

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

УДК 53.047,53.097,537.533.9,537.533.2

ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В АТМОСФЕРЕ

© 2021 г. С. Ю. Дорошкевич^а, К. П. Артёмов^а, Н. Н. Терещенко^{б,е}, Т. И. Зюбанова^{б,е},
М. С. Воробьёв^{а,*}, Е. Е. Акимова^{б,е}, О. М. Минаева^{б,е}, Е. А. Покровская^с,
В. И. Шин^{а,д}, М. С. Торба^{а,д}, В. А. Леванисов^д

^аИнститут сильноточной электроники СО РАН, просп. Академический 2/3, Томск, 634055 Россия

^бСибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий Российской академии наук, ул. Гагарина, 3 (а/я 1668), Томск, 634050 Россия

^сНациональный исследовательский Томский политехнический университет,
просп. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия

^дТомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
просп. Ленина, 40, Томск, 634050 Россия

^еНациональный исследовательский Томский государственный университет, просп. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

*E-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 05.03.2021 г.

Принята к публикации 12.03.2021 г.

Цель данной работы заключалась в поиске оптимальных режимов предпосевной обработки семян яровой пшеницы импульсным низкоэнергетическим электронным пучком. Для выбора оптимальных режимов облучения измерена и рассчитана величина поглощенной дозы в пшенице. В результате биотестирования выявлено улучшение морфологических параметров проростков пшеницы при режиме: энергия пучка 100 кэВ, поглощенная доза 15 кГр. Зависимость между интенсивностью облучения семян и откликом фитопатогенной микрофлоры имеет нелинейный характер, при этом происходит частичное обеззараживание зерна.

Ключевые слова: электронный пучок, яровая пшеница, обработка пучком электронов, поглощенная доза

DOI: 10.31857/S0023119321040069

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире высокотехнологичная обработка, к которой можно отнести обработку пучками заряженных частиц, находит все большее распространение в разных областях промышленности, науки и техники [1, 2]. В частности, обработка низкоэнергетическими электронными пучками с энергиями до 300 кэВ позволяет воздействовать на материалы, не оказывая при этом существенного влияния на глубине более 1 мм. А, как известно, именно предпосевная обработка поверхностного слоя зерна является одной из наиболее актуальных задач, поскольку, в данном случае, воздействие низкоэнергетического электронного пучка позволяет проводить дезинфекцию и дезинсекцию поверхности зерна, не только не повреждая зародыш, но и обеспечивая его стимуляцию за счет действия тормозного рентгеновского излучения [3, 4].

При этом по сравнению с такими традиционно используемыми в растениеводстве методами химической и физической предпосевной обработки как опрыскивание семян стимуляторами роста растений, растворами микроэлементов и т.п., прогрев токами высокой частоты, ультрафиолетовое и лазерное облучение, метод облучения ионизирующим излучением имеет преимущества по интенсивности воздействия на объекты и по стабильности получаемых результатов [5].

Основной целью исследований, представленных в данной статье, было изучение влияния на всхожесть семян яровой пшеницы облучения импульсным электронным пучком средних энергий (100–160 кэВ), основных морфометрических параметров и степени поражения растений возбудителями корневых гнилей с определением оптимальных режимов облучения.

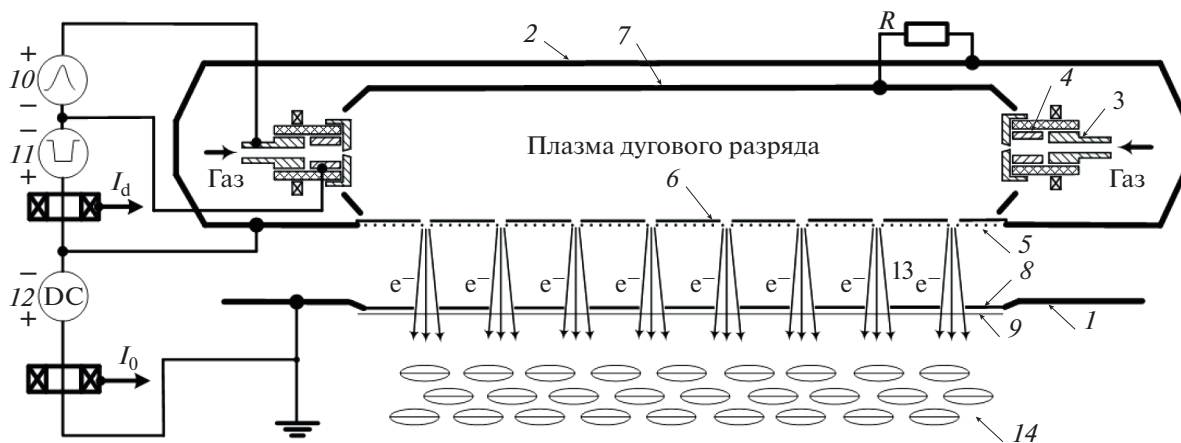


Рис. 1. Схема ускорителя электронов с сетчатым плазменным катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный эмиттер; 3 – катод; 4 – поджигающий электрод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга; 10 – источник питания поджига; 11 – источник питания разряда; 12 – источник высокого напряжения; 13 – пучок электронов; 14 – зерно.

В качестве тест-объекта была выбрана яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), сорт Ирень (разновидность – мильтурум) [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты по предпосевной обработке зерна проводились на широкоапертурном ускорителе электронов “Дуэт” (рис. 1) с выводом пучка в атмосферу [7]. Ускоритель позволяет формировать электронный пучок сечением $750 \times 150 \text{ мм}^2$ в импульсно-периодическом режиме со следующими параметрами: энергия электронов 100–200 кэВ; амплитуда тока пучка в атмосфере 5–30 А; длительность импульсов тока пучка 10–300 мкс; частота следования импульсов $1\text{--}50 \text{ с}^{-1}$; неоднородность плотности тока по сечению пучка $\pm 10\%$; максимальная средняя мощность пучка в атмосфере 5 кВт; плотность энергии пучка в атмосфере $10\text{--}500 \text{ мДж см}^{-2}/\text{имп}$. Благодаря сетчатой/слоевой стабилизации границы эмиссионной плазмы в ускорителях такого типа, параметры пучка имеют широкий диапазон регулировки и слабо зависят друг от друга.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

Измерения поглощенной дозы проводились с использованием стандартных образцов пленочных дозиметров СО ПД(Э)-1/10 (поглощенная доза 1–10 кГр, размер $10 \times 30 \text{ мм}$, погрешность измерения $\leq 15\%$). Стандартный образец представляет собой упаковку, в которой находятся три пленки. Каждая пленка имеет основу из лавсана толщиной 100 мкм и чувствительный слой 30 мкм. Поскольку при энергиях электронного пучка 100–200 кэВ длина пробега электронов сравнима с толщиной

пленки, то облучение стопки пленок позволяет измерить распределение дозы по глубине. При облучении трех пленок, сложенных стопкой, измерение дозы можно представить следующим образом: верхняя пленка (самая ближняя к пучку) фиксирует дозу непосредственно на поверхности глубиной 30 мкм, средняя пленка – на глубине 130–160 мкм, нижняя – на глубине 260–290 мкм. Измерение оптической плотности пленок проводилось с помощью спектрофотометра СПЕКС ССП 715-1 на длине волны 550 нм.

Измерение дозы при разных ускоряющих напряжениях проводились при одинаковой плотности энергии пучка ($15 \text{ Дж см}^{-2}/\text{имп}$) путем изменения длительности импульса пучка при сохранении его амплитуды тока. В табл. 1 приведены значения поглощенной дозы в зависимости от количества импульсов и энергии пучка. В каждом режиме облучалось одновременно три пленки, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 30 мм от выводного фольгового окна, затем измерялась их оптическая плотность относительно опорного образца, рассчитывалось среднее арифметическое оптической плотности, и определялась поглощенная доза в данном режиме.

Из табл. 1 видно, что поглощенная доза пропорциональна количеству импульсов с учетом погрешности измерения дозиметрических пленок и условий поставленного эксперимента. В режиме 100 кэВ и $N = 4$ импульсов оптическая плотность превысила предел измерения данных пленок ($1.19 = 10.0 \text{ кГр}$), поэтому более точное значение дозы в данном режиме измерить не удалось. Повышение энергии электронов приводит к тому, что большее число электронов способно преодолеть первую дозиметрическую пленку без взаимодействия с ней, что хорошо видно из табл. 1,

Таблица 1. Измеренная поглощенная доза в зависимости от ускоряющего напряжения

Количество импульсов	Энергия электронов, кэВ	Средняя оптическая плотность	Поглощенная доза, кГр
1	100	0.40	3.3
2		0.78	6.5
4		1.21	>10
1	130	0.36	3
2		0.77	6.4
4		1.16	9.8
1	160	0.20	1.6
2		0.36	3
4		0.66	5.5

Таблица 2. Распределение поглощенной дозы по глубине

Количество импульсов	Энергия электронов, кэВ	Верхняя пленка		Средняя пленка	
		Оптическая плотность	Поглощенная доза, кГр	Оптическая плотность	Поглощенная доза, кГр
2	100	0.61	5.1	0.00	0
20		1.34	>10	0.02	<1
2	130	0.66	5.5	0.00	0
20		1.36	>10	0.01	<1
2	160	0.35	2.9	0.08	<1
20		1.35	>10	0.86	7.2

когда увеличение энергии до 160 кэВ приводит к снижению поглощенной дозы в первой пленке. Сходство поглощенной дозы при 100 и 130 кэВ, вероятно, связано с тем, что для этих энергий большая часть электронов имеет длину пробега в пленке меньшую или равную толщине этой пленки.

Чтобы измерить распределение поглощенной дозы по глубине облучалась стопка из трех дозиметрических пленок (табл. 2). В серии из 20-ти импульсов верхняя пленка темнеет настолько, что значение оптической плотности уходит в насыщение, но при этом в средней пленке фиксируется некоторое значение поглощенной дозы, которую не позволяет зафиксировать серия из двух импульсов. Нижний предел измерения используемых пленочных дозиметров составляет 1 кГр, что соответствует 0.12 оптической плотности относительно опорного образца, поэтому более точно определить дозу <1 кГр с данными пленками не представляется возможным. Таким образом при энергии электронов 100 и 130 кэВ в средней пленке фиксируется доза на уровне погрешности измерений. При энергии 160 кэВ в средней

пленке зафиксировано 7.2 кГр за 20 импульсов, следовательно, за один импульс доза в средней пленке (на глубине 130–160 мкм) составляет около 0.36 кГр. Нижняя пленка зафиксировала отличную от опорного образца оптическую плотность (0.02) только при режиме 160 кэВ 20 импульсов. Из этого можно сделать следующий вывод: при обработке электронами с энергией 100–130 кэВ суммарная вводимая в образец доза сосредоточена на глубине до 130 мкм, а при энергии 160 кэВ происходит распределение дозы по глубине до 260 мкм.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ

Для верификации результатов измерений пленочными дозиметрами, было проведено численное моделирование. Используемый в работе код ЕРНСА2 [8], основанный на методе Монте-Карло, позволяет в барьерной геометрии моделировать прохождение электронов, позитронов и фотонов через различные среды (либо набор сред) с учетом потерь энергии, упругого и неупругого рассеяния, а также генерации тормозного излучения. Область моделирования состояла из нескольких слоев: алю-

Таблица 3. Величины доз в трех слоях воды для различных начальных энергий

Слой воды (номер пленки)	Энергия электронов, кэВ	Доза на один электрон, Гр	Полная поглощенная доза, кГр
1	100	2.75×10^{-10}	3.10
2		0	0
3		0	0
1	130	1.04×10^{-9}	4.53
2		2.03×10^{-12}	0.01
3		0	0
1	160	1.15×10^{-9}	2.16
2		3.36×10^{-10}	0.63
3		0	0

Таблица 4. Поглощенная доза на один электрон на разной толщине слоя углерода в зависимости от начальной энергии электронов

Толщина слоя углерода, мм	Доза в слоях углерода на один электрон, Гр						
	100 кэВ	110 кэВ	120 кэВ	130 кэВ	140 кэВ	150 кэВ	160 кэВ
0.0–0.05	1.64×10^{-10}	4.16×10^{-10}	6.69×10^{-10}	8.52×10^{-10}	9.55×10^{-10}	1.01×10^{-9}	1.02×10^{-9}
0.05–0.25	2.22×10^{-13}	5.52×10^{-12}	2.81×10^{-11}	7.19×10^{-11}	1.34×10^{-10}	2.05×10^{-10}	2.82×10^{-10}
0.25–0.75	5.97×10^{-15}	8.85×10^{-15}	7.87×10^{-15}	9.72×10^{-15}	1.11×10^{-14}	1.07×10^{-14}	1.21×10^{-14}

миниевая фольга толщиной 30 мкм (закрывает выводное окно установки), слой воздуха толщиной 30 мм (воздушный зазор между выводным окном и облучаемым объектом) и последовательный набор слоев: вода, лавсан, вода, лавсан, вода, лавсан. Электроны инжектировались в расчетную область с левой границы с начальной энергией 100–160 кэВ. Оценка дозы в моделировании проводилась для слоев воды той же толщины, что и чувствительный слой пленки 30 мкм. Толщина слоев лавсана составляла 100 мкм. Все дозы (табл. 3), полученные в моделировании, отражают поглощенную дозу, которую создает один электрон в мишени площадью 1 см². Для расчета полной поглощенной дозы *D* в слое использовалась формула

$$D = (j \times t_{pulse} \times D_e) / q_e, \tag{1}$$

в которой *j* – плотность электронного тока пучка 10 мА/см², *D_e* – поглощенная доза, приведенная к одному электрону, *t_{pulse}* – длительность импульса 90, 35 и 15 мкс для энергии 100, 130 и 160 кэВ соответственно, *q_e* – заряд электрона.

Из полученных данных (табл. 1, 2 и 3) видно, что результаты моделирования качественно подтверждают распределение поглощенной дозы, полученное при измерении пленочными дозиметрами. Некоторые расхождения могут быть

вызваны погрешностью пленочных дозиметров, недостаточной энергией электронов для применения данных дозиметров (рабочий интервал энергий 0.3–10 МэВ), неоднородностью плотности тока пучка в масштабе одной ячейки выводного окна ускорителя.

Далее было проведено моделирование распределения поглощенной дозы в зерне по глубине. Область моделирования так же состояла из нескольких слоев: алюминиевая фольга 30 мкм, слой воздуха 30 мм, слой углерода 1 мм (имитирует сплошной одинарный слой зерен) с плотностью равной плотности зерна пшеницы 1.3 г/см³. На рис. 2 приведено распределение дозы по глубине для различных начальных энергий электронов пучка. Видно, что основная часть электронов с начальной энергией до 160 кэВ поглощается во внешнем слое углерода толщиной менее 250 мкм (семенная оболочка зерна), там же создается и основная доза. Внутренняя часть углеродного слоя (эндосперм) облучается существенно меньше. Основным источником дозы во внутренней части – тормозное рентгеновское излучение, генерируемое во внешнем слое и, в значительно меньшей степени в фольге выводного окна. В табл. 4 приведены численные значения поглощенной дозы по толщине слоя. Полученные значения позволяют оценить суммарную поглощенную дозу в раз-

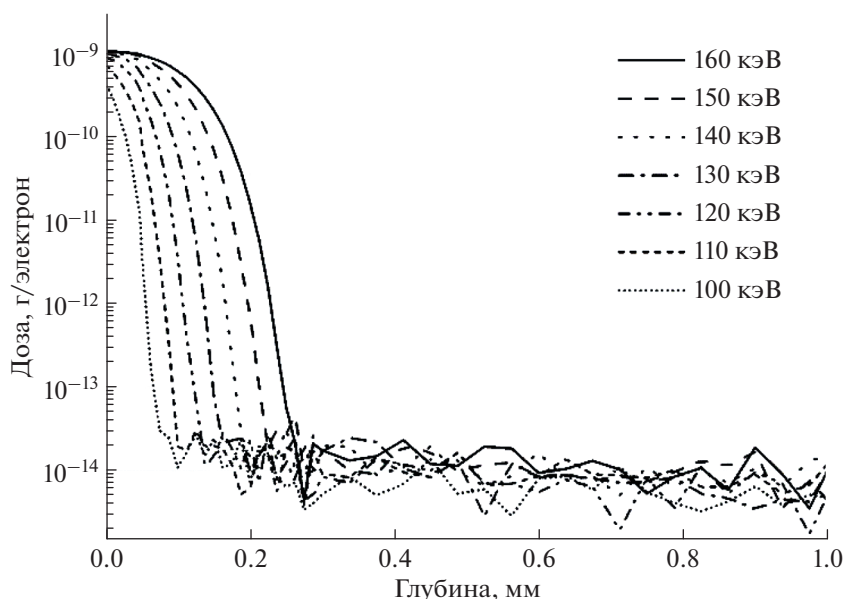


Рис. 2. Распределение поглощенной дозы в модельном слое пшеницы в зависимости от начальной энергии электронов.

ных слоях зерна при разных энергиях электронов, используя формулу (1).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком проводилась с одной стороны, на расстоянии 30 мм от выводной фольги ускорителя. Оценку воздействия различных режимов обработки проводили рулонным методом. Инкубационный период составлял 7 сут. Результаты биотестирования (4-х кратная повторность) сравнивались с контрольными необработанными семенами. Всхожесть выражали как процент проросших семян от общего числа семян, заложенных в рулон. Морфометрические показатели включали высоту проростков, сырую массу и массу высушенных проростков. Интенсивность поражения проростков возбудителями корневых гнилей оценивали по стандартной методике в соответствии с рекомендациями [9]. В предварительных экспериментах обработка пшеницы электронным пучком с энергией 160 кэВ приводила к практически полному ингибированию роста семян, поэтому далее рассматривались режимы при 100 и 130 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты модельного эксперимента с предпосевным облучением семян яровой пшеницы в исследованных режимах импульсного электронного воздействия показали, что положительное влияние на всхожесть семян оказало облучение,

характеризующееся наименьшей энергией электронов 100 кэВ, но наибольшей поверхностной дозой облучения — 15 кГр. При более высокой энергии (130 кэВ), независимо от дозы облучения, были отмечены эффекты снижения всхожести семян (табл. 5).

Как известно одной из основных задач предпосевного облучения семян ускоренными электронами является уменьшение степени их обсеменения фитопатогенными микроорганизмами. Однако ряд авторов отмечают, что режимы обработки, обеспечивающие выраженный бактерицидный и фунгистатический эффект, к сожалению, как правило, оказывают ингибирующее воздействие на показатели всхожести облученных семян [10]. В связи с этим подбор оптимальных параметров облучения, не оказывающих при этом негативного влияния на рост и развитие растений, по-видимому, является одной из наиболее актуальных задач при разработке способов предпосевного обеззараживания семян с использованием источников ионизирующего облучения.

Результаты модельного эксперимента показали, что режим обработки, обусловивший максимальные показатели всхожести семян, одновременно оказал статистически достоверное воздействие на увеличение высоты и массы растений яровой пшеницы. Так при энергии 100 кэВ и поверхностной дозе 15 кГр высота растений была на 11.6% выше, чем в контроле. Прибавка зеленой массы по сравнению с вариантом без облучения составила 6% (табл. 5).

Увеличение энергии электронов до 130 кэВ даже при малой поверхностной дозе облучения

Таблица 5. Влияние различных режимов облучения семян электронным пучком на всхожесть и основные морфометрические параметры проростков яровой пшеницы

Режимы обработки семян	Всхожесть, %	Высота растений, см	Масса 100 сырых растений, г	Масса 100 сухих растений, г
Контроль	93.0 ^{+2.6} _{-3.2}	8.17 ± 0.21	8.96 ± 0.07	0.65 ± 0.01
100 кэВ, 3 кГр	90.5 ^{+2.7} _{-3.1}	8.62 ± 0.20	9.25 ± 0.26	0.67 ± 0.02
100 кэВ, 15кГр	94.0 ^{+2.4} _{-2.9}	9.12 ± 0.21	9.49 ± 0.11	0.67 ± 0.01
130 кэВ, 3 кГр	88.0 ^{+3.4} _{-3.9}	7.89 ± 0.20	8.16 ± 0.53	0.65 ± 0.02
130 кэВ, 15 кГр	89.3 ^{+3.2} _{-3.7}	7.59 ± 0.26	7.62 ± 0.12	0.63 ± 0.01

Таблица 6. Влияние различных режимов облучения семян ускоренными электронами на зараженность проростков возбудителями корневых гнилей

Режимы обработки семян	Общая зараженность, %	Фузариоз, %	Гельминтоспориоз, %	Альтернариоз, %	Плесневые грибы, %
Контроль	59.0 ± 5.5	2.67	17.33	34.00	4.67
100 кэВ, 3кГр	66.0 ± 4.6	2.25	29.75	30.25	3.75
100 кэВ, 15кГр	57.3 ± 5.6	0.67	23.33	30.66	2.00
130 кэВ, 3 кГр	58.0 ± 5.6	2.67	22.33	27.67	5.33
130 кэВ, 15кГр	51.6 ± 5.7	3.00	11.67	31.67	4.33

(3 кГр) оказало негативное воздействие на семена пшеницы, обусловив тенденцию к снижению высоты и массы растений. При этом увеличение поверхностной дозы облучения до 15 кГр вызвало уже статистически достоверное ингибирование роста яровой пшеницы: высота растений по сравнению с контролем снизилась более чем на 7%, а масса растений – почти на 15% (табл. 5).

Предпринятый в модельном опыте анализ степени поражения растений яровой пшеницы возбудителями корневых гнилей показал, что характер воздействия облучения на грибную флору, колонизирующую поверхность семян, носит нелинейный характер. Так, в частности, максимальная по интенсивности облучения обработка (130 кэВ, 15 кГр) обусловила тенденцию к снижению степени общей зараженности растений грибами, тогда как минимальная по интенсивности облучения обработка (100 кэВ, 3 кГр), напротив, способствовала росту данного показателя (табл. 6). Аналогичные нелинейные эффекты были отмечены в работах [11, 12], где исследовалась эффективность облучения нескольких микробных штаммов ускоренными электронами.

В проведенном эксперименте при учете численности грибов разных систематических групп было установлено, что в составе грибного консорциума доминируют представители родов *Helminthosporium* и *Alternaria*. При этом реакция грибов, вызывающих гельминтоспориозную корневую

гниль, в ответ на облучение семян, в целом соответствует тем закономерностям, что были получены для общей зараженности семян грибами. Все режимы облучения, кроме наиболее интенсивного, обусловили тенденцию к увеличению степени поражения растений гельминтоспориозной корневой гнилью. Только при облучении семян электронным пучком с энергией 130 кэВ и дозой облучения 15 кГр было отмечено более чем 30% снижение степени заражения растений возбудителями гельминтоспориоза (табл. 6).

Другой опасный возбудитель корневой гнили злаковых – грибы рода *Fusarium*, оказался более устойчивым к воздействию исследуемых режимов облучения. Как видно из табл. 6, даже наиболее интенсивный режим облучения не оказал ингибирующего воздействия на численность данных грибов. Только при облучении семян электронным пучком с энергией 100 кэВ и дозой облучения 15кГр было отмечено значительное, почти 80%-ное, снижение степени поражения растений фузариозом, однако для проверки степени достоверности данного эффекта необходимы дополнительные исследования.

Грибы рода *Alternaria* под воздействием использованных режимов облучения демонстрировали тенденцию к незначительному снижению своей численности (табл. 6).

Таким образом, результаты предпринятых исследований по оценке эффективности предпосевного облучения семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком показали, что для целей стимулирования всхожести, роста и развития растений яровой пшеницы и для целей поверхностного обеззараживания семян оптимальными являются разные режимы облучения. Несовпадение параметров облучения, обуславливающих ростостимулирующие и бактерицидные эффекты является одной из серьезных проблем, возникающих при разработке оптимальных режимов предпосевного облучения семян быстрыми электронами. Как правило, для стимулирования всхожести семян и ускорения последующего роста и развития растений оптимальными являются более мягкие режимы облучения, которые, к сожалению, не оказывают достаточно сильного воздействия на фитопатогенную микрофлору, колонизирующую поверхностные и подповерхностные оболочки семян.

С другой стороны, предпринятые нами исследования подтвердили нелинейный характер зависимости между интенсивностью облучения семян и откликом фитопатогенной микрофлоры, что обуславливает необходимость более детального исследования “доза–эффект” закономерностей. По этой причине исследования, направленные на подбор режимов ионизирующего облучения, приемлемых одновременно как для стимулирования роста и развития растений, так и для целей обеззараживания посевного материала, на данном этапе исследований являются наиболее актуальными.

ВЫВОДЫ

В данной работе с помощью пленочных дозиметров была определена поглощенная доза в поверхности зерна, необходимая для выбора оптимального режима обработки. Данные измерений подтверждаются моделированием в коде EPNCA2. Кроме того, полученные значения дозы на один электрон позволяют оценить суммарную поглощенную дозу в разных слоях пшеницы при энергиях 100–160 кэВ.

Наиболее оптимальным режимом облучения электронным пучком семян яровой пшеницы, обеспечивающим увеличение высоты растений пшеницы на 11.6% и увеличение массы растений на 6%, является режим, характеризующийся энергией 100 кэВ и дозой облучения 15 кГр.

Все исследованные режимы облучения семян электронным пучком не обеспечили необходи-

мой степени обеззараживания семян. Тенденция к частичному обеззараживанию семян от грибной микрофлоры была отмечена только при использовании наиболее интенсивного режима облучения, характеризующегося энергией 130 кэВ и дозой облучения 15 кГр.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев М.С., Денисов В.В., Коваль Н.Н., Шугуров В.В., Яковлев В.В., Уетура К., Рахаржо Р. // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 3. С. 169.
2. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 224 с.
3. Loy N.N., Sanzharova N.I., Gulina S.N., Vorobiyov M.S., Koval N.N., Doroshkevich S. Yu., Chizh T.V. and Suslova O.V. // J. Phys.: Conf. Ser., 2019. V. 1393. 012107.
4. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
5. Физика. Технологии. Инновации / Под ред. Рычкова В. Н., Екатеринбург: УРФУ, 2015. 358 с.
6. Уральский НИИСХ филиал ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН. Растениеводство / Яровая пшеница [Электронный ресурс]. URL: http://uralniishoz.ru/progress/rastenievodstvo_1/rastenievodstvo/ (дата обращения 19.12.2019).
7. Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 112.
8. Беспалов В.И. // Изв. высш. уч. зав. Физика. 2000. Т. 43. № 4. С. 159.
9. ГОСТ 12044-93 Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. М.: Стандартинформ, 2011.
10. Bhat R., Sridhar K.R. // Elec. J. Env. Agricult. Food Chem. 2008. V. 7. № 12. P. 2578.
11. Илюхина Н.В., Колоколова А.Ю., Прокопенко А.В., Филиппович В.П. // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. 2018. С. 76.
12. Раздаиводин А.Н., Радин А.И., Калнин В.В., Павлов А.Н., Рябинков А.П., Карпов А.Д., Пророков А.А. // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции., Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. 2018. С. 114.