

Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 4. С. 344-355.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2025. Vol. 108. No. 4. P. 344-355.

Научная статья
УДК 633.16:577.17
doi:10.33284/2658-3135-108-4-344

Влияние хелатов и сульфатов металлов на морфометрические параметры проростков ячменя

Екатерина Юрьевна Подласова¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

¹katerina.pryakhina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2985-198X>

Аннотация. Микроэлементы меди, цинка и марганца играют важную роль в физиологии растений. Их применение в качестве предпосевной обработки семян могут оказывать как стимулирующее, так и токсическое действие в зависимости от химической формы и концентрации. В качестве оперативного и чувствительного метода оценки токсичности использовали изменение интенсивности биолюминесцентного свечения штамма *Escherichia coli* K-12 TG1. В работе изучали влияние хелатных и сульфатных форм Cu, Zn и Mn на подавление бактериальной люминесценции и на морфометрические параметры проростков ярового ячменя. Результаты исследования показали, что хелаты Zn и Mn проявляли относительно низкую токсичность на бактериальной люминесценции до 50 мг/мл, тогда как гибель 50 % бактерий вызывали хелат Cu – 0,781 мг/мл и сульфаты Zn – $1,9 \cdot 10^{-4}$ мг/мл и Cu – 0,024 мг/мл. Предпосевная обработка семян хелатами Cu 0,1 % увеличивала всхожесть на 2,5 % ($P \leq 0,05$), сырую и сухую массу корней – на 127,4 и 156,5 % и проростков – на 94 и 127,9 % относительно контроля. Применение $MnSO_4$ в концентрациях 10^{-5} % и 10^{-6} % повышало всхожесть на 4,5 и 5 % и способствовало увеличению сырой и сухой массы корней на 10,4 и 44,5 % ($P \leq 0,05$), 29,3 и 54,3 % соответственно относительно контроля. Таким образом, выявлена зависимость фитотоксичности от химической формы и концентрации микроэлементов. Сульфатные формы в целом проявили более высокую токсичность по сравнению с хелатными, тогда как низкие концентрации хелатов и $MnSO_4$ оказывали стимулирующее действие на морфометрические показатели ярового ячменя. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации предпосевной обработки семян, рекомендуется подбор химической формы и определенные концентрации микроэлементных препаратов с последующей валидацией в полевых условиях.

Ключевые слова: яровой ячмень, *Hordeum vulgare*, хелаты, сульфаты, биолюминесценция, всхожесть, проростки, цинк, марганец, медь

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2022-0015).

Для цитирования: Подласова Е.Ю. Влияние хелатов и сульфатов металлов на морфометрические параметры проростков ячменя // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 4. С. 344-355. [Podlasova EYu. Effect of metal chelates and sulfates on the morphometric parameters of barley seedlings. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):344-355. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-344>

Original article

Effect of metal chelates and sulfates on the morphometric parameters of barley seedlings

Ekaterina Yu Podlasova¹

¹Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

¹katerina.pryakhina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2985-198X>

Abstract. Such trace elements as copper, zinc and manganese play an important role in plant physiology. Their use as a pre-sowing seed treatment can have both stimulating and toxic effects, depending on the chemical form and concentration. A change in the intensity of the bioluminescence of the *Escherichia coli* K-12 TGI strain was used as an operational and sensitive method for assessing toxicity. The effect of chelated and sulfate forms of Cu, Zn, and Mn on the suppression of bacterial luminescence and on the morphometric parameters of spring barley seedlings was studied. The results of the study showed that Zn and Mn chelates showed relatively low toxicity to bacterial luminescence up to 50 mg/ml, whereas the death of 50% of bacteria was caused by Cu chelate - 0.781 mg/ml and Zn sulfates – $1.9 \cdot 10^{-4}$ mg/ml and Cu – 0.024 mg/ml. Pre-sowing treatment of seeds with 0,1% Cu chelates increased germination by 2.5% ($P \leq 0.05$), the wet and dry weight of roots by 127.4 and 156,5% and seedlings by 94 and 127.9% relative to the control. The use of $MnSO_4$ in concentrations of $10^{-5}\%$ and $10^{-6}\%$ increased germination by 4.5 and 5% and contributed to an increase in the wet and dry weight of roots by 10.4 and 44.5% ($P \leq 0.05$), 29.3 and 54.3%, respectively, relative to the control. Thus, the dependence of phytotoxicity on the chemical form and concentration of trace elements was revealed. Sulfate forms generally showed higher toxicity than chelated forms, while low concentrations of chelates and $MnSO_4$ had a stimulating effect on the morphometric parameters of spring barley. The results obtained are of practical importance for optimizing pre-sowing seed treatment, it is recommended to select the chemical form and certain concentrations of trace element preparations with subsequent validation in the field.

Keywords: spring barley, *Hordeum vulgare*, chelates, sulfates, bioluminescence, germination, seedlings, zinc, manganese, copper

Acknowledgments: the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2022-0015).

For citation: Podlasova EYu. Effect of metal chelates and sulfates on the morphometric parameters of barley seedlings. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):344-355. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-344>

Введение.

Яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – важная сельскохозяйственная культура, играющая значимую роль в обеспечении продовольственной безопасности. Он широко используется в пищевой и хлебопекарной промышленности, производстве круп, пивоварении и кормопроизводстве. Благодаря высокой адаптивности к различным климатическим условиям и типам почв, яровой ячмень успешно культивируется в различных регионах (Мордвинцев М.П. и Солдаткина Е.А., 2020; Новикова А.А. и др., 2022).

Одной из значимых биологических особенностей ярового ячменя является короткий вегетационный период, что определяет специфику потребления и использования минеральных веществ растением в течение онтогенеза (Богданова О.В. и Новикова А.А., 2022). В связи с этим оптимизация минерального питания, в частности, сбалансированное обеспечение микроэлементами, является важным агротехническим приемом для повышения устойчивости растений к биотическим и абиотическим стрессам (Скороходов В.Ю. и др., 2023; Islamgulova RR et al., 2023).

Микроэлементы, такие как медь и цинк, необходимы для нормальной жизнедеятельности растений. Медь участвует в процессах фотосинтеза и дыхания, влияет на синтез и формирование клеточных оболочек, дефицит меди проявляется хлорозом, снижением тургора, замедлением роста и нарушением репродуктивных функций. Цинк регулирует активность ряда ферментов, участвует в синтезе белков и гормонов роста, влияет на деление клеток и обмен углеводов, его недостаток приводит к снижению роста побегов и нарушению метаболизма (Газизов Н.Р., 2025). Марганец необходим для работы фотосистемы II и ферментов азотного и фосфорного обменов (Alejandro S et al., 2020).

Предпосевная обработка семян микроудобрениями представляет собой целенаправленное нанесение на поверхность семени растворимых форм микроэлементов с целью обеспечения зародыша и проростка доступными ионами, необходимыми для активации метаболических процессов в период прорастания и начального роста (Неверов А.А., 2022).

Эффективность предпосевной обработки во многом определяется химической формой микроэлемента. Хелатные формы характеризуются высокой растворимостью и стабильностью комплексов, что снижает концентрацию свободных катионов и уменьшает риск фитотоксичности (Степаченко Д.А. и др., 2021). В отличие от хелатов сульфатные соли быстро диссоциируют, создавая высокий уровень свободных ионов металлов, что обеспечивает быстрый импульс доступного микроэлемента, но одновременно увеличивает риск локальной фитотоксичности и последующей потери доступности микроэлемента для растения (Escher BI et al., 2020).

Цель исследования.

Установить оптимальные формы и концентрации Cu, Zn и Mn в предпосевной обработке семян для увеличения всхожести и ростовых параметров проростков ячменя в ювенильный период развития.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Растения *Hordeum vulgare* L. сорта Лекарь 2, оригинатор – ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (г. Оренбург).

Схема эксперимента. Исследование включало два этапа: на первом этапе определяли токсичность хелатных и сульфатных форм Cu, Zn и Mn, которую оценивали с помощью бактериально-люминесцирующего штамма *Escherichia coli* K12 TG1, несущего гибридную плазмиду с генами биолуминесценции *Photobacterium leognathi* в соответствии с рекомендациями производителя (“Эколюм”, НВО “Иммунотех”, Россия). Ингибирование люминесценции бактерий измеряли в течение 3 часов. Исследуемые образцы – хелаты и сульфаты Cu, Zn и Mn разной концентрации вносили в лунки с бактериальной суспензией в соотношении 1:1. Контроль представлял среду без добавления микроэлементов. В качестве интегральных показателей токсичности рассчитывали эффективные концентрации, вызывающие снижение люминесценции на 20 % (EC_{20}), а также полумаксимальную эффективную концентрацию (EC_{50}) для времени контакта 60, 120 и 180 минут.

На втором этапе определяли влияние исследуемых форм микроэлементов на энергию прорастания, всхожесть и морфометрические параметры ярового ячменя. Опыт однофакторный. Объем выборки – 100 семян в трехкратной повторности для каждого варианта. Изучали влияние различных форм и концентраций микроэлементов на энергию прорастания, лабораторную всхожесть, длину и массу 7-дневных проростков. Контрольные семена обрабатывали дистиллированной водой. Опытные семена обрабатывали растворами хелатных и сульфатных форм Cu, Zn и Mn в следующих концентрациях: хелаты – 0,5 %, 1 % и 5 %, сульфаты – 10^{-4} , 10^{-5} и 10^{-6} %.

Семена проращивали в термостате при температуре +20 °C. Энергию прорастания и лабораторную всхожесть определяли на 3 и 7 сутки в соответствии с ГОСТ 12038-84. На 7 сутки определяли длину ростков и корней с помощью линейки, сырую и сухую массу проростков и корней. Сушку проводили в сушильном шкафу при температуре +60 °C до постоянной массы.

Оборудование и технические средства. Исследования проводили в лаборатории селекционно-генетических исследований в растениеводстве Центра коллективного пользования ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>) с применением следующего оборудования: термостат ТСО-200 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия), шкаф сушильный (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия).

Статистическая обработка. Статистический анализ проводили с помощью 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 $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$.

Результаты исследований.

Исследование токсичности хелатных комплексов и сульфатов Zn, Cu и Mn выявило существенные различия в их воздействии на бактериальную люминесценцию (табл. 1). Хелаты Zn и Mn обладали низкой токсичностью, не вызывая гибель клеток при концентрации до 50 мг/мл. Хелат Cu оказался более токсичным, имея пороговое значение EC_{50} , равное 0,781 мг/мл.

Таблица 1. Пороговые значения биотоксичности различных форм металлов в тесте ингибирования бактериальной люминесценции, мг/мл
 Table 1. Threshold values of biotoxicity of various forms of metals in the bacterial luminescence inhibition test, mg/ml

Варианты опыта / <i>Experimental option</i>	Летальные концентрации (Tox) / <i>Lethal Concentrations (Tox)</i>	Полулетальная концентрация (EC_{50}) / <i>Half-lethal concentration (EC_{50})</i>	Субингибиторная концентрация (EC_{20}) / <i>Sub-inhibitory concentration (EC_{20})</i>	Нетоксичные концентрации (NTOX) / <i>Non-toxic concentrations (NTOX)</i>	Стимулирующие концентрации / <i>Stimulating concentrations</i>
Хелат Zn / <i>Chelate Zn</i>	Не выявлено до 50 мг/мл / <i>Not detected up to 50 mg/ml</i>				
Хелат Cu / <i>Chelate Cu</i>	3,125	0,781	-	0,391	6,1*10 ⁻³ -0,391
Хелат Mn / <i>Chelate Mn</i>	Не выявлено до 50 мг/мл / <i>Not detected up to 50 mg/ml</i>				
ZnSO ₄	0,0031	1,9*10 ⁻⁴	4,8*10 ⁻⁵	2,4*10 ⁻⁵	-
CuSO ₄	0,098	0,024	2,38*10 ⁻⁵	1,19*10 ⁻⁵	-
MnSO ₄	> 1,9*10 ⁻⁴ (временное подавление) / <i>(temporal suppression)</i>				
	(токсичен при длительной экспозиции во всех дозах) / <i>(toxic at prolonged exposure in all doses)</i>				

Сульфаты металлов проявляли значительно более высокую токсичность по сравнению с хелатами. EC_{50} для ZnSO₄ составила 1,9*10⁻⁴ мг/мл, а для CuSO₄ – 0,024 мг/мл. Сульфат MnSO₄ оказывал временное подавляющее действие на люминесценцию в концентрациях от 1,9*10⁻⁴

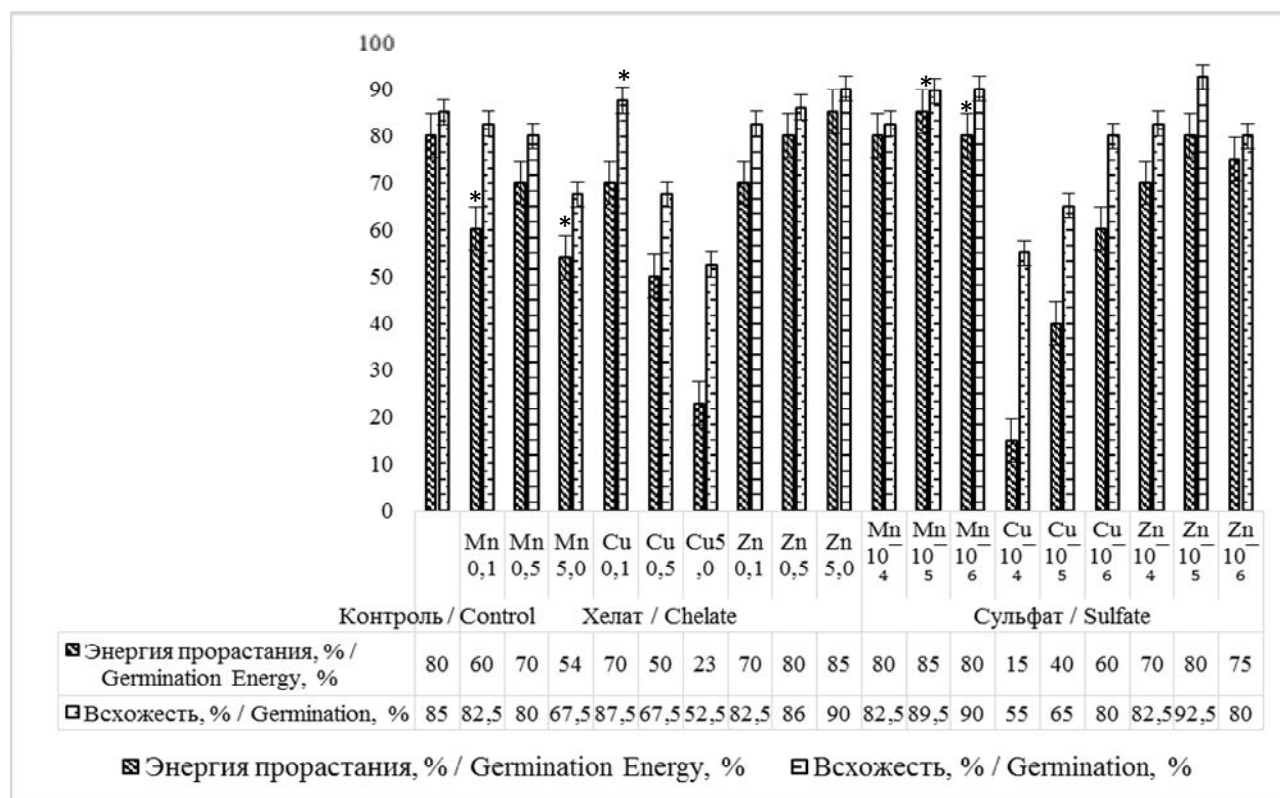
до 50 мг/мл в течение первых 30 минут, однако при длительной экспозиции проявлял токсичность во всех исследованных концентрациях.

Субингибирующие концентрации были равны для хелата Cu 0,781 мг/мл, сульфатов ZnSO₄ и CuSO₄ – $4,8 \cdot 10^{-5}$ и $2,38 \cdot 10^{-5}$ мг/мл соответственно. Нетоксичные концентрации были отмечены только для ZnSO₄ – $2,4 \cdot 10^{-5}$ мг/мл и CuSO₄ – $1,19 \cdot 10^{-5}$ мг/мл.

Стимулирующий эффект наблюдался у хелатов Cu в концентрации $6,1 \cdot 10^{-3}$ –0,391 мг/мл, Zn – 0,391–50 мг/мл и Mn – 1,563–50 мг/мл.

В контрольном варианте энергия прорастания и всхожесть семян составляла 80 и 85 % (рис. 1). Предпосевная обработка семян хелатными формами Mn в диапазоне концентраций 0,1 и 5 % приводила к снижению энергии прорастания и всхожести с минимальными значениями 60 и 54 % соответственно. Снижение энергии прорастания и всхожести относительно контроля достигало 26 и 17,5 % ($P \leq 0,05$) соответственно.

Оценка влияния соединений меди на посевные качества ярового ячменя показала, что обработка семян хелатом Cu в концентрации 0,1 % незначительно увеличивала всхожесть на 2,5 % ($P \leq 0,05$), дальнейшее увеличение концентрации оказывало ингибирующее воздействие.



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении с контрольной группой

Note: * – $P \leq 0.05$ compared with the control group

Рисунок 1. Параметры прорастания ярового ячменя при воздействии хелатов и сульфатов металлов различных концентраций
Figure 1. Germination parameters of spring barley under the influence of chelates and metal sulfates of various concentrations

Использование хелата Zn для обработки семян ярового ячменя показало, что концентрация в 5 % наиболее эффективна и обеспечивала максимальные значения энергии прорастания и всхожести, превышающие контрольные значения на 5 %. Обработка семян $ZnSO_4$ в концентрации 10^{-5} % не повлияла на энергию прорастания и составила 80 %, как и в контрольном варианте, но увеличивала всхожесть на 7,5 %.

Исследования показали, что $MnSO_4$ наиболее эффективно стимулировал прорастание ярового ячменя в концентрациях до 10^{-5} %. При этом концентрация 10^{-5} % обеспечила максимальную энергию прорастания, а концентрация 10^{-4} % – максимальную всхожесть, достоверно превышающие контрольные значения на 4,5 и 10 % ($P \leq 0,05$) соответственно.

Обработка $CuSO_4$ в концентрациях 10^{-6} и 10^{-4} % приводила к снижению относительно контроля энергии прорастания на 20 и 65 %, всхожести – на 5 и 30 % соответственно.

Анализ морфометрических показателей проростков ярового ячменя после предпосевной обработки показал, что соли металлов оказывали различное влияние на их развитие (табл. 2).

Таблица 2. Морфометрические показатели проростков ярового ячменя, выращенных при различных концентрациях сульфатов и хелатов металлов
 Table 2. Morphometric parameters of spring barley seedlings grown at various concentrations of metal sulfates and chelates

Варианты опыта / Experimental option	Длина проростка / Seedling length		Длина корня / Root length		Количество корешков / Number of roots	
	см / cm	опыт/конт., % / experiment / control, %	см / cm	опыт/конт., % / experiment / control, %	см / cm	опыт/конт., % / experiment / control, %
Хелат / Chelate						
Mn 0,1	13,76±2,78	95,1	10,25±3,82*	110,0	4,31±0,81	90,6
Mn 0,5	14,44±4,41	99,8	9,32±3,30	100,1	5,03±1,15*	105,8
Mn 5,0	12,54±4,24	86,7	8,84±4,30	94,9	4,33±0,48	91,0
Cu 0,1	17,08±6,89*	118,1	9,00±4,99	96,6	4,73±1,19	99,3
Cu 0,5	14,13±3,72	97,7	8,54±3,90	91,8	4,05±0,80	85,0
Cu 5,0	16,05±3,10*	111,0	8,39±3,84	90,1	4,65±1,22	97,6
Zn 0,1	14,05±4,08	97,1	12,84±5,01*	130,9	5,58±1,60*	117,2
Zn 0,5	16,41±2,91	113,5	8,84±4,03	95,0	5,31±1,01	111,6
Zn 5,0	14,19±5,21	98,2	5,74±1,71	61,7	4,36±0,93	91,5
Сульфат / Sulfate						
Mn 10^{-4}	10,10±3,38	69,8	6,39±1,56	68,7	4,71±1,00	99,0
Mn 10^{-5}	9,49±2,94	65,6	7,14±1,34	76,7	4,42±0,95	92,9
Mn 10^{-6}	13,20±2,04	91,3	11,77±1,59*	126,5	4,54±0,46	95,3
Cu 10^{-4}	12,26±1,79	98,2	9,64±3,23*	111,7	4,72±0,75*	107,5
Cu 10^{-5}	11,82±2,45	84,8	9,06±3,79	103,5	4,85±0,75	99,2
Cu 10^{-6}	10,62±3,50	81,7	9,01±3,57	97,3	5,36±1,25	101,9
Zn 10^{-4}	11,10±3,38	73,5	7,74±1,46	96,8	5,29±0,81*	112,5
Zn 10^{-5}	10,49±3,94	76,8	8,12±3,93	83,2	5,24±1,00*	111,0
Zn 10^{-6}	14,20±4,04	72,6	10,40±4,44	87,2	5,12±0,65*	110,1

Примечание: данные в таблице представлены в виде среднего и стандартной ошибки средней ($\bar{x} \pm S$). * – $P \geq 0,05$

Note: the data in the table is presented as the mean and the standard error of the mean ($\bar{x} \pm S$). * – $P \geq 0.05$

Варианты с хелатными соединениями Cu 0.1 и 5 % продемонстрировали статистически значимое увеличение средней длины проростка, разница относительно контроля составила 118.1 и 111 % ($P < 0.05$) соответственно. Остальные варианты с хелатами в целом существенно не отличались от контрольного варианта по длине проростка. Минимальное значение длины проростка отмечено в варианте Mn 5 %.

Среди сульфатных форм существенное снижение длины проростка отмечено для Mn 10^{-5} и Mn 10^{-4} % на 65.6 и 69.8 % от контроля, тогда как варианты с Cu и Zn 10^{-6} продемонстрировали значения, приближенные к контролю.

Наиболее выраженное положительное влияние на длину корня дали некоторые хелатные и сульфатные обработки. Так, в вариантах с хелатом Mn и Zn в концентрации 0.1 % длина корня составила 10.25 и 12.84 см, увеличение относительно контроля – 110 и 130.9 % ($P < 0.05$) соответственно.

Среди обработок сульфатными формами статистически значимое увеличение длины корня по сравнению с контролем зарегистрировано при использовании Mn 10^{-6} на 126.5 % ($P < 0.05$) и Cu 10^{-4} на 111.7 % ($P < 0.05$). Хелат Zn 5 % приводил к заметному сокращению длины корня на 61,7 % относительно контроля.

На количество корешков достоверное влияние оказывал цинк. Хелат Zn в концентрации 0.1 % увеличивал этот показатель на 117,2 % от контроля ($P < 0.05$). Сульфатные формы Zn в концентрациях 10^{-4} , 10^{-5} и 10^{-6} % повышали количество корешков на 112,5 %, 111,0 % и 110,1 % соответственно по сравнению с контролем. Также статистически значимое увеличение числа корней относительно контроля наблюдалось при использовании сульфата Cu 10^{-4} на 107,5 % ($P < 0.05$).

Аналогичная картина наблюдается при анализе динамики прироста зеленой и сухой биомассы проростков ярового ячменя (табл. 3).

Таблица 3. Сырая и сухая масса проростков и корней ярового ячменя, выращенных при различных концентрациях сульфатов и хелатов металлов
Table 3. The raw and dry mass of spring barley seedlings and roots grown at various concentrations of metal sulfates and chelates

Варианты опыта / Experimental option	Масса ростка, мг / Mass of seedling, mg		Масса корня, мг / Root mass, mg	
	сырая / fresh	сухая / dry weight	сырая / fresh	сухая / dry weight
Контроль / Control	283,39±5,1	194,85±1,3	282,67±1,8	198,89±0,4
Хелат/ Chelate				
Mn 0,1	284,74±1,7	208,51±0,8	373,80±1,6	234,58±0,6
Mn 0,5	297,43±5,6	210,30±1,7	260,82±0,7	188,95±0,7
Mn 5,0	339,53±0,3*	250,36±0,6	256,59±1,4*	252,20±0,2
Cu 0,1	550,14±0,4*	444,05±0,4	642,70±5,3*	510,12±1,4*
Cu 0,5	350,30±2,5	265,09±0,2	371,19±3,8	263,09±0,3
Cu 5,0	378,06±1,5	289,28±1,9	447,45±3,3	323,08±1,2
Zn 0,1	317,18±1,6	234,29±0,4	297,34±1,5	208,90±1,4
Zn 0,5	433,38±0,7	335,89±1,7	435,63±1,4*	336,17±1,6*
Zn 5,0	488,96±0,1	386,54±1,1	601,18±1,3*	454,69±0,5*
Сульфат/ Sulfate				
Mn 10^{-4}	281,48±0,6	178,24±3,1	221,45±0,4	198,83±1,3
Mn 10^{-5}	288,78±0,3	209,91±0,6	312,12±0,6*	257,18±1,1*
Mn 10^{-6}	326,86±0,1	246,87±0,7	408,32±1,2*	306,86±1,4*
Cu 10^{-4}	231,11±0,8*	163,33±0,2	154,60±1,4*	119,73±1,6
Cu 10^{-5}	172,44±1,6	108,00±1,1	405,57±2,6*	206,75±0,7
Cu 10^{-6}	220,76±1,9*	141,66±1,4	296,65±2,1	136,99±1,6
Zn 10^{-4}	290,24±0,9	234,80±1,2	258,43±1,9	223,93±0,9
Zn 10^{-5}	297,80±1,5	178,99±0,6	421,92±0,4*	408,82±1,9*
Zn 10^{-6}	287,07±5,4	216,07±0,4	301,83±0,9	217,49±1,3

Примечание: данные в таблице представлены в виде среднего и стандартной ошибки средней ($\bar{x} \pm S$). * – $P \geq 0,05$

Note: the data in the table is presented as the mean and the standard error of the mean ($\bar{x} \pm S$). * – $P \geq 0.05$

Наибольшее увеличение сырой массы проростков было зарегистрировано при предпосевной обработке семян хелатами Cu в концентрации 0,1 %, прибавка относительно контроля составила 94,1 % ($P \leq 0,05$). Достоверное повышение массы проростков наблюдалось при использовании хелатных форм Zn в концентрации 5 и 0,5 %, превышение относительно контроля составило 72,5 и 53 %.

Предпосевная обработка семян сульфатами Cu в концентрации 10^{-4} и 10^{-6} продемонстрировала значимое уменьшение сырой массы проростка по сравнению с контролем на 52,3 и 62,6 мг соответственно ($P \leq 0,05$). По сухой массе проростков наибольшие значения отмечены у хелатной формы Cu 0,1 %, 444,05 мг и в вариантах Zn – 0,5 и 5 %, 335,89 и 386,54 мг соответственно.

Использование хелата Cu концентрацией 0,1 % при обработке семян вызвало увеличение сырой массы корней на 127,4 % относительно контроля, ($P \leq 0,05$). Существенное ($P \leq 0,05$) повышение массы корней также отмечено при предпосевной обработке хелатными формами Zn концентрацией 0,5 и 5 % (112,6 и 54,1 % соответственно).

MnSO₄ в концентрации 10^{-6} стимулировал прирост сырой массы корней на 44,5 % по сравнению с контрольной группой ($P \leq 0,05$). Статистически значимое увеличение сырой массы корней отмечалось при использовании CuSO₄ и ZnSO₄ в концентрации 10^{-5} %. Прибавка относительно контроля составляла 43,5 и 49,3 % соответственно ($P \leq 0,05$).

Сухая масса корней, как правило, увеличивалась в тех вариантах, где наблюдался прирост сырой массы, а также при использовании хелатных комплексов. Хелат Cu 0,1 % способствовал увеличению сухой массы корней на 156,5 % по сравнению с контролем ($P \leq 0,05$). Хелат цинка в концентрациях 0,5 % и 5 % повышал сухую массу корней на 69 % и 128,6 % соответственно ($P \leq 0,05$). MnSO₄ в концентрации 10^{-5} и 10^{-6} % вызывал увеличение сухой массы корней на 29,3 % и 54,3 % соответственно ($P \leq 0,05$), а ZnSO₄ – на 105,6 % ($P \leq 0,05$) в сравнении с контрольными образцами.

Обсуждение полученных результатов.

Полученные данные демонстрируют существенные различия в токсичности и биологическом действии хелатных и сульфатных форм Zn, Mn и Cu как в тесте бактериальной люминесценции, так и при предпосевной обработке семян ярового ячменя. В целом хелатирование сопровождается уменьшением активности свободных ионов металлов в водной среде, что снижает острую токсичность для быстро реагирующих люминесцентных бактерий. Это согласуется с представлением о том, что биологически наиболее активной и часто наименее безопасной является именно ионизованная форма металла, концентрация которой уменьшается в присутствии хелатирующих агентов (Новикова А.А. и др., 2024). Наблюдаемые низкая токсичность хелатов Zn и Mn (до 50 мг/мл) и высокая токсичность хелата Cu логично вписываются в эту схему и отражают различия в стабильности комплексов и биологическом эффекте отдельных металлов.

Высокая токсичность сульфатов в бактериальном тесте объясняется их быстрой диссоциацией в водной фазе и образованием высокой доли свободных ионов металлов, что приводит к быстрому ингибированию люминесценции. Особенно выражен токсический эффект CuSO₄ и ZnSO₄, что соответствует литературным данным о сильной антимикробной активности медных и цинковых ионов (Кадомцева А.В. и др., 2023; Товстик Е.В. и др., 2025).

Различия между ответами растений и микроорганизмов подчеркивают специфичность систем. Растения обладают широким набором механизмов регуляции поглощения и детоксикации металлов, поэтому в низких концентрациях сульфатов возможно стимулирующее действие, тогда как в бактериальной системе те же концентрации проявляют токсичность (Колупаев Ю.Е. и др., 2019; Минченко Ж.Н. и Лазарев В.И., 2023). Это хорошо видно на примере ZnSO₄: при чрезвычайно низкой концентрации 10^{-5} % отмечено улучшение прорастания семян, несмотря на высокую токсичность этой соли в бактериальном тесте.

Хелат Mn при низких концентрациях 0,1 и 0,5 % оказывал положительное действие на корневую систему, увеличивая максимальную длину корня и на 110 и 100,1 % относительно контроля. Однако при высоких концентрациях Mn 5 % отмечено выраженное снижение энергии прорастания и всхожести 26 и 17,5 % соответственно относительно контроля.

Сульфат Mn стимулировал прорастание и увеличение биомассы проростков в диапазоне концентраций от 10^{-5} до 10^{-6} %, что показывает его потенциал при низких концентрациях.

Хелат Cu продемонстрировал положительный эффект при 0,1 %: небольшое увеличение всхожести – на 2,5 % и значительный прирост сырой и сухой массы корней – на 127,4 и 156,5 %, проростков – на 94 и 127,9 % относительно контроля. При более высоких концентрациях он проявлял ингибирующее действие.

Напротив, CuSO_4 снизил энергию прорастания и всхожести на 20 и 5 %, 65 и 30 % в концентрациях 10^{-6} и 10^{-4} % соответственно относительно контроля. Это свидетельствует о высокой фитотоксичности и повышенной чувствительности семян ярового ячменя к свободным ионам меди и делает сульфатную форму нежелательной для предпосевной обработки семян без экстремально низкого разведения (Колесова Т.К. и др., 2020).

Хелат Zn 0,1 % показал наиболее выраженный положительный эффект на длину корня и количество корешков, разница относительно контроля составила 130,9 и 117,2 % соответственно. Сульфат Zn 10^{-5} % способствовал увеличению всхожести семян на 7,5 % относительно контроля, тогда как в бактериальном тесте ZnSO_4 оставался токсичен.

Заключение.

Полученные данные подтверждают, что химическая форма микроэлемента и его концентрация критически определяют соотношение стимулирующего и токсичного эффектов. Хелат Cu в концентрации 0,1 % способствовал увеличению сырой массы проростков на 94,1 %, хелат Zn 5 % концентрации повышал энергию прорастания и всхожесть на 5 %. Сульфат Zn 10^{-5} увеличивал всхожесть семян на 7,5 %, число корешков – на 111 %, а сырая и сухая масса проростков возрастала на 49,3 и 105,6 % соответственно относительно контроля.

Список источников

1. Адаптивный потенциал ячменя при токсичном воздействии кадмия в различных условиях оценки / Е.В. Товстик, О.Н. Шуплецова, Л.В. Панихина, Ю.А. Злобина // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2025;186(2):128-137. [Tovstik EV, Shupletsova ON, Panikhina LV, Zlobina YuA. Adaptive potential of barley under toxic impact of cadmium in various conditions of assessment. Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2025;186(2):128-137. (*In Russ.*)] doi: 10.30901/2227-8834-2025-2-128-137
2. Богданова О.В., Новикова А.А. Обзор эмпирических и современных методов селекции для улучшения ячменя (*Hordeum vulgare*) (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 1. С. 139-158. [Bogdanova OV, Novikova AA. Review of empirical and current breeding techniques to improve barley (*hordeum vulgare*) (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):139-158. (*In Russ.*)] doi:10.33284/2658-3135-105-1-139
3. Влияние хелатных микроудобрений на посевные качества семян сортов зернового сорго / Д.А. Степанченко, С.С. Куколева, В.И. Старчак, О.П. Кибальник, И.Г. Ефремова // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 12 (114). С. 168-173. [Stepanchenko DA, Kukoleva SS, Starchak VI, Kibalnik OP, Efremova IG. The effect of chelated micronutrients on the sowing qualities of seeds of grain sorghum varieties. International Research Journal. 2021;12(114):168-173. (*In Russ.*)] doi: 10.23670/IRJ.2021.114.12.028

4. Газизов Н.Р. Влияние тяжелых металлов на рост и развитие растений // Современные научные исследования и инновации. 2025. № 8. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2025/08/103604> (дата обращения: 11.10.2025). [Gazizov NR. Vlijanie tjazhelyh metallov na rost i razvitie rastenij. Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. 2025;8. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2025/08/103604> (data obrashhenija:11.10.2025). (In Russ)].
5. ГОСТ 12038-84. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Введ. 19.12.84. М.: Стандартинформ, 2011. 31 с. [GOST 12038-84. The interstate standard. Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination. Introduction. 12/19/84. Moscow: Standartinform; 2011:31 p. (In Russ)].
6. Качество зерна яровой мягкой и твёрдой пшеницы в севооборотах Оренбургского Предуралья / В.Ю. Скороходов, Ю.В. Кафтан, А.А. Зоров, Е.Н. Скороходова, Н.А. Зенкова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 260-272. [Skorokhodov VYu, Kaftan YuV, Zorov AA, Skorokhodova EN, Zenkova NA. Quality of spring soft and durum wheat grain in crop rotations of the Orenburg Cis-Urals. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(4):260-272. (In Russ.)]. doi:10.33284/2658-3135-106-4-260
7. Колесова Т.К., Коркин Е.В., Федорова С.А. Влияние БАВ и низкомолекулярных антиоксидантов на прорастание и всхожесть семян пшеницы // Символ науки: международный научный журнал. 2020. № 5. С. 77-81. [Kolesova TK, Korkin EV, Fedorova SA. Vlijanie BAV i nizkomolekuljarnyh antioksidantov na prorastanie i vshozhest' semjan pshenicy. Symbol of Science: international scientific journal. 2020;5:77-81. (In Russ.)].
8. Колупаев Ю.Е., Карцеп Ю.В., Кабашникова Л.Ф. Антиоксидантная система растений: клеточная компартментация, защитные и сигнальные функции, механизмы регуляции (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. Т. 55. № 5. С. 419-440. [Kolupaev YE, Karpets YV, Kabashnikova LF. Antioxidative system of plants: cellular compartmentalization, protective and signaling functions, mechanisms of regulation (review). Applied Biochemistry and Microbiology. 2019;55(5):419-440. (In Russ.)]. doi: 10.1134/S0555109919050088
9. Минченко Ж. Н., Лазарев В. И. Эффективность применения удобрений с микроэлементами в посевах ярового ячменя в условиях Курской области // Агрохимия. 2023. № 8. С. 29-37. [Minchenko ZhN, Lazarev VI. Effectiveness of the use of fertilizers with trace elements on spring barley crops in the conditions of the Kursk region. Agrohimia. 2023;8:29-37. (In Russ.)]. doi: 10.31857/s0002188123080082
10. Мордвинцев М.П., Солдаткина Е.А. Сорты ярового ячменя селекции Оренбургского государственного аграрного университета и их характеристика // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. №. 4. С. 230-242. [Mordvintsev MP, Soldatkina EA. Varieties of spring barley selected by Orenburg State Agrarian University and their characteristics. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(4):230-242. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-230
11. Неверов А.А. Стимулирующая роль микроэлементов на стадии прорастания семян ячменя // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. №. 1. С. 159-170. [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.)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-159
12. Новикова А.А., Подласова Е.Ю., Глущенко Н.Н. Особенность действия наночастиц кобальта и бора на бактериальную люминесценцию и морфометрические показатели проростки яровых зерновых культур и проса // Российские нанотехнологии. 2024. Т. 19. № 6. С. 826-834. [Novikova AA, Podlasova EYu, Glushchenko NN. Special action of cobalt and boron nanoparticles on bacterial luminescence and morphometric indicators of spring sown cereal and millet sprouts. Nanobiotechnology Reports. 2024;19(6):769-777. (In Russ.)]. doi: 10.56304/S1992722324601642 doi: 10.1134/S263516762460189X

13. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов ярового ячменя по урожайности в условиях Оренбургского региона / А.А. Новикова, А.А. Емельянова, А.А. Пустовалова, О.С. Гречишкина, Т.А. Мишенина, М.В. Замерзляк // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 4. С. 220-231. [Novikova AA, Emelyanova AA, Pustovalova AA, Grechishkina OS, Mishenina TA, Zamerzlyak MV. Assessment of ecological plasticity and stability of spring barley varieties by yield in the conditions of Orenburg region. Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(4):220-231. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-105-4-220
14. Перспективы использования катионов металлов для разработки противомикробных комплексов / А.В. Кадомцева, Г.М. Мочалов, И.В. Жданович, М.С. Пискунова // Биоорганическая химия. 2023. Т. 49. № 1. С. 32-40. [Kadomtseva AV, Mochalov GM, Zhdanovich IV, Piskunova MS. Prospects for the use of metal cations for the development of antimicrobial complexes. Bioorganicheskaya Khimiya. 2023;49(1):32-40. (In Russ.)]. doi: 10.31857/S0132342323010128
15. Alejandro S, Höller S, Meier B, Peiter E. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. Frontiers in Plant Science. 2020;11:300. doi: 10.3389/fpls.2020.00300
16. Escher BI, Stapleton HM, Schymanski EL. Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment. Science. 2020;367(6476):388-392. doi: 10.1126/science.aay6636
17. Islamgulova RR, Seregina II, Novikov N, Trukhachev V, et al. Peroxidase activity in germinating barley grains depending on grain treatment with phyto regulators. E3S Web of Conferences. 2023;390:04029. doi: 10.1051/e3sconf/202339004029

References

1. Tovstik EV, Shupletsova ON, Panikhina LV, Zlobina YuA. Adaptive potential of barley under toxic impact of cadmium in various conditions of assessment. Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2025;186(2):128-137. doi:10.30901/2227-8834-2025-2-128-137
2. Bogdanova OV, Novikova AA. Review of empirical and current breeding techniques to improve barley (*hordeum vulgare*) (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(1):139-158. doi:10.33284/2658-3135-105-1-139
3. Stepanchenko DA, Kukoleva SS, Starchak VI, Kibalnik OP, Efremova IG. The effect of chelated micronutrients on the sowing qualities of seeds of grain sorghum varieties. International Research Journal. 2021;12(114):168-173. doi: 10.23670/IRJ.2021.114.12.028
4. Gazizov NR. The influence of heavy metals on plant growth and development. Modern Scientific Researches and Innovations. 2025;8. [Internet]. Available from: URL: <https://web.snauka.ru/issues/2025/08/103604> (cited 11.10.2025).
5. GOST 12038-84. The interstate standard. Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination. Implementation date 12/19/84. Moscow: Standartinform; 2011:31 p.
6. Skorokhodov VYu, Kaftan YuV, Zorov AA, Skorokhodova EN, Zenkova NA. Quality of spring soft and durum wheat grain in crop rotations of the Orenburg Cis-Urals. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(4):260-272. doi:10.33284/2658-3135-106-4-260
7. Kolesova TK, Korkin EV, Fedorova SA. Effect of BAS and low molecular weight antioxidants on growth and germination of wheat seeds. Symbol of Science: international scientific journal. 2020;5:77-81.
8. Kolupaev YE, Karpets YV, Kabashnikova LF. Antioxidative system of plants: cellular compartmentalization, protective and signaling functions, mechanisms of regulation (review). Applied Biochemistry and Microbiology. 2019;55(5):419-440. doi: 10.1134/S0555109919050088
9. Minchenko ZhN, Lazarev VI. Effectiveness of the use of fertilizers with trace elements on spring barley crops in the conditions of the Kursk region. Agrohimia. 2023;8:29-37. doi: 10.31857/s0002188123080082

10. Mordvintsev MP, Soldatkina EA. Varieties of spring barley selected by Orenburg State Agrarian University and their characteristics. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(4):230-242. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-230
11. 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. doi: 10.33284/2658-3135-105-1-159
12. Novikova AA, Podlasova EYu, Glushchenko NN. Special action of cobalt and boron nanoparticles on bacterial luminescence and morphometric indicators of spring sown cereal and millet sprouts. *Nanobiotechnology Reports*. 2024;19(6):769-777. doi: 10.56304/S1992722324601642
doi: 10.1134/S263516762460189X
13. Novikova AA, Emelyanova AA, Pustovalova AA, Grechishkina OS, Mishenina TA, Zamerzlyak MV. Assessment of ecological plasticity and stability of spring barley varieties by yield in the conditions of Orenburg region. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(4):220-231. doi: 10.33284/2658-3135-105-4-220
14. Kadomtseva AV, Mochalov GM, Zhdanovich IV, Piskunova MS. Prospects for the use of metal cations for the development of antimicrobial complexes. *Bioorganic Chemistry*. 2023;49(1):32-40. doi: 10.31857/S0132342323010128
15. Alejandro S, Höller S, Meier B, Peiter E. Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:300. doi: 10.3389/fpls.2020.00300
16. Escher BI, Stapleton HM, Schymanski EL. Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment. *Science*. 2020;367(6476):388-392. doi: 10.1126/science.aay6636
17. Islamgulova RR, Seregina II, Novikov N, Trukhachev V, et al. Peroxidase activity in germinating barley grains depending on grain treatment with phyto regulators. *E3S Web of Conferences*. 2023;390:04029. doi: 10.1051/e3sconf/202339004029

Информация об авторах:

Екатерина Юрьевна Подласова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в растениеводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460051, г. Оренбург, пр. Гагарина 27/1, тел.: 89877866593.

Information about the authors:

Ekaterina Yu Podlasova, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher at the Laboratory of Breeding and Genetic Research in Crop Production, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 27/1 Gagarin Ave., Orenburg, 460051, tel.: 89877866593.

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 03.10.2025; approved after reviewing 13.10.2025; accepted for publication 15.12.2025.