

УДК 539.1.047:633.491:632.4:631.559

ВЛИЯНИЕ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ НА РОСТ И МИКРОФЛОРУ КАРТОФЕЛЯ

© 2022 г. Н. С. Чуликова¹, А. А. Малюга¹, У. А. Близняк^{2, 3, *}, А. П. Черняев^{2, 3},
П. Ю. Борщеговская^{2, 3}, С. А. Золотов², А. Д. Никитченко², Я. В. Зубрицкая², Д. С. Юров³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Краснообск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия

*E-mail: uabliznyuk@gmail.com

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Изучено влияние электронного излучения с энергией 1 МэВ на продуктивность и фенологию картофеля, зараженного фитопатогеном *Rhizoctonia solani* Kühn. Установлено, что предпосадочное облучение семенных клубней низкоэнергетичным электронным излучением в дозе 30 Гр приводит к снижению количества пораженных заболеванием клубней в два раза, при этом урожайность картофеля уменьшается на 30%.

DOI: 10.31857/S0367676522120080

ВВЕДЕНИЕ

Применение ядерных технологий и сопутствующих им методов в аграрной промышленности способствует устойчивому развитию данного сектора экономики и позволяет эффективно решать целый ряд проблем в таких сферах, как контроль почвы, безопасность окружающей среды, селекция и генетика растений, борьба с насекомыми-вредителями и фитосанитарный контроль, продление сроков хранения, безопасность пищевой продукции и т.д. [1]. Эффективное использование малых доз ионизирующего излучения для продления сроков хранения овощей и фруктов, дезинфекции широкого спектра сельхозпродукции и ингибирования прорастания овощей при их длительном хранении подтверждается большим количеством отечественных и зарубежных исследований [2, 3].

Поражение культур грибковыми, вирусными и бактериальными заболеваниями снижает качество и количество производимой сельхозпродукции. Каждая культура имеет свой спектр заболеваний. Так фомоз (болезнь растений, вызываемая несовершенными грибами из рода *Phoma*) более свойственен капусте, томатам и свекле, в то время как фузариоз (заболевание растений, вызываемое

грибами рода *Fusarium*) имеет очень широкий круг хозяев [4–8].

Для картофеля одним из самых распространенных и вредоносных грибковых заболеваний является ризоктониоз (черная парша), которое поражает культуры в широком диапазоне температур и влажности почвы. Источником инфекции служат больные растения картофеля и некоторые сорные растения. Главными факторами передачи возбудителя являются почва и сами клубни картофеля. Ежегодные мировые потери картофеля от этого заболевания колеблются в диапазоне от 7 до 36%, а в Западной Сибири ежегодно теряется больше 50% продукции [9–11].

Источники ионизирующего излучения широко используются для обеззараживания микотоксинов и инактивации грибов в пищевой и сельскохозяйственной отраслях [12], а также для фитосанитарной обработки, где возможно как снижение, так и увеличение вирулентности и агрессивности фитопатогенов [13, 14].

Для радиационной обработки сельскохозяйственных культур разрешено применение рентгеновского и гамма-излучения с энергией до 5 МэВ, а также пучков ускоренных электронов с энергией до 10 МэВ. В последнее время в литературе обсуждается применение низкоэнергетич-

Таблица 1. Параметры облучения клубней

№ сеанса	Время облучения с двух сторон Δt , с	Ток пучка I , мкА	Значение заряда, поглощенного пластиной, при облучении с каждой из двух сторон, нКл	Поглощенная доза, Гр
1	32 ± 1	0.1 ± 0.002	$1270 \pm 40/1270 \pm 40$	20 ± 0.4
2	50 ± 1	0.1 ± 0.002	$4120 \pm 70/4080 \pm 70$	40 ± 0.8
3	100 ± 1	0.1 ± 0.002	$10170 \pm 200/10240 \pm 200$	100 ± 2
4	150 ± 1	0.1 ± 0.002	$15430 \pm 300/15220 \pm 300$	150 ± 3
5	200 ± 1	0.1 ± 0.002	$20320 \pm 400/20360 \pm 400$	200 ± 4

ного электронного излучения, требующего меньшей степени защиты персонала и позволяющего проводить поверхностную обработку биоматериалов без воздействия на их внутреннюю структуру [15, 16].

Целью данной работы являлось исследование влияния электронного излучения с энергией 1 МэВ на продуктивность и фенологию картофеля, зараженного *Rhizoctonia solani* Kühn.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Клубни картофеля сорта Lina в количестве 96 штук диаметром (4 ± 1) см с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* Kühn с глубиной залегания склероциев гриба около 2 мм подвергали воздействию ионизирующего излучения. Источником излучения являлся линейный ускоритель электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт (НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия).

Для облучения электронами в дозах 20, 40, 100, 150 и 200 Гр образцы клубней в количестве 8 шт. выкладывали на дюралюминиевую пластину с размерами 35 см \times 3 см. Количество клубней, облученных в одной дозе, составляло 16 шт. В целях равномерного распределения дозы по объему клубней проводили двухстороннее облучение картофеля. Контрольные образцы содержались в тех же условиях, что и образцы, подвергшиеся обработке. В каждом сеансе облучения измеряли значение заряда, поглощенного пластиной Q_{exp} , при этом погрешность определения заряда не превышала 3%. Значения заряда при обработке клубней с двух сторон, ток пучка, времена облучения и рассчитанные значения доз, поглощенные образцами, представлены в табл. 1.

Дозы облучения, поглощенные клубнями, рассчитывали с помощью компьютерного моделирования с использованием программного кода GEANT4, базирующегося на методе Монте-Карло. Клубни моделировали водным шаром диамет-

ром 4 см, облучаемым электронами с энергией 1 МэВ с двух противоположных сторон.

Расчет дозы, поглощенной водным шаром, осуществлялся по формуле

$$D_{model} = \frac{\Delta E_{model}}{M_{model}}, \quad (1)$$

где M_{model} – масса водного шара, ΔE_{model} – энергия, поглощенная шаром. Также в ходе моделирования фиксировался заряд Q_{model} , поглощенный водным шаром.

Зная значение заряда Q_{exp} , поглощенного дюралюминиевой пластиной в ходе облучения, ток пучка и время облучения, а также количество образцов в одном сеансе облучения (8 шт.), величину поглощенного каждым образцом заряда можно получить по формуле:

$$Q_{obj} = \frac{Q_{full} - Q_{exp}}{8}, \quad (2)$$

$$Q_{full} = \frac{I \Delta t}{2}, \quad (3)$$

где I – ток пучка, Δt – время двухстороннего облучения образцов.

Зная значения Q_{model} и Q_{obj} полученные в результате моделирования и экспериментального измерения, доза, поглощенная клубнем, вычислялась по формуле

$$D_{obj} = \left(\frac{Q_{obj}}{Q_{model}} \right) D_{model}. \quad (4)$$

По результатам расчетов проводили картирование распределения дозы по срезам водного фантома. Для расчета распределения поглощенной дозы в различных сечениях водного шара пространство вокруг него, представляющее собой куб с ребром 4 см, разбивалось на $40 \times 40 \times 40$ кубических ячеек с ребром 1 мм. Центр куба совпадал с центром шара. В объеме каждой ячейки фиксировалась сумма энергий E_i , поглощенных в результате взаимодействий электронов с веществом шара, значения квадратов энергий E_i^2 , а

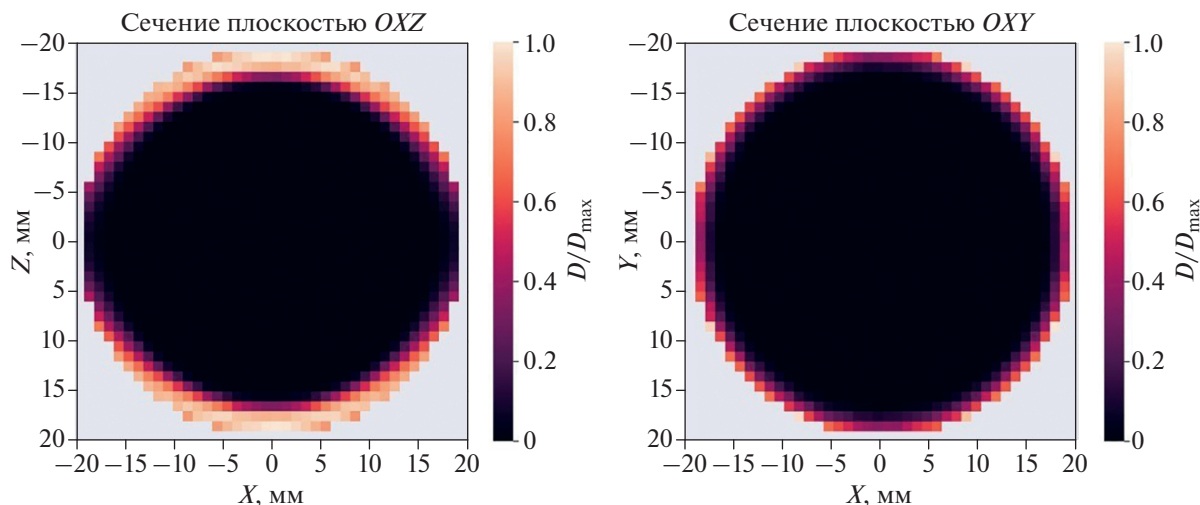


Рис. 1. Карта распределения относительной поглощенной дозы в перпендикулярном и параллельном первоначальному направлению пучка срезах, диаметр которых соответствовал диаметру водного шара, при двустороннем облучении пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ.

также число произошедших в ячейке взаимодействий. Для каждой ячейки оценивалась величина поглощенной дозы и среднеквадратичное отклонение для оценки ошибки определения поглощенной дозы:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}}{m_i}, \quad (5)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}^2 - \left(\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} E_{ij} \right)^2}, \quad (6)$$

где $\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}$ – сумма потерь энергии в i -й ячейке, $\sum_{j=1}^{N_i} E_{ij}^2$ – сумма квадратов потерь энергии в i -й ячейке, N_i – количество событий, произошедших в i -й ячейке.

Далее каждой ячейке присваивался квазицвет, значение которого соответствовало значению относительной поглощенной дозы, нормированной на максимальное значение дозы по объему шара, на шкале квазицвета.

На рис. 1 представлены карты распределений относительной поглощенной дозы в перпендикулярном и параллельном первоначальному движению электронов сечениях шара. Диаметр центральных срезов соответствовал диаметру модельного шара клубня при двухстороннем облучении пучком ускоренных электронов.

Как видно из рис. 1, вся доза поглотилась в поверхностных слоях водного шара. Таким образом, в ходе обработки электронами с энергией 1 МэВ облучались только поверхностные слои клубней

картофеля, при этом внутренние слои не были затронуты облучением.

В ходе эксперимента изучали фенологию культуры, распространенность форм ризоктониоза, а также продуктивность растений картофеля после проведения обработки электронным излучением.

Полевые исследования проведены в почвенно-климатических условиях, типичных для лесостепной зоны Западной Сибири. Почвенный покров опытного поля представлен типичным для зоны черноземом. В ходе полевых исследований оценивали предпосадочное воздействие доз облучения на клубни картофеля. При посадке культуры повторность опыта была 8-кратная, густота посадки клубней – 35.7 тыс. раст./га, площадь питания картофеля – 0.35 м × 0.7 м.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью пакета прикладных программ SNEDECOR (Россия) [17], Microsoft Excel (США) и Origin (Origin Lab Corporation, США).

Метеоданные вегетационного периода существенно отличались от среднемноголетних значений по температурному режиму и количеству выпавших осадков. Анализ погодных условий вегетационного периода (холодная погода в период посадки и до появления всходов, а также сильное переувлажнение почвы), показал, что они благоприятствовали развитию заболевания и заселению клубней картофеля склероциями *R. solani*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

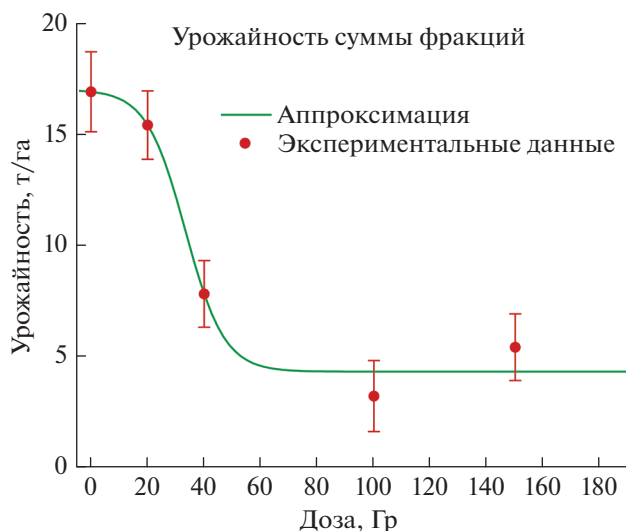
Зависимость кинетики развития растений, выращенных из облученных клубней, от дозы излучения носила нелинейный характер. Начало всходов растений, выросших из необработанного

Таблица 2. Параметры урожайности картофеля и его фракционный состав

Доза облучения, Гр	Фракции картофеля			Урожайность, т/га
	крупная, %	средняя, %	мелкая, %	
0	68.1	31.2	0.7	16.9
20	56.3	36.6	7.1	15.4
40	43.1	52.7	4.2	7.8
100	41.3	47.7	11.0	3.2
150	89.0	11.0	0	5.4

картофеля, зафиксировали на 15 день после посадки. Всходы растений, выросших из облученного картофеля, появились позже контрольных показателей: при облучении посадочного материала в дозе 20 Гр – на 5 дней, в дозах 40 и 150 Гр – на 10 дней, а в дозе 100 Гр – на 12 дней. В дальнейшем, в течение периодов вегетации, бутонизации и цветения также наблюдалась значительная задержка развития растений картофеля, выросших из облученных клубней. Так, например, начало цветения было зафиксировано на 72 и 57 день после посадки только в образцах, выросших из клубней, облученных в дозах 20 и 40 Гр соответственно. Для контрольных образцов данная фенофаза наступила на 43 день после посадки, что на 29 и 14 дней раньше, чем для образцов, обработанных в дозах 20 и 40 Гр соответственно. Обработка клубней в дозах 100 и 150 Гр не позволила растениям зацвести. Количество взошедших и полноценно вегетирующих в дальнейшем растений уменьшалось с увеличением дозы обработки посадочного материала. При этом обработка клубней в дозах свыше 200 Гр привела к полному ингибированию их прорастания.

Наблюдаемые процессы всхожести, бутонизации и вегетации повлияли на урожай культуры и

**Рис. 2.** Зависимость суммарной урожайности от дозы облучения посадочных клубней.

его фракционный состав. Было получено, что чем выше доза облучения, тем меньшую урожайность показали растения (табл. 2). При определении фракционного состава урожая выделяли три типа фракций клубней картофеля: мелкая – вес клубней меньше 40 г, средняя – от 40 до 80 г и крупная – более 80 г. Из таблицы 2 видно, что при обработке семенного картофеля в диапазоне доз от 20 до 100 Гр сформировалось больше мелких и средних клубней, а крупных клубней – меньше, чем в контрольных образцах. При облучении в дозе 150 Гр мелкая фракция картофеля отсутствовала совсем, а преобладала крупная.

На рис. 2 представлена зависимость суммарной урожайности картофеля от дозы облучения посадочного материала. Данная зависимость описывается сигмоидальной функцией вида:

$$U(D) = \frac{u_1}{1 + e^{u_2 \cdot (D - u_3)}} + u_4, \quad (7)$$

где u_1 – максимальная суммарная урожайность, равная 15.8 ± 1.1 т/га, которая соответствует урожайности контрольных клубней; u_2 – параметр, характеризующий ширину распределения функции урожайности $U(D)$ клубней по ее устойчивости к дозе облучения посадочного материала, равный 8.3 ± 1.1 Гр⁻¹ в диапазоне доз от 20 до 150 Гр; u_3 – доза облучения, при которой урожайность клубней, восприимчивых к облучению электронами в дозах от 20 до 150 Гр, уменьшается в 2 раза по сравнению с ее контрольным показателем, равная 36.6 ± 2.1 Гр; u_4 – уровень урожайности при обработке посадочного материала в дозе до 150 Гр, равный 4 ± 1.5 т/га. Параметры функции (7) рассчитаны методом наименьших квадратов, коэффициент корреляции составил 0.93. По данным исследований [18], обработка ионизирующим излучением в дозе 150 Гр полностью ингибирует прорастание картофеля, и соответственно полностью подавляет урожайность. Недостижение полного ингибирования урожайности при обработке в дозе 150 Гр в данном исследовании, по всей видимости, связано с недооблучением отдельных участков поверхности клубней (рис. 1).

На рынке производства картофеля средняя фракция клубней является наиболее востребованной. На рис. 3 представлена зависимость урожайности, представленной средней фракцией, от

дозы облучения посадочных клубней. Данная зависимость также описывается сигмоидальной функцией вида:

$$U_1(D) = \frac{a_1}{1 + e^{a_2*(D-a_3)}}, \quad (8)$$

где a_1 – максимальная урожайность, представленная средней фракцией, равная 5.2 ± 0.6 т/га, которая соответствует урожайности контрольных клубней; a_2 – параметр, характеризующий ширину распределения функции урожайности клубней средней фракции $U_1(D)$ по ее устойчивости к дозе облучения семенного картофеля, равный $32.1 \pm \pm 2.1$ Гр⁻¹; a_3 – доза облучения, при которой урожайность уменьшается в 2 раза по сравнению с ее контрольным показателем, равная 66.5 ± 5.8 Гр. Параметры функции (8) рассчитаны методом наименьших квадратов, коэффициент корреляции составил 0.94.

При фитоэкспертизе клубней картофеля нового урожая было зафиксировано их поражение как несклероциальными, так и склероциальными формами ризиктониоза (табл. 3).

Из несклероциальных форм преобладали сетчатый некроз и трещины. После облучения посадочного материала в дозе 20 Гр присутствовала уродливость клубней нового урожая. Углубленная пятнистость обнаружена только у клубней, посадочный материал которых был облучен в дозах 20 и 40 Гр, но распространенность данной формы поражения на поверхности клубней значительно меньше контрольных показателей. При обработке посадочного материала в дозе 150 Гр клубни нового урожая картофеля были поражены только сетчатым некрозом.

Склероциальные формы ризиктониоза присутствовали практически во всех образцах (исключение составили клубни, посадочный материал которых был облучен в дозе 150 Гр). В большей степени эти формы поражения наблюдались у клубней, посадочный материал которых был обработан в дозе 20 Гр. Меньшая распространен-

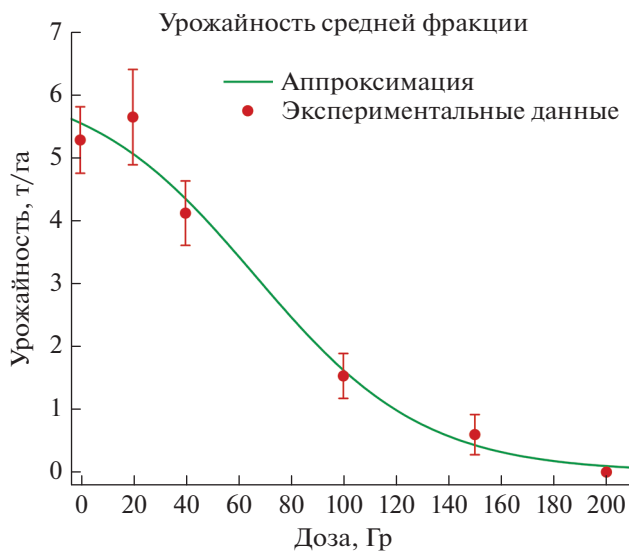


Рис. 3. Зависимость урожайности, представленной средней фракцией, от дозы облучения посадочных клубней.

ность склероциев на поверхности клубней при обработке посадочного материала в диапазоне доз от 40 до 150 Гр в сравнении с контрольными показателями объясняется более длительным процессом формирования растений, более коротким периодом клубненакопления и соответственно меньшим периодом времени, когда клубни могут быть заселены грибом *R. solani* (табл. 3).

На рис. 4 представлена зависимость распространенности сетчатого некроза на поверхности клубней нового урожая от дозы облучения посадочных клубней. Данная зависимость описывается сигмоидальной функцией вида

$$f_1(D) = \frac{b_1}{1 + e^{b_2*(D-b_3)}} + b_4, \quad (9)$$

где b_1 – максимальная доля клубней урожая, для которой в результате облучения электронами подавилось развитие сетчатого некроза, равная

Таблица 3. Распространенность форм ризиктониоза на клубнях картофеля, %, доверительный интервал $\alpha \leq 0.05$

Формы ризиктониоза	Доза облучения, Гр				
	0	20	40	100	150
Несклероциальные формы					
Сетчатый некроз	97.8 ± 0.9	100	87.5 ± 1.6	70.0 ± 1.8	66.6 ± 2.5
Углубленная пятнистость	91.3 ± 1.3	17.6 ± 0.7	18.7 ± 0.8	0	0
Трещины	13.0 ± 0.4	11.8 ± 0.6	6.2 ± 0.7	10.0 ± 0.4	0
Уродливость	2.2 ± 0.2	11.8 ± 0.1	0	0	0
Склероциальные формы (% поверхности)					
Всего	100.0	100.0	56.2 ± 0.6	10.0 ± 1.1	0
Склероции на 1/10 поверхности клубня	32.6 ± 1.0	52.9 ± 0.8	25.0 ± 0.9	10.0 ± 1.1	0
Склероции на 1/4 поверхности клубня	32.6 ± 0.8	41.2 ± 0.7	25.0 ± 0.3	0	0
Склероции на 1/2 поверхности клубня	34.8 ± 0.6	5.9 ± 0.8	6.2 ± 0.7	0	0

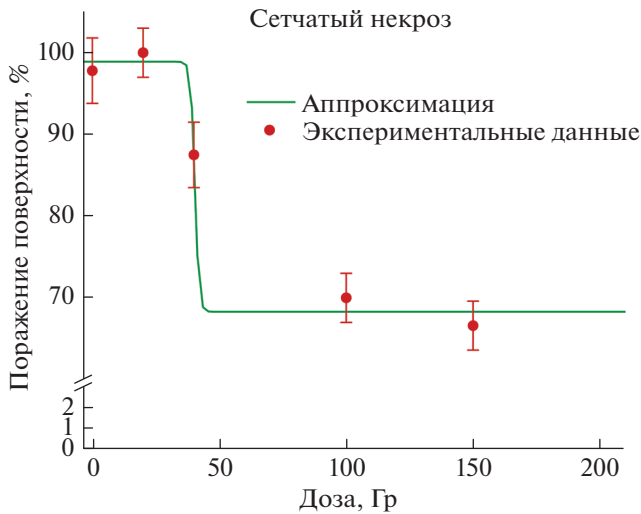


Рис. 4. Зависимость распространности сетчатого некроза на поверхности клубней нового урожая от дозы облучения посадочных клубней.

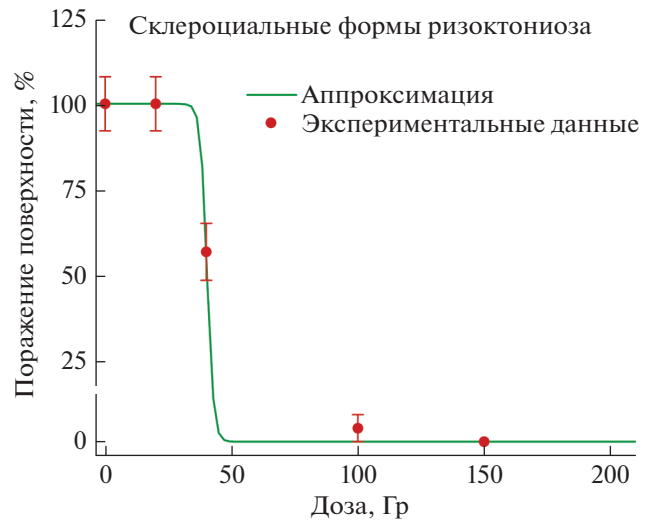


Рис. 5. Зависимость распространности склероциальных форм ризоктониоза на поверхности клубней нового урожая от дозы облучения посадочных клубней.

$30.6 \pm 1.6\%$; b_2 – параметр, характеризующий ширину распределения функции $f_1(D)$ распространности сетчатого некроза на поверхности клубней, по восприимчивости данного заболевания к дозе излучения, равный $0.8 \pm 0.2 \text{ Гр}^{-1}$; b_3 – доза облучения, при которой количество зараженных клубней, восприимчивых к воздействию излучения (30.6% всех клубней), уменьшается в 2 раза, равная $30.4 \pm 3.7 \text{ Гр}$; b_4 – доля зараженных клубней нового урожая, невосприимчивых к воздействию электронного излучения в дозах до 150 Гр на семенной картофель, равная $69.3 \pm 2.7\%$. Параметры функции (9) рассчитаны методом наименьших квадратов, коэффициент корреляции составил 0.92 .

На рис. 5 представлена зависимость распространности склероциальных форм ризоктониоза на поверхности клубней нового урожая от дозы облучения посадочных клубней. Данная зависимость также описывается сигмоидальной функцией вида

$$f_2(D) = \frac{c_1}{1 + e^{c_2 \cdot (D - c_3)}}, \quad (10)$$

где c_1 – доля клубней, для которых воздействие электронами в диапазоне доз от 20 до 150 Гр подавило склероциальную форму ризоктониоза, равная 100% ; c_2 – параметр, характеризующий ширину распределения функции $f_2(D)$ зараженных клубней по восприимчивости данного заболевания к дозе излучения, равный $1.3 \pm 0.1 \text{ Гр}^{-1}$; c_3 – доза облучения, при которой количество зараженных клубней уменьшается в 2 раза, равная $32.3 \pm 3.5 \text{ Гр}$. Параметры функции (10) рассчитаны методом наименьших квадратов, коэффициент корреляции составил 0.92 .

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из сигмоидальной зависимости суммарной урожайности от дозы облучения, можно предположить, что клубни семенного картофеля представляют собой статистический ансамбль с различной радиоустойчивостью к воздействию ионизирующего излучения в диапазоне доз от 20 до 200 Гр . Для каждого клубня характерно определенное пороговое значение дозы $D_{\text{пор}}$, после воздействия которой он перестает давать урожай. Таким образом, клубни подчиняются нормальному распределению:

$$f_N(D_{\text{пор}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D_{\text{пор}} - \overline{D_{\text{пор}}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

где $\overline{D_{\text{пор}}}$ – среднее по ансамблю N семенных клубней пороговое значение дозы, σ – среднеквадратическое отклонение. Величина пороговой дозы формирования плодов для каждого клубня определяется его состоянием, зависящим от многих параметров, таких, как сорт, химический состав, содержание витаминов, наличие грибковых, вирусных и бактериальных заболеваний, температурно-влажностные условия становления культуры, и многое другое. При воздействии ионизирующим излучением в дозе D будет отсутствовать урожай у семенных клубней, для которых $D_{\text{пор}}$ будет меньше дозы D облучения.

Сигмоидальная зависимость степени заражения ризоктониозом от дозы облучения указывает на различную восприимчивость данного заболевания, распространившегося на N клубнях нового урожая, к воздействию ионизирующего излу-

чения на заболевание в семенных клубнях, которая также распределена по нормальному закону:

$$f_N(D_{\text{риз}}) = \frac{1}{\sigma_{\text{риз}}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D_{\text{риз}} - \overline{D_{\text{риз}}})^2}{2\sigma_{\text{риз}}^2}}, \quad (12)$$

где $\overline{D_{\text{риз}}}$ – среднее по ансамблю N семенных клубней значение дозы, посадочным материалом, подавляющей развитие ризоктониоза, $\sigma_{\text{риз}}$ – среднеквадратическое отклонение.

Биологические эффекты от воздействия ионизирующего излучения, наблюдаемые в исследовании, зависели от количества актов ионизации, приходящихся на единицу поверхности клубней. При этом распределение глазков и склероциев на поверхности семенных клубней не было равномерным. Также, для подавления роста культуры и фитопатогена необходимо определенное минимальное количество актов ионизации, приходящихся на глазок или склероцию. При этом, чем больше полученная доза облучения, тем больше актов ионизации, приходящихся на единицу поверхности клубня.

На рис. 6а представлены экспериментальные данные и аппроксимирующие функции зависимостей доли суммарной урожайности картофеля, которую подавило воздействие электронного излучения в диапазоне доз от 20 до 150 Гр, и урожайности, представленной средней фракцией, нормированных на контрольные значения показателей, а также зависимости степени распространенности склероциальной и несклероциальной форм ризоктониоза от дозы облучения. Продифференцировав функциональные зависимости, можно получить функции распределения плотности вероятностей подавления урожая и заражения ризоктониозом и определить дозы, ингибирующие развитие урожайности $\overline{D_{\text{пор}}}$ и заболеваемости $\overline{D_{\text{риз}}}$ для половины клубней нового урожая (рис. 6б).

Из рис. 6б видно, что снижение общей урожайности в два раза по сравнению с контрольными показателями происходит при обработке посадочного материала в дозе 36.6 ± 2.1 Гр; для средней фракции данный показатель составил 66.5 ± 5.8 Гр. Чувствительность склероциальных и несклероциальных форм ризоктониоза к воздействию электронного излучения практически одинакова. Доза, ингибирующая развитие сетчатого некроза у половины клубней нового урожая, составила 30.4 ± 3.7 Гр, при этом данный показатель для склероциальных форм ризоктониоза составил 32.3 ± 3.5 Гр. Однако заболеваемость сетчатым некрозом не была ингибирована полностью при обработке семенного картофеля в дозах до 200 Гр. Растения нового урожая, выросшего из облученных клубней, показали снижение скорости роста, что приводило к увеличению времени нахождения клубней нового урожая в почве и тем самым

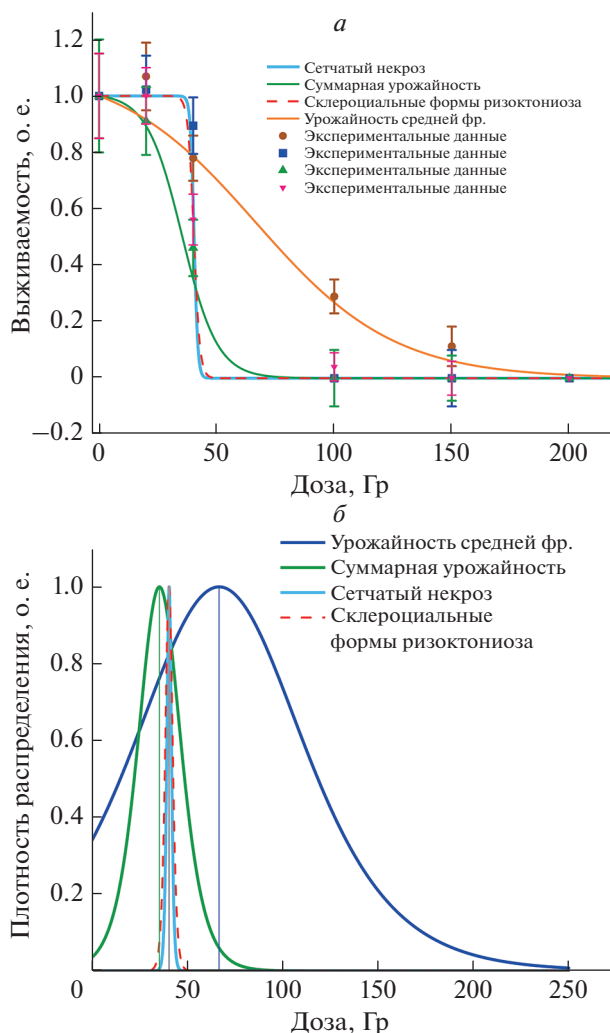


Рис. 6. Экспериментальные данные и аппроксимирующие функции зависимостей доли суммарной урожайности картофеля и доли средней фракции, нормированных на контрольные значения показателей, а также зависимости степени распространенности склероциальной и несклероциальной форм ризоктониоза от дозы облучения (а). Функции распределения плотности вероятностей подавления суммарной урожайности и доли средней фракции в ней, а также подавления распространенности склероциальной и несклероциальной форм ризоктониоза при воздействии электронного излучения в диапазоне доз от 20 до 200 Гр (б).

повышало вероятность развития различных форм ризоктониоза привнесенного извне, несмотря на подавление заболевания в семенном картофеле.

Таким образом, обработка семенного картофеля низкоэнергетическим электронами в дозе 30 Гр позволяет снизить в два раза распространенность заражения ризоктониозом среди клубней нового урожая, при этом общая урожайность картофеля снижается на 30%, а доля наиболее востребованной в производстве средней фракции картофеля снижается всего лишь на 15%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования было установлено, что предпосадочное облучение семенных клубней картофеля электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 20 до 150 Гр приводит к задержке развития взошедших растений, а свыше 200 Гр – к полному ингибированию прорастания клубней. Чем выше доза облучения посадочного материала, тем позже наступают фазы всходов, бутонизации и цветения растений. Однако, некоторые дозы показали нелинейный отклик развития различных фаз становления растений от дозы облучения.

Было отмечено снижение урожайности облученных образцов с увеличением дозы облучения семенного картофеля в диапазоне от 20 до 150 Гр, однако процент зараженных ризоктониозом клубней в урожае также снижался с увеличением дозы. Обработка посадочного материала также повлияла на фракционный состав клубней нового урожая.

Обработка клубней низкоэнергетичными ускоренными электронами воздействует только на верхние, пораженные грибом участки клубней, что делает ее наиболее предпочтительным способом обработки корнеплодов.

Исходя из сигмоидального характера зависимостей урожайности картофеля и распространенности ризоктониоза среди клубней нового урожая от дозы облучения, обработка семенного картофеля в дозе 30 Гр позволяет в два раза подавить заболеваемость среди клубней и при этом лишь частично снизить урожайность картофеля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-63-00075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernyaev A.P., Varzar S.M., Borschegovskaya P.Yu. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. No. 7. P. 988.
2. Singh B., Singh J., Kaur A. // IJBRR. 2013. V. 4. No. 3. P. 167.
3. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. // Инноватика и экспертиза. 2016. Т. 1. № 16. С. 197.
4. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
5. Антонова Т.С., Маслиенко Л.В., Мурадосилова Н.В., Саукова С.Л. Современная микология в России. М.: НАМ РФ, 2002. С. 171.
6. Бердыш Ю.И. Распространение основных вредителей и болезней сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае в 2003 г. и прогноз их появления в 2004 г. Краснодар, 2004.
7. Вянгеляускайте А.П., Жуклене Р.М., Жуклис Л.П. Вредители и болезни овощных культур. М.: Агропромиздат, 1989. 462 с.
8. Жуковская С.А., Овчинникова А.М. Возбудители болезней сельскохозяйственных растений Дальнего Востока. М.: Наука, 1980. С. 5.
9. Котова В.В. Корневые гнили гороха и вики и меры борьбы с ними. СПб: ВИЗР, 2004. С. 144.
10. Евстратова Л.П., Николаева Е.В., Кузнецова Л.А., Харин В.Н. // Агро XXI. 2006. № 4–6. С. 10.
11. Малюга А.А., Маринкина Г.А., Баранов Д.С., Васильев В.Г. // Защита и карантин растений. 2011. № 1. С. 28.
12. Халиков С.С., Малюга А.А., Чуликова Н.С. // Агротехника. 2018. № 10. С. 46.
13. Akhila P.P., Sunooj K.V., Aaliya B. et al. // Trends Food Sci. Technol. 2021. V. 114. P. 399.
14. Филипас А.С., Лой Н.Н., Ульяненко Л.Н., Степанчикова Н.С. // Докл. РАСХН. 2008. № 6. С. 18.
15. Лой Н.Н., Санжарова Н.И., Гулина С.Н., Суслова О.В. // В кн.: Сб. мат. III междунар. науч.-практ. конф. “Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции”. Ч. 1. (Краснодар, 2019). С. 434.
16. Чередниченко Д.В., Савилов В.А., Федосенко Р.В., Вишнева Н.В. // В кн.: Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. “Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы”. (Обнинск, 2018). С. 28.
17. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: ГУП РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.
18. Близнюк У.А., Леонтьев В.А., Черняев А.П. и др. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. и астроном. 2021. № 1. С. 45.

Impact of 1 MeV electron beam irradiation on phenology and microflora of potatoes

N. S. Chulikova^a, A. A. Malyuga^a, U. A. Bliznyuk^{b, c, *}, A. P. Chernyaev^{b, c}, P. Yu. Borschegovskaya^{b, c}, S. A. Zolotov^b, A. D. Nikitchenko^b, Ya. V. Zubritskaya^b, D. S. Yurov^c

^aSiberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, 630501 Russia

^bLomonosov Moscow State University, Physics Department, Moscow, 119991 Russia

^cSkobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: uabliznyuk@gmail.com

The effect of 1 MeV electron irradiation on the productivity and phenology of potatoes infected with *Rhizoctonia solani* Kuhn was studied. It was found that pre-planting irradiation of potato seed tubers with low-energy electron radiation at a dose of 30 Gy leads to a twofold decrease in the number of diseased tubers, while the potato yield decreases by 30%.