

Ультрадисперсные частицы, как механизм стимуляции корнеобразования ярового ячменя при предпосевной обработке

Е. Ю. ПОДЛАСОВА, А. А. НОВИКОВА

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, ул. 9 Января, Оренбург, 460000, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью оценки влияния предпосевной обработки семян ярового ячменя ультрадисперсными частицами Zn, Mn, Cu на морфологию и биомассу корневой системы на ранних стадиях роста и в фазе восковой спелости зерна. Объектом исследования служили растения ярового ячменя сорта Лекарь 2. Обработку семян проводили следующими композициями микроэлементов: $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$; $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$; $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$; контроль – без обработки. Работу выполняли в 2024–2025 гг. Изучение морфометрических изменений корневой системы проводили с использованием метода рулонов на семидневных проростках, а также в климатических камерах в фазе восковой спелости зерна. Наиболее выраженный эффект продемонстрировала комбинация $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$. По сравнению с контролем, количество первичных корней увеличилось на 23,6 %, средняя длина корня – на 35,5 %, общая длина корневой системы – на 33,6 %, сырая масса корней – на 26,5 %, сухая – на 50,0 %. Комбинация $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ показала умеренный стимулирующий эффект, тогда как в варианте $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$ статистически значимых отклонений от контроля не наблюдали. В фазе восковой спелости зерна обработка семян ультрадисперсными частицами $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ способствовала максимальному в опыте увеличению длины корневой системы на 10,6 % и средней длины на 21,1 %, относительно контроля. Сырая и сухая масса корней возросла на 46,7 и 65,7 %. В других вариантах отмечали менее выраженный, но в целом положительный эффект. Наиболее эффективной оказалась предпосевная обработка семян ярового ячменя комбинацией $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$, использование которой стимулировало все исследуемые показатели.

Ключевые слова: яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.), проростки, восковая зрелость, корневая система, ультрадисперсные частицы (УДЧ), рулоны, климатические камеры.

Сведения об авторах: Е. Ю. Подласова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник (e-mail: katerina.pryakhina@mail.ru); А. А. Новикова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник.

Для цитирования: Подласова Е. Ю., Новикова А. А. Ультрадисперсные частицы, как механизм стимуляции корнеобразования ярового ячменя при предпосевной обработке // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. № 3. С. 5–10. doi: 10.53859/02352451_2026_40_3_5.

Ultrafine particles as a mechanism for stimulating root formation of spring barley during pre-sowing treatment

E. Yu. Podlasova, A. A. Novikova

Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies, Russian Academy of Sciences, ul. 9 Yanvarya, Orenburg, 460000, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to evaluate the effect of pre-sowing treatment of spring barley seeds with ultrafine particles of Zn, Mn, Cu on the morphology and biomass of the root system at the early stages of growth and in the waxy ripeness phase of the grain. The object of the study was spring barley plants of the Lekar 2 variety. The seeds were treated with the following compositions of microelements: $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$; $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$; $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$; control – no treatment. The work was carried out in 2024–2025. The study of morphometric changes in the root system was carried out using the roll method on seven-day-old seedlings, as well as in climatic chambers in the waxy ripeness phase of the grain. The most pronounced effect was demonstrated by the combination of $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$. Compared to the control, the number of primary roots increased by 23.6%, the average root length by 35.5%, the total length of the root system by 33.6%, the fresh root weight by 26.5%, and the dry weight by 50%. The combination of $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ showed a moderate stimulating effect, while in the variant $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$ statistically significant deviations from the control were not observed. At the waxy stage of grain maturity, seed treatment with ultrafine particles of $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ resulted in the largest increase in root system length in the experiment, by 10.6%, and average root length by 21.1%, relative to the control. Root fresh and dry weights increased by 46.7% and 65.7%. Less pronounced but overall positive results were observed in other treatments. Pre-sowing treatment of spring barley seeds with a combination of $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ proved to be the most effective, increasing all studied parameters.

Keywords: spring barley (*Hordeum vulgare* L.); seedlings; waxy maturity; root system; ultrafine particles (UFP); rolls; climate chambers.

Author Details: E. Yu. Podlasova, Cand. Sc. (Agr.), research fellow (e-mail: katerina.pryakhina@mail.ru); A. A. Novikova, Cand. Sc. (Agr.), leading research fellow.

For citation: Podlasova EYu, Novikova AA [Ultrafine particles as a mechanism for stimulating root formation of spring barley during pre-sowing treatment]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(3):5–10. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_3_5.

Современное развитие агропромышленного комплекса предъявляет единые требования к достижению высокой урожайности сельскохозяйственных культур при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду. Ключевым фактором продуктивности большинства растений выступает корневая система, поскольку корни выполняют не только опорную функцию, поглощение воды и минеральных веществ из почвы, но и участвуют в синтезе

фитогормонов, регуляции метаболических процессов и взаимодействии с почвенной микробиотой [1]. Изучение механизмов оптимизации развития корневой системы представляет собой один из наиболее перспективных подходов к повышению устойчивости растений к абиотическим и биотическим стрессам и, как следствие, к росту их потенциальной урожайности [2].

Одним из приемов, существенно влияющих на развитие корневой системы, служит предпосевная обра-

ботка семян. Этот агротехнологический прием позволяет доставлять необходимые питательные вещества непосредственно к зачатковым структурам растения еще до прорастания, обеспечивая более быстрый и гармоничный старт развития. Традиционные методы внесения микроэлементов, например, в виде солей часто сопровождаются проблемами биодоступности, быстрой фиксацией в почве и риском фитотоксичности при высоких дозах [3]. В последние годы особое внимание уделяют использованию ультрадисперсных частиц (УДЧ) элементов, характеризующихся большой удельной поверхностью, повышенной реакционной способностью и потенциально иным механизмом транспорта через клеточные мембраны, что открывает новые возможности для повышения эффективности доставки питательных веществ и стимуляции роста растений [4, 5].

Микроэлементы, несмотря на относительно низкие концентрации в тканях растений, играют фундаментальную роль в обеспечении жизнедеятельности и поддержании продуктивности сельскохозяйственных культур. Среди них Zn, Mn и Cu занимают особое место, они необходимы для функционирования множества ферментов и белков, задействованных в ключевых метаболических процессах. Дефицит цинка, отмеченный на значительной части мировых пахотных земель, негативно сказывается на синтезе сахаров, формировании клеточных мембран, продуцировании гормонов и белков, что отражается на жизнеспособности проростков [6, 7]. Марганец выступает кофактором для ряда ферментов, включая супероксиддисмутазу (СОД), и влияет на активность фотосинтеза [8]. Ферменты, активируемые марганцем, участвуют в многочисленных биохимических процессах, включая окислительно-восстановительные реакции, синтез белков и нуклеиновых кислот, а также в биологически активных соединениях, включая ауксины и гиббереллины [9, 10]. Медь входит в состав широкого спектра белков и ферментов, играющих ключевую роль в дыхании, фотосинтезе и метаболизме. Она необходима для поддержания целостности клеточных структур и нормального функционирования растений. Нарушение баланса этих микроэлементов, как в условиях дефицита, так и избытка, приводит к сбоям в метаболических процессах, активности фотосинтеза и дыхания, ухудшению развития корневой системы, что в итоге приводит к снижению урожайности.

Яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) выступает важной зерновой культурой, широко используемой в производстве солода и кормов. Благодаря своей пластичности он часто служит моделью для изучения механизмов адаптации к стрессу [11]. Как и у других злаков, корневая система ярового ячменя состоит из первичных (зародышевых) и вторичных (адвентивных) корней. Первичные корни развиваются из зародышевого корешка и важны на ранних этапах роста, обеспечивая растение водой и питательными веществами. Вторичные корни, формирующиеся из узлов кушения стебля, становятся основной корневой системой взрослого растения: они более разветвлены, глубже проникают в почву и эффективнее поглощают воду и питательные вещества [12].

Несмотря на растущее число исследований, посвященных применению УДЧ микроэлементов, процессы комплексного влияния синергетических комбинаций УДЧ Zn, Mn и Cu на морфометрические показатели и биомассу корневой системы ярового яч-

меня остаются недостаточно изученными. Особенно актуальны исследования, позволяющие выявлять оптимальные концентрации и соотношения этих элементов для достижения максимального стимулирующего эффекта.

Цель исследования – оценить влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя различными комбинациями ультрадисперсных частиц Zn, Mn и Cu на морфологию и биомассу корневой системы на ранних стадиях роста и в фазе восковой спелости зерна для совершенствования системы удобрения культуры.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в лаборатории селекционно-генетических исследований в растениеводстве с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН) в 2024 г. Объект исследований – растения ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорт Лекарь 2, оригинатор – ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН. Семена предоставлены отделом селекции и семеноводства зерновых культур ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН.

Ультрадисперсные частицы металлов получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 (г. Москва) [10]. Частицы характеризовались следующими параметрами: цинк (Zn) – средний диаметр частиц составляет 570 нм, дзета-потенциал – +31,7 мВ, фазовый состав – Zn 100 %; медь (Cu) имеет частицы размером 616 нм и 103,7 нм, дзета-потенциал – +28,1 мВ, фазовый состав – Cu 100 %; марганец (Mn) имеет диаметр частиц 222,5 нм, дзета-потенциал – +18,6 мВ, фазовый состав – Mn 100 %. Для приготовления рабочих суспензионных растворов навески наночастиц вводили в дистиллированную воду с определенной концентрацией. Диспергирование осуществляли на ультразвуковом дезинтеграторе UP50H (Hielscher, Германия) в три цикла по 30 секунд (0,5 А, 35 кГц) с охлаждением проб для предотвращения перегрева и агломерации частиц. Далее полученные суспензии наночастиц вводили в полимерную оболочку, смешивая с 0,56 г карбоксиметилцеллюлозы натриевой, 1,4 г полиэтиленгликоля 400 и 0,37 г динатриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (Na_2EDTA). Компоненты подвергали повторному диспергированию до получения однородной смеси.

На первом этапе исследования определяли оптимальные концентрации ультрадисперсных частиц металлов в полимерном покрытии в трех вариантах: $\text{Zn } 10^{-3} + \text{Mn } 10^{-6} + \text{Cu } 10^{-4}$; $\text{Zn } 10^{-4} + \text{Mn } 10^{-5} + \text{Cu } 10^{-5}$; $\text{Zn } 10^{-5} + \text{Mn } 10^{-4} + \text{Cu } 10^{-6}$. Семена при изучении эффективности их предпосевной обработки проращивали в рулонах из фильтровальной бумаги согласно ГОСТ 12038-84 с использованием термостата ТСО-1М. Проростки выращивали до седьмых суток, после чего определяли количество, среднюю и суммарную длину, а также массу корней в свежем виде и после высушивания. Контролем служил вариант, в котором семена обрабатывали чистой дистиллированной водой. Повторность эксперимента – трехкратная, в каждом повторении по 25 растений.

Второй этап исследований проводили в климатической камере закрытого типа с программируемым управлением микроклиматом через облачный интерфейс «Синерготрон ИСП 11.02» (г. Золотой шар, Россия). Семена заделывали на глубину 5 см в перфорированные кассеты объемом 1,04 л, заполненные

кокосовым субстратом и установленные в ванну из нержавеющей стали для осуществления полива методом подтопления. В каждую кассету высевали по одному семени и выращивали до фазы восковой спелости зерна. Повторность опыта 3-кратная, 88 растений в каждой повторности.

Интенсивность светового дня составила 250 мкмоль/м²·с, которую обеспечивали светодиодные лампы дневного света, вентиляцию и воздухообмен осуществляли автоматически двумя вентиляторами на входе и выходе камеры. Температура день/ночь составляла 25/20 °С, относительная влажность – воздуха 60 %. В утренние часы создавали условия

Результаты и обсуждение. Обработка семян перед посевом различным образом влияет на морфометрические показатели корневой системы. Наиболее выраженное в опыте стимулирующее воздействие на развитие корневой системы растений ярового ячменя продемонстрировала комбинация УДЧ $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ (рис. 1). В этом варианте выявлено достоверное увеличение количества первичных корней, разница относительно контроля составила 23,6 %. Средняя длина корней и общая длина корневой системы также увеличилась на 35,5 и 33,6 % при ($p \leq 0,05$) соответственно в сравнении с контрольным вариантом.

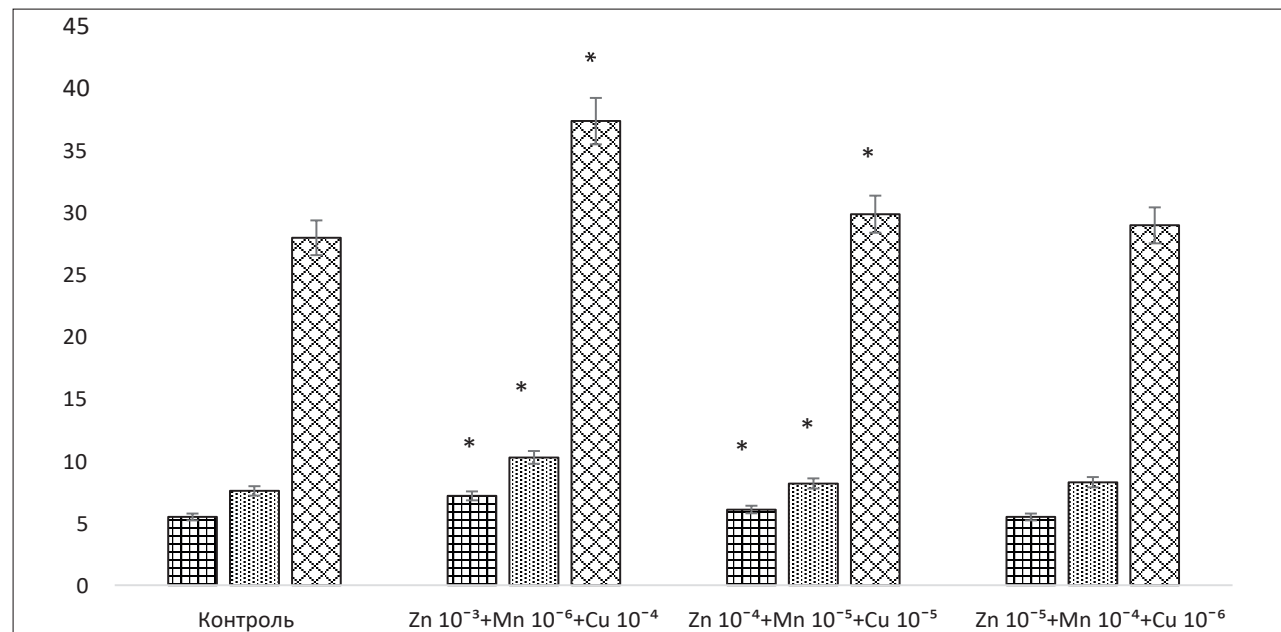


Рис. 1. Влияние предпосевной обработки семян ультрадисперсными частицами на морфометрические показатели корневой системы проростков ярового ячменя на 7 сутки (*различия с контролем достоверны при $p \leq 0,05$, здесь и на рис. 2, 3, 4): ■ – количество первичных корней, шт, ▨ – средняя длина корня, см, ▩ – общая длина корневой системы, см.

тумана, и слабый ветер до 3 м/с, для моделирования естественных условий. Полив осуществляли гидропонным раствором Кнопа, содержание компонентов в растворе в расчете на 10 л составило: $Ca(NO_3)_2$ – 7,0 г, KNO_3 – 1,75 г, KH_2PO_4 – 1,75 г, $MgSO_4$ – 1,75 г, KCl – 0,88 г, $FeCl_3$ – 0,088 г, с доведением pH до 6,6.

Длину корня измеряли линейным методом, сырую массу определяли с использованием аналитических весов сразу после отмывки, а сухую после сушки в сушильном шкафу при температуре 75 °С до постоянного веса. Статистический анализ проводили посредством офисного программного комплекса «Microsoft Office» («Microsoft», США) с применением «Excel» («Microsoft», США). Результаты представлены в виде среднего (М) и стандартной ошибки среднего (m). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Достоверными считали значения при $p \leq 0,05$.

Предпосевная обработка семян композицией УДЧ $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ продемонстрировала умеренный стимулирующий эффект. Количество первичных корней, средняя длина корней и общая длина корневой системы увеличились на 10,4, 7,3, и 6,4 % соответственно относительно контроля. Предпосевная обработка семян композицией УДЧ $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$ не оказала существенного влияния на число

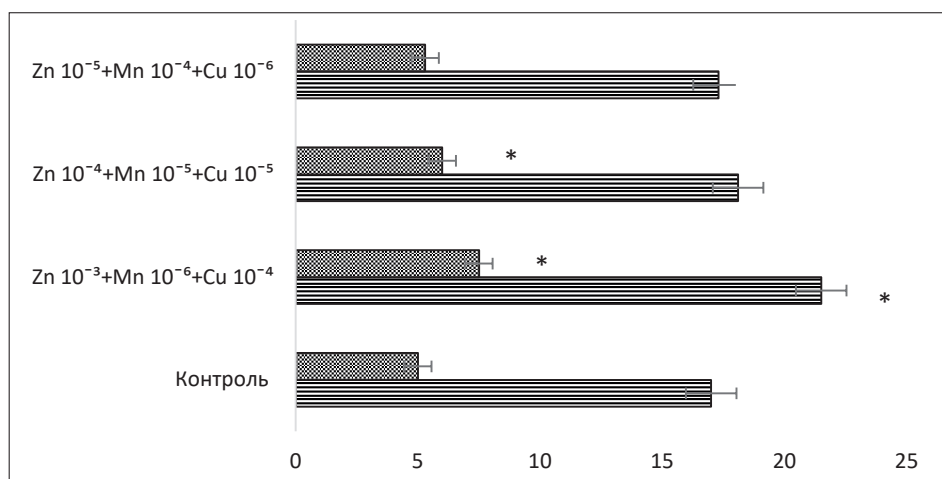


Рис. 2. Масса корневой системы у семидневных проростков в зависимости от предпосевной обработки семян композицией УДЧ: ▨ – сухая масса корневой системы, 10⁻³ г, ▩ – сырая масса корневой системы, 10⁻³ г.

первичных корней и общую длину корневой системы по отношению к контролю. Однако средняя длина корня увеличилась на 8,4 %.

Наибольшее в опыте увеличение сырой массы корневой системы зафиксировано в варианте с предпосевной обработкой УДЧ $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$, где она составила 21,5 г, что превышало контрольный вариант на 26,5 % ($p \leq 0,05$). Сухая масса корневой системы в этом варианте достигла 7,5 г, увеличившись на 50,0 %, по сравнению с контролем (рис. 2).

Предпосевная обработка семян композицией УДЧ $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$, также оказывала положительное влияние на массу корневой системы у проростков ярового ячменя. Сырая и сухая масса корней составила 18,1 и 6,0 г, увеличение относительно контроля составило 6,5 и 20 %.

Обработка семян УДЧ $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$, не оказавшая значительного влияния на морфометрические параметры, также существенно не изменяла сырую массу корневой системы, по сравнению с контролем.

Отсутствие существенных изменений в биомассе корневой системы в варианте $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$, как и в морфологических показателях, свидетельствует о необходимости учета соотношения Zn, Mn и Cu. Вероятно, такая комбинация не обеспечивает оптимального баланса для стимуляции корнеобразования и аккумуляции биомассы, что подчеркивает важность точной настройки концентраций и пропорций элементов [13].

Предпосевная обработка семян УДЧ $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ оказывала значительное положительное влияние на длину корневой системы ярового ячменя даже в более поздние стадии развития растений (рис. 3). Максимальная в опыте длина корневой системы в экспериментальной группе достигала 76,3 см, что на 10,6 % превышало контроль. Средняя длина корневой системы также составила 30,4 см, что на 21,1 % больше, чем в контрольной группе. Эти данные свидетельствуют о том, что стимуляция роста корней, выявленная на ранних стадиях, сохраняется и усиливается к фазе восковой спелости, способствуя более глубокому проникновению корней в почву и, как следствие, лучшему обеспечению растения влагой и питательными веществами [14].

Обработка семян УДЧ $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ оказала положительное влияние на морфологические параметры корневой системы. Максимальная в

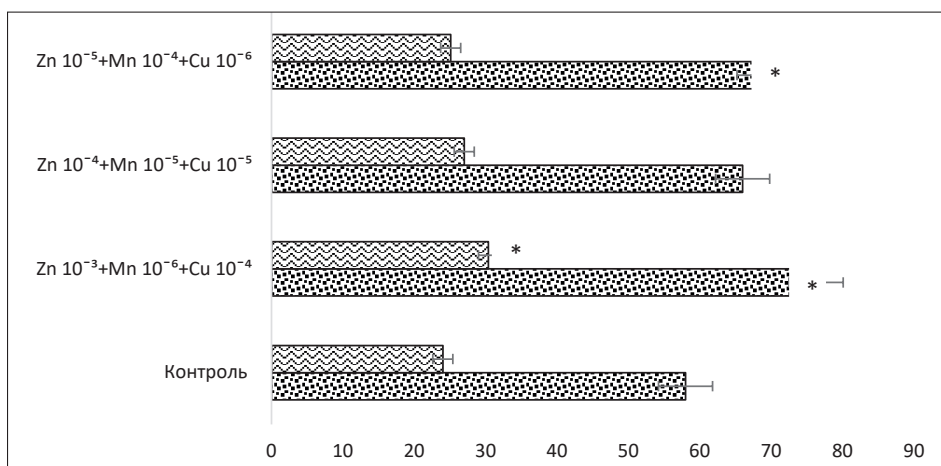


Рис. 3. Изменение длины корневой системы в фазе восковой спелости зерна в зависимости от предпосевной обработки семян УДЧ: — средняя длина корневой системы, см, — максимальная длина корневой системы, см.

опыте и средняя длина корневой системы достигла 66 и 27 см и была на 13,8 и 12,5 % выше контроля.

Обработка семян УДЧ $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$ оказала положительное влияние на морфологические параметры, по сравнению с контролем, в этом варианте максимальная длина корневой системы оказалась на 19 %, а средняя длина — на 4,6 % выше контроля. Эти данные указывают на то, что не все сочетания микроэлементов обеспечивают одинаковый потенциал для стимуляции корнеобразования в поздние фазы роста, и что баланс концентраций Zn, Mn и Cu имеет критическое значение для полного раскрытия корневого потенциала.

Наибольшая в опыте сырая и сухая масса корневой системы отмечена в варианте с обработкой семян УДЧ $Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$, разница относительно контроля составила 46,7 и 65,7 % (рис. 4). Это указывает на то, что предпосевная обработка семян в этом варианте не только стимулирует удлинение корней, но и способствует активному накоплению органического вещества, формированию более разветвленной и массивной корневой системы. Увеличение массы корневой системы служит прямым индикатором лучшего развития растений [15, 16].

В варианте с обработкой семян УДЧ $Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ сырая масса корневой системы увеличилась более чем в 1,4 раза относительно контроля,

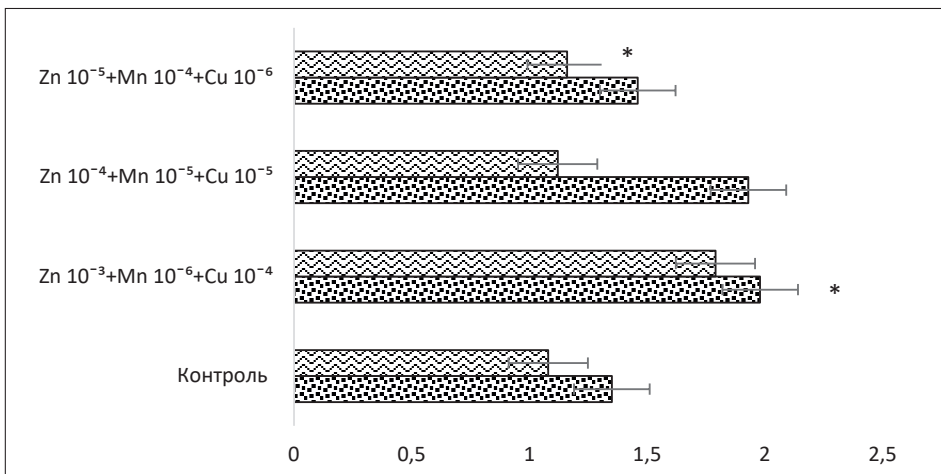


Рис. 4. Влияние предпосевной обработки семян УДЧ на массу корневой системы одного растения ярового ячменя в фазе восковой спелости зерна: — сухая масса корневой системы, г, — сырая масса корневой системы, г.

в то время как сухая масса – только на 3,7 %. Это существенное расхождение между сырой и сухой массой указывает на то, что наблюдаемый рост корневой системы в значительной степени обусловлен увеличением содержания воды в корневых тканях.

В варианте с предпосевной обработкой семян $UDЧ\ Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$, отмечено наименьшее в опыте изменение относительно контрольного варианта. Сырая и сухая масса корней увеличилась на 8,1 и 7,4 % соответственно, по сравнению с контролем. Это свидетельствует о том, что такие концентрации не обеспечивают эффективного стимулирования роста корней, и возможно не активируют процессы накопления органического вещества в корневой системе.

Анализ параметров корневой системы в этот период характеризует способность растений формировать глубокую и разветвленную корневую сеть, обеспечивающую поступление влаги и питательных веществ на этапах закладки и начала формирования зерна [17].

Выводы. Предпосевная обработка семян $UDЧ\ Zn\ 10^{-3} + Mn\ 10^{-6} + Cu\ 10^{-4}$ оказала наиболее выраженный, по сравнению с контролем, положительный эффект на количественные и качественные показатели корневой системы ярового ячменя. На ранних этапах развития, у 7-дневных проростков, отмечено увеличение общего количества первичных корней относительно контроля на 23,6 %, их средней и общей

длины – соответственно на 35,5 и 33,6 %, сырой и сухой массы – на 26,5 и 50,0 %. Такая стимуляция развития корневой системы сохранялась до фазы восковой спелости зерна, в которую средняя длина корней была больше, чем в контроле, на 21,1 %, а их сырая и сухая масса – на 46,7 и 65,7 %.

Другие исследованные комбинации микроэлементов ($Zn\ 10^{-4} + Mn\ 10^{-5} + Cu\ 10^{-5}$ и $Zn\ 10^{-5} + Mn\ 10^{-4} + Cu\ 10^{-6}$) были менее эффективными. Это подчеркивает критическую важность не только наличия микроэлементов, но и их оптимального соотношения и концентрации для достижения максимального агрономического эффекта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук в рамках НИР по теме № FNWZ-2022-0015. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Подласова Е. Ю., Лебедев С. В., Новикова А. А. Роль первичных корней в формировании продуктивности растений ячменя в условиях недостаточного увлажнения // *Земледелие*. 2025. № 7. С. 14–18. doi: 10.24412/0044-3913-2025-7-14-18.
2. Влияние соединений с биологической активностью на рост и развитие ярового ячменя / С. Н. Михалева, Н. И. Будынов, Л. Н. Ульяненко и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2024. Т. 38. № 10. С. 91–96. doi: 10.53859/02352451_2024_38_10_91.
3. Новикова А. А., Подласова Е. Ю., Глущенко Н. Н. Совместное действие наночастиц марганца, меди и цинка на ростовые процессы и фотосинтетические показатели растений ячменя в условиях недостаточного увлажнения // *Агрохимия*. 2025. № 10. С. 69–76. doi: 10.7868/S3034496425100093.
4. Косых Л. А., Никонорова Ю. Ю. Оценка сортов ярового ячменя на устойчивость к селеному стрессу // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 11. С. 31–36. doi: 10.53859/02352451_2022_36_11_31.
5. Наночастицы селена в качестве многофункциональной добавки, обеспечивающей рост и развитие сельскохозяйственных культур: механизмы, эффективность, перспективы и ограничения / Р. М. Саримов, М. Е. Асташев, Д. В. Яныкин и др. // *Агрохимия*. 2025. № 6. С. 92–104. doi: 10.31857/S0002188125060124.
6. Новикова А. А., Подласова Е. Ю., Глущенко Н. Н. Особенность действия наночастиц кобальта и бора на бактериальную люминесценцию и морфометрические показатели проростков яровых зерновых культур и проса // *Российские нанотехнологии*. 2024. Т. 19. № 6. С. 826–834. doi: 10.56304/S1992722324601642.
7. Recent Advances in Biodegradable Matrices for Active Ingredient Release in Crop Protection: Towards Attaining Sustainability in Agriculture / T. Pirzada, B. V. Farias, R. Mathew, et al. // *Opinion in Colloid & Interface Science*. 2020. Vol. 48. P. 121–136. doi: 10.1016/j.cocis.2020.05.002.
8. Seaweed-Based Biogenic ZnO Nanoparticles for Improving Agro-Morphological Characteristics of Rice (*Oryza sativa* L.) / P. D. Ittroutwar, K. Govindaraju, S. Tamilselvan, et al. // *Journal of Plant Growth Regulation*. 2020. Vol. 39. No. 2. P. 717–728. doi: 10.1007/s00344-019-10012-3.
9. Manganese Nanoparticles Control Salinity-Modulated Molecular Responses in *Capsicum annuum* L. through Priming: A Sustainable Approach for Agriculture / Y. Ye, K. Cota-Ruiz, J. A. Hernández-Viezas, et al. // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2020. Vol. 8. No. 3. P. 1427–1436. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b05615.
10. Влияние биостимулятора из растительного сырья на морфологические, цитогенетические и биохимические показатели проростков ячменя / Н. В. Амосова, М. А. Севостьянов, К. В. Бабина и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2024. Т. 38. № 2. С. 29–34. doi: 10.53859/02352451_2024_38_2_29.
11. Горянин О. И., Пронович Л. В. Влияние элементов технологий на эффективность возделывания ярового ячменя в засушливых условиях Поволжья. *Достижения науки и техники АПК*. 2024. Т. 38. № 6. С. 11–15. doi: 10.53859/02352451_2024_38_6_11.
12. Comparative Sensitivity of the Luminescent *Photobacterium phosphoreum*, *Escherichia coli*, and *Bacillus subtilis* Strains to Toxic Effects of Carbon-Based Nanomaterials and Metal Nanoparticles / D. G. Deryabina, L. V. Efremova, I. F. Karimov, et al. // *Microbiology*. 2016. Vol. 85. No. 2. P. 177–186. doi: 10.1134/S0026261716020053.
13. Sarker I., Moore L. R., Tetu S. G. Investigating zinc toxicity responses in marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus* // *Microbiology*. 2021. Vol. 167. No. 6. P. 001064. URL: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001064?crawler=true#> (дата обращения: 05.04.2025). doi: 10.1099/mic.0.001064.
14. Optical properties and antibacterial activity of CdO:Zn nanoparticles / R. Santhi, C. Shanthy, M. Sathya, et al. // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2016. Vol. 8. No. 9. P. 249–258.
15. Дозозависимые эффекты наноразмерных форм гуминовых кислот в гидропонной культуре *Triticum aestivum*: индукция окислительного стресса и увеличение численности пограничных клеток / Н. Г. Мензянова, С. А. Пятина, А. В. Шабанов и др. // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2023. Т. 16. № 1. С. 64–86.

16. Косых Л. А., Никонорова Ю. Ю., Ермилина Н. Н. Оценка физико-механических свойств семян сортов ячменя ярового и их использование в селекции растений в условиях Средневолжского региона // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 9. С. 37–43. doi: 10.53859/02352451_2025_39_9_37.
17. Effects of Drought Stress at the Booting Stage on Leaf Physiological Characteristics and Yield of Rice / X. Yang, X. Wang, Y. Li, et al. // *Plants*. 2024. Vol. 13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/342855523> (дата обращения: 27.02.2025). doi: 10.3390/plants13243464.

References.

1. Podlasova EYu, Lebedev SV, Novikova AA. [The role of primary roots in the formation of barley plant productivity under insufficient moisture conditions]. *Zemledelie*. 2025;(7):14-8. doi: 10.24412/0044-3913-2025-7-14-18. Russian.
2. Mikhaleva SN, Budynkov NI, Ul'ianenko LN, et al. [Effect of compounds with biological activity on the growth and development of spring barley]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2024;38(10):91-6. doi: 10.53859/02352451_2024_38_10_91. Russian.
3. Novikova AA, Podlasova EYu, Glushchenko NN. [Combined effect of manganese, copper and zinc nanoparticles on growth processes and photosynthetic parameters of barley plants under insufficient moisture conditions]. *Agrokimiia*. 2025;(10):69-76. doi: 10.7868/S3034496425100093. Russian.
4. Kosykh LA, Nikonorova YuYu. [Assessment of spring barley varieties for resistance to selenium stress]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2022;36(11):31-6. doi: 10.53859/02352451_2022_36_11_31. Russian.
5. Sarimov RM, Astashev ME, Yanykin DV, et al. [Selenium nanoparticles as a multifunctional additive ensuring the growth and development of agricultural crops: mechanisms, efficiency, prospects and limitations]. *Agrokimiia*. 2025;(6):92-104. doi: 10.31857/S0002188125060124. Russian.
6. Novikova AA, Podlasova EYu, Glushchenko NN. [Peculiarity of the action of cobalt and boron nanoparticles on bacterial luminescence and morphometric parameters of seedlings of spring cereals and millet]. *Ross Nanotekhnol*. 2024;19(6):826-34. doi: 10.56304/S1992722324601642. Russian.
7. Pirzada T, Farias BV, Mathew R, et al. Recent Advances in Biodegradable Matrices for Active Ingredient Release in Crop Protection: Towards Attaining Sustainability in Agriculture. *Opin Colloid Interface Sci*. 2020;48:121-36. doi: 10.1016/j.cocis.2020.05.002.
8. Itroutwar PD, Govindaraju K, Tamilselvan S, et al. Seaweed-Based Biogenic ZnO Nanoparticles for Improving Agro-Morphological Characteristics of Rice (*Oryza sativa* L.). *J Plant Growth Regul*. 2020;39(2):717-28. doi: 10.1007/s00344-019-10012-3.
9. Ye Y, Cota-Ruiz K, Hernández-Viezas JA, et al. Manganese Nanoparticles Control Salinity-Modulated Molecular Responses in *Capsicum annuum* L. through Priming: A Sustainable Approach for Agriculture. *ACS Sustainable Chem Eng*. 2020;8(3):1427-36. doi: 10.1021/acssuschemeng.9b05615.
10. Amosova NV, Sevost'ianov MA, Babina KV, et al. [Effect of a biostimulant from plant raw materials on morphological, cytogenetic and biochemical parameters of barley seedlings]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2024;38(2):29-34. doi: 10.53859/02352451_2024_38_2_29. Russian.
11. Goryanin OI, Pronovich LV. [Influence of technology elements on the efficiency of spring barley cultivation in arid conditions of the Volga region]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2024;38(6):11-5. doi: 10.53859/02352451_2024_38_6_11. Russian.
12. Deryabina DG, Efremova LV, Karimov IF, et al. Comparative Sensitivity of the Luminescent Photobacterium phosphoreum, Escherichia coli, and Bacillus subtilis Strains to Toxic Effects of Carbon-Based Nanomaterials and Metal Nanoparticles. *Microbiology*. 2016;85(2):177-86. doi: 10.1134/S0026261716020053.
13. Sarker I, Moore LR, Tetu SG. Investigating zinc toxicity responses in marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. *Microbiology [Internet]*. 2021;167(6):001064. Available from: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001064?crawler=true#>. doi: 10.1099/mic.0.001064. [cited 2025 Apr 5].
14. Santhi R, Shanthi C, Sathya M, et al. Optical properties and antibacterial activity of CdO:Zn nanoparticles. *J Chem Pharm Res*. 2016;8(9):249-58.
15. Menzianova NG, Piatina SA, Shabanov AV, et al. [Dose-dependent effects of nanoscale forms of humic acids in hydroponic culture of *Triticum aestivum*: induction of oxidative stress and increase in the number of border cells]. *Zhurn Sib Fed Univ Biol*. 2023;16(1):64-86. Russian.
16. Kosykh LA, Nikonorova YuYu, Ermilina NN. [Assessment of physical and mechanical properties of spring barley seeds and their use in plant breeding in the Middle Volga region]. *Dostizh Nauki Tekh APK*. 2025;39(9):37-43. doi: 10.53859/02352451_2025_39_9_37. Russian.
17. Yang X, Wang X, Li Y, et al. Effects of Drought Stress at the Booting Stage on Leaf Physiological Characteristics and Yield of Rice. *Plants [Internet]*. 2024[cited 2025 Feb 27];13(24):3464. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/342855523>. doi: 10.3390/plants13243464.

Поступила в редакцию 15.02.2026 После доработки 04.03.2026 Принята к публикации 25.03.2026

ВНИМАНИЮ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ И ДРУГИХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ ЛИЦ!

Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК» издает монографии
и другую книжную продукцию с редактированием и всеми выходными данными.

Цены договорные.

Заявки отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166.

Тел.: (963) 758-48-44. E-mail: agroapk@mail.ru