

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ XI МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ “ХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА”
РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ

УДК 58.03: 54-77: 631.53.027.34

ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНО-
ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН И ПРОДУКТИВНОСТЬ ПШЕНИЦЫ

© 2021 г. А. А. Буренина^а, Т. П. Астафурова^а, Е. Н. Сурнина^{а, *}, А. Н. Бутенкова^а,
О. П. Кутенков^б, Э. А. Соснин^{а, б}, М. А. Большаков^{а, б}, В. В. Ростов^б

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

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

*E-mail: ensurnina@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2021 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принята к публикации 12.03.2021 г.

Изучено влияние предпосевной обработки семян пшеницы наносекундным импульсно-периодическим рентгеновским излучением (ИПРИ) с дозой 0.07 Гр и частотами повторения импульсов 13 и 25 Гц на посевные качества семян и продуктивность растений. После обработки семян ИПРИ с частотой 25 Гц увеличивались размеры зародыша и его частей, а также урожайность зерна на 10.5% относительно контроля. Полученные результаты показали перспективность дальнейших исследований механизмов стимулирующего действия и расширение спектра исследуемых хозяйственно-ценных культур с целью выявления их видо- и сортоспецифичности.

Ключевые слова: наносекундное импульсно-периодическое рентгеновское излучение, *Triticum aestivum* L, стимуляция, предпосевная обработка семян

DOI: 10.31857/S0023119321040057

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений в современной науке и технике является научное обоснование практического использования в сельском хозяйстве физических факторов воздействия, в частности ионизирующих излучений. Преимуществом их является: более высокая экологичность, сохранность ценных качеств и свойств облученной продукции, технологичность процессов радиационной обработки, повышенные экономические показатели [1].

Впервые эффект радиационной стимуляции был описан М. Мальдинеем и К. Тувиным в 1899 г. через три года после открытия рентгеновских лучей [2]. Ускорение прорастания семян, облученных рентгеновскими лучами, привлекло внимание многих исследователей. Так, в работе В.П. Чехова и И.К. Замараевой, начатой в 1930 г., проводилось облучение семян и растений (пшеница, бобовые, ячмень) в лабораторных и полевых условиях. В ходе опытов изучали проникаемость семян различных культур к излучению, влияние условий облучения на размеры опытных растений, воздействие рентгеновских лучей на

рост растений при облучении зародыша и эндосперма (в стадии сухих семян), а также летальные дозы для сухих и набухших семян. Дозы облучения варьировали ориентировочно от 300 до 1600 Гр. Было обнаружено, что снижение дозы облучения обеспечивает наибольшее стимулирующее действие на растения. Помимо того изучалась возможность предпосевной стимуляции сухих и влажных семян с последующим лабораторным и полевым выращиванием. В результате было впервые установлено, что сухие семена, вопреки ранее установившемуся мнению, также являются чувствительными к рентгеновским лучам [3].

В 1960–1980-е годы активно развивались методы радиационной предпосевной обработки семян с целью повышения урожая и улучшения качества продукции. В частности, было показано, что облучение семян сельскохозяйственных культур ускоряет прохождение первых фаз онтогенеза растений, сокращает сроки созревания и, в конечном итоге, приводит к увеличению урожая зерновых и картофеля на 5–20%. При этом дозы, рекомендуемые для радиационной стимуляции

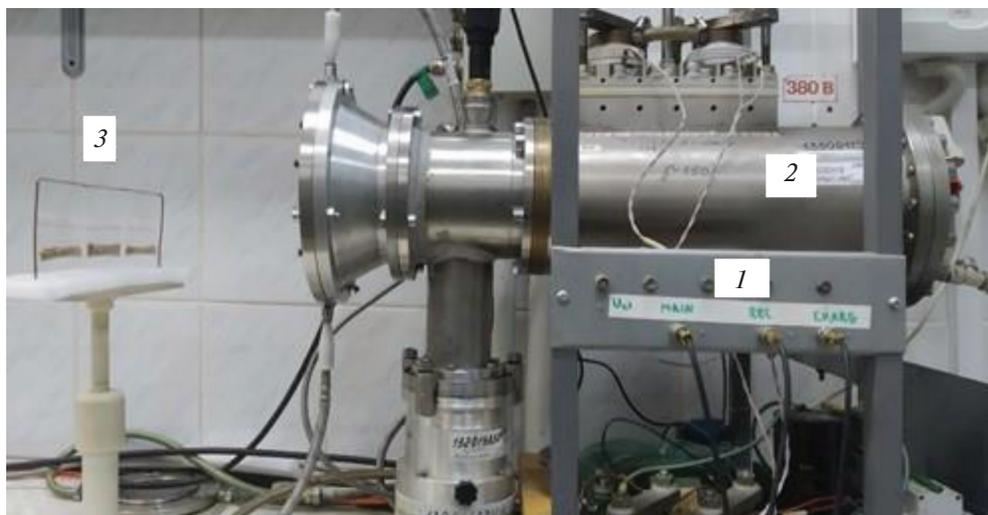


Рис. 1. Установка для облучения семян “СИНУС-150”: 1 – источник ИПРИ, 2 – излучатель ИПРИ, 3 – облучаемые семена пшеницы.

семян, составляли 3–40 Гр [1]. Предпосевное облучение семян способствует повышению экономической эффективности возделывания сельскохозяйственных культур за счет ускорения роста и развития растений, сокращения сроков созревания и увеличения урожайности.

В последние годы стали появляться данные о том, что импульсно-периодическое рентгеновское излучение эффективно влияет на различные биологические объекты и процессы при разных частотах повторения наносекундных импульсов и дозах менее 1 Гр [4–6]. Целью настоящей работы было выяснение возможности стимуляции развития растений (пшеницы) после однократной предпосевной обработки семян наносекундным ИПРИ с дозами менее 0.1 Гр.

МЕТОДИКА

Объектом исследования являлись семена мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень, посевные качества которых определяли по ГОСТ 12038. Перед закладкой опыта семена обрабатывали ИПРИ с поглощенной дозой 0.07 Гр и частотами повторения импульсов 13 и 25 Гц. В качестве контроля использовали необработанные семена.

Источником рентгеновского излучения служил лабораторный ускоритель электронов “Синус-150” Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск), обеспечивающий ускоряющее напряжение 270 кВ, ток электронного пучка 2.5 кА, длительность импульса на полувысоте 4 нс. В режиме генерации ИПРИ это обеспечивает импульсные дозы рентгеновского излучения до 100 мР за импульс и с энергией фотонов в диапазоне 90–

120 кэВ. [7]. Пакеты с зерном пшеницы (по 100 зерен) однократно подвергались действию 4000 импульсов с дозой 1.8 мР за импульс с частотами повторения 13 и 25 Гц (рис. 1).

Выбор дозы и частот повторения режимов облучения зерна обусловлен результатами ранее проведенных экспериментов (данные не опубликованы). Измерение проводилось с помощью электростатического дозиметра с кварцевым волокном Argow-Tech 138 (Argow-Tech, Inc. США), измеряющего экспозиционные дозы. Поскольку биологические эффекты определяются величиной поглощенной дозы, то измеренные величины экспозиционной дозы пересчитывались в величины поглощенной дозы, исходя из соотношения: экспозиционная доза 1 Р с погрешностью до 5% соответствует поглощенной дозе 0.873 рад в воздухе или 0.95 рад в биологической ткани, что соответствует 0.0095 Гр. Текущий контроль облучения зерен осуществляли с помощью осциллографа TDS-6604 (Tektronix Inc., США) и датчика, установленного непосредственно в излучателе ИПРИ.

Полевые исследования проводили на территории Учебно-экспериментального участка СибБС ТГУ (г. Томск) согласно методике Б. А. Доспехова [9]. Площадь листьев пшеницы определяли по линейным размерам листа, умноженным на расчетный коэффициент (для пшеницы – 0.67) [10]. Чистую продуктивность фотосинтеза рассчитывали по формуле Кидда, Веста и Брикса [10]. Качество зерна определяли на инфракрасном спектрофотометре Инфралам ФТ-10 (Россия).

Таблица 1. Анатомические показатели семян пшеницы после обработки ИПРИ

Вариант опыта	ППС почечки, мм ²	ППС зародышевого корешка, мм ²	ППС зародыша, мм ²
Контроль	1.71 ± 0.05	1.69 ± 0.10	3.40 ± 0.14
13 Гц	1.65 ± 0.04	1.50 ± 0.10	3.15 ± 0.12
25 Гц	2.00 ± 0.07*	1.85 ± 0.09*	3.84 ± 0.15*

Примечание. ПСС – площадь продольного сечения, знаком * отмечены достоверные различия при $p \leq 0.05$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Имеются данные, что малые дозы рентгеновского облучения могут положительно влиять на всхожесть и урожайность различных видов растений. Так, облучение семян солодки и клематиса рентгеновскими и гамма-лучами в стимулирующей дозе 1.0, 1.5 и 5.0 Гр способствовало более ускоренному их развитию, а также увеличению всхожести в среднем на 20–60% [11, 12].

Исследования, проведенные с семенами пшеницы в лабораторных условиях показали, что через сутки после набухания у семян, подвергнутых облучению ИПРИ при частоте импульсов 25 Гц отмечено увеличение размеров зародыша на 9–17% относительно контроля (табл. 1, рис. 2). Это указывает на то, что предпосевная обработка семян пшеницы ИПРИ с указанной частотой может ускорять прорастание семян.

Одним из основных посевных показателей семян являются их лабораторные энергия прорастания и всхожесть. По требованиям к качеству семян зерновых культур всхожесть должна быть не менее 92% (Гост Р 52325). В нашей работе использовались семена, у которых энергия прорастания составила 88%, а лабораторная всхожесть 90%, что ниже нормы. Несмотря на пониженный процент лабораторной всхожести, отмечена тенденция к увеличению полевой всхожести семян, прошедших однократную предпосевную обработку ИПРИ с частотами повторения рентгеновских импульсов 13 и 25 Гц. Так, в контроле полевая всхожесть составила $34.92 \pm 3.00\%$, а у облученных семян с частотами повторения 13 и 25 Гц со-

ответственно $38.96 \pm 3.07\%$ и $38.63 \pm 1.72\%$. Также отмечено увеличение длины корня пшеницы и площади листовой поверхности в разные сроки измерений, а также весовых параметров. Площадь листовой поверхности растений в опытных вариантах достигала максимума в фазу кушения (30 дней), у контроля – в фазу колошения (37 дней), а затем уменьшалась к фазе созревания семян за счет отмирания нижних листьев. Статистически значимое увеличение показателей наблюдалось при частоте повторения импульсов 13 и 25 Гц на 27.5 и 32.2% соответственно в фазу кушения (рис. 3а). Значения удельной поверхностной плотности листа (УППЛ) были схожими и увеличивались в процессе онтогенеза растений – от 3.87 мг/см² в фазу начала кушения до 5.93 мг/см² в фазу начала созревания семян (рис. 3б). Отмечена тенденция увеличения длины корня, сухой массы надземной части и корня в фазе созревания семян (52 дня) при частоте повторения импульсов 13 и 25 Гц, на 12.1–32.3% в зависимости от показателя (рис. 4).

В формировании урожайности большую роль выполняют фотосинтетические процессы, за счет которых образуется основная масса органического вещества. Одним из показателей фотосинтетической деятельности растений является чистая продуктивность фотосинтеза (ЧПФ), характеризующая накопление вегетативной массы за определенный период времени. Проведенные исследования показали, что ЧПФ в фазе кушения – колошения в контрольном варианте составила 3.77 ± 0.23 г/м² в сутки, у опытных вариантов с обработкой ИПРИ



Рис. 2. Анатомия семян пшеницы (срезы семян спустя 1 день после замачивания).

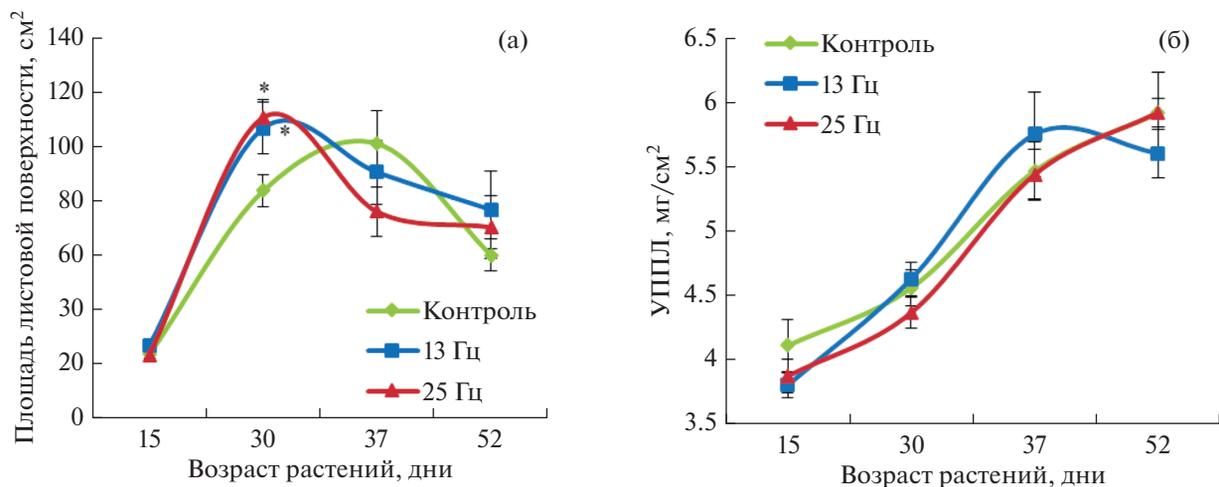


Рис. 3. Влияние обработки ИПРИ на площадь листовой поверхности (а) и УППЛ (б). * – достоверные различия между контролем и опытом при $p \leq 0.05$

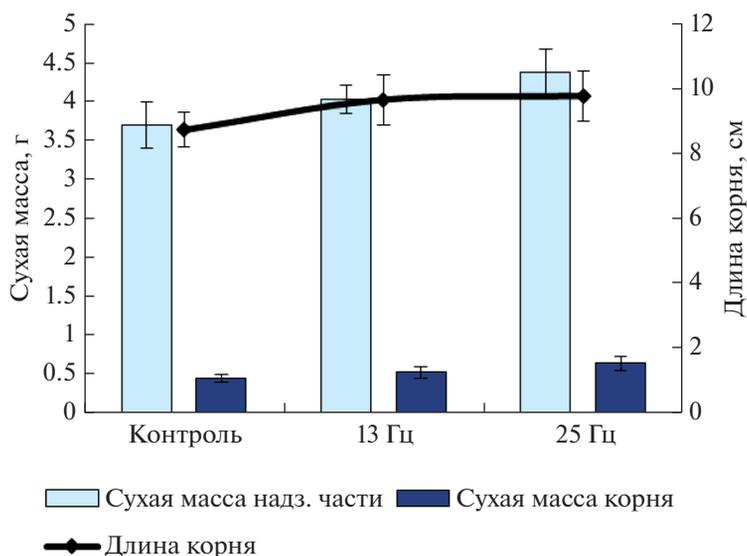


Рис. 4. Влияние обработки ИПРИ на длину корня и весовые параметры пшеницы в фазу созревания семян.

при частоте повторения импульсов 13 и 25 Гц показатели превышали контроль на 6.9 и 10.1% соответственно.

Урожайность яровой пшеницы в значительной степени зависит от числа растений на единицу площади, продуктивной кустистости, массы 1000 штук семян, количества зерен в колосе и выживаемости растений. Анализ данных в конце вегетационного периода показал, что воздействие ИПРИ на семена оказало влияние на структуру урожая пшеницы. При частоте повторения импульсов 25 Гц увеличилось количество продуктивных побегов на 13.2%, а урожайность зерна на 10.5% относительно контрольных значений (табл. 2). При 13 Гц количество продуктивных по-

бегов также увеличилось, а урожайность зерна возросла на 7.9% по сравнению с контролем.

Наряду с урожайностью важным показателем является качество зерна и содержание таких основных компонентов как белок и клейковина. Белок (протеин) – исключительно важное питательное вещество, определяющее пищевую ценность зерна. Белок хлебных злаков включает незаменимые аминокислоты, которые не синтезируются в животном организме: лизин, метионин, треонин, триптофан и др. Селекционеры работают над повышением их содержания в зерне [13]. По литературным данным известно, что существенное влияние на содержание белка в зерне пшеницы оказывают экологические факторы, условия веге-

Таблица 2. Влияние уровня облученности ИПРИ на структуру урожая пшеницы

Параметры	Вариант опыта		
	контроль	13 Гц	25 Гц
Высота растений, см	107.11 ± 0.85	106.43 ± 0.80	105.99 ± 0.86
Количество продуктивных побегов	242.00 ± 6.42	259.75 ± 10.10	274.00 ± 8.95*
Длина колоса, см	9.08 ± 0.13	8.79 ± 0.10	9.03 ± 0.12
Масса колоса, г	1.80 ± 0.05	1.74 ± 0.04	1.85 ± 0.05
Число зерен в колосе, шт	33.2 ± 0.80	31.63 ± 0.53	33.3 ± 0.73
Масса зерна в колосе, г	1.42 ± 0.04	1.37 ± 0.03	1.46 ± 0.04
Масса 1000 шт. семян, г	42.18 ± 0.87	41.76 ± 0.57	43.11 ± 0.71
Урожайность зерна, г/м ²	245.61 ± 6.28	265.05 ± 9.19	271.42 ± 7.37*

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

тационного периода, наследственные особенности сортов, а также взаимодействие между ними [14]. В настоящей работе было показано, что предпосевная обработка семян ИПРИ не оказала отрицательного воздействия на качество зерна пшеницы нового урожая, а в варианте с частотой облучения 13 Гц отмечена тенденция к увеличению содержания белка и клейковины. Так, содержание белка в контроле составило $15.57 \pm 0.19\%$, в вариантах с частотой облучения 13 и 25 Гц – $16.03 \pm 0.24\%$ и $15.67 \pm 0.26\%$. Содержание клейковины в контроле было $26.74 \pm 1.17\%$, а при облучении 13 и 25 Гц – $27.22 \pm 0.41\%$ и $26.46 \pm 0.91\%$ соответственно.

Таким образом, однократная предпосевная обработка семян пшеницы с. Ирень длительного срока хранения оказала стимулирующий эффект на рост и развитие растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенной работы подтвердили возможность стимулирующего действия малых доз наносекундного импульсно-периодического рентгеновского излучения на семена пшеницы. После обработки семян ИПРИ с поглощенной дозой 0.07 Гр при частоте повторения импульсов 25 Гц увеличивались размеры зародыша и его частей, а урожайность зерна превышала контроль на 10.5%. При частоте повторения импульсов 13 Гц урожайность зерна увеличилась на 7.9%.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ, проект № 8.1.29.2018 и частично в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Павлов А.Н.* // Вестник Российской академии естественных наук. 2014. № 1. С. 78.
2. *Гродзинский Д.М.* Радиобиология растений. Киев: Наукова думка, 1989. 384 с.
3. *Чехов В.П., Замараева И.К.* // Труды Томского государственного университета. 1932. Т. 85. С. 23.
4. *Litvyakov N.V., Rostov V.V., Buldakov M.A., Bolshakov M.A., Afanas'ev K.A., Astapenko A.N., Kutenkov O.P., Cherdentstva N.V.* // Biophysics (Suppl. 1). 2005. V. 50. P. 51.
5. *Большаков М.А., Либрихт О.К., Князева И.Р., Ельчанинов А.А., Климов А.И., Ростов В.В.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 1. С. 22.
6. *Васильев С.А., Степанова Е.Ю., Кутенков О.П., Беленко А.А., Жаркова Л.П., Лебедев И.Н., Большаков М.А., Ростов В.В.* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 1. С. 31.
7. *Артемов К.П., Ельчанинов А.А., Кутенков О.П. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 66.
8. Погода и климат: справочно-информационный портал [Электронный ресурс]. 2004–2019. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 10.11.2020).
9. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 351 с.
10. *Гродзинский А.М., Гродзинский Д.М.* Краткий справочник по физиологии растений. К.: Наукова думка, 1973. 591 с.
11. *Лаханова К.М., Сарсембаева М.У.* // Успехи современного естествознания. 2015. № 6. С. 119.
12. *Коротков О.И., Зубкова Н.В.* // Сборник научных трудов ГНБС. 2017. Т. 145. С. 280.
13. *Жилкин А.А., Тютюма Н.В.* // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2003. № 8. С. 94.
14. *Поладова Г.Г.* // Аграрная наука. 2011. № 12. С. 13.