

Действие УФ-излучения среднего диапазона ХеСl-эксилампы на морфогенез и структуру урожая пшеницы сорта *Triticum aestivum L.*

Э. А. Соснин, Е. И. Липатов, В. С. Скакун, А. А. Буренина, Т. П. Астафурова,
Е. Н. Сурнина

Представлены результаты лабораторных и полевых исследований влияния однократной предпосевной обработки семян пшеницы УФБ-излучением эксиплексной лампы барьерного разряда на молекулах ХеСl. Выявлены дозы и сроки посадки после обработки, оптимальные для увеличения морфологических показателей проростков пшеницы. Показано, что при УФБ-облучении проявляет себя гормезис: переход к субдозам обработки обеспечивает долговременный эффект в полевых условиях, увеличивая показатели урожайности пшеницы. Результаты подтверждают характеристику указанного физического метода стимуляции семян как экологически безопасного метода повышения продуктивности растений и качества урожая.*

Ключевые слова: гормезис, субдозы облучения, структура урожая, УФБ, эксилампа.

Ссылка: Соснин Э. А., Липатов Е. И., Скакун В. С., Буренина А. А., Астафурова Т. П., Сурнина Е. Н. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 98.

Reference: E. A. Sosnin, E. I. Lipatov, V. S. Skakun, A. A. Burenina, T. P. Astaphyrova, and E. N. Surnina, Applied Physics, No. 2, 98 (2020).

Введение

Умеренное действие всякого стрессового фактора на биологическую систему, имеющее силу, недостаточную для проявления вредных факторов, но вызывающие стимуляцию биологических процессов, называется гормезисом (термин введен С. Зонтманом и Д. Эрлихом в 1943 г. [1]). В последние годы вновь возобновился интерес к изучению гормезиса, вызван-

ного различными физическими факторами [2]. Традиционно работы по изучению гормезиса являются междисциплинарными.

Как частный случай, гормезис наблюдается под действием ультрафиолетового (УФ) излучения. Наименее изученным сегодня является действие УФБ-излучения ($290 < \lambda < 320$ нм), хотя его доля в потоке солнечной радиации составляет в среднем около 1,5 % от общего потока излучения на планете [3]. В процессе эволюции живые организмы приспосабливаются к условиям обитания. На основании этого в 2003 г. Э. А. Сосниным была выдвинута гипотеза о том, что сравнительно малый поток УФБ-излучения, достигающий поверхности Земли, тоже используется растениями, но на уровне субдоз. Последующие лабораторные эксперименты на хвойных и культурных растениях подтвердили эту гипотезу [4, 5]. Кроме того, эффект гормезиса от УФБ-излучения подтверждают и другие работы (см. ссылки в [6]). В настоящее время показано, что низкоуровневое УФБ-излучение стимулирует прорастание семян, рост биомассы, толщину се-

Соснин Эдуард Анатольевич^{1,2}, в.н.с., д.ф.-м.н.

Евгений Игоревич Липатов^{1,2}, н.с., к.ф.-м.н.

Скакун Виктор Семенович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Буренина Анастасия Анатольевна², м.н.с.

Астафурова Татьяна Петровна², зав. лаб., д.биол.н.

Сурнина Елена Николаевна², ст. лаборант.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

² Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36.

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 07 мая 2020 г.

менной оболочки, сырую и сухую массу корней и побегов.

Одним из механизмов стимулирующего действия физических факторов на семена является растрескивание поверхности семян, что ускоряет влагопоглощение и интенсифицирует дыхание семян. Прямые измерения параметров поверхности семян, подвергнутых действию физических факторов подтверждают этот механизм [7]. Другой механизм воздействия, связанный с УФБ-излучением, пока рассматривается скорее как гипотетический. В этом случае говорят об активации УФБ-излучением фоторецептора UVR8. Это приводит к экспрессии генов, участвующих в акклиматизации растений и регуляции их стрессоустойчивости. UVR8 также участвует в регуляции генов, связанных с патогенезом и хлоропластическими белками [8]. По нашему мнению, в процесс фоторегуляции могут быть вовлечены оба эти механизма.

Для экспериментальной проверки действия обоих указанных механизмов нужны не только лабораторные, но и полевые исследования действия УФБ-излучения, для наблюдения за всеми этапами процесса онтогенеза. В настоящей работе мы приводим результаты как лабораторных, так и полевых исследований влияния предпосевной обработки семян пшеницы УФБ-излучением на процесс онтогенеза растений и структуру урожая.

Помимо научного интереса, данное исследование имеет значение в рамках мировой тенденции к переходу к т. н. интенсивному сельскому хозяйству за счёт применения различных физических факторов воздействия на растения [9], закладывает новые направления в агробиофотонике [10].

Экспериментальная установка и методики измерений

Объектом исследования были семена мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень. Использовали отборные семена, всхожесть которых была определена предварительно по ГОСТ 12038-84 и составляла не менее 95 %.

Обработку семян осуществляли на установке, показанной на рис. 1. Она состоит из коаксиальной эксилампы барьерного разряда

[11], выполненной из двух соосно установленных трубок (1, 2), спаянных на концах. На внешней поверхности лампы располагался сплошной электрод-отражатель (3), а во внутренней трубке – полупрозрачный электрод из металлической проволоки (4). На внешний электрод подаются импульсы напряжения амплитудой до 8 кВ, длительностью по основанию до нескольких микросекунд с частотой несколько десятков кГц. Полость (5), образованная трубками (1, 2) заполнена смесью Хе и Cl₂. Как результат, между трубками (1, 2) возбуждается барьерный разряд и формируется излучение эксиплексных молекул ХеCl* с максимумом на $\lambda = 308$ нм, полушириной спектральной полосы ~ 2 нм и имеющее около 18 нм по основанию. Оно хорошо отвечает УФБ-диапазону, являясь симулятором коротковолнового края солнечного ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности земли. С помощью электрода-отражателя (3) излучение концентрируется во внутренней трубке, где установлен полимерный шнек (6) с регулируемой скоростью вращения. На шнек поступает облучаемое зерно. Регулируя скорость вращения шнека можно задавать различные дозы УФБ-облучения семян.

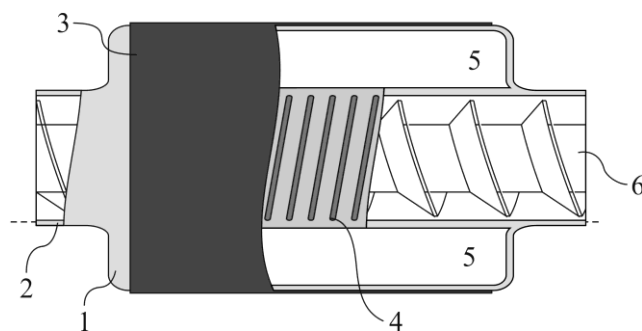


Рис. 1. Схема облучающей установки на основе ХеCl-эксилампы: 1, 2 – кварцевые трубы диаметром 8 и 4 см; 3 – сплошной отражающий электрод из металлической фольги, 4 – полупрозрачный электрод из металлической проволоки; 5 – область импульсного барьерного разряда; 6 – шнек для подачи зерна.

Проводились как лабораторные, так и полевые исследования. Для предпосевной обработки семян излучением ХеCl-эксилампы использовали поверхностные дозы облучения от 0,2 до 12,6 Дж/см².

В лабораторных тестах использовали 7-суточные проростки. Растения выращивали в климатической камере («Labline Scientific

Instruments», Польша) при 12-часовом фотопериоде, температуре 23–24 °С и освещенности 60 Вт/м².

Полевые исследования проводились согласно методикам Б. А. Доспехова [13].

Для выявления времени последствия УФ-излучения опыт закладывали в день облучения семян, а также через 1, 2 и 3 суток после облучения. Для оценки влияния параметров облучения на процессы вегетации растений у всех образцов оценивались морфометрические параметры – длина корневой системы, длина проростков, масса корневой и надземной частей растений.

Содержание общей воды (T_w) в растительных тканях (листья и корни) рассчитывали с использованием значений сырой (M_1) и сухой (M_0) массы:

$$T_w(\%) = \left(\frac{M_1 - M_0}{M_1} \right) \times 100.$$

Фракционный состав воды в листьях определяли рефрактометрическим методом [14]. Изучение влияния облучения на скорость поглощения воды семенами (набухание) проводили в течение суток.

Статистическая обработка результатов исследований проводилась с помощью программы Microsoft Office Excel 2013 и Statistica 8.0. В таблицах будут представлены средние арифметические значения в форме «среднее ± ошибка среднего» по морфологическим параметрам из 25–40 повторностей, по физиолого-биохимическим из 3–4 повторностей. Все показатели проверены на нормальность распределения. В случае нормального распределения и близости дисперсии выборок использовали сравнение групп по t -критерию Стьюдента. Для сравнения малых выборок использовался U -тест Манна-Уитни. Достоверно значимые отличия определяли при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Известно, что семена, поглотившие больше воды за первые 4 часа после замачивания, чаще проявляют большую продуктивность при последующем развитии [15]. Поэтому лабораторные исследования были

начаты с измерения водопоглощения семян, подвергнутых влиянию различных доз УФ-облучения. Независимо от дозы облучения поглощение воды семенами было неравномерным, что характерно для многих сельскохозяйственных культур и связано как с физическими, так и с биохимическими явлениями, происходящими в зародыше в процессе метаболизма [16]. Во всех вариантах опытов с наибольшей скоростью семена пшеницы поглощали воду в течение первого часа после замачивания. При дозах облучения 5 и 12,6 Дж/см² семена поглощали воды больше контрольного варианта на 24 и 57 % соответственно (рис. 2). На втором пике поглощения воды (5–6-й час от начала замачивания) наиболее активно поглощали воду семена контрольного варианта, а при дозах облучения 5 и 12,6 Дж/см² показатели снижались на 19 и 36 % соответственно.

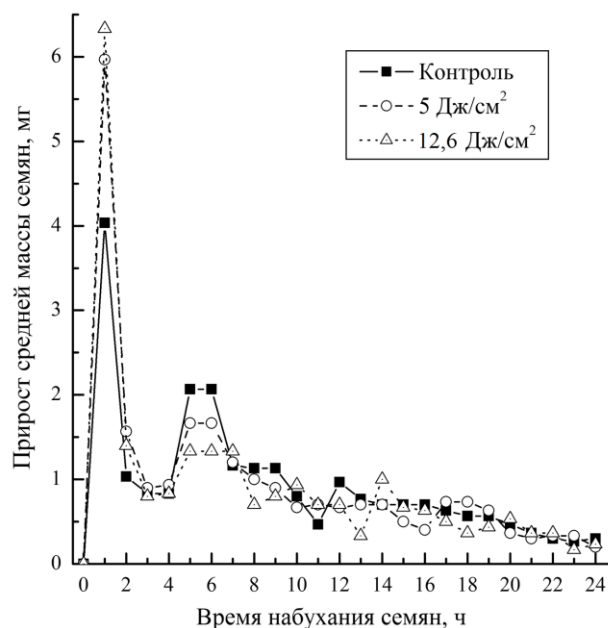


Рис. 2. Динамика поглощения воды набухающими семенами пшеницы в зависимости от дозы УФ-излучения.

Содержащаяся в семенах вода (общая вода) условно подразделяется на две формы: свободную (или рыхло связанную) и связанную (или прочно связанную). Под связыванием подразумевается возникновение взаимодействий между молекулами воды и неводного компонента, ведущих к снижению подвижности молекул воды, отчего изменяются и другие её свойства. Свободной являет-

ся более подвижная фракция воды, которая активно участвует в физиологических процессах.

Результаты изменения содержания связанной и свободной воды в наших экспериментах приведены в табл. 1. Известно, что в эндосперме и семядолях сухих семян пшеницы преобладает вода, прочно связанная с биополимерами, тогда как в зародыше содержится значительно больше свободной воды [17].

Т. е. содержание свободной воды характеризует достижение зародышем полной фазы физиологического роста и переход семени в стадию проклевывания. По табл. 1 видно, что максимальное содержание свободной воды образуется при дозе 5 Дж/см², что свидетельствует об ускоренном переходе семян к проклевыванию. В этом случае частично проклюнувшиеся зерна пшеницы наблюдались уже через 17 ч от начала замачивания.

Таблица 1

Влияние дозы УФБ-облучения на содержание свободной и связанной воды в семенах пшеницы

| Время, ч | Тип воды | Содержание воды, % | | |
|----------|-----------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| | | Контроль | 5 Дж/см ² | 12,6 Дж/см ² |
| 0 | связанная | 10,92 ± 0,18 | | |
| | свободная | 0 | | |
| 9 | связанная | 25,24 ± 0,35 | 22,43 ± 0,34 | 24,38 ± 0,17 |
| | свободная | 3,46 ± 0,34 | 4,98 ± 0,34 | 2,39 ± 0,17 |
| 24 | связанная | 25,19 ± 0,9 | 22,61 ± 0,57 | 22,39 ± 0,8 |
| | свободная | 13,3 ± 0,9 | 16,64 ± 0,57 | 14,22 ± 0,8 |

Между тем достоверных различий между контролем и опытом по таким показателям, как скорость прорастания и всхожесть найдено не было. Это, вероятно, обусловлено высокими посевными качествами семян.

На следующем этапе лабораторных исследований фиксировали морфологические параметры проростков пшеницы, причём время посадки после УФБ-облучения варьировали. При посеве семян в день обработки длина корня проростков при дозе облучения 5 и 12,6

Дж/см² была больше контроля на 18 и 17 % соответственно (рис. 3, а). При посеве через сутки после обработки наблюдалась иная закономерность: длина корня при облучении 5 Дж/см² увеличилась на 73 % относительно контрольных значений. При последующем посеве семян наблюдалось ингибирование роста корня при дозах облучения 12,6 Дж/см² на 13 % (через 2 суток после обработки) и при дозах 5 и 12,6 Дж/см² на 10–11 % (через 3 суток после обработки).

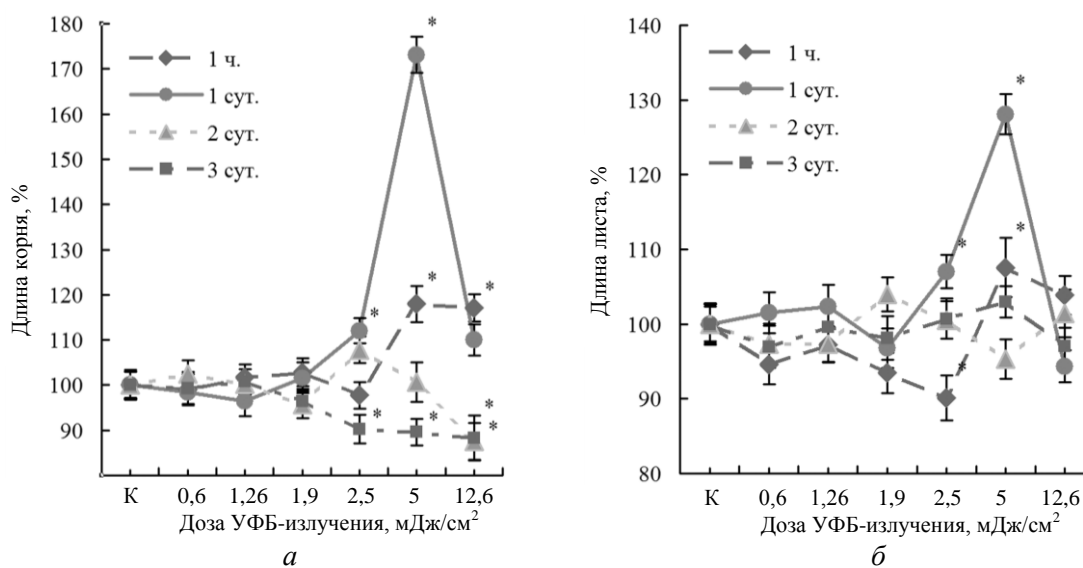


Рис. 3. Влияние различных доз УФС-облучения на морфометрические параметры проростков пшеницы. К – контрольный, необлученный вариант. Достоверные отличия обозначены звёздочками.

Похожая закономерность характеризовала длину листа растений. При посеве семян в день обработки длина листа при дозе облучения 5 Дж/см² увеличивалась относительно контроля на 8 %, а при посеве через сутки на 28 % (рис. 3, б). При последующем посеве семян через 2 и 3 суток после обработки достоверных различий между контролем и опытными вариантами выявлено не было.

Обработка УФБ-излучением значительно повлияла на накопление биомассы проростков пшеницы. При посеве семян в день обработки сухая масса корня при дозе облучения 5 и 12,6 Дж/см² была выше контрольной на 29 и 15 %, соответственно. При посеве через сутки после обработки масса корня при облучении 2,5 и 5 Дж/см² увеличилась на 21 и 37 % относительно контрольных значений. Сухая масса листьев проростков увеличилась относительно контроля при дозе облучения 5 и 12,6 Дж/см² на 16 и 25 % соответственно при посеве семян в день обработки. При посеве через сутки после обработки показатель был больше на 22 % при дозе облучения 5 Дж/см².

При посеве семян через 2 и 3 суток после обработки достоверных различий между

контролем и опытными вариантами по массе корня и сухой массе листьев не обнаружено.

Таким образом в лабораторных тестах стимулирующие эффекты УФБ-облучения семян пшеницы были выявлены при дозах облучения 2,5 и 5 Дж/см² при посеве семян в день обработки и через сутки после обработки. Доза 5 мДж/см² была отобрана далее для полевых опытов. Кроме того, для полевых испытаний был дополнительно заложен ещё один вариант, отвечающий субдозе 0,2 Дж/см². При этом мы исходили из предположения, что субдоза может проявить себя не на ранних, а поздних фазах развития растения. Полевые исследования подтвердили эту гипотезу.

В табл. 2 перечислены параметры урожайности, высоты растений, количества продуктивных побегов, массы колоса и зерна в колосе, полученные в контрольном варианте и при двух выбранных дозах облучения – повышенной и субдозе. Видно, что наибольшие (и статистически значимые) параметры урожайности были получены при субдозе 0,2 Дж/см². Увеличение дозы в 25 раз (до 5 мДж/см²) почти на порядок снижает указанные показатели даже по сравнению с контролем. Так при УФБ-облучении проявляет себя гормезис.

Таблица 2

Структура урожая пшеницы (адаптировано по нашим данным [18])

| Параметры | Дозы УФБ-облучения, Дж/см ² | | |
|--------------------------------------|--|-----------------|---------------|
| | 0 (Контроль) | 0,2 | 5 |
| Высота растений, см | 75,11 ± 1,4 | 85,9 ± 1,3* | 72,71 ± 1,44 |
| Количество продуктивных побегов, шт. | 356,1 ± 15,1 | 408,3 ± 7,2* | 330,2 ± 5,49 |
| Длина колоса, см | 7,18 ± 0,12 | 6,36 ± 0,12* | 6,56 ± 0,16 |
| Масса колоса, г | 0,60 ± 0,03 | 0,71 ± 0,03* | 0,48 ± 0,03* |
| Масса зерна в колосе, г | 0,35 ± 0,03 | 0,42 ± 0,02* | 0,28 ± 0,02 |
| Масса 1000 шт. семян, г | 22,77 ± 0,23 | 24,7 ± 0,21* | 16,62 ± 0,21 |
| Урожайность зерна, г/м ² | 125,09 ± 3,7 | 171,20 ± 10,64* | 93,64 ± 7,37* |

Заключение

Таким образом, проведенные лабораторные и полевые исследования действия УФБ-излучения на семена пшеницы показали, что переход к субдозам обработки обеспечивает долговременный эффект в полевых условиях, увеличивая показатели урожайности пшеницы. Полученные данные находятся в согласии с известными фактами и гипотезами. Впоследствии планируется проверить действие субдоз УФБ-излучения на проростках, в т. ч.

ещё снизить дозы, для выявления границ, в которых проявляет себя гормезис.

Полученные данные позволяют надеяться на разработку низкозатратного (с энергетической точки зрения) процесса стимуляции семян.

Результаты получены в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ (тема № 8.1.29.2018) и государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Southam C. M., Ehrlich J. // *Phytopathology*. 1943. № 33. P. 517.
2. Belz R. G., Piepho H.-P. // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7. P. e33432. DOI: 10.1371/journal.pone.0033432.
3. Caldwell M. M., Teramura A. H., Tevini M. // *Trends in Ecology & Evolution*. 1989. Vol. 4. P. 363. DOI: 10.1016/S0169-5347(96)10062-8
4. Бендер О. Г., Петрова Е. А., Зотикова А. П., Соснин Э. А., Авдеев С. М. // *Вестник ТГУ*. 2006. № 67(2). С. 15.
5. Sosnin E. A., Chudinova Y. V., Victorova I. A., Volotko I. I. // *Proc. SPIE: XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers*. 2015. Vol. 9810. P. 98101K. DOI: 10.1117/12.2224936.
6. Thomas D., Jos T. T., Puthur T. // *Environ. Exp. Botany*. 2017. Vol. 138. № 6. P. 57. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.03.003
7. Zahoranová A., Hoppánová L., Šimončicová J., Tučeková Z., et al. // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2018. Vol. 35. № 5. P. 969. DOI: 10.1007/s11090-018-9913-3.
8. Yin R., Skvortsova M. Y., Loubery S., Ulm R. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2016. Vol. 26. № 113. P. E4415. DOI: 10.1073/pnas.1607074113.
9. Jisha K. C., Vijayakumari K., Puthur J. T. // *Acta Physiol. Plant.* 2013. Vol. 35. № 5. P. 1381. DOI: 10.1007/s11738-012-1186-5.
10. Соснин Э. А., Кульчин Ю. Н., Астафурова Т. П. // *Фотон-экспресс-наука*. 2019. № 6. С. 70. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16031.
11. Avdeev S. M., Orlovskii V. M., Panarin V. A., Pechenitsin D. S., Skakun V. S., Sosnin E. A., Tarasenko V. F. // *Russian Physics Journal*. 2017. Vol. 60. № 8. P. 1298. DOI: 10.1007/s11182-017-1211-7.
12. Доспехов Б. А. *Методика полевого опыта*. – М.: Изд-во Колос, 1985.
13. *Методы биохимического исследования растений / под ред. А. И. Ермакова*. – Л.: Колос, 1972.
14. Овчаров К. Е. *Физиология формирования и прорастания семян*. – М.: Колос, 1976.
15. *Физиология и биохимия покоя и прорастания семян*. – М.: Колос, 1982.
16. Аксенов С. И., Аскоченская Н. А., Петунов Н. С. // *Физиология растений*. 1969. Т. 16. № 1. С. 71.
17. Shulepov M. A., Surnina E. N., Burenina A. A., Lipatov E. I. // *Proc. SPIE: XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*. 2019. Vol. 11322. P. 113222P. DOI: 10.1117/12.2550967.

PACS: 42.72.Bj; 33.20.Lg; 87.50.–a

Effect of XeCl excilamp UVB radiation on morphogenesis and structure of wheat crop (*Triticum aestivum* L.)

E. A. Sosnin^{1,2}, E. I. Lipatov^{1,2}, V. S. Skakun¹, A. A. Burenina², T. P. Astaphyrova², and E. N. Surnina²

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia

² Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

Received May 7, 2020

The results of laboratory and field studies of the effect of a single pre-sowing treatment of wheat seeds by UVB radiation of a barrier discharge exciplex lamp on XeCl molecules are presented. The optimal doses and timing of planting after processing for increasing the morphological parameters of wheat seedlings were identified. It is shown that under UVB irradiation hormesis manifests itself: the transition to processing subdoses provides a long-term effect in the field, increasing wheat yield indicators. The results confirm the characteristic of discussed physical method of seed stimulation as an environmentally safe technique of increasing plant productivity and crop quality.*

Keywords: hormesis, subdose, crop structure, UVB radiation, excilamp.

REFERENCES

1. C. M. Southam and J. Ehrlich, *Phytopathology*, No. 33, 517 (1943).
2. R. G. Belz and H.-P. Piepho, *PLoS ONE* **7**, e33432 (2012). DOI: 10.1371/journal.pone.0033432.
3. M. M. Caldwell, A. H. Teramura, and M. Tevini, *Trends in Ecology & Evolution* **4**, 363 (1989). DOI: 10.1016/S0169-5347(96)10062-8
4. O. G. Bender, E. A. Petrova, A. P. Zotikova et al., *Vestnik TSU*, No. 67 (2), 15 (2006).
5. E. A. Sosnin, Y. V. Chudinova, I. A. Victorova, and I. I. Volotko, in *Proc. SPIE: XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers*. **9810**, 98101K (2015). DOI: 10.1117/12.2224936.
6. D. Thomas, T. T. Jos, and T. Puthur, *Environ. Exp. Botany* **138** (6), 57 (2017). DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.03.003
7. A. Zahoranová, L. Hoppanová, J. Šimončicová, Z. Tučeková, V. Medvecká, D. Hudcová, B. Kaliňáková, D. Kováčik, and M. Černák, *Plasma Chem. Plasma Process* **35** (5), 969 (2018). DOI: 10.1007/s11090-018-9913-3.
8. R. Yin, M. Y. Skvortsova, S. Loubery, and R. Ulm, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **26** (113), E4415 (2016). DOI: 10.1073/pnas.1607074113.
9. K. C. Jisha, K. Vijayakumari, and J. T. Puthur, *Acta Physiol. Plant.* **35** (5), 1381 (2013). DOI: 10.1007/s11738-012-1186-5.
10. E. A. Sosnin, Yu. N. Kul'chin, and T. P. Astaphyrova, *Photon-express-nauka*, No. 6, 70 (2019). DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16031 [in Russian].
11. S. M. Avdeev, V. M. Orlovskii, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Russian Physics Journal* **60** (8), 1298 (2017). DOI: 10.1007/s11182-017-1211-7.
12. V. A. Dospekhov, *Methodology of field experience* (Kolos Publishing House, Moscow, 1985) [in Russian].
13. *Methods of biochemical research of plants* (Kolos Publishing House, Leningrad, 1972) [in Russian].
14. K. E. Ovcharov, *Physiology of seed formation and germination* (Kolos Publishing House, Moscow, 1976) [in Russian].
15. *Physiology and biochemistry of dormancy and germination of seeds* (Kolos Publishing House, Moscow, 1982) [in Russian].
16. S. I. Aksenov, N. A. Askochenskaya, and N. S. Petinov, *Plant physiology* **16** (1), 71 (1969) [in Russian].
17. M. A. Shulepov, E. N. Surnina, A. A. Burenina, and E. I. Lipatov, in *Proc. SPIE: XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications* **11322**, 113222P (2019). DOI: 10.1117/12.2550967.