'nykh putej pri formirovani zashchitnykh reaktsiy rasteniy v otvet na stressovye faktory okruzhayushchei sredy [Interaction of signaling pathways in the formation of plant defense responses to environmental stress factors] / A.R. Lubyanova, M.V. Bezrukova, F.M. Shakirova // *Fiziol. rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. — 2021. — Vol. 68, № 6. — P. 563–578. [in Russian]
10. Nilovskaya N.T. Metodika provedeniya morfofiziologicheskogo kontrolya za sostoyaniem zernovykh kul'tur [Methodology for morphophysiological monitoring of cereal crops] : guidelines / N.T. Nilovskaya, N.V. Ostapenko. — Moscow, 1999. — 24 p. [in Russian]
11. Dvorák P. Signaling Toward Reactive Oxygen Species-Scavenging Enzymes in Plants / P. Dvorák, Y. Krasylenko, A. Zeiner [et al.] // *Front. Plant Sci.* — 2021. — Vol. 11. — Art. 618835. DOI: 10.3389/fpls.2020.618835.
12. Noctor G. The metabolomics of oxidative stress / G. Noctor, C. Lelarge-Trouverie, A. Mhamdi // *Phytochemistry.* — 2015. — № 112. — P. 33–53. DOI: 10.1016/j.phytochem.2014.09.002.
13. Karpun N.N. Mekhanizmy formirovaniya nespetsificheskogo indutsirovannogo immuniteta u rasteniy pri biogennom stressе (obzor) [Mechanisms of formation of non-specific induced immunity in plants under biotic stress (review)] / N.N. Karpun, E.B. Yanushevskaya, E.V. Mikhailova // *S.-kh. biologiya* [Agricultural Biology]. — 2015. — Vol. 50, № 5. — P. 540–549. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.540rus. [in Russian]
14. Reactive oxygen species and antioxidant systems in plants: role and regulation under abiotic stress. — Singapore : Springer, 2017. — 328 p.
15. Chen R. Droughts and Thermo-Priming Enhance Acclimation to Later Drought and Heat Stress in Maize Seedlings by Improving Leaf Physiological Activity / R. Chen, X. Hu, D. Chen [et al.] // *Agronomy.* — 2023. — Vol. 13. — P. 1124. DOI: 10.3390/agronomy13041124.