

УДК 635.21:632.935.49

РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СЕМЕННОГО КАРТОФЕЛЯ КАК МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ РИЗОКТОНИОЗА НА КЛУБНЯХ НОВОГО УРОЖАЯ[§]

© 2023 г. Н. С. Чуликова^{1,*}, А. А. Малюга¹, У. А. Близняк^{2,3,**},
П. Ю. Борщеговская^{2,3}, С. А. Золотов², Я. В. Зубрицкая², В. С. Ипатова³,
А. П. Черняев^{2,3}, И. А. Родин^{4,5}

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН
630501 Краснообск, Новосибирский р-н, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелева
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 3, Россия

⁵Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет),
кафедра эпидемиологии и доказательной медицины
119435 Москва, ул. Б. Пироговская, 2, стр. 2, Россия

*E-mail: natalya-chulikova@yandex.ru

**E-mail: uabliznyuk@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 06.10.2022 г.

Принята к публикации 15.11.2022 г.

Изучили влияние предпосадочной обработки ионизирующим излучением семенного картофеля, клубни которого были заражены грибом *Rhizoctonia solani* Kühn, на развитие и урожайность культуры. Двухлетний мониторинг показал, что обработка семенного материала в дозах 20–25 Гр эффективно снижала распространенность форм ризоктониоза на клубнях нового урожая. Поверхностный характер облучения низкоэнергетичными ускоренными электронами, использованными в эксперименте, позволил воздействовать исключительно на пораженные грибом верхние слои клубней картофеля, что делало этот способ обработки наиболее предпочтительным.

Ключевые слова: радиационная обработка, ускоренные электроны, склерозии *Rhizoctonia solani* Kühn, фенология картофеля, фракционный состав, урожайность культуры.

DOI: 10.31857/S0002188123020072, **EDN:** MSHQZY

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается снижение качества и количества производимой сельхозпродукции, в первую очередь связанное с поражением культур инфекционными заболеваниями: грибковыми, вирусными и бактериальными [1]. Одними из наиболее распространенных видов грибковых болезней сельскохозяйственных культур являются фомоз, фузариоз и ризоктониоз [2–6].

Ризоктониоз поражает картофель в широком диапазоне температур и влажности почвы, при этом источником инфекции служат больные рас-

тения картофеля и некоторые сорные растения. Главными факторами передачи возбудителя являются почва и больные клубни картофеля. Например, численность возбудителя в пахотных почвах Сибири меняется от 0 до 20 пропагул/100 г воздушно-сухой почвы, при этом более инфицированы почвы после посадок картофеля. Частота передачи возбудителя через зараженные клубни составляет от 29 до 70%, при этом вероятность передачи возбудителя воздушно-капельным путем возрастает при влажности воздуха >86% [7]. Ежегодные мировые потери картофеля от этого заболевания изменяются в диапазоне от 7 до 36%, а в Западной Сибири ежегодно теряется >50% продукции [8–10].

[§]Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

Таблица 1. Параметры облучения клубней (время облучения, ток пучка, величина заряда, поглощенного пластиной, и величины доз, поглощенных образцами

Сеанс, №	Суммарное время облучения с 2-х сторон, с	Ток пучка, мкА	Заряд на пластине, нКл	Поглощенная доза, Гр
1	32 ± 1	0.10 ± 0.01	2070 ± 40/2070 ± 40	20.0 ± 0.4
2	50 ± 1	0.10 ± 0.01	4120 ± 70/4080 ± 70	40 ± 1
3	100 ± 1	0.10 ± 0.01	10200 ± 200/10200 ± 200	100 ± 2
4	150 ± 1	0.10 ± 0.01	15400 ± 300/15200 ± 300	150 ± 3
5	200 ± 1	0.10 ± 0.01	20300 ± 400/20400 ± 400	200 ± 4
6	230 ± 1	1.90 ± 0.01	50900 ± 1000/50900 ± 1000	500 ± 10
7	210 ± 1	4.80 ± 0.01	101800 ± 2000/101800 ± 2000	1000 ± 20
8	422 ± 1	4.80 ± 0.01	203300 ± 4000/203300 ± 4000	2000 ± 40
9	632 ± 1	4.80 ± 0.01	305300 ± 6000/305300 ± 6000	3000 ± 60

С целью повышения качества и обеспечения безопасности продукции в мире наблюдается растущий интерес к использованию ядерных технологий. Данный метод позволяет решать следующий ряд актуальных задач: сокращение использования химических удобрений с целью контроля безопасности почвы и пищевой продукции, борьба с насекомыми-вредителями, различными грибковыми и вирусными возбудителями, опасными для жизни человека и животных, продление сроков хранения продукции, задержка или стимуляция прорастания и многое другое [11–15].

В качестве источников ионизирующего излучения для радиационной обработки сельскохозяйственных культур разрешено применение тормозного излучения с энергией до 5 МэВ, генерируемого с помощью ускорителей электронов, и гамма-излучения от радиоактивных изотопов ^{137}Cs и ^{60}Co , а также ускоренных электронов с энергией до 10 МэВ, генерируемое ускорителями. Выбор источника излучения зависит от категории обрабатываемой продукции и цели обработки [16]. Вследствие небольшой проникающей способности низкоэнергетичных электронов в литературе обсуждается возможность применения данного типа излучения для проведения поверхностной обработки биоматериалов без воздействия на их внутренние структуры [17].

Цель работы — исследование влияния ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на продуктивность и фенологию картофеля, зараженного *Rhizoctonia solani*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Двухгодичное исследование влияния ускоренных электронов на продуктивность и фитосани-

тарное состояние урожая проводили на клубнях семенного картофеля сорта Лина с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* Kühn (*R. solani*). Средний диаметр клубней составлял (4 ± 1) см, глубина залегания склероциев гриба — ≈ 2 мм.

В первый год исследования клубни в количестве 80 шт. подвергали воздействию излучения в дозах 20, 40, 100, 150, 200, 500, 1000, 2000 и 3000 Гр. Во 2-й год 192 клубня облучали в 5-ти дозах: 20, 40, 100, 150 и 200 Гр. Облучение образцов проводили на линейном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 (ЦКП УНО, НИИЯФ МГУ, Россия) с максимальной энергией 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт.

При облучении образцы в количестве 8 шт. выкладывали на дюралюминиевую пластину с размерами 35×5 см на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов. Проводили двухстороннее облучение картофеля с целью равномерного распределения дозы по поверхности клубней. Контрольные образцы находились в тех же условиях, что и подвергшиеся обработке. В табл. 1 представлены данные облучения, которые фиксировали в каждом сеансе облучения.

Распределение дозы, поглощенной клубнями, рассчитывали с помощью компьютерного моделирования с использованием инструментария GEANT 4 (ЦЕРН, Швейцария), основанного на методе Монте-Карло [18].

Клубни моделировали водным шаром диаметром 4 см, облучаемым с 2-х противоположных сторон электронами с энергией 1 МэВ. Для расчета распределения дозы по объему водного шара пространство вокруг шара, представляющее собой куб с ребром 4 см, разбивали на $40 \times 40 \times 40$ кубических ячеек с ребром 1 мм, для каждой из которых подсчитывали суммарную полученную во взаи-

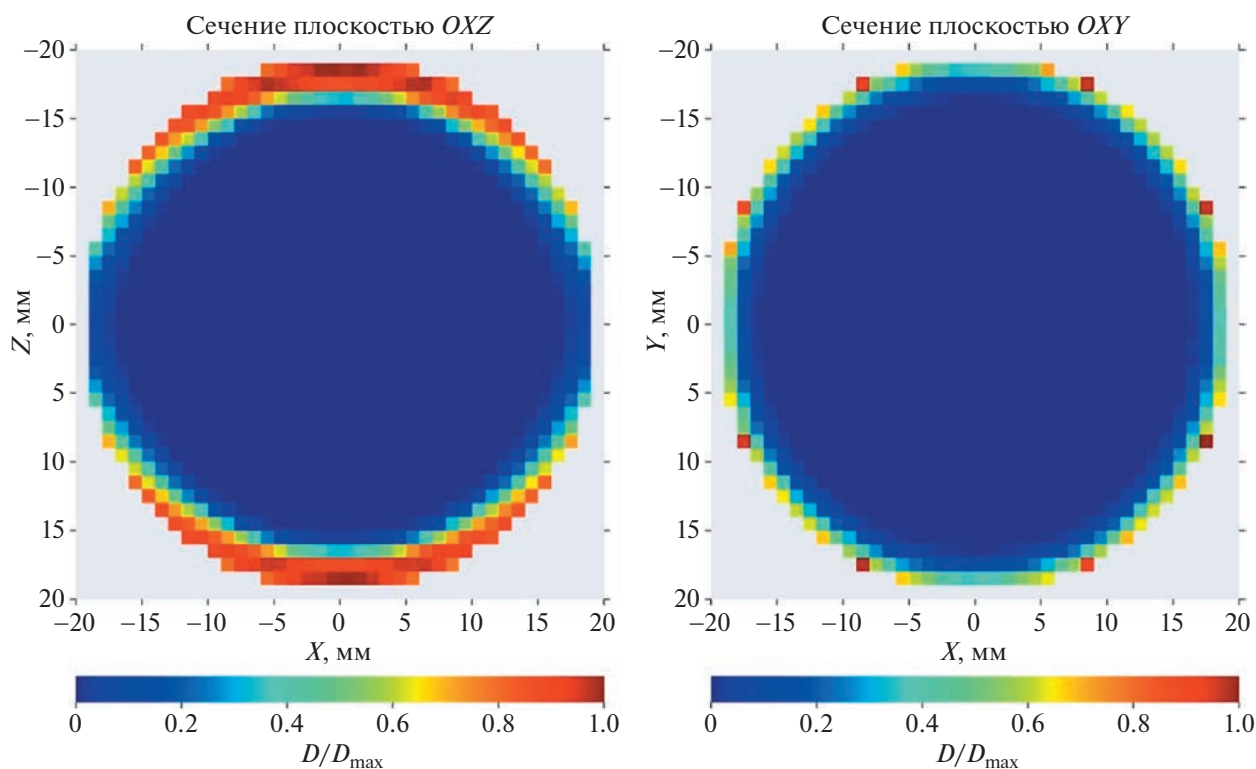


Рис. 1. Карта распределения относительной поглощенной дозы в центральных параллельном (OXZ) и перпендикулярном (OXY) первоначальному направлению электронов срезах шара из воды диаметром 4 см при двустороннем облучении пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ.

модействиях энергию ΔE_i . Дозу, поглощенную каждой ячейкой, определяли по формуле:

$$D_i = \frac{E_i}{m_i}, \text{ где } \Delta m_i - \text{масса ячейки.}$$

По результатам расчетов проводили картирование дозы, отнесенной к максимальной величине дозы в срезе шара толщиной 1 мм в плоскостях, перпендикулярной и параллельной начальному направлению электронов в пучке. Как видно на рис. 1, вся доза поглотилась в поверхностных слоях водного шара, залегающих на глубине, не более чем 3 мм от поверхности шара. Таким образом, при облучении были затронуты только поверхностные слои картофеля, зараженные фитопатогеном, при этом внутренние слои облучены не были.

В ходе исследования проводили фенологические наблюдения за растениями картофеля, распространенностью форм ризоктониоза и продуктивностью культуры после предпосадочной обработки клубней низкоэнергетичными электронами.

Полевые исследования проводили в почвенно-климатических условиях, типичных для лесостепной зоны Западной Сибири. Почвенный покров опытного поля был представлен типичным для зоны выщелоченным среднесуглинистым

черноземом с агрохимической характеристикой пахотного слоя почвы (0–30 см): гумус (по Тюрину) – $\approx 5\%$, содержание общего азота (по Кьельдалю) – 0.34 мг/100 г почвы, фосфора и калия (по Чирикову) – 29.0 и 13.0 мг/100 г почвы соответственно, рН 6.7–6.8.

Посадку картофеля осуществляли 05.06.2020 г. и 24.05.2021 г. Опытные исследования проводили на одном и том же участке с естественным фоном заселения почвы ризоктониозом, количество ризоктониоза в почве перед посадкой составляло 20 пропагул/100 г воздушно-сухой почвы. Распространенность ризоктониоза на посадочных клубнях составляла 100%. При посадке культуры повторность опыта была двукратной, густота посадки клубней – 35.7 тыс. клубней/га, площадь питания картофеля – 0.35×0.7 м. Удобрения в исследовании не применяли.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью пакета прикладных программ SNEDECOR (Сорокин, Россия), основанного на использовании стандартных методов математической обработки [19].

Период вегетации в 2020 и в 2021 гг. по температурному режиму был близок к среднегодовым показателям (табл. 2). Осадки в данных веге-

Таблица 2. Метеорологические показатели вегетационных периодов 2020 г. и 2021 г. (ГМС “Огурцово” Новосибирского р-н, Новосибирская обл.)

Месяц	Декада	Температура воздуха, °С			Осадки, сумма, мм		
		2020 г.	2021 г.	Средне многолетняя норма	2020 г.	2021 г.	Средне многолетняя норма
Май	1-я	11.7	16.6	7.7	21.0	10	11.0
	2-я	19.7	14.8	10.0	1.4	13.3	12.0
	3-я	15.2	16.4	13.2	32.0	8.5	13.0
	Средние	16.5	15.9	10.3	54.0	31.8	36.0
Июнь	1-я	13.9	16.6	15.4	16.0	21.9	13.0
	2-я	16.2	17.3	16.7	7.8	2.3	20.0
	3-я	19.7	14.6	18.1	0.0	48.9	25.0
	Средние	16.6	16.2	16.7	24.0	73.1	58.0
Июль	1-я	21.2	20.4	19.1	32.0	18.0	19.0
	2-я	21.2	18.8	18.9	8.9	4.1	26.0
	3-я	17.0	20.0	18.9	44.0	0.3	27.0
	Средние	19.6	19.7	19.0	85.0	22.4	72.0
Август	1-я	21.5	19.7	17.9	14.0	25.1	24.0
	2-я	18.9	16.8	16.0	43	36.8	20.0
	3-я	16.0	17.6	13.5	25	5.4	22.0
	Средние	18.6	18.0	15.8	82	67.3	66.0

тационных сезонах распределялись крайне неравномерно.

Май 2020 г. особенно выделялся по температуре и режиму увлажнения. Температура воздуха в этом месяце превышала средние показатели, тогда как количество осадков в начале месяца было больше, в конце — существенно меньше средне многолетней нормы. Тем не менее, количество выпавших осадков превысило норму для данного региона в 1.5 раза. В 2021 г. температура воздуха также была выше средне многолетней. В 3-й декаде мая увлажнение было недостаточным, осадков выпало в 2 раза меньше в сравнении со средне многолетними показателями.

В июне 2020 г. и 2021 г. температура не показывала существенных отклонений от средне многолетних показателей. В 2020 г. приход атмосферной влаги был ниже нормы более чем в 2 раза, в 2021 г. был выше нормы в 1.2 раза. Но при этом в 2021 г. в 1-ю декаду июня увлажнение было избыточным, т.к. количество выпавших осадков было больше в 1.7 раза по сравнению со средне многолетней нормой. Во 2-й декаде месяца количество выпавших осадков также было меньше нормы в 8.7 раза. В 3-й декаде июня увлажнение превысило средне многолетние показатели в 2 раза.

В июле 2020 г. и 2021 г. температурные показатели отклонялись от нормы не более чем на 2.5°C. Количество выпавших осадков по годам и декадам сильно варьировалось. В 2020 г. в 1-й и 3-й декадах превышение средне многолетней нормы составило 1.7 и 1.6 раза соответственно, а во 2-й декаде осадков выпало в 2.9 раза меньше нормы. В целом, за месяц осадков выпало в 1.2 раза больше нормы. В 2021 г. 2-я и 3-я декады июля были засушливыми, осадков выпало меньше средне многолетних показателей в 6.3 и 90.0 раза соответственно.

В 2020 г. и в 2021 г. август был достаточно теплым: температура воздуха превысила средне многолетнюю норму. В 2020 г. приход атмосферной влаги в 1-й декаде месяца был в 1.7 раза ниже нормы, во 2-й декаде осадков выпало в 2.2 раза больше средне многолетней нормы. При этом в конце 2-й декады выпало 26 мм (из 43 мм) в виде сильного дождя и града. В 2021 г. в 1-й декаде августа увлажнение было близко к средне многолетним показателям. Во 2-й декаде данного месяца осадков выпало с избытком — в 1.8 раза больше нормы. Третья декада августа была засушливой, осадков выпало меньше средне многолетних показателей в 4.1 раза.

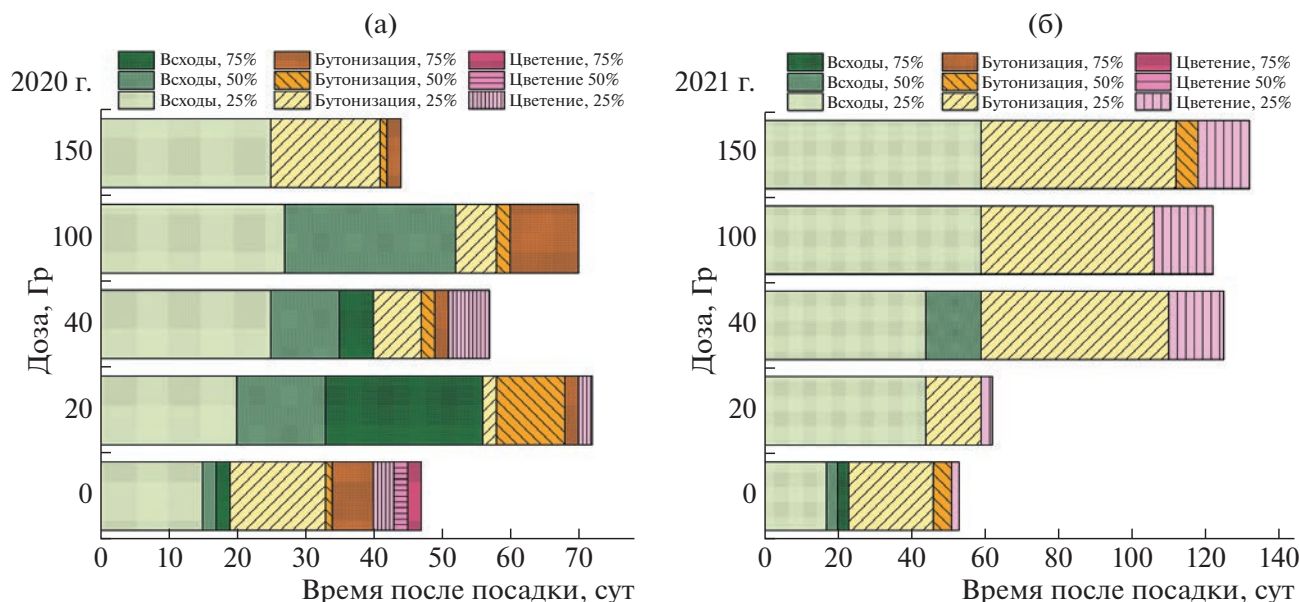


Рис. 2. Зависимость наступления фаз роста растений от дозы, полученной посадочным материалом: (а) – 2020 г., (б) – 2021 г.

Погодные условия вегетационного периода, а именно холодная погода в период посадки и до появления всходов, а также сильное переувлажнение почвы благоприятствовали развитию заболевания и заселению клубней картофеля склероциями *R. solani*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость фенологии растений от дозы, полученной посадочным материалом, носила нелинейный характер для 2-х годов исследования. Контрольные образцы и образцы, обработанные в дозе 20 Гр, в фазах всходов и бутонизации имели показатели 25, 50 и 75% от общего количества растений. В фазе цветения только 25% растений соответствовали фенологической норме. Цветение 50 и 75% от общего количества растений происходило только в контроле (рис. 2). Для остальных образцов отмечено отсутствие некоторых фенофаз.

В первый год исследования начало фазы всходов растений (25%), выросших из необработанного картофеля, зафиксировали на 15-е сут после посадки, во 2-й год исследования – на 18-е сут после посадки. Для обоих годов исследования всходы картофеля, выросшие из облученных клубней, появились позже по сравнению с контрольными необлученными образцами.

Для первого года исследования при облучении посадочного материала в дозе 20 Гр начало фазы всходов было на 5 сут позже контроля, в дозах 40 Гр и 150 Гр – на 10 сут, в дозе 100 Гр – на 12 сут.

В дальнейшем, в течение периода вегетации также наблюдали значительную задержку развития растений картофеля, выросшего из клубней, прошедших обработку. После обработки посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр массовые всходы растений (50%) были зафиксированы на 33-и и 35-е сут, а полные (75%) – на 56-е и 40-е сут после посадки соответственно. При этом для растений, выросших из контрольных образцов, данные фенофазы наступали на 17-е и 19-е сут соответственно после посадки. Массовые всходы картофеля, выращенного из посадочных клубней, обработанных в дозе 100 Гр, были отмечены на 52-е сут, при этом фаза полных всходов отсутствовала. Воздействие электронов в дозе 150 Гр на посадочный материал не позволило растениям достичь фаз массовых и полных всходов. Воздействие на семенные клубни в дозе 200 Гр и более привело к полному ингибированию их прорастания.

Тенденция отставания в развитии облученных растений картофеля сохранилась и в фазе бутонизации картофеля. Всходы и бутонизация контрольных образцов имели более короткий период, чем те же стадии облученных растений. Для контрольных образцов фенофаза начала цветения была зафиксирована на 43-и сут после посадки, что было на 29 и 14 сут раньше, чем для образцов, обработанных в дозах 20 и 40 Гр соответственно. Обработка клубней в дозах 100 и 150 Гр не позволила растениям зацвести.

На 2-й год исследования при облучении посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр начало всхо-

Таблица 3. Параметры урожайности картофеля и его фракционный состав

Доза, Гр	Фракции картофеля						Урожайность, т/га	
	крупная, %		средняя, %		мелкая, %			
	1	2	1	2	1	2	1	2
0 (контроль)	68.1	67.0	31.2	31.1	0.7	1.9	16.9	26.5
20	56.3	47.2	36.6	49.7	7.1	3.1	15.4	13.8
40	43.1	49.4	52.7	48.8	4.2	1.8	7.8	13.0
100	41.3	41.4	47.7	54.1	11.0	4.5	3.2	10.7
150	89.0	59.6	11.0	35.7	0	4.7	5.4	11.6
200	0	27.8	0	72.2	0	0	0	11.3
<i>HCP</i> ₀₅							0.5	

Примечание. В графе 1 — 2020 г., 2 — 2021 г. То же в табл. 4.

дов было отмечено на 27 сут позже контроля, в дозах 100 и 150 Гр — на 42 сут позже. При облучении посадочного материала в дозе 200 Гр количество взошедших растений на 59-е сут от посадки составило всего 9%, при этом количество растений, так и не достигнувших фазы начала всходов, составило 25% от общего количества взошедших. В течение периода вегетации наблюдали большую по сравнению с первым годом исследования задержку развития растений картофеля, выросшего из клубней, прошедших обработку, по сравнению с контролем. При этом массовые всходы были зафиксированы только для контрольных образцов и для образцов, обработанных в дозе 40 Гр. В контрольных клубнях данная фенофаза наступала на 20-е сут после посадки, что было на 39 сут раньше, чем при обработке семенных клубней в дозе 40 Гр. В фазе бутонизации сохранялась та же тенденция к отставанию фенофаз у растений, выращенных из облученного картофеля, по сравнению с контрольными образцами. Начало бутонизации у контрольных растений наступило на 23-и сут после посадки, что было раньше на 24 сут, чем при обработке в дозах 100 и 200 Гр, и на 28 сут и на 36 сут позже при обработке клубней в дозах 40 и 20 Гр соответственно. Массовая бутонизация была зафиксирована у растений, посадочный материал которых был обработан в дозах 20 и 150 Гр, что было на 40 и 37 сут позже соответственно, чем для контрольных растений. Полная бутонизация была учтена только у контрольных образцов и наступила на 32-е сут после посадки. Фаза начала цветения была зафиксирована для всех образцов. Для контрольных образцов данная фенофаза была определена на 32-е сут. после посадки, что было раньше от 27-ми до 35-ти сут, чем для образцов, обработанных в дозах от 20 до 200 Гр соответственно. У растений с облучением посадочного материала отсутствовали фазы массового и полного цветения.

Количество взошедших и полноценно вегетирующих в дальнейшем растений уменьшалось с увеличением дозы обработки посадочного материала. В первый год при облучении семенного материала в дозах 20 и 40 Гр количество взошедших растений было на уровне контроля, воздействие в дозе 100 Гр снизило количество взошедших растений на 27.5%, а максимальное снижение густоты стояния растений уменьшилось на 77.5% по сравнению с контролем при обработке посадочного материала в дозе 150 Гр. Дозы свыше 200 Гр привели к полному ингибированию прорастания клубней. Во 2-й год исследования количество полноценно вегетирующих растений в контроле составляло 93.8%. Облучение посадочного материала в дозах от 20 до 200 Гр снижало данный показатель от 47 до 84.4%.

В среднем, за 2 года исследования количество взошедших растений было максимальным в контроле и составило 90.6% от общего количества посадочного материала, что было больше на 23 и 34%, чем при обработке семенного картофеля в дозах 40 и 20 Гр соответственно, на 53% больше, чем при обработке в дозе 100 Гр, и на 71 и 81% больше, чем у растений, посадочный материал которых был обработан в дозах 150 и 200 Гр соответственно.

При фитомониторинге посадок было установлено, что не взошедшие клубни картофеля погибли от воздействия комплекса грибов рода *Fusarium*, вызывающих сухую гниль.

Наблюдаемые процессы всхожести, бутонизации и вегетации повлияли на урожай культуры и его фракционный состав клубней в оба года исследования: чем выше была доза облучения, тем меньший сформировался урожай (табл. 3). При определении фракционного состава выделили такие фракции как мелкая — масса клубней <40 г, средняя — от 40 г до 80 г и крупная — >80 г.

Таблица 4. Данные распространенности форм ризоктониоза на клубнях картофеля, %

Форма ризоктониоза	Доза облучения, Гр											
	0 (контроль)		20		40		100		150		200	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Несклероциальные формы												
Сетчатый некроз	97.8	78.9	100.0	71.4	87.5	57.4	70.0	58.3	66.6	54.8	Нет клубней	41.7
Углубленная пятнистость	91.3	12.2	17.6	20.4	18.7	22.5	0	21.2	0	16.3		75.0
Трещины	13.0	2.0	11.8	3.4	6.2	1.8	10.0	0	0	2.8		0
Уродливость	2.2	2.3	11.8	6.8	0	3.6	0	12.9	0	2.8		0
Склероциальные формы												
Всего	100.0	23.5	100.0	3.4	56.2	26.1	10.0	33.3	0	0	Нет клубней	33.3
Склероции на 1/10 поверхности клубня	32.6	21.2	52.9	3.4	25.0	26.1	10.0	33.3	0	0		33.3
Склероции на 1/4 поверхности клубня	32.6	0.6	41.2	0	25.0	0	0	0	0	0		0
Склероции на 1/2 поверхности клубня	34.8	1.7	5.9	0	6.2	0	0	0	0	0		0

В первый год исследования определение фракционного состава показало, что по сравнению с контрольными образцами при обработке клубней в диапазоне доз от 20 до 100 Гр сформировалось больше мелких и средних клубней — на 3.5–10.3% и на 5.4–21.5% соответственно, крупных — меньше на 11.8–26.8%. Во 2-й год исследования, при воздействии на клубни излучением в дозах от 20 до 200 Гр доля средних клубней также увеличивалась на 4.6–41.1%, крупных — уменьшалась на 7.4–39.2% по сравнению с контролем. Доля мелкой фракции в урожае 2021 г. увеличивалась при облучении во всех дозах, за исключением 40 и 200 Гр. При облучении в дозе 150 Гр в первый год исследования и дозе 200 Гр во 2-й год мелкая фракция картофеля отсутствовала совсем. В первый год исследования при этом преобладала крупная фракция, в то время как во 2-й год — средняя. За 2 года исследования максимальный урожай картофеля был у контрольных образцов, достоверно превышая данный показатель у облученных образцов в зависимости от дозы от 8.8 до 100% в 2021 г. и от 48 до 60% в 2022 г. При этом картофель, выросший из клубней, облученных в дозе 20 Гр, оказался наиболее продуктивным из всех изученных доз.

При фитоэкспертизе клубней картофеля нового урожая было установлено их поражение как несклероциальными, так и склероциальными формами ризоктониоза (табл. 4). Из несклероциальных форм преобладал сетчатый некроз. Углубленную пятнистость наблюдали у всех опытных

образцов, максимальное количество данной формы присутствовало у картофеля, выращенного из контрольных образцов в 2021 г., и составило 91.3%. При облучении посадочного материала в дозах 20 и 40 Гр данный показатель в среднем был на уровне 17–22.5% от контроля. При обработке в дозах 100 и 150 Гр углубленная пятнистость или отсутствовала совсем, как в 2020 г., или в 2021 г. была на уровне 16–21%. Однако максимальная распространенность данной формы в 2021 г. была при облучении семенных клубней в дозе 200 Гр и составила 75%. Высокая доля распространенности трещин на клубнях была зафиксирована в 2020 г. как в контрольных образцах, так и при облучении посадочного материала в дозах 20 и 100 Гр и составила 10% и 13% соответственно. В 2021 г. данный показатель был меньше в 3.5–10 раз по сравнению с контролем. После облучения посадочного материала в дозе 20 Гр в первый год исследования и в дозе 100 Гр во 2-й год присутствовала уродливость клубней нового урожая и ее распространенность превышала этот же показатель у контрольных образцов на 9.6% и 8.3% соответственно.

В проведенном ранее исследовании [20] было установлено, что облучение ускоренными электронами с энергией 1 МэВ отделенных от культуры склероциев гриба *R. solani* в дозах от 20 до 900 Гр существенно не влияло на их рост. Облучение в дозах свыше 4500 Гр позволило полностью ингибировать развитие гриба в течение всего периода наблюдений.

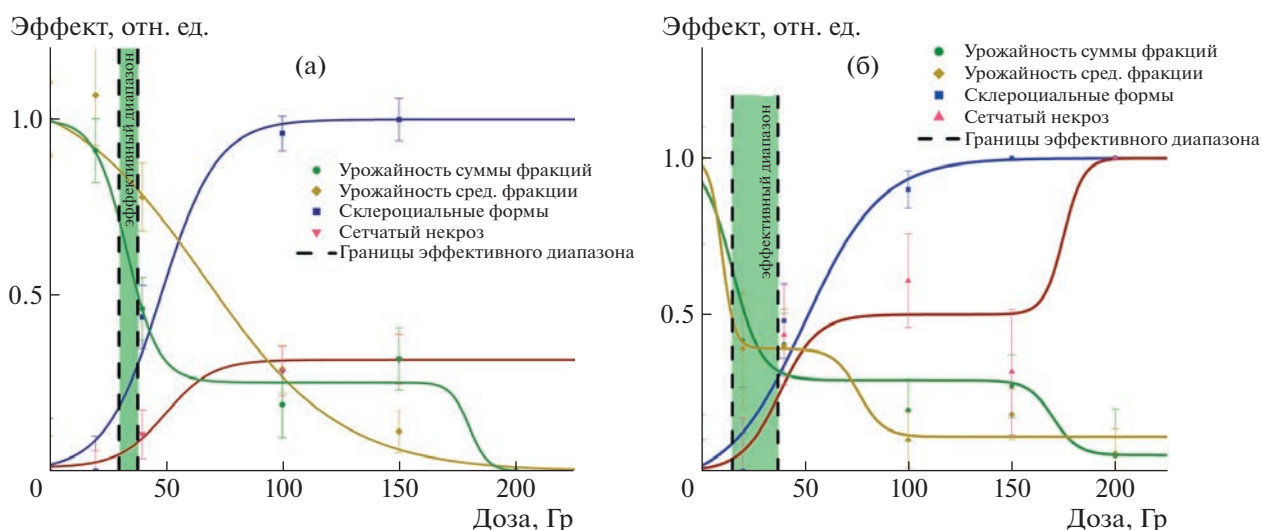


Рис. 3. Зависимости общего урожая картофеля, урожая средней фракции и распространенности склероциальных и несклероциальных форм ризиктониоза на клубнях нового урожая от дозы облучения посадочного материала: (а) – 2020 г., (б) – 2021 г.

В данном исследовании склероциальные формы ризиктониоза присутствовали практически на всех образцах обработанного картофеля, исключение составили клубни, посадочный материал которых был облучен в дозе 150 Гр как в первый, так и во второй год исследования. Для двух годов исследования распространенность склероциальных форм на клубнях нового урожая различалась. В 2021 г. в большей степени эти формы поражения наблюдали у клубней, посадочный материал которых был обработан в дозе 20 Гр, где распространенность склероциев на поверхности клубней составила 100%, в меньшей степени при обработке в дозе 40 Гр – 56.2%, и менее всего они встречались на клубнях, обработанных в дозе облучения 100 Гр – 10.0%.

В 2021 г. распространенность склероциальных форм на клубнях нового урожая была меньше по сравнению с 2020 г. Даже у контрольных образцов она составляла 23.5% от общего количества клубней. У образцов, обработанных в дозах 100 и 200 Гр, данный показатель был максимальным и составил 33.3%, превышая контроль на 10.5 и на 30% для клубней, посадочный материал которых обработан в дозе 20 Гр. В целом на клубнях преобладали склероции, занимающие 1/10 поверхности клубня.

В 2020 г. преобладала распространенность склероциев на 1/4 и 1/2 поверхности клубня, в 2021 г. данные показатели были значительно ниже или вообще отсутствовали. Меньшая распространенность склероциев на поверхности клубней нового урожая при обработке посадочного материала в диапазоне доз от 40 до 150 Гр в сравнении с контролем (1/10, 1/4 и 1/2 поверхности

клубней соответственно) объясняется более длительным процессом формирования растений, более коротким периодом клубненакопления и соответственно меньшим периодом времени, когда клубни могли быть заселены грибом *R. solani*.

Более высокая эффективность обработки ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ для подавления склероциальных форм ризиктониоза, локализованных на поверхности картофеля, по сравнению с несклероциальными формами связана проникновением низкоэнергетичных электронов в поверхностные слои клубня, расположенные на глубине не более 3 мм от поверхности клубня, без оказания воздействия на внутренние структуры картофеля.

Доля непригодных клубней нового урожая варьировалась в зависимости от дозы обработки посадочного материала. При облучении семенного картофеля в дозе 20 Гр данный показатель составил 100%, так же как и для контроля, при облучении в дозах 40 и 100 Гр – на уровне 74.4 и 55.0% соответственно. При обработке семенного картофеля в дозе 150 Гр непригодные клубни полностью отсутствовали.

На рис. 3 представлены зависимости общего урожая, урожая средней фракции, как наиболее востребованной на рынке, а также зависимости распространенности склероциальных и несклероциальных форм ризиктониоза клубней нового урожая от дозы облучения семенного картофеля, полученные в 2020 г. и в 2021 г. Полученные экспериментальные данные могут быть аппроксимированы сигмоидальными зависимостями вида:

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

где u_1 — максимальная величина функции; u_2 — параметр, характеризующий ширину распределения функции по устойчивости биологических объектов к дозе облучения, u_3 — доза облучения, при которой количество устойчивых к облучению биообъектов уменьшается в 2 раза по сравнению с контрольным показателем, u_4 — уровень, показывающий количество биообъектов, устойчивых к максимальной полученной дозе облучения. Некоторые зависимости имеют более сложный вид и представимы в виде суммы из двух сигмоидальных функций. Сигмоидальный характер зависимостей говорит о различной восприимчивости образцов клубней картофеля и пораженного культуру фитопатогена к воздействию ионизирующего излучения. Влияние на полученный биологический эффект оказывает количество актов ионизации на единицу поверхности клубня, а также распределение глазков и склероциев по поверхности клубней.

Исходя из полученных эффектов подавления распространенности ризоктинииоза на клубнях нового урожая и снижения урожайности картофеля от дозы облучения семенного материала, были выбраны критерии оптимального диапазона доз предпосадочной радиационной обработки клубней картофеля. Нижняя граница диапазона соответствовала подавлению распространенности склероциальных форм ризоктинииоза на клубнях нового урожая от 10% и больше по сравнению с контрольными показателями, а верхняя граница диапазона определялась снижением урожая клубней не более, чем на 50% по сравнению с необработанным семенным картофелем. Таким образом, с учетом погрешностей аппроксимации зависимостей, представленных на рис. 3, для первого года исследования эффективный диапазон доз составил от (19 ± 2) до (36 ± 3) Гр, для второго года — от (15 ± 2) до (25 ± 3) Гр.

Таким образом, по результатам 2-летнего исследования было показано, что поверхностная обработка семенного картофеля ускоренными электронами в диапазоне от 20 до 25 Гр является эффективной для улучшения качества урожая культуры за счет подавления заболеваемости ризоктониозом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что предпосадочное облучение семенных клубней картофеля в диапазоне доз от 20 до 200 Гр приводило к задержке развития возросших растений, свыше 200 Гр — к полному ингибированию прорастания клубней. Чем выше была доза облучения посадочного материала, тем позже наступали фазы всхожести, бутонизации и вегетации растений. При этом все

дозы показали нелинейный отклик развития различных фаз вегетации растений от дозы облучения.

Было отмечено снижение урожая клубней, прошедших предпосевную радиационную обработку, с увеличением дозы облучения семенного картофеля, однако доля непригодных клубней в урожае также снижалась с увеличением дозы. Обработка посадочного материала также повлияла на фракционный состав клубней нового урожая.

Распространенность различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая снижалась с увеличением дозы предпосадочной обработки семенного картофеля ускоренными электронами с энергией 1 МэВ, что могло быть связано не только с прямым воздействием излучения на фитопатоген, но и с более коротким периодом клубнекопления и, соответственно, меньшим периодом времени, когда клубни могли быть заселены грибом *R. solani* из почвы.

При этом низкоэнергетичные электроны воздействовали только на верхние, пораженные грибом участки клубней, что делает такой способ обработки наиболее предпочтительным для корнеплодов.

На основании проведенного исследования рекомендуемый диапазон доз предпосадочного облучения семенного картофеля, улучшающий фитосанитарное состояние урожая, составляет от 20 до 25 Гр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nazarov P.A., Baleev D.N., Ivanova M.I.* Infectious plant diseases: Etiology, current status, problems and prospects in plant protection // *Acta Natur.* 2020. V. 12. № 3. P. 46–59.
2. *Антонова Т.С., Маслиенко Л.В., Мурадосилова Н.В., Саукова С.Л.* Виды грибов из рода *Фузариум*, встречающиеся на подсолнечнике в Краснодарском крае, и их патогенность // *Современная микология в России.* М.: НАМ РФ, 2002. С. 171.
3. *Бердыш Ю.И.* Распространение основных вредителей и болезней сельскохозяйственных культур в Краснодарском крае в 2003 году и прогноз их появления в 2004 году // *Краснодар: Пограничная госинспекция по карантину растений по Краснодарскому краю*, 2004. 35 с.
4. *Вянгеляускайте А.П., Жуклене Р.М., Жуклис Л.П.* Вредители и болезни овощных культур. М: Агропромиздат, 1989. 462 с.
5. *Жуковская С.А., Овчинникова А.М.* Возбудители грибных болезней сои // *Возбудители болезней сельскохозяйственных растений Дальнего Востока* / Под. ред. Азбукина З.М. М.: Наука, 1980. С. 5–50.
6. *Котова В.В.* Корневые гнили гороха и вики и меры борьбы с ними. СПб.: ВИЗР, 2004. 144 с.
7. *Малюга А.А., Енина Н.Н., Щеглова О.В.* Агротехнические и химические меры борьбы с ризоктониозом

- картофеля. Новосибирск: РАСХН, СибНИИЗиХ, 2010. 24 с.
8. Евстратова Л.П., Николаева Е.В., Кузнецова Л.А., Харин В.Н. Уровень поражения картофеля почвообитающими патогенами в условиях Карелии // Агро XXI. 2006. № 4–6. С. 10–12.
 9. Малюга А.А., Маринкина Г.А., Баранов Д.С., Васильев В.Г. Роль предшественников в борьбе с ризоктониозом картофеля // Защита и карантин раст. 2011. № 1. С. 28–30.
 10. Халиков С.С., Малюга А.А., Чуликова Н.С. Экологически безопасные препараты на основе механохимической модификации тебуконазола для комплексной защиты картофеля // Агрохимия. 2018. № 10. С. 46–53.
 11. Toms B. Ethical concerns in plant biotechnological research // Inter. J. Biotechnol. Bioengin. Res. 2013. V. 4. № 3. P. 167–174.
 12. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технического развития // Инноватика и экспертиза. 2016. Т. 1. № 16. С. 197–206.
 13. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.
 14. Филипас А.С., Лой Н.Н., Ульяненко Л.Н., Степанчикова Н.С. Поражение сортов мягкой пшеницы стеблевой ржавчиной при раздельном и совместном облучении компонентов ценоза // Докл. РАСХН. 2008. № 6. С. 18–20.
 15. Лой Н.Н., Санжарова Н.И., Гулина С.Н., Сулова О.В. Влияние предпосевного гамма-облучения семян подсолнечника на развитие проростков и пораженность их болезнями // Сб. мат-лов III Международ. научн.-практ. конф. ВНИИТТИ. Краснодар, 2019. Ч. 1. С. 434–439.
 16. ГОСТ 33339-2015 “Межгосударственный стандарт. Радиационная обработка пищевых продуктов. Основные технические требования” (введен в действие Приказом Росстандарта от 31.08.2015 г. № 1220-ст). М.: Стандартинформ, 2016.
 17. Чередниченко Д.В., Савилов В.А., Федосенко Р.В., Вишнева Н.В. Основные тренды на международном рынке радиационных технологий / Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы. Сб. докл. Международ. научн.-практ. конф. Обнинск: ВНИИРиА, 2018. С. 28–31.
 18. Agostinelli S. Geant4 – a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. V. 506. Iss. 3. P. 250–303.
 19. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.
 20. Близнюк У.А., Леонтьев В.А., Малюга А.А. Влияние ионизирующего излучения на рост фитопатогена *R. solani* // Вестн. МГУ. Сер. 3: Физика. Астрономия. М.: Изд-во МГУ, 2021. № 1. С. 45–49.

Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Harvest Tubers

N. S. Chulikova^{a, #}, A. A. Malyuga^a, U. A. Bliznyuk^{b, c, ##}, P. Yu. Borshchegovskaya^{b, c}, S. A. Zolotov^b,
Ya. V. Zubritskaya^b, V. S. Ipatova^c, A. P. Chernyaev^{b, c}, and I. A. Rodin^{d, e}

^aSiberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS
Novosibirsk region, Krasnoobsk 630501, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Physics Department
Leninskiye gory 1, bld. 2, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^cSkobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
Leninskiye gory 1, bld. 2, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^dLomonosov Moscow State University, Chemistry Department
Leninskiye gory 1, bld. 3, Moscow, GSP-1, 119991, Russia

^eFirst Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov of the Ministry of Health of Russia (Sechenov University),
Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine
ul. B. Pirogovskaya 2, bld. 2, Moscow 119435, Russia

[#]E-mail: natalya-chulikova@yandex.ru

^{##}E-mail: uabliznyuk@gmail.com

This study focuses on the impact of pre-planting irradiation of seed potatoes on the phenophases of the root crop and proliferation of fungus *Rhizoctonia solani* on the new crop tubers. A two-year monitoring of seed potatoes after irradiation shows that treatment of tubers with 30–40 Gy decreases the spread of fungal infection on the surface of the tubers. It was found that low-energy electrons, used in the experiment, are the most effective irradiation treatment, since they penetrate in the upper layers of potato tubers affected by the fungus.

Key words: radiation processing, accelerated electrons, sclerotia of *Rhizoctonia solani* Kühn, potato phenology, fractional composition, crop yield.