ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 2023, том 57, № 4, с. 304–313

РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ

УДК 541.15:541.515:543.422.27

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА УРОЖАЙНОСТЬ И ОСТРУЮ ТОКСИЧНОСТЬ СЕМЕННЫХ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ СОРТА “МЕТЕОР”

© 2023 г. А. С. Аллаярова[a], А. В. Шитикова[a], И. И. Файнгольд[b], У. Ю. Аллаярова[b], Е. Н. Климанова[b], Т. Е. Сашенкова[b], С. В. Демидов[b], С. Д. Чекалина[b], С. Р. Аллаяров[b, *]

[a] *Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, 127434 Россия*

[b] *Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия*

*****E-mail: sadush@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2022 г.
После доработки 14.03.2023 г.
Принята к публикации 15.03.2023 г.

Исследовано влияние дозы предпосевного γ-облучения клубней на анатомо-морфологическое строение, урожайность и дегустационные свойства картофеля сорта “Метеор”. В картофеле, выращенном из облученных дозами 500–600 Гр клубней, обнаружены морфологические нарушения – клювообразные, сердцевидные клубни крупной фракции, мелкие клубни в форме эмбрионов, хотя во время вегетационного развития не были отмечены внешние анатомо-морфологические различия стеблей и листьев растений картофеля вне зависимости от дозы предпосевного облучения клубней. Облучение дозами 200–300 Гр семенных клубней приводит к наибольшей урожайности и рентабельности, а также наилучшим дегустационным качествам выращенного картофеля. Эксперименты по изучению токсичности облученных дозами 100–1500 кГр клубней картофеля и сока, выделяемого в процессе их радиолиза дозами 1200–5000 кГр, показали на отсутствие негативного влияния на организм употреблявших их животных. При этом у подопытных животных не наблюдается угнетение физиологических процессов пищеварения, выделения и обмена веществ, а также уровень глюкозы в их крови остается в пределах физиологических референтных значений. Экспериментально установленные наибольшие дозы γ-облучения картофеля и дозы введения водной дисперсии облученного продукта в организм мышей (грамм вещества на 1 кг живой массы животного), не вызвавшие клинических проявлений, составляли 10 г/кг облученного дозой 1500 кГр порошка клубней картофеля или 20 г/кг порошка высушенного сока, выделявшегося в ходе облучения клубней картофеля дозой 2000 кГр.

Ключевые слова: картофель, предпосевное γ-облучение, подопытные животные, урожай картофеля, анатомо-морфологическое строение и дегустационные свойства, токсичность

DOI: 10.31857/S0023119323040022, **EDN:** QMHGYR

ВВЕДЕНИЕ

Картофель является одним из основных продуктов потребления для человека, производимых во всем мире [1], поскольку он является важным источником энергии, углеводов и пищевых волокон, питательные характеристики которого (например, усвояемость крахмала и гликемический индекс) важны для здоровья человека. Срок хранения клубней зависит от многих факторов, при длительном хранении картофеля, происходит снижение веса клубней за счет процессов метаболизма. В процессе транспирации с поверхности клубней, и особенно через образующиеся ростки испаряется большое количество влаги, что приводит не только к потере веса клубней, но также к снижению товарного качества и неудобствам, связанным с обращением проросшего картофеля. Для торможения этого процесса и продления вегетативной паузы часто применяются химические агенты, которые, при своей высокой эффективности являются экономически затратными, неудобными в обращении и не всегда гарантируют безопасность обработанной продукции, а также негативно влияют на здоровье потребителей в силу наличия остаточных химических соединений в продукте.

Известно [2, 3], что облучение ионизирующим излучением задерживает рост картофеля посредством ингибирования ростовых клеток, а также радиолиз проводит антисептирование, подавляя жизнедеятельность патогенной микрофлоры. В случае радиационной обработки картофеля перед

хранением в нем сохраняются органолептика и другие потребительские свойства, а также в отличие от обработки химикатами, обработка излучением обеспечивает отсутствие остаточных химических соединений и минимально влияет на биохимические показатели клубней картофеля [4].

Проведенные исследования [2, 3, 5] показали, что для ингибирования прорастания большинства сортов картофеля необходимая доза γ-облучения колеблется от 50 до 250 Гр. Они являются безопасными для последующего применения картофеля для питания, поскольку, согласно заключению объединенного комитета экспертов ФАО/МАГАТЭ/ВОЗ по облучению пищевых продуктов облучение дозой до 10 кГр является безопасным и не представляет токсикологической опасности для здоровья человека [6].

Предпосевное облучение клубней картофеля ионизирующим излучением в определенных дозах оказывает стимулирующий эффект не только на урожайность растений, но и улучшает его качество. Показано [7], что облучение клубней картофеля γ-излучением в дозе 3 Гр или потоком ускоренных электронов в дозе 1 Гр за 2–6 сут до посадки приводит к выведению из состояния покоя большего количества глазков, быстрее пробуждая точки роста, в которых начинается интенсивное деление клеток, что в конечном итоге способствует более интенсивному корнеобразованию и более высокой кустистости наземной массы с повышенной фотосинтетической активностью. Последнее способствует лучшему образованию клубней, повышению их урожайности на 18–25% и содержания крахмала, белков и витамина С на 15–30%.

Очевидно, что эффективность подобного стимулирующего действия ионизирующего излучения на рост картофеля зависит не только от условия облучения, но и от сорта картофеля и условий дальнейшего его выращивания. В настоящей работе этот вопрос рассматривается на примере влияния предпосевного γ-облучения клубней семенного картофеля сорта “Метеор” на потребительские свойства и урожайность картофеля.

В последнее время особенно актуальным является использование крахмала или крахмалсодержащего сырья для получения термопластичного материала с целью разработки различных способов получения биоразлагаемых упаковок [8, 9]. С использованием сравнительно дешевого крахмала из кукурузы и пшеницы получены биоразлагаемые упаковочные материалы [10]. В этом плане весьма актуальным является радиационное модифицирование крахмала или материала с большим содержанием крахмала для последующего использования в качестве компонента при получении малотоксичных биоразлагаемых композиционных материалов [8]. Однако под лучом ионизирующего излучения высокой энергии в веществе происходит целый ряд химических превращений, что приводит к образованию множества продуктов, отличающихся по свойствам от исходного облучаемого объекта, в том числе и по токсичности. Одной из задач данной работы было исследование относительно широкого диапазона дозы γ-облучения от 10 до 5000 кГр на острую токсичность клубней картофеля, в составе которого основным компонентом является крахмал.

В итоге, целю настоящего исследования являлось всестороннее изучение влияния дозы предпосевного γ-облучения клубней картофеля на анатомо-морфологическое строение, урожайность и дегустационные свойства картофеля сорта “Метеор” в условиях Московской области Российской Федерации, а также изучение острой токсичности облученных клубней картофеля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Объектом исследования был очень ранний сорт картофеля ранней группы спелости российской селекции “Метеор”, содержащий 10–12% крахмала. Клубень овально-округлый с глазками средней глубины, кожура желтая, мякоть светло-желтая.

Токсичность γ-облученных клубней картофеля исследовалась на экспериментальных мышах линии C57Bl/6j массой 20–23 г, выращенных в виварии ФИЦ ПХФ и МХ РАН. Для дополнительного кормления подопытных животных был использован полнорационный безопасный комбикорм “ЧАРА”, предназначенный для содержания конвенциональных мелких лабораторных грызунов (мышей, крыс, хомяков) и производимый ООО “Ассортимент агро” по ГОСТу 23462. Данный корм сбалансирован по аминокислотному составу, минеральным веществам и витаминам, изготовлен из высококачественных компонентов.

Гамма-облучение

Гамма-облучение клубней картофеля проводилось γ-лучами Co^{60} на УНУ “Гамматок-100” ФИЦ ПХФ и МХ РАН при мощности дозы облучения 3.6 Гр/с. Особенности данной установки и возможности ее использования подробно описаны в работе [11].

Полевой опыт

Закладка полевого опыта, учеты, наблюдения и обработка полученных данных методом дисперсионного анализа проведены в соответствии с требованиями методики полевого опыта и “Методики исследований по культуре картофеля”. Для посадки были отобраны клубни картофеля весом 70–80 г. Условия формирования урожая и

изучение качества клубней картофеля на полевом опыте опытной станции в Центре точного земледелия РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева подробно описано в работе [12].

С целью выяснения влияния предпосадочного облучения клубней картофеля γ-лучами применяли широкий диапазон доз облучения 100–600 Гр. Проводили подготовку клубней без ростков и с ростками к облучению, а также измеряли среднюю длину ростков и число глазков в клубнях перед облучением. Средняя длина ростков у клубней условно обозначенных как клубни “с короткими ростками” перед облучением составляла 1.4 см, а в клубнях “с длинными ростками” 2.8 см.

Учет урожая проводился методом взвешивания клубней с каждой делянки, далее в лабораторных условиях определялась структура урожая по пробам клубней, которые сортировали на фракции по наибольшему поперечному диаметру клубня в соответствии с его формой.

Дегустационная оценка опытных образцов отварного картофеля проводилась по методике ФИЦ Картофеля имени А.Г. Лорха. Кулинарные качества выращенного картофеля оценивались в послеуборочных пробах по 9-ти бальной системе согласно методическим рекомендациям ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова.

При проведении дегустационной оценки картофеля учитывались следующие показатели: целостность кожуры и мякоти, которые определялись по внешнему виду в баллах: 9 – целостность кожуры и мякоти не нарушается; 7 – нарушается только целостность кожуры; 5 – нарушается целостность кожуры и верхнего слоя мякоти клубня. Консистенция у клубней (плотность) определялась с помощью пенетрометра в баллах: 7 – нежная, 5 – умеренно мягкая. Мучнистость-рассыпчатость визуально и органолептически определяли в баллах: 9 – зернистая, 7 – очень мучнистая, 5 – мучнистая умеренно. Визуально определялась водянистость, разрезая клубни и оценивая в баллах: 9 – совсем не водянистая, 7 – мало водянистая, 5 – умеренно водянистая. Запах определялся после того, как сварили клубни картофеля, и оценивался в баллах: 9 – очень приятный, 7 – приятный, 5 – удовлетворительный. Вкус клубней определялся в результате дегустации отварного картофеля, также оценивали в баллах: 9 – отличный, 7 – хороший, 5 – удовлетворительный. Развариваемость клубня определялась визуально в баллах: 9 – разваривается очень сильно, 7 – разваривается сильно, 5 – умеренно разваривается. Потемнение сырого и отварного картофеля определялось по тому, с какой скоростью он темнеет и в какой степени изменяется цвет: отварной картофель – после 20 мин и 2 ч, сырой – 24 ч и оценивалось по шкале: 9 – не темнеет, 7 – слабо темнеет, 5 – умеренно темнеет.

Изучение токсичности порошка картофеля, полученного при измельчении облученных γ-излучением клубней картофеля

В работе для исследования токсичности облученных клубней картофеля использовали клубни картофеля, облученные γ-лучами ^{60}Co в дозах 100–1500 кГр. Критериями оценки влияния облученного картофеля на организм мышей служили весовые и патоморфологические показатели, наблюдение за клиническими проявлениями интоксикации, а также анализ уровня глюкозы в крови мышей.

В первой части эксперимента с целью исследования различных доз γ-облучения на токсичность картофеля использовали 25 мышей, распределенных на 4 группы по 5 мышей в каждой. Животным 1, 2 и 3 групп в течение двух месяцев ежедневно внутрижелудочно с помощью атравматичного зонда вводили измельченный и разведенный в воде картофель в дозе 1000 мг/кг. Картофель перед измельчением был облучен γ-лучами ^{60}Co дозами 100–1000 кГр. Животные 4 группы служили биологическим контролем и также в течение двух месяцев в дозе введения 1000 мг/кг получали необлученный разведенный в воде порошок картофеля. Кроме того, всем животным давали комбикорм и воду в неограниченных количествах. Длительность эксперимента составила два месяца.

Во второй части эксперимента было изучено токсическое влияние картофеля (хроническая токсичность), подвергнутого радиационной обработке дозой облучения 1500 кГр, при ежедневном внутрижелудочном введении экспериментальным животным. Для этой серии опытов использовали по 8 мышей в каждой группе. Животные получали внутрижелудочно в дозах введения 5000, 7500 и 10000 мг/кг разведенный в воде порошок картофеля, облученный до измельчения дозой 1500 кГр. Мыши контрольной группы получали внутрижелудочно разведенный в воде порошок необлученного картофеля в дозе введения 5000 и 10000 мг/кг. Кроме разведенных в воде порошков картофеля животные получали комбикорм и воду в неограниченных количествах. Длительность эксперимента составила два месяца.

На протяжении первой и второй серии опытов отмечали общее состояние животных. Общее состояние оценивалось при ежедневном внешнем осмотре животных, а также измерение ректальной температуры, потребления воды и корма выполнялось раз в неделю. Изменение массы тела подопытных животных определялось в течение всего опыта каждый день.

В ходе радиолиза клубней картофеля при комнатной температуре с повышением дозы облучения происходит разрушение коры клубня и начинается выделение сока. Были исследованы токсические характеристики сока, выделяемого после

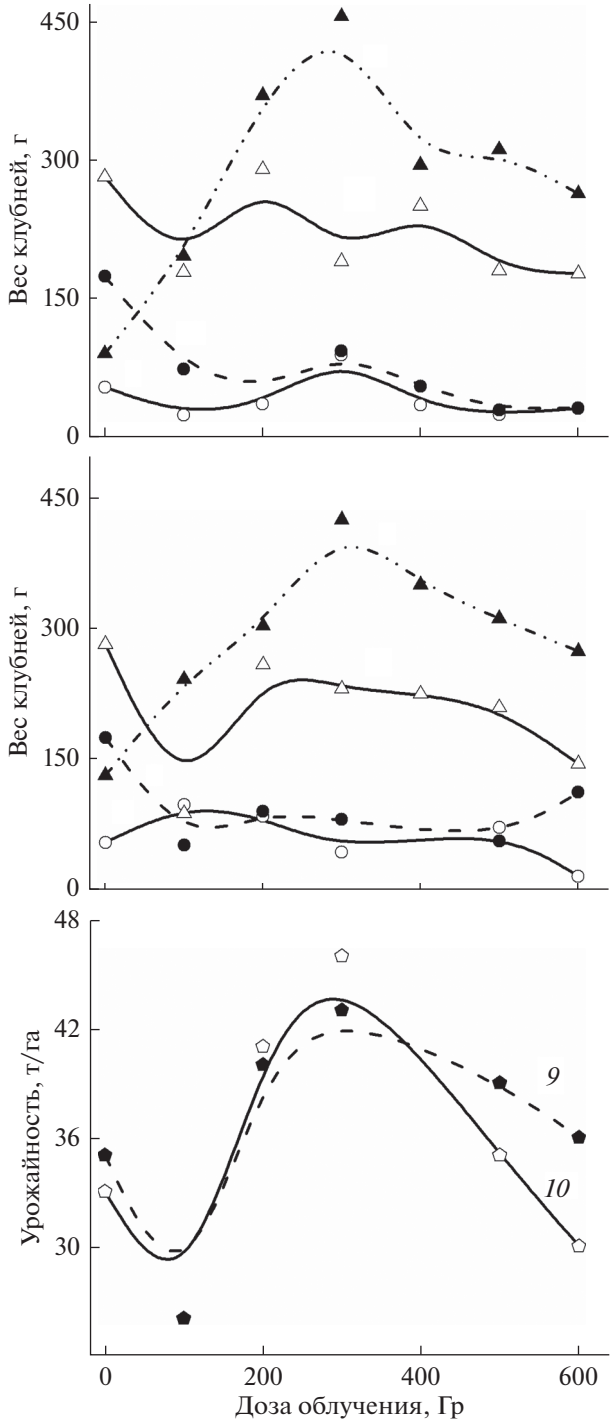

Рис. 1. Зависимость структуры урожая в 1 кусте картофеля (*1*–*8*) в граммах <30 (*1*, *5*), 30–50 (*2*, *6*), 50–80 (*3*, *7*), >80 (*4*, *8*) и урожайности (*9*, *10*) в т/га от дозы предпосевного γ-облучения клубней картофеля без глазков (*1*–*4*, *9*) и с глазками (*5*–*8*, *10*).

радиолиза клубней картофеля дозами γ-излучения 1200, 2000 и 5000 кГр путем внутрижелудочного введения подопытным животным. Кроме сока облученного картофеля животные получали комбикорм и воду в неограниченных количествах. Общая продолжительность наблюдения за животными составила 21 день.

Во всех проведенных опытах для проведения внутрижелудочного введения препаратов был использован атравматичный зонд.

Глюкоза является чувствительным показателем выраженности деструктивных процессов в тканях поджелудочной железы, поэтому в работе было исследовано влияние подвергнутого γ-облучению картофеля на уровень глюкозы в крови мышей. Для этого через два месяца после внутрижелудочного введения порошка облученного картофеля измеряли уровень глюкозы в крови мышей. Концентрацию глюкозы в крови измеряли в цельной крови, полученной из хвостовой вены натощак, используя анализатор глюкозы (OneTouchSelect; США).

По завершении всего цикла экспериментов все выжившие животные подвергались эвтаназии в CO_2-камере и направлялись на вскрытие и патоморфологическое исследование внутренних органов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость урожайности и структуры урожая картофеля от дозы предпосевного облучения клубней

Анализ структуры урожая картофеля, клубни которого были облучены перед посадкой различными дозами γ-излучения проводился после уборки урожая. На рис. 1 приведена зависимость структуры урожая (кривые *1*–*8*) и урожайности (кривые *9*, *10*) от дозы предпосевного γ-облучения клубней картофеля с короткими ростками (кривые *1*–*4*, *9*) и с длинными ростками (кривые *5*–*8*, *10*). Полученные данные показывают, что дозы облучения клубней с короткими ростками перед посадкой 200 и 300 Гр приводят к повышению урожая картофеля на 13 и 8 т/га по сравнению с картофелем, выращенным из необлученных клубней. К тому же при этих дозах предпосевной обработки клубней наблюдается большая доля крупных клубней размером более 80 г в составе урожая картофеля. Это видно при анализе фракционного состава клубней картофеля в 1 кусте по клубням, облученным различными дозами перед их посадкой (рис. 1, кривые *1*–*4*). В урожае картофеля, выращенного из клубня с короткими ростками, облученного дозой 300 Гр на долю клубней размером более 80, 50–80, 30–50 г и меньше 30 г приходится, соответственно, 55, 23, 12 и 9% урожая картофеля. У картофеля, выращенного из предварительно не обработанных клубней, доли вышеуказанных размеров картофеля составляют 15, 47, 29 и 9% урожая. При этом дозы облучения семенного клубня свыше 400 Гр приводят к снижению урожайности и структуры урожая почти до

уровня, наблюдаемого при посадке необлученных клубней. Аналогичная картина наблюдается и при анализе фракционного состава урожая картофеля, выращенного из облученных перед посадкой клубней с длинными ростками. В нем клубни со средним весом более 80 г составляет более 54% всего урожая.

В работе [12] было показано, что дозы γ-облучения 200–300 Гр посевных клубней картофеля сорта “Метеор” приводят к наибольшему приросту в длине ростков и количестве глазков и стеблей, а также в показателях количества фотосинтетической активной биомассы и крахмала в клубнях выращенного картофеля. Сравнительный анализ данных по урожайности на рис. 1 с данными по высоте и количеству стеблей, приведенными в работе [12], приводит к тому, что высота растений оказывает влияние на будущую урожайность, однако в большей степени положительная корреляция с урожайностью наблюдается у показателя, отражающего количество стеблей.

Анатомо-морфологические изменения клубней картофеля, выращенных из семенных клубней, облученных перед посадкой γ-излучением

Очевидно, что изменения морфологических свойств картофеля под действием радиации зависят от дозы облучения, и относительно высокие дозы радиации отличаются повышенными мутагенными последствиями. В проведенных опытах при облучении семенного клубня дозами 100–400 Гр морфологических нарушений у растений картофеля не наблюдалось, они были округлые, хорошо выполненные, глубина залегания глазков была маленькой (рис. 2а–2в). В то же время, при облучении семенных клубней дозами 500 и 600 Гр наблюдались морфологические изменения у выращенных из облученных клубней картофеля, а именно: клювообразные и в форме сердца большие клубни, мелкие клубни в форме эмбрионов, у всех клубней глубоко залегающие глазки (рис. 2г). Следует отметить, что во время вегетационного развития не наблюдалось внешних анатомо-морфологических различий стеблей и листьев растений картофеля вне зависимости от дозы облучения.

Скорее всего, изменение в морфологии урожая картофеля, выращенного из клубней, облученных относительно большими дозами γ-облучения (500–600 Гр), связано с мутагенными последствиями облучения. Известно, что благодаря радиационному мутагенезу получены формы мутантов картофеля с новыми признаками, не встречавшихся в природе, одновременно, при этом значительно сокращается время выведения конкретного сорта картофеля, устойчивого к биотическим и абиотическим стрессам [13, 14], устойчивого к болезням [15] и фитофторе [16, 17], с повышенной устойчивостью к солености почвы [18, 19] и жаре [16].

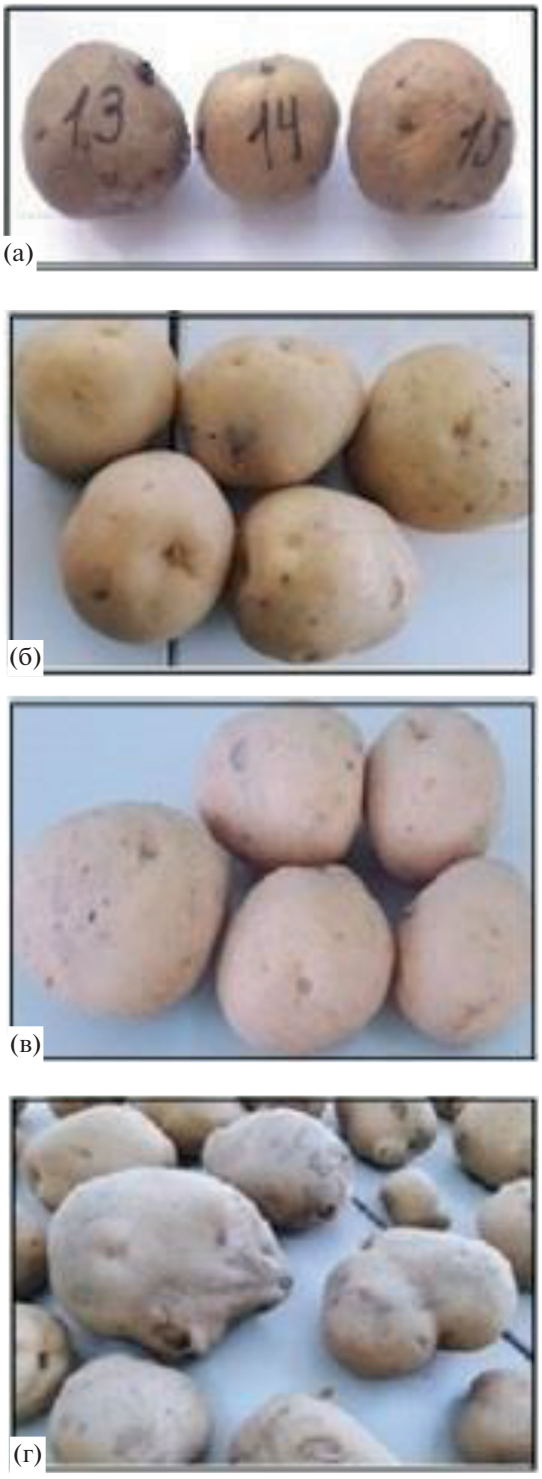

Рис. 2. Морфологические признаки клубней, использованных при посадке (а), а также клубней урожая, полученных из клубней, не облученных (б) и облученных перед посадкой, γ-излучением дозами 100–400 Гр (в) и 500–600 Гр (г).

Таблица 1. Дегустационная оценка картофеля, выращенного из γ-облученных семенных клубней

Характеристики	Доза, кГр													
	0		100		200		300		400		500		600	
	Условие облучение													
	С[1]	Б[2]	С	Б	С	Б	С	Б	С	Б	С	Б	С	Б
Целостность кожуры и мякоти	8.3	8.0	8.1	8.0	8.7	8.0	8.8	8.1	8.7	7.6	7.0	7.1	6.8	6.7
Консистенция мякоти клубня (плотность)	7.5	7.4	6.8	6.7	7.9	7.7	8.2	8.0	6.8	6.7	6.1	6.2	7.7	7.6
Мучнистость-рассыпчатость мякоти клубня	6.3	6.5	6.5	6.4	7.8	7.7	7.7	7.6	5.8	5.8	5.7	5.9	6.2	6.5
Водянистость	5.8	5.7	7.8	7.6	6.2	6.7	7.4	7.0	7.5	7.1	7.2	7.3	5.8	5.7
Запах клубня	6.5	6.5	6.5	6.4	7.7	7.3	8.0	7.9	7.8	7.7	6.5	6.5	6.7	6.6
Вкус клубней	6.7	6.6	7.7	7.6	7.2	7.0	7.9	7.9	7.7	7.6	7.1	7.9	7.3	7.7
Развариваемость клубня	6.7	6.5	8.0	8.1	7.8	7.7	7.8	7.5	7.0	7.0	7.3	7.5	7.2	7.1
Потемнение сырой и вареной мякоти	6.3	6.2	8.1	8.0	7.7	7.6	8.1	8.5	8.3	7.4	7.4	7.4	7.2	7.3

[1] – предпосевное облучение клубней без глазков;
[2] – предпосевное облучение клубней с глазками.

Следует отметить, что установление истинной причины приведенных на рис. 2г морфологических изменений в строении картофеля, выращенном из клубней сорта “Метеор”, облученных перед посадкой дозой 500–700 Гр, требует дополнительных исследований.

Оценка дегустационных показателей клубней картофеля, выращенных из γ-облученных семенных клубней

Результаты дегустационной оценки картофеля, выращенного из γ-облученных семенных клубней приведены в табл. 1. Их анализ показывает, что по дегустационным характеристикам лучшими являются клубни картофеля, выращенные из семенных клубней, облученных дозой 300 Гр вне зависимости от наличия или длины ростков при облучении. Они оказались с наилучшей целостностью кожуры и мякоти, имеют лучшую консистенцию и обладают лучшим запахом и вкусом.

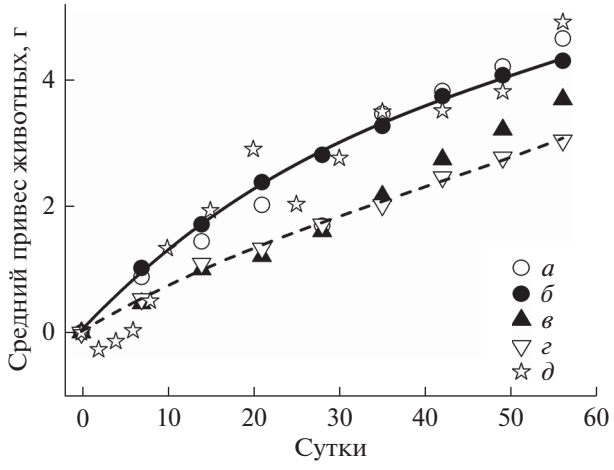

Рис. 3. Изменение массы тела экспериментальных животных, получавших разведенного в воде порошка не облученного (*а*) и облученного картофеля (*б*–*г*), а также стандартный рацион питания вивария ФИЦ ПХФиМХ РАН (*д*). Дозы облучения (кГр): 100 (*б*), 400 (*в*), 1000 (*г*).

Влияние различных доз γ-облучения на токсичность клубней картофеля

В первой серии опытов у мышей, получавших ежедневно внутрижелудочно в дозе 1000 мг/кг разведенного в воде порошка облученного различной дозой γ-излучения (100–400 кГр) картофеля, клинические признаки были без видимых изменений: животные выглядели активными, реагировали на внешние раздражители, потребляли корм и воду, температура, пульс, дыхание были в пределах физиологической нормы. Слизистая глаз без изменений. Кожный покров гладкий, движения животных естественные. Случаев гибели животных не наблюдали. Мыши опытных групп ничем не отличались от контрольных, получавших не облученный картофель.

Изменение массы тела экспериментальных животных, получавших не облученный и облученный картофель приведено на рис. 3. Как видно, животные, получавшие только необлученный (кривая *а*), облученный дозой 100 кГр (кривая *б*) прибавляют в весе практически так же, как и животные, получавшие полноценный стандартный рацион питания вивария ФИЦ ПХФ и МХ РАН (кривая *д*). Последние за время эксперимента прибавили в весе в среднем на 5 г. Однако наблюдается некоторое снижение среднего прироста живой массы мышей, если их кормить картофелем, облученным более высокими дозами радиа-

ции. В результате, в конце эксперимента привес животных, получавших облученный дозами 400 и 1000 кГр картофель, был примерно на 40% ниже, чем при их кормлении стандартным рационом либо картофелем, не облученным или облученным дозой 100 кГр.

Как видно, животные, получавшие внутрижелудочно водную суспензию порошка необлученного или облученного дозой до 100 кГр картофеля, набирают вес, как в случае их кормления полноценным стандартным рационом, т.е. присутствие в их рационе облученного такой дозой картофеля не сказывается на качестве питания и весе животных.

Патоморфологическое исследование внутренних органов подопытных животных не показало существенных различий во внешнем виде между опытными и контрольными группами. Как видно из рис. 4, массовые коэффициенты почек (кривая *а*), селезенки (кривая *б*), сердца (кривая *в*) и легких (кривая *г*) мышей, получавших не облученный и облученный картофель, практически одинаковы и не зависят от дозы облучения картофеля, что косвенно может указывать на отсутствие токсического проявления облученного дозой до 1000 кГр картофеля. Только на кривой зависимости печени мышей, получавших облученный картофель (кривая *д*), наблюдается незначительное увеличение (на 0.25 г) средней массы печени с повышением дозы облучения картофеля до 1000 кГр.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что у животных, получавших разведенный в воде порошок облученного дозой 100–1000 кГр картофеля, не проявляются отрицательные изменения в клинических и патоморфологических показателях по сравнению с контролем, получавшем необлученный картофель. Из этого следует, что кормление γ-облученным дозой до 1000 кГр картофелем не влияет на организм животных, за исключением того, что при кормлении животных картофелем, облученным дозой 400 и 1000 кГр наблюдается снижение привеса в живой массе животных.

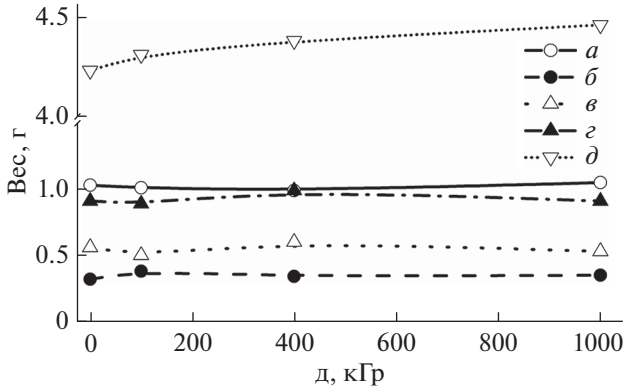

Рис. 4. Изменение средней массы почек (*а*), селезенки (*б*), сердце (*в*), легких (*г*) и печени (*д*) экспериментальных животных, получавших разведенный в воде порошок облученного картофеля, в зависимости от дозы облучения картофеля.

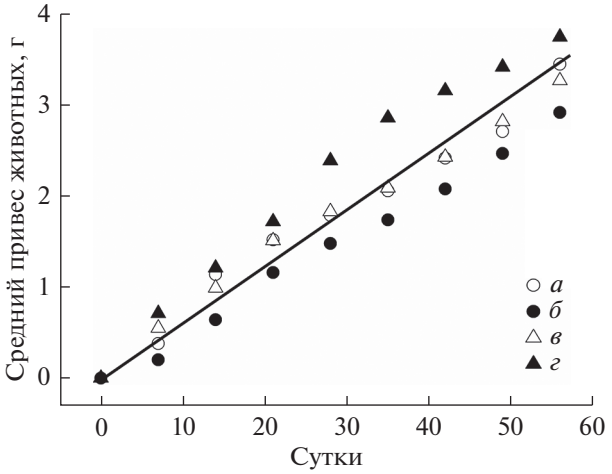

Рис. 5. Изменение живой массы мышей при скармливании облученного и измельченного картофеля в разных дозах введения. Дозы облучения картофеля (кГр): 0 (*а*), 1500 (*б–г*). Дозы введения препарата в животных (мг/кг): 10000 (*а*, *г*), 5000 (*б*), 7500 (*в*).

Влияние дозы введение γ-облученных клубней картофеля на их токсичность

Во второй части эксперимента с подопытными животными было изучено влияние на хроническую токсичность дозы введение в организм мышей водной суспензии γ-облученного картофеля. Установлено, что многократное применение облученного в дозе 1500 кГр картофеля во всех испытанных дозах внутрижелудочного введения (5000–1000 мг/кг) не вызывает значимых изменений в клиническом состоянии опытных мышей. Поведенческие реакции, поедание корма и потребление воды, частота дыхания у всех животных опытных групп оставались в пределах нормы и не отличались от контроля. За период наблюдения у мышей, находящихся в опыте, не было выявлено расстройств пищеварения и мочеотделения. Летальных случаев среди животных в ходе опыта не было. Мыши охотно поедали корм, равномерно прибавляли в весе, независимо от дозы введения суспензии в воде измельченных после облучения дозой 1500 Гр клубней картофеля (рис. 5).

Результаты макроскопического исследования экспериментальных групп показали на отсутствие достоверно значимых отличий по относительной массе внутренних органов у мышей при кормлении облученным дозой 1500 кГр картофелем в изученных дозах введения 5000–10000 мг/кг

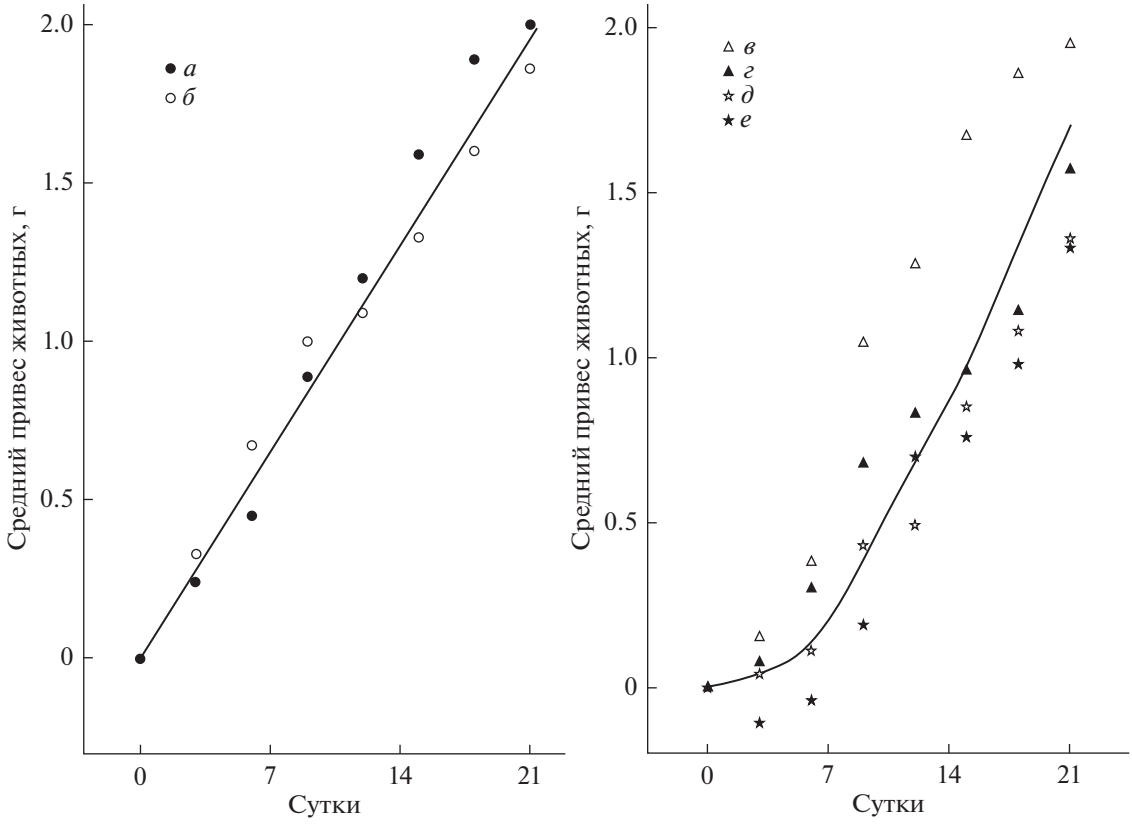

Рис. 6. Изменение массы тела экспериментальных животных, получавших сок, выделявшегося при облучении картофеля дозой (кГр): 2000 (*а*, *б*), 1200 (*в*, *г*), 5000 (*д*, *е*). Дозы внутрижелудочного введения водной суспензии сока облученного картофеля 10000 мг/кг (*а*) и 20000 мг/кг (*б*), а также самого сока облученного картофеля ежедневно по 0.5 мл (*в*, *д*) и 1.0 мл (*г*, *е*).

по сравнению с аналогичными показателями у интактных животных.

На основании проведенных экспериментов было выявлено, что облучение картофеля дозой γ-облучения до 1500 кГр не оказывает негативного влияния на организм животных и доказывает его безвредность для потребления человеком.

Токсические свойства сока, выделяемого в ходе облучения картофеля при комнатной температуре

Токсические свойства сока, выделяемого в ходе радиолиза клубней картофеля дозами γ-излучения 1200, 2000 и 5000 кГр были исследованы на экспериментальных мышах.

Согласно рекомендациям, данным в “Руководстве по проведению доклинических исследований лекарственных средств” [20], максимальный объем вводимого препарата внутрижелудочно мышам может быть не более 0.5 мл. Поэтому сок картофеля с дозами облучения 1200 и 5000 кГр вводили внутрижелудочно животным в неизменном виде по 0.5 и 1 мл (два введения по 0.5 мл в течение 3 ч) на протяжении трех недель. При этом сок картофеля с дозой облучения 2000 кГр был предварительно высушен и введен однократно в виде водной суспензии подопытным животным внутрижелудочно в дозах 10000 и 20000 мг/кг. Общая продолжительность наблюдения за животными составила 21 день.

При внутрижелудочном введении порошка из сока, облученного дозой 2000 кГр, и сока картофеля с дозами облучения 1200 и 5000 кГр ни одна мышь не пала. После введения видимых изменений в двигательном и пищевом поведении животных не отмечено.

Данные о влиянии облученного сока картофеля на массу тела экспериментальных животных приведены на рис. 7. Как видно, не зависимо от формы введения препарата, положительная динамика массы тела мышей опытных групп наблюдается как в случае введения водной суспензии порошка облученного картофеля (рис. 6, кривые *1*, *2*), так и при введении сока облученного картофеля (рис. 6, кривые *3*–*6*). При этом не наблюдается явных различий в изменении массы тела по сравнению с контрольной группой. Следует отметить, что в ходе введения сока облученного картофеля заметный набор веса подопытными животными начинается после недельного ежедневного внутрижелудочного

введения сока облученного картофеля, причем дозы облучения картофеля в диапазоне 1200–5000 кГр практически не сказывается на питательности сока картофеля.

После окончания экспериментальной части исследования все животные были подвергнуты эвтаназии с последующим макроскопическим описанием внутренних органов. В результате вскрытия и последующего макроскопического исследования изменения во внутренних органах опытных животных, получивших внутрижелудочно облученный разными дозами сок картофеля, не обнаружены.

Таким образом, летальности достигнуть не удалось. Исследуемый сок картофеля, облученного дозой до 5000 кГр, является малотоксичным при внутрижелудочном введении.

Как видно из вышеописанных наблюдений за животными, внутрижелудочное введение облученного картофеля не угнетает физиологические процессы пищеварения, выделения, обмена веществ. Все животные опытных групп на всем протяжении эксперимента были физически активны. Облучение картофеля не повлияло также на уровень глюкозы в крови мышей. Во всех группах животных уровень глюкозы в крови был в пределах физиологических референтных значений (рис. 7).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

• предпосевные дозы облучения 200–300 Гр клубней сорта “Метеор” при посадке в условиях Московской области Российской Федерации приводят к наибольшему повышению урожая и содержанию крупных клубней картофеля с его лучшими потребительскими свойствами.

• сравнительный анализ данных по урожайности, по высоте и количеству стеблей позволяет сделать следующий вывод – хотя высота растений оказывает влияние на будущую урожайность, однако в большей степени положительная корреляция с урожайностью наблюдается у показателя, отражающего количество стеблей в период роста растений картофеля;

• в отличие от урожая без морфологических нарушений, выращенного из клубней, облученных дозами 100–400 Гр, в формах картофеля из облученных дозами 500–600 Гр семенных клубней, наблюдаются морфологические изменения, а именно: клювообразные и в форме сердца большие клубни, мелкие клубни в форме эмбрионов;

• оценка влияния облученного картофеля на организм мышей по изменению веса животных, содержанию глюкозы в крови, патоморфологическим показателям и клиническим проявлением интоксикации свидетельствует, об отсутствии токсического проявления в случае кормления подопытных животных γ-облученными дозой до 100–1500 кГр клубнями картофеля или соком, выделявшимся при их радиолизе дозой 1200–5000 кГр;

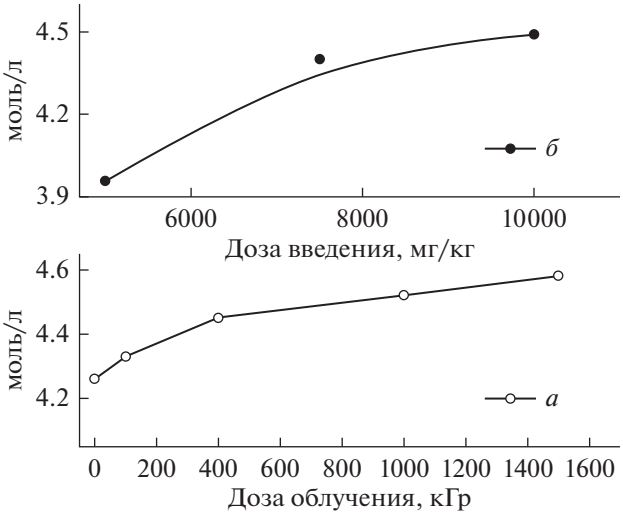

Рис. 7. Содержание глюкозы в крови мышей в течение эксперимента в зависимости от дозы облучения картофеля (*а*) и от дозы введения облученного картофеля (*б*).

• наблюдение за животными показало, что внутрижелудочное введение водной суспензии порошка γ-облученных клубней картофеля или сока, выделяемого в процессе радиолиза клубней, не приводит к угнетению физиологических процессов пищеварения, выделения или обмена веществ подопытных животных. Все животные опытных групп на всем протяжении эксперимента были физически активны, и уровень глюкозы в их крови был в пределах физиологических референтных значений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Государственного задания АААА-А19-119041090087-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *DeFauw S.L., He Z., Larkin R.P., Mansour S.A.* // Sustainable Potato Production: Global Case Studies. Dordrecht: Springer, 2012. P. 3.
2. *Nouri J., Toofanian F.* // Pakistan journal of biological science. 2001. V. 4. P. 1275.
3. *Rezaee M., Amasi M., Farhani A.M., Minae S., Khodadadi M.* // J. Agr. Sci. Tech. 2011. V. 13. P. 829.
4. *Afifi A.M.R., El-Beltagi Y.S., Aly A.A., Elk-Ansary A.E.* // Not Bot Horti Agrobo. 2012. V. 40. P. 129.
5. *Singh S., Singh N., Ezekiel R., Kaur A.* // Carbohydrate polymers. 2010. V. 10. P. 1016.
6. *Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Study Group* // WHO Technical Report Series № 890. Geneva: World Health Organization, 1999. 94 p.
7. *Лазаревич С.В., Сергеева И.И., Лазаревич С.С., Азаренко Ю.В.* // Радиобиология: курс лекций: в 4 ч. Ч. 4. Прикладная радиобиология. Горки: БГСХА, 2012. 64 с.

8. *Bhat R., Karim A.A.* // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2009. V. 8. № 2. P. 44.
9. *Gomes M.E., Ribeiro A.S., Malafaya P.B., Reis R.L., Cunha A.M.* // Biomaterials. 2001. V. 22. P. 883.
10. *Bhatnagar S., Hanna M.A.* // Cereal Chem. 1996. V. 73. P. 601.
11. *Кирюхин Д.П., Кичигина Г.А., Аллаяров С.Р., Бадамшина Э.Р.* // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. С. 224.
12. *Аллаярова А.С., Шитикова А.В., Аллаяров С.Р., Демидов С.В., Аллаярова У.Ю.* // Химия высоких энергий. 2023. Т. 57. С. 132.
13. *Das A., Gosal S.S., Sidhu J.S., Dhaliwal H.S.* // *Euphytica*. 2000. V. 114. P. 205.
14. *Al-Safadi B., Arabi M.I.E.* // Journal of Genetics and Breeding. 2003. V. 57. P. 359.
15. *Wang Y., Wang F., Zhai H., Liu Q.* // Sci. Horti. 2007. V. 111. P. 173.
16. *Gosal S.S., Das A., Gopal J., Minocha J.L., Chopra H.R., Dhaliwal H.S.* // Proceedings of a Final Research Co-ordination Meeting. TECDOC-1227. Vienna: IAEA, 2001. P. 7.
17. *Haverkort A.J., Bicamumpaka M.* // Netherlands Journal of Plant Pathology. 1986. V. 92. P. 239.
18. *Saif-Ur-Rasheed M., Asad S., Zafar Y., Waheed R.A.* // Proceedings of a Final Research Co-ordination Meeting. TECDOC-1227. Vienna: IAEA, 2001. P. 61.
19. *Sharabash M.T.* // Proceedings of a Final Research Co-ordination Meeting. TECDOC-1227. Vienna: IAEA, 2001. P. 83.
20. *Миронов А.Н., Бунятян Н.Д., Васильев А.Н.* // Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М: Гриф и К., 2012. 994 с.