

ВЛИЯНИЕ СУБДОЗ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ (*TRITICUM AESTIVUM* L.)

© 2023 г. Е. Н. Сурнина^{а, *}, А. А. Буренина^а, Т. П. Астафурова^а, С. И. Михайлова^а,
Э. А. Соснин^{а, b}, Т. С. Пак^а, В. А. Панарин^b, С. А. Нужных^а

^аФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский Томский государственный университет”, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

^bФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), пр. Академический, 2/3, Томск, 634055 Россия

*E-mail: ensurnina@mail.ru

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

После доработки 11.01.2023 г.

Принята к публикации 12.01.2023 г.

Выполнены многолетние полевые исследования влияния предпосевной обработки семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) УФБ-излучением ХеСІ-эксилампы на посевные качества семян и продуктивность растений. Определены особенности морфогенеза на различных этапах роста и развития растений пшеницы. Выявлена субдоза воздействия, повышающая урожайность культуры. Проведенные исследования доказывают перспективность введения обработки УФБ-излучением в пул современных агротехнологий.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., гормезис, предпосевное облучение семян, УФБ-излучение, морфогенез, продуктивность, урожайность, качество зерна

DOI: 10.31857/S0023119323030142, **EDN:** KIAOOQ

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что действие того или иного стрессового фактора на биологические объекты существенно зависит как от самого объекта, так и от природы и дозы действующего фактора. Причем зависимость эффекта от величины дозы имеет немонотонный характер. Впервые это заметили авторы работы [1], где на семена растений (пшеница, бобовые, ячмень) действовали рентгеновским излучением и было найдено, что при уменьшении дозы до умеренных значений (т. н. субдозы) неблагоприятное влияние физического фактора, напротив, оказывает стимулирующее воздействие на растения. Впоследствии это явление, обусловленное действием любого стрессового фактора, было названо гормезисом [2]. В настоящее время гормезис трактуют как двухфазную зависимость доза-эффект, при которой субдозы действующего фактора оказывают стимулирующее (положительное) влияние на биологический объект, а высокие дозы фактора оказывают ингибирующее воздействие [3]. В настоящее время для обозначения этого явления также применяется иностранный термин “priming” или закалка [4].

Гормезис проявляет себя и через химические, и через физические факторы воздействия [5]. В

нашем эксперименте мы рассмотрим явление гормезиса для случая, когда действующим фактором является ультрафиолетовое излучение Б-типа ($290 < \lambda < 320$ нм) или УФБ-излучение. В общем лучистом потоке его доля в естественных условиях солнечного освещения поверхности Земли составляет не более 1.5% [6]. Фактически, это означает, что поверхности планеты достигают субдозы УФБ-излучения, что стало основой гипотезы Э.А. Соснина, сформулированной в 2003 г. о том, что такое воздействие может быть эффективным для развития растений. Последующая проверка гипотезы на различных культурах подтвердила ее обоснованность в приложении как к семенам различных культур (лен, огурцы, пшеница, салат), так и к саженцам и черенкам (виноград, яблоня, кедр) растений [7–11].

Ранее мы сообщали о данных, полученных на предыдущих этапах исследований [9]. В настоящей статье обобщим полученные результаты завершающего цикла полевых работ по воздействию УФБ-излучения на продуктивность пшеницы, что позволит говорить о достоверном и воспроизводимом гормезисе субдоз УФБ-излучения.

Таблица 1. Влияние УФБ-излучения на урожайность зерна пшеницы по годам

Год	Урожайность зерна, г/м ²		
	контроль	0.5 Дж/см ²	% к контролю
2019	329.58 ± 8.44	363.18 ± 8.06*	110
2020	245.61 ± 6.28	258.31 ± 10.57	105
2021	440.67 ± 38.75	496.11 ± 10.92*	112
2022	249.44 ± 10.42	298.02 ± 7.84*	119

Знаком * отмечены достоверные различия при $p \leq 0.05$.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Полевые исследования по изучению влияния разовой предпосевной обработки семян низкодозовым УФБ-излучением на рост, развитие и продуктивность пшеницы были проведены в коллекционном питомнике лаборатории сельскохозяйственных растений на территории Учебно-экспериментального участка СибБС ТГУ (г. Томск). Согласно многолетним наблюдениям, климат Томской области резко континентальный, с влажным умеренно теплым летом и холодной снежной продолжительной зимой. Он характеризуется наличием поздних весенних и ранних осенних заморозков, ограничивающих и без того короткий период вегетации растений. Погодные условия вегетационного периода 2022 г. характеризуются как умеренно влажные и умеренно теплые. Сумма активных температур выше +10°C с мая по сентябрь 2032.4°C, сумма осадков за этот период — 278.9 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) составил 1.38, который характеризует вегетационный период как умеренно влажный и умеренно теплый [12].

Объектом исследования являлись семена мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень. Перед посевом семена однократно обрабатывали излучением ХеСI-эксилампы (модель BD_P) в течение 120 и 60 с, что соответствовало энергетическим экспозициям (дозам) 0.5 и 0.25 Дж/см². Эксилампа на рабочих молекулах ХеСI* была разработана в лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) и обеспечивала интенсивную полосу излучения в диапазоне длин волн $\lambda \sim 290\text{--}320$ нм с максимумом излучения на $\lambda = 308$ нм и полушириной полосы $\Delta\lambda_{1/2} = 1.9$ нм [13]. Контролем являлись семена, которые не подвергались УФ-облучению (УФО). Норма высева семян составила 600 шт./м². Для каждого варианта были заложены деланки площадью 1 м² в 4-кратной повторности. Наблюдения за ростом и развитием растений проводились на протяжении всего вегетационного периода — от всходов до полной спелости (созревания).

Для оценки влияния УФО на процессы вегетации растений у всех образцов оценивались морфометрические параметры (высота растений и масса надземной части). Площадь листьев пше-

ницы определяли по линейным размерам листа, умноженным на расчетный коэффициент (для пшеницы — 0.67) [14]. Для определения сухой массы проростки высушивали в сушильном шкафу при 70°C до постоянной массы. Удельную поверхностную площадь листьев (УППЛ) рассчитывали, как соотношение сухой массы листьев к их площади. Качество зерна определяли на инфракрасном спектрофотометре Инфралюм ФТ-10 (Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные многолетние исследования показали, что предпосевная обработка семян УФБ-излучением оказывает положительное влияние на урожайность зерна пшеницы, которая является основным показателем продуктивности растений. Метеорологические условия за годы исследования были различными по температурному режиму и влагообеспеченности почвы, что позволило всесторонне изучить действие субдоз УФО. Анализ данных за четыре года испытаний показал, что урожайность зерна при дозе 0.5 Дж/см² превышала контроль от 5 до 19% (табл. 1).

В условиях рынка важно получить высокую урожайность в сочетании с качеством зерна. Одними из основных показателей являются белок, который определяет пищевую ценность зерна и клейковина — по ее содержанию определяют хлебопекарное качество муки. По литературным данным известно, что существенное влияние на качество зерна оказывают экологические факторы, условия вегетационного периода, наследственные особенности сортов, а также взаимодействие между ними [15]. Наши исследования показали, что обработка семян УФ-излучением не оказала влияния на качество зерна пшеницы. Содержание белка и клейковины в разные годы полевых исследований достоверно не отличались от контроля и варьировали от 12 до 15% (белок) и от 22 до 29% (клейковина).

Дальнейшие исследования были направлены на изучение и сравнение влияния еще меньших доз УФБ-излучения на потенциальную продуктивность пшеницы по морфометрическим показателям. Подобная закономерность была нами обнаружена ранее при изучении воздействия малых доз

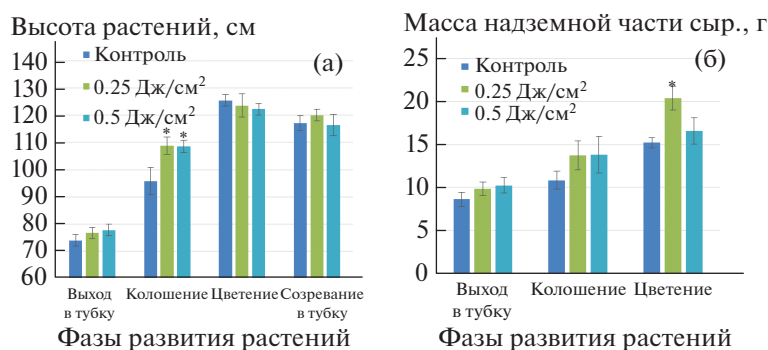


Рис. 1. Влияние уровня облученности ХеСl-эксилампой на высоту растений (а) и сырую массу надземной части (б) пшеницы. * — достоверные различия между контролем и опытом при $p \leq 0.05$.

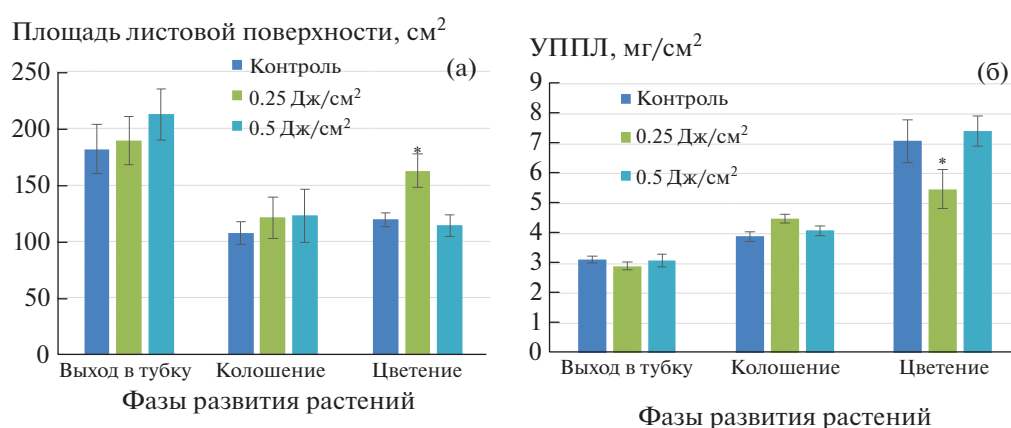


Рис. 2. Влияние уровня облученности ХеСl-эксилампой на площадь листовой поверхности (а) и УППЛ (б) пшеницы (2022 г.). * — достоверные различия между контролем и опытом при $p \leq 0.05$.

импульсно-периодического рентгеновского излучения на качество семян и продуктивность пшеницы [16]. Так, сократив дозу УФО в 2 раза (до 0.25 Дж/см²) мы наблюдали увеличение значений по высоте растений и массе надземной части, которые были больше контроля почти на протяжении всей вегетации, максимальные значения массы надземной части в фазу цветения превышали контроль на 34% (рис. 1). Накопление биомассы в фазу цветения происходило, в основном, за счет прироста стеблей и колосьев. В опытном варианте 0.5 Дж/см² также отмечены увеличения показателей высоты растений в фазу выхода в трубку и колошения, а надземная масса превышала контроль на всех этапах онтогенеза.

В растительном мире индивидуальные размеры и быстрота роста массы отдельных растений более тесно коррелируют с площадью листьев, чем с интенсивностью их работы [17]. Из рис. 2а видно, как пропорционально надземной части (рис. 1б) увеличивалась площадь листьев, наибольшие значения были отмечены в фазу выхода в трубку, затем — за счет отмирания нижних листьев — суммарная площадь ассимилирующей по-

верхности растений снижалась. Так, в варианте 0.5 Дж/см² в фазу выхода в трубку отмечена тенденция к увеличению площади листьев, а в варианте 0.25 Дж/см² в фазу цветения значения площади листьев превышали контроль на 36%.

Важным параметром листового аппарата, характеризующим жизнедеятельность растений, является удельная поверхностная плотность листа (УППЛ). Некоторые морфологические показатели листьев находятся в тесной связи с интенсивностью фотосинтеза и УППЛ. Было установлено, что значения УППЛ в фазах выхода в трубку и колошения во всех вариантах были схожими и увеличивались в процессе онтогенеза, в фазу цветения в контроле и в варианте 0.5 Дж/см² значения были 7.1 и 7.4 мг/см², а в варианте 0.25 Дж/см² показатель снизился до 5.49 мг/см² (рис. 2б). Считается, что у растений с низким УППЛ — при более тонком листе — фотосинтез осуществляется эффективнее из-за снижения затрат на формирование листа и потерь световой энергии [18].

Полевые исследования 2022 г. показали, что урожайность зерна в опытных вариантах 0.25 и

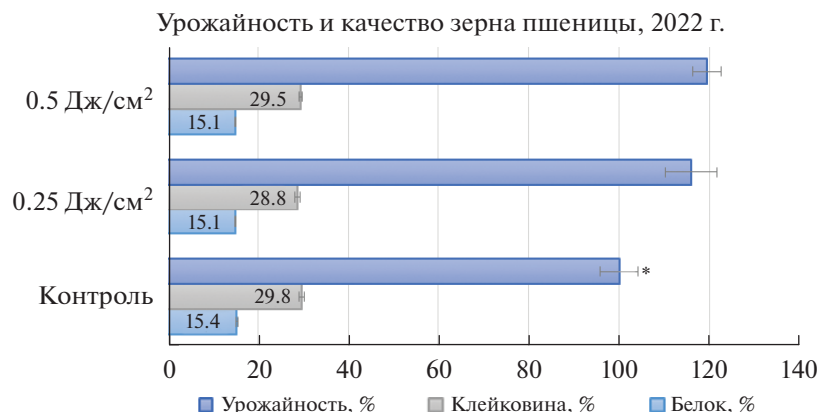


Рис. 3. Влияние УФБ-излучения на урожайность и качество зерна пшеницы, 2022 г. * — достоверные различия между контролем и опытом при $p \leq 0.05$.

0.5 Дж/см² составила 289.1 и 298.0 г/м², что превышает показатели в контроле на 15.9 и 19.5% соответственно, при этом качество зерна не снизилось: содержание белка во всех вариантах составило 15%, содержание клейковины изменялось незначительно — от 28.8 до 29.8% (рис. 3).

Таким образом, предпосевная обработка семян пшеницы УФБ-излучением оказала стимулирующий эффект на морфогенез и продуктивность растений пшеницы с. Ирень. Переход на пониженные дозы (0.25 Дж/см²) облучения интенсифицирует развитие растений и не снижает урожайности культуры (в пределах погрешности измерений). С научной точки зрения найденные факты подтверждают явление гормезиса в наших условиях. С практической стороны эти факты следует учесть при проектировании аппаратуры для предпосевной обработки семян.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждено стимулирующее действие малых доз ультрафиолетового средневолнового излучения ХеСІ-эксилампы (УФ-Б) на семена пшеницы. После однократной обработки семян субдозами 0.25 и 0.5 Дж/см² происходит увеличение морфометрических показателей, таких как высота растений, масса надземной части, площадь ассимилирующей поверхности листьев. Урожайность пшеницы при воздействии субдозами УФБ-облучения за четыре года полевых исследований увеличивалась в среднем на 11.5%, при этом не отмечено снижения качества зерна.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и частично в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чехов В.П., Замараева И.К. // Труды Томского государственного университета. 1932. Т. 85. С. 23.
2. Southam C.M., Ehrlich J. // Phytopathology. 1943. № 33. Р. 517.
3. Эйдус Л.Х. // Биофизика. 2005. Т. 50. № 4. С. 693.
4. Thomas D., Jos T.T., Puthur T. // Environmental and Experimental Botany. 2017. V. 138. Р. 57.
5. De Sousa Araújo S., Paparella S., Dondi D. // Front Plant Sci. 2016. V. 7. Р. 646.
6. Caldwell M.M., Teramura A.H., Tevini M. // Trends in Ecology & Evolution. 1989. V. 4. Р. 363.
7. Бендер О.Г., Петрова Е.А., Зотикова А.П. и др. // Вестник ТГУ. 2006. № 67. С. 15.
8. Sosnin E.A., Chudinova Y.V., Victorova I.A. // Proc. SPIE (XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers) 98101K. 2015. V. 9810.
9. Соснин Э.А., Липатов Е.И., Скакун В.С. и др. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 98.
10. Баянов Е.О., Фадеева Ю.Ю., Лящева Л.В. и др. // Инноватика-2021: сб. материалов XVIII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (21–22 апреля 2022 г.) / Под ред. Солдатов А.Н.: Томск: СТТ, 2022. С. 126.
11. Лящева Л.В., Соснин Э.А., Лящев А.А. и др. // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 4(96). С. 179.
12. Погода и климат: справочно-информационный портал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 06.12.2022).
13. Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Панарин В.А. и др. Патент № 139005 РФ // МПК А01С1/00. 2014
14. Гродзинский А.М., Гродзинский Д.М. Краткий справочник по физиологии растений. К.: Наукова думка, 1973. 591 с.
15. Беденко В.П. Фотосинтез и продуктивность озимой пшеницы на юго-востоке Казахстана. Алма-Ата, Наука, 1976.
16. Буренина А.А., Астафурова Т.П., Сурнина Е.Н. и др. // Химия высоких энергий. 2021. Т. 55. № 4. С. 321.
17. Поладова Г.Г. // Аграрная наука. 2011. № 12. С. 13.
18. Васфилов С.П. // Журнал общей биологии. 2011. Т. 72. № 6. С. 436.