

СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

УДК 577.175.19:633.11»321»:581.1.046

DOI: 10.31367/2079-8725-2024-94-5-5-12

ОЦЕНКА АДАПТОГЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЛАТОНИНА В ОТНОШЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ СЕМЯН И ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ К ЗАСОЛЕНИЮ

М. Т. Мухина, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и пестицидов, mtmasm@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6210-592X;
О. А. Шаповал, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник лаборатории испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и пестицидов, shapowal.olga@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3375-527X;

Р. А. Боровик, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и пестицидов, to.roman@yahoo.com, ORCID ID: 0009-0004-5152-8021;

А. А. Коршунов, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории испытаний элементов агротехнологий, агрохимикатов и пестицидов, alexkorshunov01@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1392-4133

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова»,
127434, Москва, ул. Прянишникова, д. 31-А; тел. 8 (499) 976-37-50, факс: 8 (499) 976-37-39;
e-mail: info@vniia-pr.ru*

Настоящая статья посвящена изучению мелатонина как адаптогена, способного повышать толерантность пшеницы в отношении стресса, вызванного избыточным содержанием в окружающей среде легкорастворимых солей. Цель проведенного исследования – оценка в рамках лабораторного модельного опыта способности мелатонина повышать всхожесть семян и стимулировать ростовые процессы проростков пшеницы на фоне засоления. Исследование проводили на базе ФГБНУ ВНИИ агрохимии имени Д. Н. Прянишникова в 2024 году. В качестве объекта исследования были выбраны семена пшеницы яровой сорта Дарья. Перед закладкой опыта семена были обработаны водными растворами мелатонина в концентрациях 0; 0,01; 0,1; 1 и 10 мг/л методом прайминга. В качестве фоновых растворов для проращивания использовали дистиллированную воду и раствор хлорида натрия 150 мМ. В результате было показано, что в рамках проведенного эксперимента наблюдалось повышение всхожести семян на фоне обработки растворами мелатонина в концентрациях от 0,1 до 10 мг/л на засоленном фоне. Обработка семян мелатонином демонстрировала выраженный ростостимулирующий эффект на проростки пшеницы, особенно в отношении корневой системы. Однако сила этого эффекта была несколько снижена на засоленном фоне по сравнению с контрольными условиями. Максимальный ростостимулирующий эффект от применения мелатонина на обоих фонах наблюдался при применении раствора с концентрацией 1 мг/л. Также было отмечено, что прайминг семян мелатонином способствовал удержанию воды в клетках корней проростков, что может быть одним из механизмов повышения устойчивости растений к засолению.

Ключевые слова: яровая пшеница, мелатонин, стресс, засоление.

Для цитирования: Мухина М. Т., Шаповал О. А., Боровик Р. А., Коршунов А. А. Оценка адаптогенного потенциала мелатонина в отношении устойчивости семян и проростков яровой пшеницы к засолению // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16, № 5. С. 5–12. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-94-5-5-12.



ESTIMATION OF THE ADAPTOGENIC POTENTIAL OF MELATONIN ON SALINITY RESISTANCE OF SPRING WHEAT SEEDS AND SPROUTS

M. T. Mukhina, Candidate of Biological Sciences, head of the laboratory for testing the elements of agrotechnologies, agrochemicals and pesticides, mtmasm@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6210-592X;

O. A. Shapoval, Doctor of Agricultural Sciences, main researcher of the laboratory for testing the elements of agrotechnologies, agrochemicals and pesticides, shapowal.olga@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3375-527X;

R. A. Borovik, PhD in Biology, researcher of the laboratory for testing the elements of agrotechnologies, agrochemicals and pesticides, to.roman@yahoo.com, ORCID ID: 0009-0004-5152-8021;

A. A. Korshunov, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for testing the elements of agrotechnologies, agrochemicals and pesticides, alexkorshunov01@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1392-4133

*FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov,
127434, Moscow, Pryanishnikov Str., 31-A, tel.: 8 (499) 976-37-50, fax: 8 (499) 976-37-39*

The current paper is devoted to the study of melatonin as an adaptogen capable of increasing wheat tolerance to stress caused by excess levels of easily soluble salts in the environment. The purpose of the study was to evaluate, within the framework of a laboratory model experiment, the ability of melatonin to increase seed germination and stimulate growth processes in wheat sprouts against the background of salinity. The study was conducted at the FSBI All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov in 2024. The study objects were seeds of the spring wheat variety 'Darya'. Before the experiment, the seeds were treated with aqueous solutions of melatonin in concentrations of 0; 0.01; 0.1; 1 and 10 mg/l using the priming method. Distilled water and a 150 mM sodium chloride solution were used as background solutions for germination. As a result, there has been shown that within the framework of the experiment, there is an increase in seed germination against the background of treatment with melatonin solutions in concentrations from 0.1 to 10 mg/l against a saline background. Seed treatment with melatonin has demonstrated a pronounced growth-stimulating effect on wheat sprouts, especially in relation to the root system. However, the strength of this effect was somewhat reduced on a saline background compared to control conditions. There was a maximum growth-stimulating effect of melatonin on both backgrounds when using a solution with a concentration of 1 mg/l. There was also established that priming seeds with melatonin promoted water retention in seedling root cells, which may be one of the mechanisms for increasing plant resistance to salinity.

Keywords: spring wheat, melatonin, stress, salinity.

Введение. Выращивание сельскохозяйственных культур зачастую сопряжено с риском снижения жизнеспособности растений на ранних этапах развития в результате воздействия внешних стрессовых факторов. Одним из таких факторов является избыточное содержание легкорастворимых солей в почвенном растворе. Происхождение этих солей может быть как естественным, так и антропогенным. Первый вариант наблюдается в почвах аридных регионов с десуктивно-выпотным водным режимом или в гидроморфных почвах, находящихся под влиянием засоленных грунтовых вод. Антропогенное засоление связано либо с загрязнением почв, либо с применением минеральных удобрений. Зачастую система удобрений включает обязательное внесение припосевного удобрения, в особенности на бедных легких почвах, для обеспечения питательными элементами растений на этапе всходов. Локальное внесение минеральных удобрений может значительно повышать концентрацию легкорастворимых солей в почвенном растворе в зоне прорастания семян и формирования всходов (EL Sabagh et al., 2021; Минеев и др., 2017).

Избыточное содержание солей в почвенном растворе повышает его осмотическое давление по отношению к давлению внутри клетки корня, что приводит к оттоку воды по градиенту концентрации. В результате клетка обезвоживается и все жизненно важные метаболические процессы в ней ингибируются. Клетки корня обладают комплексом механизмов для противодействия осмотическому стрессу, однако эти механизмы имеют свой предел. К таковому можно отнести регуляцию осмотического давления внутри клетки путем накопления углеводов, регуляцию содержания калия, активность транспортерных мембранных белков и т.д. (EL Sabagh et al., 2021; Seleiman et al., 2021).

Регуляция антистрессовых механизмов у растений осуществляется гормональным путем. Одним из ключевых агентов регуляции физиологического ответа на стресс является мелатонин – молекула индольной природы, которая не так давно была признана новым фитогормоном. Способность мелатонина повышать устойчивость растений к неблагоприятным факторам среды была показана во множестве

исследований, в связи с чем применение мелатонина представляет практический интерес в контексте повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к различным неблагоприятным и стрессовым условиям (Shibaeva et al., 2018; Arnao and Hernández-Ruiz, 2020; Jiang et al., 2021; Murch and Erland, 2021).

Цель настоящего исследования заключалась в проведении в рамках модельного лабораторного опыта оценки потенциала использования мелатонина для обработки семян с целью повышения жизнеспособности, всхожести семян и стимуляции ростовых процессов проростков яровой пшеницы сорта Дарья в условиях повышенного содержания легкорастворимых солей в окружающей среде.

Материалы и методы исследований. Изучение эффективности мелатонина в повышении толерантности яровой пшеницы к избыточному содержанию в среде легкорастворимых солей проводили с использованием климатической камеры (POL-EKO). Для достижения целей исследования была разработана оригинальная методика, которая базируется на методах определения показателей всхожести (ГОСТ 12038-84, методе фитотестирования (ISO 22030:2005) и методе прайминга семян (Rajora et al., 2022)).

Схема опыта построена на основе двухфакторного дисперсионного комплекса с тремя повторностями. Первый фактор – засоление – включал две градации: дистиллированная вода и 150 мМ раствор хлорида натрия. Вторым фактором – концентрация водного раствора мелатонина – включал пять градаций: 0 мг/л; 0,01 мг/л; 0,1 мг/л; 1 мг/л и 10 мг/л.

В качестве опытной культуры была выбрана яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья. Семена урожая 2023 года, масса 1000 семян – 39,54 г, натура – 831 г.

Опыт проводили на базе ФГБНУ ВНИИ агрохимии имени Д.Н. Прянишникова в феврале 2024 года. Перед закладкой опыта семена пшеницы обработали растворами мелатонина согласно схеме опыта методом прайминга. Суть прайминга заключается в замачивании семян в испытуемом растворе в массовом соотношении 1 : 5 (семена : раствор) в течение суток при температуре 25 °С в темноте. Затем семена промывают дистиллированной водой и вы-

сушивают в течение суток при тех же условиях (Rajora et al., 2022).

Перед закладкой опыта была проведена дезинфекция оборудования путем прокаливания чашек Петри при 180 °С в течение двух часов и кварцевания внутреннего пространства климатической камеры в течение 30 минут.

После прайминга семена выкладывали в чашки Петри на два слоя фильтровальной бумаги равномерно по 20 штук. В качестве фона в каждую чашку добавляли 10 мл дистиллированной воды (нейтральный фон) или 150 мМ раствора хлорида натрия (засоленный фон) согласно схеме опыта. Чашки Петри с семенами инкубировали в климатической камере при температуре 20 °С в течение семи дней без освещения.

На третьи сутки была определена энергия прорастания семян, на седьмые сутки – всхожесть семян и проведены биометрические измерения: определены средняя длина корней и надземных вегетативных органов, их воздушно-сухая масса и влажность в пересчете на 10 растений. Полученные результаты были обработаны методами корреляционного и двухфакторного дисперсионного анализа со взаимодействием в программе LibreOffice Calc 24.2.4. Полученные данные приведены в формате: среднее ± стандартное отклонение.

Результаты и их обсуждение. Всхожесть и энергия прорастания семян являются важными показателями их жизнеспособности. Присутствие в окружающей среде легкорастворимых солей повышает осмотическое давление окружающего раствора, создавая градиент водного потенциала, провоцируя отток воды из живых клеток, снижая тем самым их жизнеспособность. Полученные нами данные демонстрируют это явление – на нейтральном фоне семена имели высокие показатели лабораторной всхожести – 95 %, а на засоленном фоне всхожесть семян составляла 88,3 %. Применение мелатонина позволило повысить жизнеспособность семян, пророщенных на засоленном фоне. Заметный положительный эффект наблюдался на вариантах, где проводилась обработка мелатонином в концентрации от 0,1 до 10 мг/л. На этих вариантах на засоленном фоне всхожесть составила 91,7–96,7 % при всхожести на нейтральном фоне 96,7–100,0 %. Энергия прорастания была несущественно ниже лабораторной всхожести и имела аналогичную динамику. Низкая концентрация мелатонина в 0,01 мг/л оказалась неэффективной в отношении повышения показателей всхожести (табл. 1).

Таблица 1. Показатели всхожести семян яровой пшеницы на нейтральном и засоленном фонах
Table 1. Germination rates of spring wheat seeds on neutral and saline backgrounds

Концентрация мелатонина, мг/л	0 (контроль)	0,01	0,1	1	10
<i>Энергия прорастания, %</i>					
Фон: H ₂ O	95,0	100,0	93,3	98,3	96,7
Фон: 150 мМ NaCl	88,3	85,0	96,7	91,7	90,0
<i>Лабораторная всхожесть, %</i>					
Фон: H ₂ O	95,0	100,0	96,7	98,3	100,0
Фон: 150 мМ NaCl	88,3	86,7	96,7	91,7	91,7

Избыточное содержание легкорастворимых солей в почвенном растворе негативно сказывается на развитии проростков пшеницы – ингибируется рост вегетативных органов, замедляются водный и углеводный обмен, снижается накопление биомассы. Чем быстрее происходит рост проростка и чем крупнее его размеры, тем больше вероятность того, что он выживет на ранних этапах и разовьется в здоровое растение, способное реализовать свой продуктивный потенциал. Поэтому биометрия проростков является информативным индикатором эффективности действия адаптогена.

Полученные в ходе исследования данные по биометрии показали, во-первых, угнетение роста проростков пшеницы на засоленном фоне, а во-вторых, наличие у мелатонина ростостимулирующего действия на обоих фонах. На нейтральном фоне по мере роста концентрации рабочего раствора мелатонина практические линейно возрастала средняя длина и воздушно-сухая масса надземных вегетативных органов – с $9,3 \pm 0,1$ см и $0,064 \pm 0,003$ г в контроле до $9,8 \pm 0,1$ см и $0,070 \pm 0,006$ г на варианте с применением максимальной дозы мелатонина в 10 мг/л (рис. 1, табл. 2).

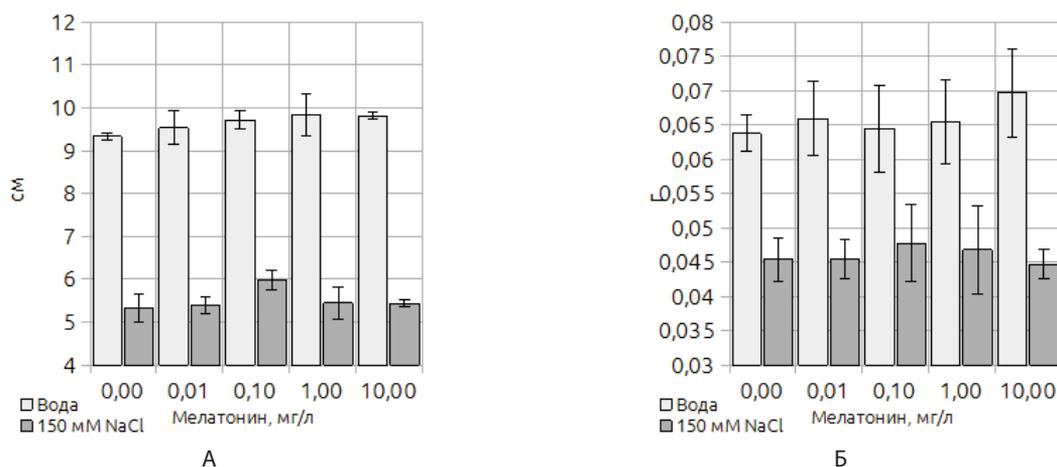


Рис. 1. Средняя длина (А) и суммарная воздушно-сухая масса (Б) надземных вегетативных органов 10 проростков пшеницы

Fig. 1. Mean length (A) and total air-dry mass (B) of aboveground vegetative organs of 10 wheat sprouts

Таблица 2. Биометрические параметры, воздушно-сухая масса и влажность корней и надземных вегетативных органов проростков яровой пшеницы
Biometric parameters, air-dry mass, and moisture content of the roots and aboveground vegetative organs of spring wheat seedlings

Фон	Раствор мелатонина, мг/л	Надземные вегетативные органы (в пересчете на 10 растений)		Корни (в пересчете на 10 растений)		Соотношение «надземные вегетативные органы : корни»		Влажность, %	
		Средняя длина, см	Воздушно-сухая масса, г	Средняя длина, см	Воздушно-сухая масса, г	Соотношение длин	Соотношение воздушно-сухих масс	Надземных вегетативных органов	Корней
H ₂ O дист.	0	9,3 ± 0,1	0,064 ± 0,003	12,4 ± 0,8	0,066 ± 0,003	0,78 ± 0,06	0,96 ± 0,01	90,5 ± 0,2	91,2 ± 0,3
H ₂ O дист.	0,01	9,5 ± 0,4	0,066 ± 0,005	13,5 ± 0,8	0,073 ± 0,010	0,72 ± 0,04	0,90 ± 0,05	90,5 ± 0,2	90,6 ± 0,4
H ₂ O дист.	0,10	9,7 ± 0,2	0,064 ± 0,006	13,6 ± 0,4	0,076 ± 0,010	0,72 ± 0,02	0,85 ± 0,03	90,4 ± 0,2	91,3 ± 0,5
H ₂ O дист.	1,00	9,8 ± 0,5	0,065 ± 0,006	14,3 ± 0,3	0,081 ± 0,006	0,69 ± 0,04	0,81 ± 0,02	90,4 ± 0,2	91,1 ± 0,3
H ₂ O дист.	10,0	9,8 ± 0,1	0,070 ± 0,006	13,1 ± 0,9	0,075 ± 0,008	0,76 ± 0,06	0,93 ± 0,09	90,1 ± 0,2	90,8 ± 0,3
150 mM NaCl	0	5,3 ± 0,3	0,045 ± 0,003	6,2 ± 0,4	0,047 ± 0,004	0,89 ± 0,01	0,97 ± 0,03	89,1 ± 0,5	90,2 ± 0,9
150 mM NaCl	0,01	5,4 ± 0,2	0,045 ± 0,003	6,4 ± 0,4	0,046 ± 0,003	0,87 ± 0,03	0,98 ± 0,04	89,1 ± 0,5	91,2 ± 0,7
150 mM NaCl	0,10	6,0 ± 0,2	0,048 ± 0,006	6,8 ± 0,2	0,051 ± 0,005	0,90 ± 0,03	0,94 ± 0,05	89,0 ± 0,3	91,8 ± 0,2
150 mM NaCl	1,00	5,5 ± 0,4	0,047 ± 0,006	6,8 ± 0,6	0,050 ± 0,005	0,82 ± 0,04	0,93 ± 0,05	88,7 ± 0,3	92,0 ± 0,4
150 mM NaCl	10,0	5,4 ± 0,1	0,045 ± 0,002	6,1 ± 0,4	0,049 ± 0,004	0,90 ± 0,05	0,91 ± 0,04	88,9 ± 0,3	92,1 ± 0,0
<i>Результаты двухфакторного дисперсионного анализа со взаимодействием</i>									
Фактор:	р =								
засоление	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	<0,001	0,012
мелатонин	0,046	0,930	0,008	0,143	0,027	0,013	0,318	0,009	
взаимодействие	0,270	0,664	0,397	0,665	0,662	0,119	0,648	0,003	
HCP ₀₅	0,5	0,008	1,0	0,011	0,07	0,08	0,5	0,8	

Примечание. Данные приведены в формате: среднее ± стандартное отклонение.

На засоленном фоне также отмечался прирост как линейного размера, так и воздушно-сухой биомассы надземных вегетативных органов, однако пик этих показателей приходился на вариант с концентрацией мелатонина 0,1 мг/л – 6,0±0,2 см и 0,048±0,006 г при значениях в контроле соответственно 5,3±0,3 см и 0,045±0,003 г. Двухфакторный дисперсионный анализ показал наличие статистической значимости в $p = 0,046$ в отношении влияния

мелатонина на длину надземных вегетативных органов. HCP₀₅ для данного показателя составила 0,5 см. В отношении воздушно-сухой массы статистическая значимость не обнаружилась ($p = 0,93$), однако динамика этого показателя тесно коррелировала с длиной надземных органов ($r = 0,94$).

Влияние мелатонина на рост и развитие корневой системы пшеницы было выражено несколько отчетливее. Как и в отношении

надземных органов, в отношении корневой системы мелатонин также проявлял ростостимулирующее действие с похожей динамикой, но с отличием в том, что пиковые биометрические показатели наблюдались у семян, прошедших прайминг раствором мелатонина в концентрации 1 мг/л. В контроле на нейтраль-

ном фоне длина корневой системы составляла $12,4 \pm 0,8$ см и на засоленном фоне – $6,2 \pm 0,4$ см (рис. 2, табл. 2). На варианте с праймингом семян раствором мелатонина в концентрации 1 мг/л значения составили соответственно $14,3 \pm 0,3$ и $6,8 \pm 0,6$ см.

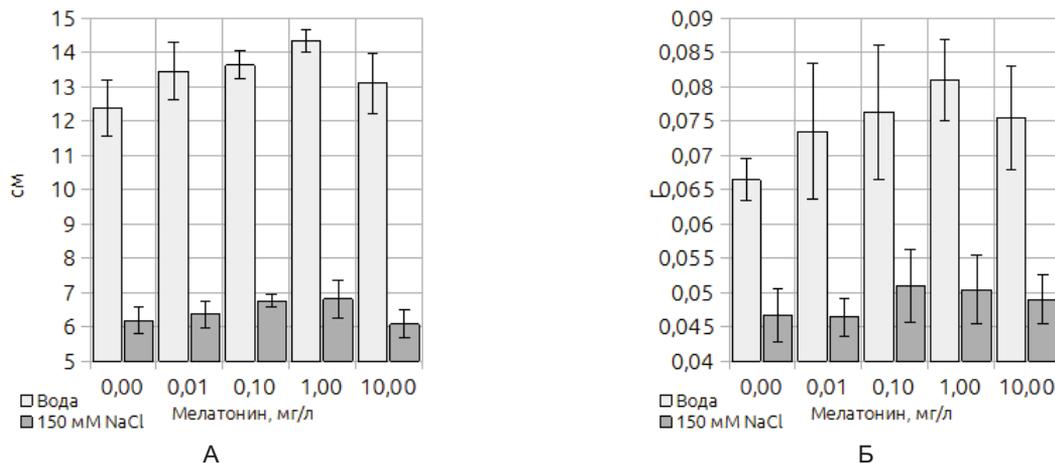


Рис. 2. Средняя длина (А) и суммарная воздушно-сухая масса (Б) корней 10 проростков пшеницы
Fig. 2. Mean length (A) and total air-dry mass (B) of roots of 10 wheat sprouts

Значения воздушно-сухой массы в контроле на нейтральном и засоленном фонах составили соответственно $0,066 \pm 0,003$ и $0,047 \pm 0,004$ г, а на вариантах с праймингом раствором мелатонина в концентрации 1 мг/л – соответственно $0,081 \pm 0,006$ и $0,050 \pm 0,005$ г. Методом дисперсионного анализа в отношении влияния мелатонина на длину корней была выявлена статистическая значимость в $p = 0,008$ ($HCP_{05} = 1,0$ см), а в отношении влияния на воздушно-сухую биомассу корневой системы статистическая значимость не обнаружена ($p = 0,143$). Как и в случае с длиной надземных вегетативных органов, имеет место высокая корреляция между линейными размерами и массой корневой системы ($r = 0,94$).

Наиболее точную информацию о преимущественном влиянии мелатонина на рост надземных или подземных вегетативных органов можно получить из анализа соотношения биометрических показателей между собой. На засоленном фоне соотношение средней длины и воздушно-сухой массы надземных вегетативных органов к длине и массе корней значительно возрастало по сравнению с нейтральным фоном и приближалось практически к 1 (рис. 3, табл. 2). Иными словами, стресс, вызванный засолением, в большей степени ингибирует рост и развитие корневой системы, нежели надземных побегов.

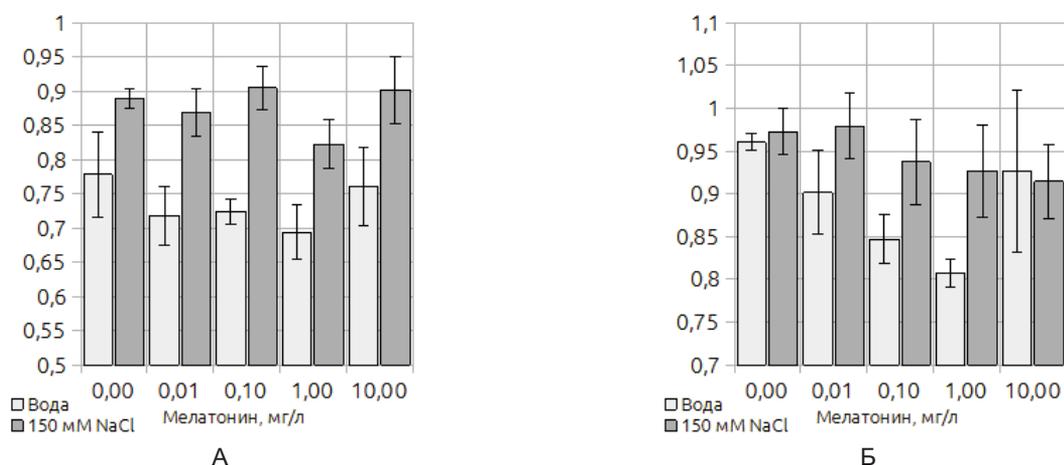


Рис. 3. Соотношение длин надземных вегетативных органов и корней (А) и соотношение воздушно-сухих масс надземных вегетативных органов и корней (Б) у 10 проростков пшеницы
Fig. 3. Ratio of the lengths of aboveground vegetative organs and roots (A) and ratio of air-dry masses of aboveground vegetative organs and roots (B) of 10 wheat sprouts

По мере роста концентрации рабочего раствора мелатонина, примененного на засоленном фоне, наблюдалось слабо выраженное снижение соотношения размеров надземных вегетативных органов к корням. Наиболее отчетливо это было видно на примере соотношения воздушно-сухих масс, где корреляция этого показателя с концентрацией рабочего раствора мелатонина составила $r = -0,39$ при уровне значимости коэффициента корреляции $p = 0,099$. На нейтральном фоне оба описываемых показателя находились в U-образной зависимости с концентрацией рабочего раствора мелатонина с минимумом на варианте 1 мг/л. Дисперсионный анализ показал, что уровень значимости влияния мелатонина на соотношение длин надземных вегетативных органов и корней составил $p = 0,027$ ($HCP_{05} = 0,07$), а на соотношение воздушно-сухих масс – соответственно $p = 0,013$ ($HCP_{05} = 0,08$). Из этого следует, что на нейтральном фоне при значе-

ниях соотношений длин и масс надземных вегетативных органов и корней в контроле в 0,78 и 0,96, обнаружались статистически значимые различия с вариантом, где применялся раствор мелатонина 1 мг/л. Здесь значения соотношений длин и масс составляли соответственно 0,69 и 0,81. В то же время на засоленном фоне разницы между контролем и любыми другими вариантами не превышают соответствующих значений HCP_{05} . Таким образом, на фоне засоления ростостимулирующее действие мелатонина в отношении корневой системы снижается.

Интерес представляет динамика влажности вегетативных органов проростков пшеницы. Гипертонический раствор стимулирует отток жидкости из цитоплазмы во внешнюю среду по градиенту концентрации. В контрольном варианте влажность вегетативных органов на засоленном варианте была существенно ниже, чем на нейтральном фоне (рис. 4, табл. 2).

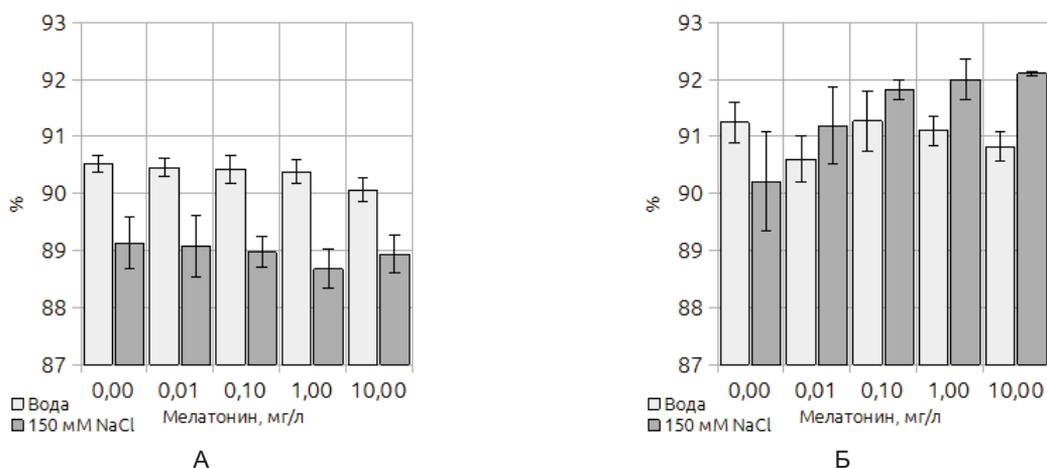


Рис. 4. Влажность надземных вегетативных органов (А) и корней (Б) проростков пшеницы
Fig. 4. Humidity of aboveground vegetative organs (A) and roots (B) of wheat sprouts

Влияние мелатонина на влажность надземных вегетативных органов и корней проявилось по-разному. Так, на нейтральном фоне отмечена сильная обратная корреляция между влажностью надземных вегетативных органов и концентрацией рабочего раствора мелатонина: $r = -0,69$; $p < 0,01$. На засоленном фоне эта корреляция отсутствовала: $r = -0,08$. В отношении размеров корней ситуация была обратная – коэффициент корреляции между концентрацией рабочего раствора мелатонина и влажностью корней на нейтральном фоне составлял $r = -0,23$, однако при $p = 0,267$ его нельзя рассматривать как статистически значимый. А на засоленном фоне корреляция уже была положительная и составляла $r = 0,43$ при уровне значимости $p = 0,068$. При этом на вариантах с концентрациями мелатонина в диапазоне 0,1–10 мг/л влажность корневой системы на фоне засоления была на 0,6–1,3 % выше, чем на нейтральном фоне. Таким образом, на основании проведенного анализа правомерно предположить, что мелатонин способствует

удержанию влаги внутри клеток корневой системы в условиях избыточного засоления.

Достоверность полученных результатов подтверждается литературными данными. В опыте на водной культуре в условиях засоления обработка семян хлопка раствором мелатонина концентрацией 200 мкМ (47 мг/л) привела к увеличению сырой массы надземных вегетативных органов на 36 %, а корневой системы – на 48 % (Jiang et al., 2021). В аналогичном модельном опыте по изучению влияния избыточного засоления на прорастание семян пшеницы было показано снижение лабораторной всхожести семян со 100 % в контроле до 72 % на фоне раствора хлорида натрия 200 мМ. При обработке семян раствором мелатонина 200 мкМ путем замачивания наблюдалось повышение всхожести до 92%. При этом средняя высота проростков на контроле составила 15,98 см, на засоленном фоне – 4,25 см, а на фоне обработки семян мелатонином – 10,16 см (Wang et al., 2022). В исследовании на семенах огурца показано увеличение всхожести

семян на засоленном фоне (150 мМ NaCl) после прайминга семян мелатонином в концентрации до 100 мкМ (25 мг/л) (Zhang et al., 2014).

Выводы. Базируясь на анализе данных, полученных в результате исследования влияния прайминга семян растворами мелатонина в различных концентрациях на нейтральном и засоленном фонах на прорастание и рост проростков яровой пшеницы сорта Дарья, можно сделать следующие выводы.

1. В рамках проведенного эксперимента прайминг семян мелатонином с применением рабочих растворов с концентрацией 0,1–10 мг/л повышал показатели всхожести семян на засоленном фоне с 88,3 до 91,7–96,7 %.

2. Мелатонин оказывает ростостимулирующее действие на проростки пшеницы. При этом более сильный эффект наблюдается

в отношении корневой системы. Применение раствора мелатонина концентрацией 10 мг/л повысило сухую массу надземных вегетативных органов на 9,1 %, а применение раствора мелатонина 1 мг/л повысило на сухую массу корневой системы на 21,9 %

3. Ростостимулирующий эффект мелатонина на засоленном фоне выражен слабее, чем на нейтральном фоне. Прирост биомассы надземных вегетативных органов и корней на вариантах с засоленным фоном меньше на 25,9–37,8 % по сравнению с нейтральным фоном.

4. Применение мелатонина для прайминга семян способствует удержанию воды в клетках корней проростков пшеницы в условиях выращивания на засоленном фоне.

Библиографические ссылки

1. Минеев В. Г., Сычев В. Г., Гамзиков Г. П. Агрехимия. Учебник. М.: Изд-во ВНИИА им. Д. Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
2. Arnao M. B., Hernández-Ruiz J. Is Phytomelatonin a New Plant Hormone? // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 1. С. 95. DOI: 10.3390/agronomy10010095
3. EL Sabagh A., Islam M. S., Skalicky M., Ali Raza M., Singh K. Salinity Stress in Wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Changing Climate: Adaptation and Management Strategies // *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. DOI: 10.3389/fagro.2021.661932
4. Jiang D., Lu B., Duan W., Meng Y., Li J., Zhang K., Sun H., Zhang Y., Dong H., Bai Z., Li C. Exogenous melatonin improves the salt tolerance of cotton by removing active oxygen and protecting photosynthetic organs // *BMC Plant Biology*. 2021. Vol. 21, № 1. Article number: 331. DOI: 10.1186/s12870-021-03082-7
5. Murch S. J., Erland L. A. E. A Systematic Review of Melatonin in Plants: An Example of Evolution of Literature // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.683047
6. Rajora N., Vats S., Raturi G., Thakral V., Kaur S., Rachappanavar V., Kumar M., Kesarwani A. K., Sonah H., Sharma T. R., Deshmukh R. Seed priming with melatonin: A promising approach to combat abiotic stress in plants // *Plant Stress*. 2022. Vol. 4, Article number: 100071. DOI: 10.1016/j.stress.2022.100071
7. Seleiman M., Aslam M., Alhammad B., Maqbool R., Chattha M., Khan I., Gitari H., Uslu O., Roy R., Battaglia M. Salinity Stress in Wheat: Effects, Mechanisms and Management Strategies // *PHYTON*. 2021. Vol. 91, № 4. P. 667–694. DOI: 10.32604/phyton.2022.017365
8. Shibaeva T., Markovskaya E., Mamaev A. Phytomelatonin: A Review // *Biology Bulletin Reviews*. 2018. Vol. 8. P. 375–388. DOI: 10.1134/S2079086418050080
9. Wang J., Lv P., Yan D., Zhang Z., Xu X., Wang T., Wang Y., Peng Z., Yu C., Gao Y., Duan L., Li R. Exogenous Melatonin Improves Seed Germination of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Salt Stress // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, № 15. Article number: 8436. DOI: 10.3390/ijms23158436
10. Zhang H.-J., Zhang N., Yang R.-C., Wang Li., Sun Q.-Q., Li D.-B., Cao Y.-Y., Weeda S., Zhao B., Ren S., Guo Y.-D. Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA4 interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.) // *Journal of Pineal Research*. 2014. Vol. 57, № 3. P. 269–279. DOI: 10.1111/jpi.12167

References

1. Mineev V. G., Sychev V. G., Gamzиков G. P. Agrokhimiya. Uchebnik [Agrochemistry. Textbook]. M.: Izd-vo VNIIA im. D. N. Pryanishnikova, 2017. 854 s.
2. Arnao M. B., Hernández-Ruiz J. Is Phytomelatonin a New Plant Hormone? // *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 1. С. 95. DOI: 10.3390/agronomy10010095
3. EL Sabagh A., Islam M. S., Skalicky M., Ali Raza M., Singh K. Salinity Stress in Wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Changing Climate: Adaptation and Management Strategies // *Frontiers in Agronomy*. 2021. Vol. 3. DOI: 10.3389/fagro.2021.661932
4. Jiang D., Lu B., Duan W., Meng Y., Li J., Zhang K., Sun H., Zhang Y., Dong H., Bai Z., Li C. Exogenous melatonin improves the salt tolerance of cotton by removing active oxygen and protecting photosynthetic organs // *BMC Plant Biology*. 2021. Vol. 21, № 1. Article number: 331. DOI: 10.1186/s12870-021-03082-7
5. Murch S. J., Erland L. A. E. A Systematic Review of Melatonin in Plants: An Example of Evolution of Literature // *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpls.2021.683047
6. Rajora N., Vats S., Raturi G., Thakral V., Kaur S., Rachappanavar V., Kumar M., Kesarwani A. K., Sonah H., Sharma T. R., Deshmukh R. Seed priming with melatonin: A promising approach to combat abiotic stress in plants // *Plant Stress*. 2022. Vol. 4, Article number: 100071. DOI: 10.1016/j.stress.2022.100071
7. Seleiman M., Aslam M., Alhammad B., Maqbool R., Chattha M., Khan I., Gitari H., Uslu O., Roy R., Battaglia M. Salinity Stress in Wheat: Effects, Mechanisms and Management Strategies // *PHYTON*. 2021. Vol. 91, № 4. P. 667–694. DOI: 10.32604/phyton.2022.017365

8. Shibaeva T., Markovskaya E., Mamaev A. Phytomelatonin: A Review // *Biology Bulletin Reviews*. 2018. Vol. 8. P. 375–388. DOI: 10.1134/S2079086418050080
9. Wang J., Lv P., Yan D., Zhang Z., Xu X., Wang T., Wang Y., Peng Z., Yu C., Gao Y., Duan L., Li R. Exogenous Melatonin Improves Seed Germination of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Salt Stress // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, № 15. Article number: 8436. DOI: 10.3390/ijms23158436
10. Zhang H.-J., Zhang N., Yang R.-C., Wang Li., Sun Q.-Q., Li D.-B., Cao Y.-Y., Weeda S., Zhao B., Ren S., Guo Y.-D. Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA4 interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.) // *Journal of Pineal Research*. 2014. Vol. 57, № 3. P. 269–279. DOI: 10.1111/jpi.12167

Поступила: 20.06.24; доработана после рецензирования: 15.08.24; принята к публикации: 22.08.24.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Мухина М. Т. – концептуализация и проектирование исследования, подготовка рукописи; Шаповал О. А. – концептуализация и проектирование исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Боровик Р. А. – концептуализация и проектирование исследования, выполнение лабораторных опытов, сбор и анализ данных, подготовка рукописи; Коршунов А. А. – выполнение лабораторных опытов, сбор данных, подготовка рукописи.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.