

Импульсное магнитное поле как фактор повышения адаптивности пшеницы мягкой к токсическому действию тяжелых металлов

Н. А. Роденко[✉], научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия»

О. В. Бледных, научный сотрудник лаборатории «Биоинженерия»

Ю. В. Дегтева, лаборант лаборатории «Биоинженерия»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

443001, г. Самара, ул. Студенческий переулок, 3А

[✉]t.rodenko@mail.ru

Резюме. Магнитная обработка отвечает современным требованиям к экологичности и эффективности в сельском хозяйстве. Она минимизирует использование пестицидов, снижает экологический след и повышает продуктивность культур. Цель исследования – изучение влияния импульсного магнитного поля (ИМП) на снижение абиотического стресса, индуцированного ионами меди (Cu^{2+}), у мягкой пшеницы с помощью оценки биометрических показателей, содержания пигментов и активности генерации супероксид анион-радикала. Объектом исследования являлась пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), которая проращивалась в условиях действия абиотического стресса на растворах сульфата меди CuSO_4 с концентрациями: 0 мг/л, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 0,50 мг/л. Были сформированы две группы: первая включала проращивание семян пшеницы при действии ионов меди Cu^{2+} в условиях геомагнитного поля Земли (ГМП $\approx 56,51$ мкТл), во второй группе семена проращивались при воздействии ГМП+ИМП при $B=2,21$ Тл, частотой разрядного тока $f = 15,7$ кГц и числом импульсов $n=3$. В результате исследования установлено, что воздействие ИМП с индукцией $B=2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ стимулирует увеличение длины проростков пшеницы на 9,3 % на пятые сутки, выращенные на дистиллированной воде. При действии умеренного стресс-фактора (0,25 мг/л сульфата меди) на семена пшеницы при их предварительной обработке ИМП было зафиксировано увеличение длины проростков на 32,7 % на пятые сутки. Обработка семян ИМП увеличивает количественное содержание суммы пигментов на 27,4 % в проростках пшеницы при проращивании на дистиллированной воде, однако не оказывает значимого защитного действия на фотосинтетический аппарат в условиях повышенной концентрации меди. Наблюдается тенденция к снижению уровня супероксид анион-радикала на 18,2 % в растениях пшеницы мягкой при обработке семян ИМП. Обработка ИМП стимулирует рост стеблей и корней пшеницы мягкой как в нормальных условиях, так и при умеренном стрессе (0,25 мг/л сульфата меди).

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, тяжелые металлы, пшеница мягкая, активные формы кислорода, медь.

Для цитирования: Роденко Н. А., Бледных О. В., Дегтева Ю. В. Импульсное магнитное поле как фактор повышения адаптивности пшеницы мягкой к токсическому действию тяжелых металлов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3 (71). С. 45-51. doi:10.18286/1816-4501-2025-3-45-51

Pulsed magnetic field as a factor in increasing the adaptability of soft wheat to the toxic effect of heavy metals

N. A. Rodenko[✉], O. V. Blednykh, Yu. V. Degtyareva

Federal State Budgetary Institution of Science "Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences"

443001, Samara, Studenchesky st., 3A

[✉]t.rodenko@mail.ru

Abstract. Magnetic treatment meets modern requirements for environmental friendliness and efficiency in agriculture. It minimizes the use of pesticides, reduces the ecological footprint and increases crop productivity. The purpose of the study is to study the effect of a pulsed magnetic field (PMF) on reducing abiotic stress induced by copper ions (Cu^{2+}) in soft wheat by assessing biometric parameters, pigment content and superoxide anion radical generation activity. The object of the study was common wheat (*Triticum aestivum* L.), which was germinated under conditions of abiotic stress in copper sulfate CuSO_4 solutions with concentrations of 0 mg/l, 0.125 mg/l, 0.25 mg/l, 0.50 mg/l. Two groups were formed: the first included germination of wheat seeds under the action of copper ions Cu^{2+} under the conditions of the Earth's geomagnetic field (GMF ≈ 56.51 μT), in the second group, the seeds were germinated under the action of GMF + IMF at $B = 2.21$ T, discharge current frequency $f = 15.7$ kHz and the number of pulses $n = 3$. The study found that the effect of IMF with induction $B = 2.21$ T and the number of pulses $n = 3$ stimulates an increase in the length of wheat

seedlings by 9.3% on the fifth day, cultivated in distilled water. An increase in the length of seedlings by 32.7% was recorded on the fifth day under the influence of a moderate stress factor (0.25 mg/l of copper sulfate) on wheat seeds with their preliminary treatment with IMF. Treatment of seeds with IMF increases the quantitative content of the sum of pigments by 27.4% in wheat seedlings when germinated in distilled water, but does not have a significant protective effect on the photosynthetic apparatus under the conditions of increased copper concentration. A decrease tendency in the level of superoxide anion radical by 18.2% in soft wheat plants is observed when seeds are treated with IMF. Thus, IMF treatment stimulates the growth of stems and roots of soft wheat both under normal conditions and under moderate stress (0.25 mg/l of copper sulfate).

Keywords: pulsed magnetic field, heavy metals, soft wheat, active oxygen species, copper.

For citation: Rodenko N. A., Blednykh O. V., Degtyareva Yu. V. Pulsed magnetic field as a factor in increasing the adaptability of soft wheat to the toxic effect of heavy metals // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025.3 (71): 45-51 doi:10.18286/1816-4501-2025-3-45-51

Введение

Тяжелые металлы (Cu, Cd, Pb и др.) входят в составы почв и участвуют в метаболизме растений [1]. Однако из-за влияния природных и антропогенных факторов в настоящее время наблюдается превышение нормального уровня концентрации данных элементов в экосистемах, что угнетает рост и замедляет развитие живых организмов [2].

Возникновение окислительного стресса вследствие избыточного образования активных форм кислорода (АФК) является одним из механизмов токсического действия тяжелых металлов на растения [3].

В работе [4] обработка проростков риса *Oryza sativa* (L.) 0,05 мг л⁻¹ кадмием способствовала снижению массы и длины корней в растениях с увеличением продукции супероксидного радикала и малонового диальдегида, являющихся маркерами окислительного стресса. При обработке проростков пшеницы *Triticum aestivum* (L.) раствором хлорида кадмия CdCl₂ отмечается снижение длины побегов до 16,57 см и количества хлорофилла *a* до 0,08 мг/м² относительно контрольных значений при высоких концентрациях соли (200 и 400 мкМ) [5]. При внесении CuO в почву в дозах 2000...10000 мг/кг установлено снижение длины корня ячменя *Hordeum vulgare* (L.) на 21-49%, длины стебля – на 17...38 %, массы зерна – на 19...74 %, по сравнению с контрольными значениями. Накопление меди в растениях привело к снижению урожайности до 75 % от контрольных показателей [6].

Импульсные магнитные поля с частотой от 1 до 100 Гц и длительностью воздействия 16...30 мин демонстрируют снижение стресса у растений при предпосевной обработке семян за счёт активации антиоксидантных ферментов и формирования «памяти на стресс» [7], что обеспечивает увеличение водоудерживающей способности проростков в условиях водного дефицита [8], устойчивость к инфекционным заболеваниям [9]. Влияние постоянных и переменных магнитных полей на толерантность к повышенной концентрации тяжелых металлов изучено недостаточно.

Цель исследования – изучение влияния импульсного магнитного поля на снижение абиотического стресса, индуцированного ионами меди (Cu²⁺), у мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с помощью оценки биометрических показателей, содержания

пигментов и активности генерации супероксид анион-радикала.

Материалы и методы

Исследования по оценке влияния импульсного магнитного поля как фактора, снижающего абиотический стресс у растений проводили на базе лаборатории «Биоинженерия» СамНЦ РАН. В качестве объекта исследования были выбраны семена пшеницы мягкой *Triticum aestivum* (L.) сорта Тулайковская надежда. Для оценки влияния тяжелых металлов на проростки использовали растворы сульфата меди CuSO₄ с концентрациями: 0 мг/л, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 0,50 мг/л. Предварительно отбиралось 200 семян для каждой из опытных групп, контрольная группа находилась в условиях геомагнитного поля Земли (ГМП ≈ 56,51 мкТл).

Обработку семян импульсным магнитным полем (ИМП) с индукцией B=2,21 Тл, частотой разрядного тока f=15,7 кГц и числом импульсов n=3 проводили в стеклянных пробирках диаметром 15 мм и высотой l=115 мм, поочередно располагаемых в цилиндрическом многовитковом индукторе с индуктивностью L = 13,52 мГн в области равномерного магнитного поля на многофункциональной магнитно-импульсной установке МИУ-БИО-5.

Для оценки биометрических показателей длины корней, стеблей и ростков пшеницы отбирали семена без признаков повреждений. Для индукции стресса у растений семена пшеницы мягкой были разделены на контрольную и экспериментальную группы (воздействие ИМП) и проращивались на растворах сульфата меди с концентрациями 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 0,50 мг/л и на дистиллированной воде (0 мг/л CuSO₄) в течение семи дней. Проращивание проводили при комнатной температуре t=22±2 °C в течение двух суток в темноте. На третьи сутки проростки пшеницы помещали под лампы при освещенности E_v = 8696 лк и плотностью потока фотосинтетических фотонов PPFD = 117 μМ·м⁻²·с⁻¹ при 14-часовом фотопериоде. Замеры длины ростков, стеблей и корней пшеницы осуществляли на пятые сутки; измеряли по 10 растений в трех биологических повторках.

Для измерения количественного содержания пигментов отбирались проростки пшеницы массой 150...200 мг в трех биологических повторностях, каждая биологическая повторность разделялась на

четыре аналитических повтора. Определение проводили на седьмые сутки методом спектрофотометрического анализа на спектрофотометре Альтаир КФК-300УФ (TAGLER, Россия).

Вытяжки из проростков пшеницы готовили с использованием 15 мл 80 %-го ацетона. Полученные вытяжки фильтровали через воронку Шотта №4 в колбу Бунзена при пониженном давлении. Концентрацию пигментов определяли по измерению оптической плотности на спектрофотометре при длинах волн $\lambda_1 = 440$ нм; $\lambda_2 = 644$ нм; $\lambda_3 = 662$ нм. Для этого вытяжки помещались в стеклянные кюветы с длиной оптического пути 10 мм, объемом 3,5 мл. В качестве холостой пробы использовали 80%-й ацетон. Для каждой пробы проводили 5 измерений. Для определения количественного содержания пигментов в растениях использовали формулы (D. Wettstein, 1957) (1-4):

$$C_a = 9,784E_{662} - 0,990E_{644} \quad (1)$$

$$C_b = 21,426E_{644} - 4,650E_{662} \quad (2)$$

$$C_{a+b} = 5,134E_{662} - 20,436E_{644} \quad (3)$$

$$C_c = 4,695E_{440} - 0,268C_{a+b} \quad (4)$$

где E_{440} , E_{644} , E_{662} – оптическая плотность вытяжки при 440 нм, 644 нм и 662 нм соответственно, C – концентрация пигмента в вытяжке (мг/л).

Для пересчета содержания пигментов к массе пробы использовали формулу (5):

$$F = \frac{V \cdot C}{P \cdot 1000} \quad (5)$$

где F – содержание пигмента в листьях (мг/г сырой массы), V – объем вытяжки (л), C – концентрация пигмента (мг/л), P – навеска растительного материала (г).

Для регистрации генерации супероксид анион-радикала применяли акцепторный метод с последующим проведением фотометрического измерения при $\lambda = 480$ нм. Суть данного метода заключается в способности адреналина в слабощелочной среде или в присутствии сильных окислителей окисляться до адренохрома. Определение проводили на третьи сутки. Навеску ростков массой 150...200 мг гомогенизировали в 15 мл холодной дистиллированной воды, затем полученный гомогенат центрифугировали в течение 10 минут при 10000 g. К 3 мл супернатанта добавляли 100 мкл 0,01 раствора адреналина (ФГУП «Московский эндокринный завод», Россия) и инкубировали в течение 45 минут при комнатной температуре и освещенности $E_v = 8696$ лк. Сразу после инкубации измерялась оптическая плотность образовавшегося адренохрома. В качестве холостой пробы выступала смесь 100 мкл адреналина в 3 мл дистиллированной воды. Скорость генерации супероксид-аниона рассчитывали в мкМ/г-мин по молярной экстракции адренохрома ($4020 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$) по формуле (6):

$$C = \frac{D \cdot V \cdot k}{m \cdot \epsilon} \quad (6)$$

где C – генерация супероксид анион-радикала, $\mu\text{M}/\text{г}_{\text{мин}}$; D – оптическая плотность при A_{480} ; V – объем экстракта в кювете, мл; k – коэффициент цветности экстракта (0,1-0,5); m – масса сырой навески, г; ϵ – коэффициент молярной экстракции адренохрома $4020 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

Статистическую обработку результатов осуществляли с использованием теста Шапиро-Уилка. Однородность дисперсий подтверждали тестом Левина. Все результаты были представлены в виде значения $M \pm SE$ для трех повторностей. Данные были подвергнуты однофакторному дисперсионному анализу (ANOVA). Статистический анализ проводили с помощью программы jamovi (версия 2.6) [проект jamovi (2025), www.jamovi.org]. Различия принимали как статистически значимые при уровнях значимости $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$.

Результаты

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает увеличение биометрических показателей пятисуточных проростков пшеницы мягкой, полученных из обработанных ИМП с индукцией $V=2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ семян, при проращивании на растворе сульфата меди CuSO_4 с концентрацией 0,25 мг/л: длина корня увеличилась на 38,5 % ($p < 0,05$), стебля – на 22,2 % ($p < 0,001$) и ростка – на 32,7 % ($p < 0,001$) относительно контрольного варианта. Обработка семян импульсным магнитным полем при последующем проращивании в дистиллированной воде (0 мг/л CuSO_4) способствовала увеличению длины корня на 12,9 % ($p < 0,05$) и длины ростка на 9,3 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой.

Обработка семян пшеницы ИМП с индукцией $V=2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ привела к увеличению содержания пигментов в листьях семисуточных растений только в варианте опыта, где проращивание проводилось на дистиллированной воде (0 мг/л CuSO_4). Зафиксировано увеличение количества хлорофилла a на 23,4 % ($p < 0,01$), хлорофилла b – на 22,2 % ($p < 0,01$), каротиноидов – на 42,1 % ($p < 0,001$) и суммы пигментов – на 27,4 % ($p < 0,001$) относительно контрольной группы. Воздействие ИМП на семена не повлияло на содержание пигментов в листьях при проращивании семян на растворах сульфата меди CuSO_4 с концентрациями 0,125...0,50 мг/л (табл. 2).

Обработка семян ИМП с индукцией $V=2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ способствовала статистически значимому снижению уровня супероксид-анион радикала в трехсуточных ростках пшеницы мягкой только в условиях проращивания в дистиллированной воде (0 мг/л CuSO_4) на 18,2 % от контрольного значения (табл. 3).

Таблица 1. Биометрические показатели пятисуточных проростков пшеницы мягкой

Параметр	Вариант опыта	Концентрация р-р CuSO ₄ , мг/л	M±SE	F _{факт.}	p _{Тьюки}	F _{крит. для α = 0,05}	% от контроля
Корень	Контроль	0	5,4±0,2	-	-	4,01	-
		0,125	2,0±0,1				
		0,25	1,3±0,1				
		0,50	0,9±0,1				
	ИМП В=2,21 Тл	0	6,1±0,2*	6,81	0,011		12,9
		0,125	2,3±0,2	1,87	0,176		15,0
		0,25	1,8±0,2*	6,34	0,015		38,5
		0,50	1,0±0,1	0,85	0,360		11,1
Стебель	Контроль	0	9,7±0,30	-	-	4,01	-
		0,125	4,0±0,20				
		0,25	4,5±0,20				
		0,50	3,4±0,20				
	ИМП В=2,21 Тл	0	10,4±0,30	2,51	0,118		7,2
		0,125	4,5±0,30	2,34	0,131		12,5
		0,25	5,5±0,20***	11,16	0,001		22,2
		0,50	3,5±0,20	0,20	0,650		2,9
Росток	Контроль	0	15,1±0,4	-	-	4,01	-
		0,125	6,0±0,3				
		0,25	5,8±0,2				
		0,50	4,3±0,2				
	ИМП В=2,21 Тл	0	16,5±0,5*	4,39	0,040		9,3
		0,125	6,8±0,3	3,90	0,053		13,3
		0,25	7,3±0,3***	21,41	<0,001		32,7
		0,50	4,5±0,2	0,37	0,542		4,7

Примечание: * – различия статистически достоверны при $p < 0,05$; *** – различия статистически достоверны при $p < 0,001$

Таблица 2. Содержание пигментов в семисуточных листьях пшеницы мягкой

Пигмент	Вариант опыта	Концентрация р-р CuSO ₄ , мг/л	M±SE	F _{факт.}	p _{Тьюки}	F _{крит. для α=0,05}	% от контроля
Chl(a)	Контроль	0	0,47±0,01	-	-	4,30	-
		0,125	0,34±0,02				
		0,25	0,29±0,03				
		0,50	0,31±0,01				
	ИМП В=2,21 Тл	0	0,58±0,03**	12,83	0,002		23,4
		0,125	0,41±0,05	1,84	0,188		20,5
		0,25	0,34±0,03	1,42	0,246		17,2
		0,50	0,35±0,03	1,42	0,246		12,9
Chl(b)	Контроль	0	0,18±0,01	-	-	4,30	-
		0,125	0,13±0,01				
		0,25	0,1±0,02				
		0,50	0,1±0,01				
	ИМП В=2,21 Тл	0	0,22±0,01**	9,80	0,005		22,2
		0,125	0,14±0,02	0,47	0,497		7,7
		0,25	0,12±0,02	1,08	0,308		20,0
		0,50	0,12±0,01	3,70	0,067		20,0
Car.	Контроль	0	0,19±0,01	-	-	4,30	-
		0,125	0,14±0,01				
		0,25	0,14±0,01				
		0,50	0,14±0,01				
	ИМП В=2,21 Тл	0	0,27±0,01***	27,91	<0,001		42,1
		0,125	0,17±0,02	1,77	0,197		21,4
		0,25	0,13±0,01	0,06	0,796		-7,1
		0,50	0,15±0,01	0,01	0,932		7,1
Сумма пигментов	Контроль	0	0,84±0,03	-	-	4,30	-
		0,125	0,6±0,04				
		0,25	0,51±0,05				
		0,50	0,55±0,03				
	ИМП В=2,21 Тл	0	1,07±0,05***	15,73	<0,001		27,4
		0,125	0,72±0,07	1,60	0,219		20,0
		0,25	0,59±0,06	0,93	0,345		15,7
		0,50	0,61±0,04	1,35	0,258		10,9

Примечание: Chl(a) – хлорофилл а, Chl(b) – хлорофилл b, Car. – каротиноиды ** – различия статистически достоверны при $p < 0,01$; *** – различия статистически достоверны при $p < 0,001$

Таблица 3. Генерация супероксид-анион радикала в трехсуточных ростках пшеницы мягкой

Вариант опыта	Концентрация р-р CuSO ₄ , мг/л	M±SE	F _{факт.}	p _{Тьюки}	F _{крит.} для α=0,05	% от контроля
Контроль	0	5,99±0,3	-	-	4,49	-
	0,125	7,39±1,1				
	0,25	8,65±0,6				
	0,50	9,78±1,3				
ИМП B=2,21 Тл	0	4,90±0,2**	8,78	0,009		-18,2
	0,125	6,20±0,3	1,16	0,296		-16,1
	0,25	8,86±0,4	0,09	0,773		2,4
	0,50	7,59±0,5	2,45	0,137		-22,4

Примечание: ** – различия статистически достоверны при $p < 0,001$

Обсуждение

Полученные результаты во многом подтверждают данные других исследователей о снижении абиотического стресса у растений при обработке магнитными полями [10-12]. Исследования по воздействию ИМП высокой напряженности при микро-секундном диапазоне воздействия для снижения абиотического стресса у растений ранее не проводились, что определяет научную новизну настоящей работы и вносят ценный вклад по повышению устойчивости растений к стрессам в условиях изменения окружающей среды, стимуляции ростовых процессов у сельскохозяйственных культур. Результаты наших предыдущих экспериментов доказывают стимулирующее влияние ИМП с индукцией $B = 2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ на посевные качества семян, биометрические показатели проростков, отмечали снижение генерации супероксид-анион-радикала при интенсивном освещении (1600 лк) [13-15].

Концентрация 0,25 мг/л CuSO₄ находится в диапазоне, когда ионы меди создают умеренный стресс, не являющийся токсичным, но стимулирующий адаптационные механизмы растений. ИМП может усиливать эти механизмы, активируя антиоксидантные системы (супероксиддисмутазу, каталазу), что способствует росту корней и приводит к смягчению стресса, вызванного ионами меди. Следовательно, эффект ИМП проявляется только в узком диапазоне концентраций Cu²⁺ (0,25 мг/л), достигается баланс между стимуляцией адаптации и вызванным умеренным стрессом. При более низких (0,125 мг/л) и более высоких (0,50 мг/л) значениях концентрации сульфата меди статистически значимых изменений в биометрических показателях пшеницы не было выявлено.

Медь в низких концентрациях является микроэлементом, необходимым для растений [16], но её уровень в 0,125 мг/л, вероятно, не достигает порога, необходимого для активации адаптационных или ростовых механизмов, с которыми ИМП могло бы взаимодействовать. Без умеренного стресса, вызванного ионами меди, эффект ИМП может быть недостаточным для усиления метаболических процессов или активации антиоксидантных систем. Высокие концентрации меди (0,50 мг/л) могут нарушать метаболизм растений, вызывать окислительный

стресс и повреждать мембраны, что будет препятствовать стимулирующему действию ИМП.

Таким образом, ИМП при низких и высоких концентрациях ионов меди, используемых в данной работе, может быть недостаточно эффективным для смягчения токсического эффекта при магнитно-импульсной обработке, а концентрация 0,25 мг/л может активировать антиоксидантные системы, способствуя росту корней и стеблей.

Снижение содержания хлорофилла *a* и *b* в растениях является одним из механизмов токсического действия повышенной концентрации тяжелых металлов на злаковые [17]. В нашем исследовании обработка семян импульсным магнитным полем с индукцией $B = 2,21$ Тл и числом импульсов $n = 3$ способствовала увеличению хлорофилла *a*, хлорофилла *b* и суммы пигментов только в растениях, не подвергшихся стрессу. Однако отмечается тенденция к снижению отрицательного действия ионов меди на содержание хлорофилла *a* в листовом аппарате проростков пшеницы мягкой после воздействия ИМП на 12,9...20,5 % и хлорофилла *b* на 7,7...20,0 % относительно контрольных вариантов.

Нарушения в работе фотосинтетического аппарата, в том числе при действии тяжелых металлов на растения, приводят к генерации супероксид-анион радикала, приводя к нарушениям гомеостатического состояния растений [18].

Заключение

Воздействие импульсного магнитного поля с индукцией $B=2,21$ Тл и числом импульсов $n=3$ стимулирует увеличение длины проростков пшеницы, выращенной на дистиллированной воде, а также при действии стресс-фактора на растения, вызванного сульфатом меди при концентрации 0,25 мг/л, однако воздействие на семена пшеницы при низких концентрациях (0,125 мг/л) и при более высоких концентрациях (0,50 мг/л) ионов меди при совместном действии ИМП не способствует статистически значимому изменению биометрических показателей пшеницы. Обработка семян пшеницы мягкой ИМП не оказывает значимое защитное действие на фотосинтетический аппарат. В нашей работе было выявлено снижение генерации O₂⁻ на 18,2 % только при проращивании семян на дистиллированной воде (0 мг/л CuSO₄). В случае умеренного стресса при концентрации CuSO₄ 0,125 мг/л и 0,50 мг/л была

отмечена тенденция к снижению уровня O_2^- , а при концентрации $CuSO_4$ 0,25 мг/л генерация O_2^- находится на уровне контрольных значений. Возможно, обработка ИМП повышает активность супероксиддисмутазы; если продукция и утилизация O_2^- сбалансированы или если последующая нейтрализация H_2O_2 усилена, изменения в уровне O_2^- могут быть минимальными или не обнаруживаемыми. Это может указывать на высокую адаптивность антиоксидантной системы, которая поддерживает гомеостаз при действии ИМП, особенно в условиях умеренного стресса. Поэтому, вероятно, ИМП стимулирует рост проростков как в условиях отсутствия стресс-фактора, так и при проращивании растений на растворе сульфата меди с концентрацией 0,25 мг/л при умеренном стрессе.

Для объяснений наблюдаемых изменений в биометрических показателях пшеницы мягкой в условиях ИМП и при действии ИМП с умеренным стрессом требуются дальнейшие исследования, в частности определение активности ферментов (супероксиддисмутазы, пероксидазы), уровня H_2O_2 , концентрации низкомолекулярных антиоксидантов (глутатиона, аскорбата) для подтверждения гипотезы о том, что ИМП повышает устойчивость к умеренному стрессу, активируя защитные механизмы, такие как усиление антиоксидантной системы.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Глушченкову Владимиру Александровичу, старшему научному сотруднику лаборатории «Биоинженерия» СамНЦ РАН за планирование и проведение экспериментов.

Литература

1. Тяжелые металлы в окружающей среде и их влияние на сельскохозяйственные растения / А. В. Погорелов, В. Э. Лазыко, В. И. Шматок и др. // Рисоводство. 2021. № 4(53). С. 54-61.
2. Волкова А. В. Тяжелые металлы в экосистемах и агроценозах // Science Time. 2021. № 12(96). С. 88-93.
3. Heavy metal toxicity in plants and the potential NO-releasing novel techniques as the impending mitigation alternatives / A. Pande, B. G. Mun, N. J. Methela, et al. // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. P. 1019647.
4. Oxidative Damage in Roots of Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings Exposed to Microplastics or Combined with Cadmium / L. Liu, Y. Zhou, C. Wang, et al. // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2022. No. 110(1). P. 15.
5. The effects of cadmium on growth, some anatomical and physiological parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) / I. Ozyigit, D. Baktibekova, A. Hocaoglu-Ozyigit, et al. // International Journal of Life Sciences and Biotechnology. 2021. No. 4. P. 217-235.
6. Transformation of copper oxide and copper oxide nanoparticles in the soil and their accumulation by *Hordeum sativum* / M. Burachevskaya, T. Minkina, S. Mandzhieva, et al. // Environmental Geochemistry and Health. 2021. Vol. 43. P. 1655-1672.
7. Физические эустрессоры как потенциальные инструменты для повышения стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур / О. Н. Бахчевников, С. В. Брагинец, Н. С. Кравченко и др. // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023. No. 15. P. 360-386.
8. Нижарадзе Т. С., Кирсанов Р. Г. Влияние предпосевной обработки семян на водный режим и устойчивость к септориозу твердой яровой пшеницы в лесостепи Самарской области // Известия ОГАУ. 2020. № 3(83). С. 62-65.
9. The effect of a magnetic field on the phenolic composition and virus sanitation of raspberry plants / M. Upadyshev, S. Motyleva, I. Kulikov, et al. // Horticultural Science. 2021. No. 48(4). P. 166-173.
10. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean / S. Kataria, L. Baghel, K.N. Guruprasad // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2017. No. 10. P. 83-90.
11. Static magnetic field treatment of seeds improves carbon and nitrogen metabolism under salinity stress in soybean / L. Baghel, S. Kataria, K.N. Guruprasad // Bioelectromagnetics. 2016. No. 37. P.455-470.
12. Effects of pulsed magnetic field treatment of soybean seeds on calli growth, cell damage, and biochemical changes under salt stress / R. Radhakrishnan, T. Leelapriya, B.D. Ranjitha-Kumari // Bioelectromagnetics. 2012. No.33. P.670-681.
13. Change in the growth parameters of soft wheat *Triticum aestivum* (L.) after pretreatment of seeds with a pulsed magnetic field / N. A. Rodenko, O. V. Blednykh, V. A. Glushchenkov, et al. // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 139. P. 01002.
14. Генерация супероксид анион-радикала в листьях пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) под воздействием импульсного магнитного поля высокой напряженности / О. В. Бледных, Н. А. Роденко, В. А. Глушченков и др. // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2025. Т. 17. № 1. С. 50-69.
15. Кратковременное воздействие импульсного магнитного поля на семена пшеницы мягкой *Triticum aestivum* (L.) для улучшения их посевных качеств / О. В. Бледных, Н. А. Роденко, В. А. Глушченков и др. // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 12. С. 30-34.
16. В. В. Иванищев. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2020. № 1. С. 33-41.

17. Lead toxicity in cereals: mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management / M. Aslam, A. Aslam, M. Sheraz, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 11. P. 1-20.

18. Physiological response mechanism and stress resistance characteristics of four garden plants under heavy metal stress / N. Li, N. Lu, J. Zhang, et al. // *Frontiers in Environmental Science*. 2025. Vol. 13. P.1-10.

References

1. Heavy metals in the environment and their impact on agricultural plants / A. V. Pogorelov, V. E. Lazko, V. I. Shmatok, et al. // *Rice cultivation*. 2021. No.4 (53). P. 54-61.

2. Volkova A. V. Heavy metals in ecosystems and agrocenoses // *Science Time*. 2021. No.12 (96). P. 88-93.

3. Heavy metal toxicity in plants and the potential NO-releasing novel techniques as the impending mitigation alternatives / A. Pande, B. G. Mun, N. J. Methela, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 1019647.

4. Oxidative Damage in Roots of Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings Exposed to Microplastics or Combined with Cadmium / L. Liu, Y. Zhou, C. Wang, et al. // *Vestnik of Environmental Contamination and Toxicology*. 2022. No.110(1). P. 15.

5. The effects of cadmium on growth, some anatomical and physiological parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.) / I. Ozyigit, D. Baktibekova, A. Hocaoglu-Ozyigit, et al. // *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*. 2021. No.4. P. 217-235.

6. Transformation of copper oxide and copper oxide nanoparticles in the soil and their accumulation by *Hordeum sativum* / M. Burachevskaya, T. Minkina, S. Mandzhieva, et al. // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. Vol. 43. P. 1655-1672.

7. Physical eustressors as potential tools for increasing stress resistance of agricultural crops / O. N. Bakhchevnikov, S. V. Braginets, N. S. Kravchenko, et al. // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023. No.15. P. 360-386.

8. Nizharadze T. S., Kirsanov R. G. Effect of pre-sowing seed treatment on water regime and resistance to septoria of hard spring wheat in the forest-steppe of Samara region // *Izvestiya of OSAU*. 2020. No.3(83). P. 62-65.

9. The effect of a magnetic field on the phenolic composition and virus sanitation of raspberry plants / M. Upadyshev, S. Motyleva, I. Kulikov, et al. // *Horticultural Science*. 2021. No.48(4). P. 166-173.

10. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean / S. Kataria, L. Baghel, K.N. Guruprasad // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017. No.10. P. 83-90.

11. Static magnetic field treatment of seeds improves carbon and nitrogen metabolism under salinity stress in soybean / L. Baghel, S. Kataria, K.N. Guruprasad // *Bioelectromagnetics*. 2016. No.37. P.455-470.

12. Effects of pulsed magnetic field treatment of soybean seeds on calli growth, cell damage, and biochemical changes under salt stress / R. Radhakrishnan, T. Leelapriya, B.D. Ranjitha-Kumari // *Bioelectromagnetics*. 2012. №33. P.670-681.

13. Change in the growth parameters of soft wheat *Triticum aestivum* (L.) after pretreatment of seeds with a pulsed magnetic field / N. A. Rodenko, O. V. Blednykh, V. A. Glushchenkov, et al. // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 139. P. 01002.

14. Generation of superoxide anion radical in soft wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves under the influence of a high-intensity pulsed magnetic field / O. V. Blednykh, N. A. Rodenko, V. A. Glushchenkov et al. // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2025. Vol. 17. No.1. P. 50-69.

15. Short-term effect of a pulsed magnetic field on soft wheat *Triticum aestivum* (L.) seeds to improve their sowing qualities / O. V. Blednykh, N. A. Rodenko, V. A. Glushchenkov et al. // *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex*. 2024. Vol. 38. No.12. P. 30-34.

16. V. V. Ivanishchev. Bioaccumulation, homeostasis, and toxicity of copper in plants // *Vestnik of Tula State University. Natural sciences*. 2020. No.1. P. 33-41.

17. Lead toxicity in cereals: mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management / M. Aslam, A. Aslam, M. Sheraz, et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 11. P. 1-20.

18. Physiological response mechanism and stress resistance characteristics of four garden plants under heavy metal stress / N. Li, N. Lu, J. Zhang, et al. // *Frontiers in Environmental Science*. 2025. Vol. 13. P.1-10.