

Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 1. С. 159-170.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2022. Vol. 105, no 1. P. 159-170.

Научная статья
УДК 633.16:631.81.095.337
doi:10.33284/2658-3135-105-1-159

Стимулирующая роль микроэлементов на стадии прорастания семян ячменя

Александр Алексеевич Неверов¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия
¹nevalex2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5467-2476>

Аннотация. Микроэлементы играют центральную роль в поддержании метаболизма растений, стрессоустойчивости и устойчивости к болезням. В лабораторных условиях изучено влияние обработки семян водными растворами солей серной кислоты разных металлов и различных концентраций на рост и развитие проростков ячменя. Результаты обработки семян различаются в зависимости от металла и концентрации раствора. Ионы Fe^{++} , Mg^{++} , Zn^{++} в концентрации 1 % водного раствора сульфата металла повышают всхожесть семян ячменя на 5-7 %. Эти же ионы оказывают существенное положительное влияние на рост и развитие корневой системы и ростков ячменя. Наибольший положительный эффект на все показатели – у ионов Fe^{++} . Ионы Cu^{++} в 1 % концентрации соли стимулируют только рост и ускоренное развитие ростков. Ионы Mn^{++} в концентрации 0,1-1,0 % водного раствора фитотоксичны для проростков ячменя.

Ключевые слова: ячмень, семена, сульфаты, железо, магний, цинк, марганец, медь

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2021-2030 гг. ФГБНУ БСТ РАН по теме (№ 0526-2022-0014).

Для цитирования: Неверов А.А. Стимулирующая роль микроэлементов на стадии прорастания семян ячменя // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105, № 1. С. 159-170. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-159>

Original article

Stimulating role of trace elements at the stage of germination of barley seeds

Alexander A Neverov¹

¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
¹nevalex2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5467-2476>

Abstract. Trace elements play a central role in maintaining plant metabolism, increasing stress resistance and disease resistance. The effect of seed treatment with aqueous solutions of sulfuric acid salts of various metals and concentrations on the growth and development of barley seedlings was studied in laboratory conditions. Seed treatment leads to different results depending on the metal and the concentration of the solution. Fe^{++} , Mg^{++} , Zn^{++} ions in a concentration of 1% aqueous solution of metal sulfate increase the germination of barley seeds by 5-7%. The same ions have a significant positive effect on the growth and development of the root system and barley sprouts. Iron Fe has the greatest positive effect on all indicators. Cu^{++} ions in 1% salt concentration stimulate only the growth and accelerated development of sprouts. In a concentration of 0.1-1.0% aqueous solution Mn is phytotoxic for barley seedlings.

Keywords: barley, seeds, sulfates, iron, magnesium, zinc, manganese, copper

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2030 FSBRI FRC BST RAS (No. 0526-2022-0014).

For citation: Neverov AA. Stimulating role of trace elements at the stage of germination of barley seeds. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(1):159-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-1-159>

Введение.

Микроэлементы играют центральную роль в поддержании метаболизма растений, стрессоустойчивости и устойчивости к болезням (Shahzad Z et al., 2017). Такие микроэлементы, как медь (Cu), марганец (Mn), железо (Fe) и цинк (Zn), необходимы растениям, и их функции тесно связаны с жизненно важным обменом веществ. Нормальный диапазон концентраций каждого из этих металлов в растении узок, причём как недостатки, так и избытки вызывают серьёзные физиологические последствия. Поддержание в растении оптимального уровня этих окислительно-активных металлов требует сбалансированной деятельности транспортёров, которые обеспечивают импорт в клетку, правильное распределение там, где это необходимо, и хранение, а также использование в металлопротеинах и металлоферментах внутри клетки (Shingles R et al., 2004).

Запасы микроэлементов в семенах считаются «стартовым удобрением» и жизненно важны в почвенных условиях с их низким запасом, а также в условиях стресса, таких как стресс от засухи (Сакмак I, 2008; Farooq M et al., 2012).

Растения поддерживают строгий баланс в поглощении, транспортировке, использовании и хранении этих металлов для поддержания соответствующего ионного гомеостаза, поскольку эти металлы могут стать токсичными в избыточных концентрациях (производство активных форм кислорода с помощью реакции Фентона), вызывая окислительный стресс (Grotz N et al., 2006).

Будучи переходными металлами, они подвергаются окислительно-восстановительным изменениям в биологических условиях; регулируют биохимические функции путём установления и поддержания стабильных координационных связей с атомами-донорами электронных пар органических лигандов в определённой геометрии и функциональных, а также структурных компонентах металлопротеинов (Krämer U and Clemens S, 2005).

Железо (Fe) является одним из наиболее распространённых элементов в окружающей среде, но всё же третьим, наиболее ограничивающим питательным веществом в растениях, главным образом из-за его низкой растворимости, особенно в щелочных и известковых почвах. Fe необходим для многих жизненно важных процессов, таких как синтез ДНК, производство энергии (дыхание), преобразование энергии (фотосинтез). Он конкурирует с другими переходными металлами, такими как Cu, Zn и Mn, в своём поглощении, транспорте и химической реакции в растительных клетках. Дефицит Fe является распространённым расстройством питания у многих культурных растений, приводящим к снижению урожайности и качества питания (Rou G and Sahoo S, 2015).

Железо обычно находится в двух состояниях окисления: Fe⁺⁺⁺ или Fe⁺⁺. Окислительное состояние формы железа (Fe⁺⁺) легко изменяется, и это позволяет ему участвовать в различных клеточных функциях, однако его регуляция имеет решающее значение для предотвращения клеточной токсичности. Fe недоступно в нейтральных и щелочных почвах, что делает растения дефицитными по железу, несмотря на его обилие. Железо является кофактором окислительно-восстановительных ферментов, таких как оксидаза цитохрома (Cyt), пероксидаза, каталаза, железосернистые белки и ферредоксин (Guerinot M, 1994). Fe также является активным кофактором многих ферментов, необходимых для синтеза гормонов растений (таких как этилен), и ферментов, таких как липоксигеназа и 1-аминоциклопропановая кислота-1-карбоновая оксидаза (Siedow J, 1991). Реакции на дефицит Fe включают задержку роста корней (Satbhai S et al., 2017). В отличие от ограниченной доступности Fe, его избыток в растениях может привести к окислительному стрессу с помощью реакции Фентона (Nishio J et al., 1985).

Улучшение N-статуса растений с низкого до достаточного приводит к трёхкратному увеличению содержания Fe в побегах растений пшеницы (Aciksoz B et al., 2011). Аналогично Grotz N с соавторами (2006) продемонстрировали, что N играет решающую роль в поглощении и накоплении Zn в растениях. В зависимости от поставок N ремобилизация Zn из источников, предшествовавших антезису, обеспечивала почти весь Zn зерна, когда поставка Zn была приостановлена во время антезиса (Kutman U et al., 2011a). Сакмак I с коллегами (2010) обнаружили совместную локализацию белка, Fe и Zn в зародыше и алейроновом слое зерна пшеницы, что указывает на то, что богатые белком зёрна накапливают большее количество Zn и Fe в зерне пшеницы.

Цинк (Zn) действует как каталитический или структурный кофактор во многих ферментах и регуляторных белках. Он служит кофактором для большого количества ферментов, участвующих в транскрипции ДНК, метаболизме белков, нуклеиновых кислот, углеводов и липидов (Hajiboland R, 2012; Ishimaru I et al., 2011). Zn является неотъемлемым компонентом ферментов растений, таких как карбоангидраза, алкогольдегидрогеназа, щелочная фосфатаза, РНК-полимераза и фосфолипаза, а также участвует в реакции других ферментов, где Zn не является основным компонентом (Hajiboland R, 2012).

Дефицит цинка в растениях приводит к развитию аномалий в растениях, которые проявляются в виде таких симптомов, как задержка роста, хлороз и более мелкие листья, стерильность колосков, снижение скорости синтеза белка. Поскольку цинк является составной частью РНК-полимеразы, которая регулирует синтез белка, при её дефиците наблюдается более высокая склонность к инфекциям и заболеваниям. При дефиците цинка рост побегов обычно более подавлен, чем рост корней (Ciftci S and Yilmazand Mittler R, 2008).

Авторы (Guo X et al., 2021) сообщают о том, что микроэлемент Zn положительно коррелирует с макроэлементами N, K, Mg и микроэлементом Mn, что указывает на то, что Zn играет важную роль в опосредовании усвоения питательных веществ пшеницей. Исследование показало, что дефицит цинка снижает способность к поглощению нитратов хлопком, подсолнечником и гречихой. При хорошей обеспеченности цинком улучшается перемещение азота от корня в листья растений и повышается урожайность риса. Эти результаты показывают, что N и Zn синергически влияют на транслокацию от корня к побегу и преимущественное распределение в зерне видов сельскохозяйственных культур.

Дефицит фосфора (P) приводит к чрезмерному накоплению Zn в побегах растений и наоборот (Bouain N et al., 2014; Khan G et al., 2014; Ova E et al., 2015), что указывает на антагонистический эффект между фосфором и цинком в растениях. Кроме того, имеются доказательства сходных физиологических перекрестных связей между P и Fe (Zheng L et al., 2009).

Медь (Cu) играет важную роль в фотосинтезе, дыхании и защите от окислительного стресса. Известны не менее 30 медьсодержащих ферментов, включая оксидазы, такие как цитохромоксидаза, диаминооксидаза, фенолоксидаза, ДОФА-оксидаза, тирозиназа, фенолаза, полифенолоксидаза, лакказы, пластоцианин; антиоксидантный фермент (Cu-Zn супероксиддисмутаза); переносчики кислорода, такие как гемоцианин. Пластоцианин является наиболее распространённым белком меди, участвующим в транспорте электронов между комплексом цитохрома b6f к фотосистеме I (PSI) в тилакоидном просвете хлоропластов. Депривация меди вызывает дефект фотосинтетического транспорта электронов из-за недостатка пластоцианина (PC) (Smiri M an Missaoui T, 2014).

Хотя марганец (Mn) доступен в почве в трёх степенях окисления, Mn^{2+} является единственной фитодоступной формой, а две другие формы Mn^{+++} и Mn^{++++} плохо растворимы. Mn оказывает глубокое влияние на три физиологических процесса в растениях: Mn участвует в структуре водоразделительной системы фотосистемы II (ФСII), которая обеспечивает необходимые электроны для фотосинтеза (Graham R and Webb M, 2018).

Mn является важнейшим компонентом Mn-супероксиддисмутазы (Mn-SOD), основного антиоксидантного фермента (Lidon F et al., 2004). Кроме того, он также служит кофактором многих ферментов, таких как Mn-каталаза, Mn-пероксидазы, декарбоксилазы цикла ТСА, РНК-полимеразы и многочисленные гликозилтрансферазы (Lidon F et al., 2004). Недостаток марганца в растениях часто путают с недостатком железа. Однако дефицит Mn проявляется в виде межжилкового хлороза (жёлтые листья с зелёными прожилками) молодых листьев, иногда с желтовато-коричневыми, впадыми пятнами в хлоротичных областях между жилками, а также в виде замедленного роста и задержки роста растений (Heine G et al., 2011).

Дефицит Mn – широко распространённая проблема, чаще всего встречающаяся в песчаных почвах, органических почвах с pH выше 6 и сильно выветренных почвах. Обычно это усугубляется холодом и влажностью. Напротив, концентрация Mn в растениях, превышающая требуемую, как и

других обсуждаемых микроэлементов, вызывает выработку АФК по механизму Фентона (Heine G et al., 2011).

Магний (Mg) является одним из наиболее распространённых катионов в живых клетках, уступая только калию (Kobayashi N, 2015). Общая концентрация Mg в растительных клетках находится в диапазоне 15-25 мг, и большая его часть хранится в вакуолях, вдали от метаболизма. Для синтеза хлорофилла в фотосинтетических тканях требуется значительный пул общего клеточного Mg, а остальная часть используется для соединения рибосом во время трансляции и для хелатирования с нуклеотидами, нуклеиновыми кислотами и другими фосфатсодержащими соединениями. Обычно до 20 % общего количества Mg содержится в хлоропластах, но оно может увеличиваться до 50 % в условиях низкой освещенности или во время дефицита Mg.

Неверовым А.А. (2021) установлено, что под влиянием обработки семян нута сульфатом магния лабораторная всхожесть семян существенно не повышалась, однако наблюдался заметный стимулирующий эффект: увеличение массы ростков на 60,9 % и корешков – на 83,9 %. В опытах с яровой пшеницей, подсолнечником, нутом наблюдалась общая для всех культур тенденция: лучшие показатели лабораторной всхожести показал вариант 0,1 %-ной концентрации раствора $MgSO_4$, а наибольший стимулирующий эффект, усиливающий ростовые процессы, наблюдали в варианте с 1 %-ной концентрацией водного раствора.

Исследования прорастания семян тыквы показали, что семена, полученные из растений с большим содержанием Mg, были более энергичными и демонстрировали более раннее появление всходов и лучшее формирование и развитие проростков по сравнению с семенами, собранными из растений с дефицитом Mg (Zhang B et al., 2020). Точно так же размер семян и масса семян растений пшеницы были заметно меньше при дефиците Mg, а внекорневое опрыскивание растений повысило содержание этого элемента, что положительно повлияло на размер семян (Ceylan Y et al., 2016).

Семена материнских растений с низким содержанием Mg имели плохую всхожесть и аномальное развитие проростков, что было связано с меньшим количеством крахмала в семенах Mg-дефицитных растений. Аналогичные результаты были получены и для растений пшеницы, выращенных в тепличных условиях (Ceylan Y et al., 2016).

Цель исследования.

Изучить влияние обработки семян водными растворами сульфатов разных металлов в различных концентрациях на всхожесть и биометрические показатели 4-дневных проростков ячменя.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Сорт ярового ячменя Анна.

Схема эксперимента. Для эксперимента использовали соли серной кислоты (сульфаты) разных металлов.

1. Сульфат железа $FeSO_4 \times 7 H_2O$ (железный купорос), неорганическое соединение, железная соль серной кислоты. Сульфат железа (II) хорошо растворим в воде (26,3 г при +20 °С). Из водных растворов кристаллизуется голубовато-зелёный гептагидрат $FeSO_4 \times 7 H_2O$.

2. Сульфат меди $CuSO_4 \times 5 H_2O$ (медный купорос). Сульфат меди (II) хорошо растворим в воде. Из водных растворов кристаллизуется в виде голубого пентагидрата $CuSO_4 \times 5 H_2O$ (медный купорос).

3. Сульфат цинка $ZnSO_4 \times 7 H_2O$ (цинковый купорос). Сернокислый цинк, $ZnSO_4$ – цинковая соль серной кислоты в виде порошка, состоящего из прозрачных, бесцветных кристаллов без запаха, но с резким и вяжущим вкусом.

4. Сульфат марганца $MnSO_4 \times 5 H_2O$ (марганцевый купорос). Белый порошок, при прокаливании плавится и разлагается. Кристаллогидрат $MnSO_4 \times 5 H_2O$ – красно-розовый, техническое название – марганцевый купорос. Хорошо растворим в воде.

5. Сульфат магния $MgSO_4 \times 7 H_2O$ (эпсомит) – белый кристаллический порошок, растворимый в воде, пакетирован по 20 г (Южно-Уральский завод магниевых соединений, г. Кувандык, Россия). Молярная масса – $24+32+16 \times 4+7 \times (2 \times 1+16)=246$ г/моль.

Расчёт количества препарата для обработки семян проводился по действующему веществу – сульфату металла. На примере сульфата магния $MgSO_4$ (120г/моль) с содержанием в препарате – $120/246=48,8\%$.

Расход рабочего раствора для обработки 1 т семян сельскохозяйственных культур – 10 л. Расход сульфата магния семиводного (препарата) на 1 т семян при 1 %-ной концентрации водного раствора – 205 г, 0,1 %-ной – 20,5 г. Для приготовления 100 мл: 1 %-ного раствора сульфата магния требуется 2,05 г семиводного сульфата магния; 0,1 %-ного – 0,21 г.

Для обработки 1000 г семян использовалось 10 мл водного раствора указанных концентраций препарата с экспозицией 1 сутки. Обработка семян проводилась в стерильных пакетах. Проращивание – в растильнях на фильтровальной бумаге, в темноте (НБ, Т) при постоянной температуре +24 °С в четырёхкратном повторении, по 100 шт. семян в каждом повторении. День закладки семян на проращивание и день съёма семян считался за одни сутки. Проращивание проводилось в течение 4 суток. Для контроля использовались семена, обработанные водопроводной водой из расчёта 10 л воды на 1 т семян.

Обработка семян ячменя в лабораторных условиях водными растворами сульфатов металлов в концентрации 0,1 % и 1,0 % из расчёта 10 л рабочего раствора на 1 т семян. Количество вариантов – 11.

1. Контроль (10 л воды на 1 т семян)
2. $CuSO_4$ – 1 %-ный раствор (Cu^{++})
3. $CuSO_4$ – 0,1 %-ный раствор (Cu^{++})
4. $FeSO_4$ – 1 %-ный раствор (Fe^{++})
5. $FeSO_4$ – 0,1 %-ный раствор (Fe^{++})
6. $MgSO_4$ – 1 %-ный раствор (Mg^{++})
7. $MgSO_4$ – 0,1 %-ный раствор (Mg^{++})
8. $ZnSO_4$ – 1 %-ный раствор (Zn^{++})
9. $ZnSO_4$ – 0,1 %-ный раствор (Zn^{++})
10. $MnSO_4$ – 1 %-ный раствор (Mn^{++})
11. $MnSO_4$ – 0,1 %-ный раствор (Mn^{++})

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф>. Термостат ТСО-1М (ООО «Промкомплект», Россия), растильни, фильтровальная бумага, стерильные пакеты, мерные конические колбы на 100 мл, пробирки градуированные на 1 мл и 10 мл, пипетка градуированная на 10 мл.

Статистическая обработка. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 6.1» («Stat Soft Inc.», США).

Результаты исследования.

Эффективность обработки семян ячменя сульфатами различных металлов и концентраций существенно различалась между вариантами (табл. 1).

В контрольном варианте лабораторная всхожесть семян от обработки водой составила 89,2 %. Не оказали существенного влияния на число проростков ячменя ($НСР_{05}=2\%$) ионы металлов: Mn^{++} , Cu^{++} различной концентрации раствора, а также 0,1%-ного раствора Zn^{++} и Fe^{++} . Значительный прирост всхожести семян (7 %) наблюдался в варианте 1%-ного раствора Zn^{++} , Mg^{++} (по 5 %) в обеих концентрациях и 1%-ного раствора Fe^{++} .

Таблица 1. Лабораторная всхожесть семян ячменя после обработки водными растворами солей металлов

Table 1. Laboratory germination of barley seeds after treatment with aqueous solutions of metal salts

Варианты опыта / <i>Experience Variant</i>	Концентрация раствора, %/ <i>Solution concentration, %</i>	Всхожесть семян, % / <i>Seed germination, %</i>	Отклонения от контроля, % / <i>Deviations from control, %</i>
Контроль / <i>Control</i>	0	89,2	-
Cu ⁺⁺	1	89,2	0,0
	0,1	87,2	-2,0
Fe ⁺⁺	1	94,2	5,0*
	0,1	87,2	-2,0
Mg ⁺⁺	1	94,2	5,0*
	0,1	94,2	5,0*
Zn ⁺⁺	1	96,2	7,0*
	0,1	87,2	-2,0
Mn ⁺⁺	1	89,2	0,0
	0,1	89,2	0,0
Среднее по концентрации 1 % / <i>Average concentration 1%</i>		92,6	3,4*
Среднее по концентрации 0,1 % / <i>Average concentration 0.1%</i>		89,0	-0,2
Среднее по опыту / <i>Average by experience</i>		90,7	1,6
HCP₀₅ / SSD₀₅			2,0

Примечание: * – Различия относительно контроля при уровне достоверности p≤0,05
 Note: * – Differences with respect to control at the confidence level p≤0.05

Более существенное влияние металлы оказали на рост и развитие проростков (табл. 2 и 3).

Таблица 2. Стимуляция корневой системы у проростков ячменя водными растворами сульфатов металлов

Table 2. Stimulation of the root system of barley seedlings with aqueous solutions of metal sulfates

Варианты опыта / <i>Experience Variant</i>	Концентрация раствора, % <i>/Solution concentration, %</i>	Масса корней, мг <i>/Weight of roots, mg</i>	Отклонения от контроля, мг / <i>Deviations from control, mg</i>	Отклонения от контроля, % / <i>Deviations from control, %</i>
Контроль / <i>Control</i>	0	44,7	-	-
Cu ⁺⁺	1	47,5	2,8	6,3
	0,1	44,3	-0,4	-1,0
Fe ⁺⁺	1	64,6	19,9*	44,5*
	0,1	59,5	14,8*	33,2*
Mg ⁺⁺	1	49,1	4,5*	10,0*
	0,1	45,3	0,7	1,5
Zn ⁺⁺	1	50,1	5,4*	12,1*
	0,1	52,0	7,3*	16,3*
Mn ⁺⁺	1	40,2	-4,5*	-10,0*
	0,1	41,2	-3,5	-7,9
Среднее по концентрации 1 % / <i>Average concentration 1%</i>		50,3	5,6*	12,6*
Среднее по концентрации 0,1 % / <i>Average concentration 0.1%</i>		48,4	3,8*	8,4*
Среднее по опыту / <i>Average by experience</i>		48,9	4,7	10,5
HCP₀₅ / SSD₀₅		-	3,5	7,8

Примечание: * – Различия относительно контроля при уровне достоверности P≤0,05
 Note: * – Differences with respect to control at the confidence level P≤0.05

Масса зародышевых корешков одного проростка в контрольном варианте составила 44,7 мг. Не оказало существенного влияния на формирование корневой системы обработка семян растворами Cu^{++} обеих концентраций (отклонения от контроля – меньше величины $\text{HCP}_{05}=7,8\%$), а также Mg^{++} 0,1 %-ной концентрации. Наибольший прирост корней по массе наблюдался в вариантах с Fe^{++} – 44,5 и 33,2 % от контроля соответственно в растворах 1 %-ной и 0,1 %-ной концентраций; затем – в вариантах с Zn^{++} (12,1 и 16,3 %) и с Mg^{++} (10 % в 1%-ном растворе).

Существенное отрицательное влияние (фитотоксичность) на прирост корневой системы оказал ион Mn^{++} – снижение 7,9 и 10 % относительно контроля в растворах меньшей и большей концентрации соответственно.

Несколько иначе ионы металлов влияли на формирование ростков ячменя (табл. 3).

Таблица 3. Влияние обработки семян водными растворами солей металлов на формирование ростков ячменя
Table 3. The effect of seed treatment with aqueous solutions of metal salts on the formation of barley sprouts

Варианты опыта / Experience Variant	Концентрация раствора, % / So- lution concentra- tion, %	Масса одного ростка, мг / Weight of one sprout, mg	Отклонения от контроля, мг / Deviations from control, mg	Отклонения от контроля, % / Deviations from control, %
Контроль / <i>Control</i>	0	47,6	-	-
Cu^{++}	1	53,0	5,4*	11,2*
	0,1	48,9	1,3	2,6
Fe^{++}	1	79,6	31,9*	67,1*
	0,1	78,5	30,9*	65,0*
Mg^{++}	1	52,5	4,9*	10,3*
	0,1	48,7	1,1	2,4
Zn^{++}	1	50,3	2,7	5,6
	0,1	49,3	1,7	3,6
Mn^{++}	1	42,5	-5,1*	-10,7*
	0,1	43,5	-4,1*	-8,7*
Среднее по концентрации 1 % / <i>Average concentration 1%</i>		55,8	8,1*	17,1*
Среднее по концентрации 0,1 % / <i>Average concentration 0,1%</i>		53,6	6,0*	12,6*
Среднее по опыту / <i>Average by experience</i>		54,0	7,1	14,8
$\text{HCP}_{05}/ \text{SSD}_{05}$		-	4,0	8,4

Примечание: *– Различия относительно контроля при уровне достоверности $p \leq 0,05$

Note: *– Differences with respect to control at the confidence level $p \leq 0.05$

Масса одного ростка в контрольном варианте составила 47,6 мг. Не оказали заметного влияние на формирование ростка варианты с Zn^{++} обеих концентраций при HCP_{05} , равной 8,4 %, а также Cu^{++} и Mg^{++} 0,1%-ной концентрации раствора. Наибольшая эффективность по приросту массы ростка относительно контроля показал вариант Fe^{++} – 65,0 и 67,1 % в меньшей и большей концентрациях раствора. Примерно равный эффект (10,2 и 11,2 %) от ионов Mg^{++} и Cu^{++} 1 %-ного раствора.

Так же, как и в случае с корневой системой, достоверно установлено, что ионы Mn^{++} проявили фитотоксичность: масса ростка уменьшилась на 8,7 и 10,7 % соответственно в растворах низкой и более высокой концентрации.

Обсуждение полученных результатов.

Вероятно, повышение всхожести семян, усиление ростовой активности проростков ячменя под влиянием конкретных питательных ионов металлов свидетельствует, прежде всего, о недостатке того или иного элемента в семенах растений.

Каждому генотипу растений соответствует своё оптимальное соотношение ионов минерального питания в почвенном растворе. Особенности поглощения элементов минерального питания зависят от генотипа растений, в данном случае от особенностей сорта ячменя Анна, а также от экологических условий: погоды и почвы.

Для степной зоны Оренбургского Предуралья характерно воздействие на агроценозы часто повторяющихся водных и температурных стрессов. В условиях засухи замедляются в почве биогенные процессы формирования доступных для усвоения растениями минеральных форм азота. Почвы степной зоны в основном представлены южными чернозёмами карбонатными, которые характеризуются избыточным содержанием ионов Ca^{++} и K^+ и щелочной реакцией почвенного раствора. По наблюдениям автора, в условиях засухи рН водной вытяжки почвы смещается до 8,5-9,0 ед. в период активной вегетации ячменя, что создаёт крайне неблагоприятные условия для нормального функционирования корневой системы растений. Избыток извести способствует переводу жизненно важных для растений микроэлементов в труднодоступные формы.

В наших исследованиях наибольшая положительная реакция проростков получена от обработки семян ячменя сульфатами Fe^{++} , Zn^{++} , Mg^{++} . Ионы Mn^{++} проявили сильную фитотоксичность в концентрациях 0,1 и 1,0 %-ного водного раствора, которую мы считаем избыточной для ячменя сорта Анна.

Вероятно, недостаточное азотное питание растений в силу засушливости климата, в совокупности со щелочной реакцией почвенного раствора, в условиях степной зоны Оренбуржья приводит к дефициту в растениях, прежде всего, ионов Fe^{++} и Zn^{++} . Данный вывод находит подтверждение в работах ряда учёных (Сакмак I et al., 2010; Ши R et al., 2010; Кутман U et al., 2011b; Вагунавати N et al., 2013), которые показали, что азотные удобрения не только повышают урожайность зерна пшеницы, но и способствуют усвоению Fe и Zn в зерно пшеницы.

В наших исследованиях марганец отрицательно повлиял на рост зародышевых корешков и ростков ячменя и не оказал положительного влияния на лабораторную всхожесть семян при 0,1%-ной и 1%-ной концентрации раствора. При этом известно, что марганец – необходимый микроэлемент для растительного организма, и особую потребность в нём испытывают зерновые культуры. Видимо, в данном случае при высоких концентрациях он проявляет себя как тяжёлый металл, что приводит к общим, физиологическим и биохимическим, изменениям. Наше предположение согласуется с результатами лабораторных исследований Шелудько А.Н. и Червоненко Д.В. (2016), которые установили, что при повышении действующих концентраций в растворе марганца 0,01-1,0 % наблюдается угнетающее влияние и на корнеобразование, и на показатели массы ростков озимой пшеницы.

Положительное действие ионов магния на проростки ячменя вполне согласуется с выводами об антагонизме ионов магния с ионами кальция и калия. Избыток ионов кальция и калия, характерный для почв Оренбургского Предуралья, в почвенном растворе ухудшает поглощение магния корневой системой растений.

Заключение.

Обработка семян ячменя водными растворами солей серной кислоты приводит к различным результатам в зависимости от металла и концентрации раствора.

Ионы Fe^{++} , Mg^{++} , Zn^{++} в концентрации 1%-ного водного раствора сульфата металла повышают всхожесть семян ячменя на 5-7 %. Эти же ионы оказывают существенное положительное влияние на рост и развитие корневой системы и ростков ячменя. Наибольший положительный эффект на все показатели у железа. Ионы Cu^{++} в 1%-ной концентрации соли стимулируют только

рост и ускоренное развитие ростков у ячменя. Cu, Mn существенного влияния на всхожесть не оказывают. В концентрации 0,1 и 1,0 % водного раствора Mn фитотоксичен для проростков ячменя.

Положительная реакция проростков ячменя на тот или иной вид микроэлемента свидетельствует о его недостатке в той партии семян, где экологические условия выращивания растений не способствовали достаточному накоплению этого элемента в зерне.

Список источников

1. Неверов А.А. Стимулирующий эффект сульфата магния на стадии прорастания семян сельскохозяйственных культур // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 1(87). С. 74-78. [Neverov AA. The stimulating effect of magnesium sulfate at the stage of seed germination of agricultural crops. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021;1(87):74-78. (*In Russ*)]. doi: 10.37670/2073-0853-2021-87-1-74-78
2. Шелудько А.Н., Червоненко Д.В. Влияние соли марганца различной концентрации на ростовые процессы пшеницы // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2016. Т. 6. № 5. С. 669. [Shelud'ko AN, Chervonenko DV. Vliyanie soli margantsa razlichnoi kontsentratsii na rostovye protsessy pshenitsy. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2016;6(5):669. (*In Russ*)].
3. Aciksoz BS, Yazicici A, Ozturk L, Cakmak I. Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. *Plant Soil*. 2011;349:215-225. doi: 10.1007/s11104-011-0863-2
4. Barunawati N, Giehl RFH, Bauer B, von Wiren N. The influence of inorganic nitrogen fertilizer forms on micronutrient retranslocation and accumulation in grains of winter wheat. *Front Plant Sci*. 2013;4:320. doi: 10.3389/fpls.2013.00320
5. Bouain N, Kisko M, Rouached A, Dauzat M, Lacombe B, Belgaroui N, et al. (2014). Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of Pi transport. *Biomed Res Int*. 2014;2014:548254. doi: 10.1155/2014/548254
6. Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*. 2008;302:1-17. doi: 10.1007/s11104-007-9466-3
7. Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, Torun AA, Aydin N, Wang Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *J Agric Food Chem*. 2010;58(16):9092-9102. doi: 10.1021/jf101197h
8. Ceylan Y, Kutman UB, Mengutay M, Cakmak I. Magnesium applications to growth medium and foliage affect the starch distribution, increase the grain size and improve the seed germination in wheat. *Plant Soil*. 2016;406:145-156. doi: 10.1007/s11104-016-2871-8
9. Ciftci-Yilmaz S, Mittler R. The zinc finger network of plants. *Cell Mol Life Sci*. 2008;65:1150-1160. doi: 10.1007/s00018-007-7473-4
10. Farooq M, Wahid A, Siddique KHM. Micronutrient application through seed treatments - a review. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2012;12(1):125-142. doi: 10.4067/S0718-95162012000100011
11. Graham RD, Webb MJ. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. In: Mortvedt JJ, editor. *Micronutrients in Agriculture*. 2018;4(10):329-370. doi: 10.2136/sssabookser4.2ed.c10
12. Grotz N, Guerinot ML. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res*. 2006;1763(7):595-608. doi: 10.1016/j.bbamcr.2006.05.014
13. Guerinot ML. Microbial iron transport. *Annu Rev Microbiol*. 1994;48:743-72. doi: 10.1146/annurev.mi.48.100194.003523
14. Guo X, Ma X, Zhang J et al. Meta-analysis of the role of zinc in coordinating absorption of mineral elements in wheat seedlings. *Plant Methods*. 2021;17(1):105. doi: 10.1186/s13007-021-00805-7
15. Hajiboland R. Effect of micronutrient deficiencies on plants stress responses. Ahmad P, Prasad MNV, editor. *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012:283-329. doi: 10.1007/978-1-4614-0634-1_16
16. Heine G, Max JF, Führs H, Moran-Puente DW, Heintz D, Horst WJ. Effect of manganese on the resistance of tomato to *Pseudocercospora fuligena*. *J Plant Nutr Soil Sci*. 2011;174(5):827-836. doi: 10.1002/jpln.201000440

17. Ishimaru Y, Bashir K, Nishizawa NK. Zn uptake and translocation in rice plants. *Rice*. 2011;4:21-27. doi: 10.1007/s12284-011-9061-3
18. Khan G.A, Bouraine S, Wege S, Li Y, de Carbonnel M, Berthomieu P, et al. Coordination between zinc and phosphate homeostasis involves the transcription factor PHR1, the phosphate exporter PHO1, and its homologue PHO1;H3 in Arabidopsis. *J Exp Bot*. 2014;65(3):871-884. doi: 10.1093/jxb/ert444
19. Kobayashi NI, Tanoi K. Critical issues in the study of magnesium transport systems and magnesium deficiency symptoms in plants. *Int J Mol Sci*. 2015;16(9):23076-23093. doi: 10.3390/ijms160923076
20. Krämer U, Clemens S. Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. In: Tamas MJ, Martinoia E, editors. *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification. Topics in Current Genetics*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2005;14:215-271. doi: 10.1007/4735_96
21. Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat. *J Cereal Sci*. 2011a;53:118-125. doi: 10.1016/j.jcs.2010.10.006
22. Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil*. 2011b;342:149-164. doi: 10.1007/s11104-010-0679-5
23. Lidon FC, Barreiro MG, Ramalho JC. Manganese accumulation in rice: implications for photosynthetic functioning. *J Plant Physiol*. 2004;161(11):1235-1244. doi: 10.1016/j.jplph.2004.02.003
24. Nishio JN, Abadia J, Terry N. Chlorophyll-proteins and electron transport during iron nutrition-mediated chloroplast development. *Plant Physiol*. 1985;78(2):296-299. doi: 10.1104/pp.78.2.296
25. Ova EA, Kutman UB, Ozturk L, Cakmak I. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant Soil*. 2015;393:147-162. doi: 10.1007/s11104-015-2483-8
26. Rou GR, Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Rev Agric Sci*. 2015;3:1-24. doi: 10.7831/ras.3.1
27. Satbhai SB, Setzer C, Freynschlag F, Slovak R, Kerdaffrec E, Busch W. Natural allelic variation of FRO2 modulates Arabidopsis root growth under iron deficiency. *Nat Commun*. 2017;8:15603. doi: 10.1038/ncomms15603
28. Shahzad Z, Amtmann A. Food for thought: how nutrients regulate root system architecture. *Curr Opin Plant Biol*. 2017;39:80-87. doi: 10.1016/j.pbi.2017.06.008
29. Shi R, Zhang Y, Chen X, Sun Q, Zhang F, Römheld V, Zou C. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Cereal Sci*. 2010;51(1):165-170. doi: 10.1016/j.jcs.2009.11.008
30. Shingles R, Wimmers LE, McCarty RE. Copper transport across pea thylakoid membranes. *Plant Physiol*. 2004;135(1):145-151. doi: 10.1104/pp.103.037895
31. Smiri M., Missaoui T. The role of ferredoxin : thioredoxin reductase / thioredoxin m in seed germination and the connection between this system and copper ion toxicity. *Journal of Plant Physiology*. 2014;171(17):1664-1670. doi: 10.1016/j.jplph.2014.06.019
32. Zhang B, Cakmak I, Feng J, et al. Magnesium deficiency reduced the yield and seed germination in wax gourd by affecting the carbohydrate translocation. *Front Plant Sci*. 2020;11:797. doi: 10.3389/fpls.2020.00797
33. Zheng L, Huang F, Narsai R, Wu J, Giraud E, He F, et al. Physiological and transcriptome analysis of iron and phosphorus interaction in rice seedlings. *Plant Physiol*. 2009;151(1):262-274. doi: 10.1104/pp.109.141051

References

1. Neverov AA. The stimulating effect of magnesium sulfate at the stage of seed germination of agricultural crops. *Izvestia of Orenburg State Agrarian University*. 2021;1(87):74-78. doi: 10.37670/2073-0853-2021-87-1-74-78

2. Shelud'ko AN, Chervonenko DV. Effect of manganese salt of various concentrations on the growth processes of wheat. *Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2016;6(5):669.
3. Aciksoz BS, Yazicici A, Ozturk L, Cakmak I. Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. *Plant Soil*. 2011;349:215-225. doi: 10.1007/s11104-011-0863-2
4. Barunawati N, Giehl RFH, Bauer B, von Wiren N. The influence of inorganic nitrogen fertilizer forms on micronutrient retranslocation and accumulation in grains of winter wheat. *Front Plant Sci*. 2013;4:320. doi: 10.3389/fpls.2013.00320
5. Bouain N, Kisko M, Rouached A, Dauzat M, Lacombe B, Belgaroui N, et al. (2014). Phosphate/zinc interaction analysis in two lettuce varieties reveals contrasting effects on biomass, photosynthesis, and dynamics of Pi transport. *Biomed Res Int*. 2014;2014:548254. doi: 10.1155/2014/548254
6. Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil*. 2008;302:1-17. doi: 10.1007/s11104-007-9466-3
7. Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, Torun AA, Aydin N, Wang Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *J Agric Food Chem*. 2010;58(16):9092-9102. doi: 10.1021/jf101197h
8. Ceylan Y, Kutman UB, Mengutay M, Cakmak I. Magnesium applications to growth medium and foliage affect the starch distribution, increase the grain size and improve the seed germination in wheat. *Plant Soil*. 2016;406:145-156. doi: 10.1007/s11104-016-2871-8
9. Ciftci-Yilmaz S, Mittler R. The zinc finger network of plants. *Cell Mol Life Sci*. 2008;65:1150-1160. doi: 10.1007/s00018-007-7473-4
10. Farooq M, Wahid A, Siddique KHM. Micronutrient application through seed treatments - a review. *J Soil Sci Plant Nutr*. 2012;12(1):125-142. doi: 10.4067/S0718-95162012000100011
11. Graham RD, Webb MJ. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. In: Mortvedt JJ, editor. *Micronutrients in Agriculture*. 2018;4(10):329-370. doi: 10.2136/sssabookser4.2ed.c10
12. Grotz N, Guerinot ML. Molecular aspects of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants. *Biochim Biophys Acta Mol Cell Res*. 2006;1763(7):595-608. doi: 10.1016/j.bbamcr.2006.05.014
13. Guerinot ML. Microbial iron transport. *Annu Rev Microbiol*. 1994;48:743-72. doi: 10.1146/annurev.mi.48.100194.003523
14. Guo X, Ma X, Zhang J et al. Meta-analysis of the role of zinc in coordinating absorption of mineral elements in wheat seedlings. *Plant Methods*. 2021;17(1):105. doi: 10.1186/s13007-021-00805-7
15. Hajiboland R. Effect of micronutrient deficiencies on plants stress responses. Ahmad P, Prasad MNV, editor. *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability*. New York, NY: Springer; 2012:283-329. doi: 10.1007/978-1-4614-0634-1_16
16. Heine G, Max JF, Führs H, Moran-Puente DW, Heintz D, Horst WJ. Effect of manganese on the resistance of tomato to *Pseudocercospora fuligena*. *J Plant Nutr Soil Sci*. 2011;174(5):827-836. doi: 10.1002/jpln.201000440
17. Ishimaru Y, Bashir K, Nishizawa NK. Zn uptake and translocation in rice plants. *Rice*. 2011;4:21-27. doi: 10.1007/s12284-011-9061-3
18. Khan G.A, Bouraine S, Wege S, Li Y, de Carbonnel M, Berthomieu P, et al. Coordination between zinc and phosphate homeostasis involves the transcription factor PHR1, the phosphate exporter PHO1, and its homologue PHO1;H3 in Arabidopsis. *J Exp Bot*. 2014;65(3):871-884. doi: 10.1093/jxb/ert444
19. Kobayashi NI, Tanoi K. Critical issues in the study of magnesium transport systems and magnesium deficiency symptoms in plants. *Int J Mol Sci*. 2015;16(9):23076-23093. doi: 10.3390/ijms160923076
20. Krämer U, Clemens S. Functions and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. In: Tamas MJ, Martinoia E, editors. *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification*. Topics in Current Genetics. Berlin, Heidelberg: Springer. 2005;14:215-271. doi: 10.1007/4735_96

21. Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat. *J Cereal Sci.* 2011a;53:118-125. doi: 10.1016/j.jcs.2010.10.006
22. Kutman UB, Yildiz B, Cakmak I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil.* 2011b;342:149-164. doi: 10.1007/s11104-010-0679-5
23. Lidon FC, Barreiro MG, Ramalho JC. Manganese accumulation in rice: implications for photosynthetic functioning. *J Plant Physiol.* 2004;161(11):1235-1244. doi: 10.1016/j.jplph.2004.02.003
24. Nishio JN, Abadía J, Terry N. Chlorophyll-proteins and electron transport during iron nutrition-mediated chloroplast development. *Plant Physiol.* 1985;78(2):296-299. doi: 10.1104/pp.78.2.296
25. Ova EA, Kutman UB, Ozturk L, Cakmak I. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant Soil.* 2015;393:147-162. doi: 10.1007/s11104-015-2483-8
26. Rou GR, Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Rev Agric Sci.* 2015;3:1-24. doi: 10.7831/ras.3.1
27. Satbhai SB, Setzer C, Freynschlag F, Slovak R, Kerdaffrec E, Busch W. Natural allelic variation of FRO2 modulates Arabidopsis root growth under iron deficiency. *Nat Commun.* 2017;8:15603. doi: 10.1038/ncomms15603
28. Shahzad Z, Amtmann A. Food for thought: how nutrients regulate root system architecture. *Curr Opin Plant Biol.* 2017;39:80-87. doi: 10.1016/j.pbi.2017.06.008
29. Shi R, Zhang Y, Chen X, Sun Q, Zhang F, Römheld V, Zou C. Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Cereal Sci.* 2010;51(1):165-170. doi: 10.1016/j.jcs.2009.11.008
30. Shingles R, Wimmers LE, McCarty RE. Copper transport across pea thylakoid membranes. *Plant Physiol.* 2004;135(1):145-151. doi: 10.1104/pp.103.037895
31. Smiri M., Missaoui T. The role of ferredoxin: thioredoxin reductase / thioredoxin m in seed germination and the connection between this system and copper ion toxicity. *Journal of Plant Physiology.* 2014;171(17):1664-1670. doi: 10.1016/j.jplph.2014.06.019
32. Zhang B, Cakmak I, Feng J, et al. Magnesium deficiency reduced the yield and seed germination in wax gourd by affecting the carbohydrate translocation. *Front Plant Sci.* 2020;11:797. doi: 10.3389/fpls.2020.00797
33. Zheng L, Huang F, Narsai R, Wu J, Giraud E, He F, et al. Physiological and transcriptome analysis of iron and phosphorus interaction in rice seedlings. *Plant Physiol.* 2009;151(1):262-274. doi: 10.1104/pp.109.141051

Информация об авторах:

Неверов Александр Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник отдела технологий зерновых и кормовых культур, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина, 27/1, тел.: 8-919-861-84-18.

Information about the authors:

Alexander A Neverov, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the Department of Technologies of Grain and Fodder Crops, Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 8-919-861-84-18.

Статья поступила в редакцию 11.01.2022; одобрена после рецензирования 07.02.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted 11.01.2022; approved after reviewing 07.02.2022; accepted for publication 21.03.2022.