

**Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции**

УДК 543.429.22:577.334

DOI 10.31857/S2500262725020126 EDN DFMGZH

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАКТА ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ**© 2025 г. **И. М. Меджидов, В. А. Харламов**, кандидат биологических наук, **Н. Н. Лой**, кандидат биологических наук, **Д. И. Титова**, кандидат биологических наук*Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
249035, Калужская обл., Обнинск, Киевское ш., 1, корп. 1  
E-mail: immedzhidov@mail.ru*

*Исследование проводили с целью изучения возможности применения спектрометрии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) для идентификации факта облучения низкоэнергетическими электронами семян яровой пшеницы. Радиационную обработку семян сорта Ирень (урожай 2023 г., репродукция 1) проводили спустя год после сбора урожая с использованием электронного облучения с энергией 100 и 120 кэВ в дозах 1...5 кГр с шагом 1 кГр (мощность – 100 Гр/имп.). Необлученные семена использовали в качестве контроля. Семена после облучения хранили без доступа света при комнатной температуре и влажности не более 60 %. Спектрометрию проводили спустя 14, 28 дней, 3 и 6 месяцев после облучения. Изучали изменения сигнала ЭПР в зависимости от дозы облучения, а также скорость его ослабления с течением времени. Отмечено возрастание интенсивности ЭПР-сигнала с увеличением дозы облучения. Разница в амплитуде сигнала между образцами, обработанными при 100 и 120 кэВ, в зависимости от дозы через 14 дней достигала 8...55 %, через 28 дней – 12...62 % ( $p \leq 0,05$ ). В первые 14 и 28 дней после облучения зарегистрировано значительное снижение интенсивности сигнала в зависимости от дозы на 16...38 % (100 кэВ) и 16...32 % (120 кэВ). Спустя 3 месяца интенсивность сигнала уменьшилась на 5...25 % (100 кэВ) и 5...47 % (120 кэВ) относительно данных 28-го дня. Через 6 месяцев интенсивность сигнала уменьшилась на 26...33 % (100 кэВ) и 26...41 % (120 кэВ), по сравнению с трехмесячными данными. Величина g-фактора (в точке пересечения первой производной ЭПР-сигнала с нулевой линией) составляла 2,0048, что свидетельствует о присутствии углерод-центрированных радикалов.*

**APPLICATION OF EPR SPECTROMETRY FOR IDENTIFYING THE IRRADIATION OF WHEAT SEEDS WITH LOW-ENERGY ELECTRONS****I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, N. N. Loy, D. I. Titova***Russian Institute of Radiology and Agroecology  
National Research Centre «Kurchatov Institute»,  
249035, Kaluzhskaya obl., Obninsk, Kievskoe sh., 1, korp. 1  
E-mail: immedzhidov@mail.ru*

*The study aimed to investigate the applicability of electron paramagnetic resonance (EPR) spectrometry for detecting the radiation treatment of spring wheat seeds using low-energy electrons. Seeds of the Iren variety (2023 crop, first reproduction) were irradiated one year after harvesting with electrons at energies of 100 and 120 keV over a dose range of 1...5 kGy (step 1 kGy), dose rate was 100 Gy/imp. Non-irradiated seeds served as the control. After irradiation, the seeds were stored in the dark at room temperature and relative humidity below 60 %. EPR spectrometry was performed 14, 28 days, 3 and 6 months after irradiation. The dose dependence of the EPR signal and its attenuation over time were studied. An increase in EPR signal intensity with increasing dose was observed. The difference in signal amplitude between samples irradiated at 100 and 120 keV, depending on the dose, reached 8...55 % at day 14 and 12...62 % at day 28 ( $p \leq 0,05$ ). In the first 14–28 days, the signal decreased by 16...38 % (100 keV) and 16...32 % (120 keV), depending on the dose. After 3 months, the intensity decreased by 5...25 % (100 keV) and 5...47 % (120 keV), relative to the data of day 28. After 6 months, the signal intensity decreased by 26...33 % (100 keV) and 26...41 % (120 keV) relative to the 3-month data. The g-factor (at the zero-crossing point of the first derivative of the EPR signal) was 2.0048, confirming the presence of carbon-centred radicals.*

**Ключевые слова:** пшеница (*Triticum aestivum* L.), семена, низкоэнергетическое электронное излучение, ЭПР-спектрометрия.

**Keywords:** wheat, seeds, low-energy electron radiation, EPR spectrometry.

Согласно информации, предоставленной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО), мировые потери растениеводческой продукции составляют от 10 до 30 % [1]. Основные их причины – различные заболевания растений, вызываемые микроорганизмами (фитопатогенами), а также насекомые-вредители. В связи с этим возникает необходимость применения средств защиты растений.

Для борьбы с болезнями и вредителями растений активно применяют агрохимикаты. Однако у них есть

ряд недостатков, среди которых можно выделить токсичность для людей и окружающей среды, а также загрязнение почвы и грунтовых вод [2]. В качестве альтернативы предлагают радиационные технологии, которые более эффективны и безопасны для окружающей среды [3].

Радиационную обработку сельскохозяйственных продуктов можно проводить с использованием гамма-излучения ( $^{60}\text{Co}$  или  $^{137}\text{Cs}$ ), электронного излучения с энергией до 10 МэВ и тормозного излучения до 5 МэВ [4]. Для эффективной защиты зерна от бакте-

рий и грибов без негативного воздействия на пищевые качества необходима доза до 10 кГр [3], для уничтожения насекомых – 0,1...1,0 кГр [3, 5]. Такие параметры подходят для обработки семян, не предназначенных для посева.

В литературе [6] охарактеризован способ предпосевной обработки семян низкоэнергетическими (до 300 кэВ) электронами, при котором глубина проникновения излучения настолько мала, что позволяет избежать повреждения зародыша. Такие электронные ускорители представляют собой электронно-физические устройства и не содержат радиоактивных изотопов. У семян зерновых после обработки низкоэнергетическими электронами снижается зараженность фитопатогенами, ростовые показатели при этом существенно не нарушаются или даже улучшаются [6, 7].

Хотя радиационная обработка сельхозпродуктов имеет доказанные преимущества, существуют опасения в отношении такого подхода. Правила, установленные объединенными комитетами Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), предписывают предотвращать чрезмерное или повторное облучение продуктов [4]. Для проверки соответствия продуктов требованиям безопасности используют специальные методы идентификации [8, 9]. Ионизирующее излучение вызывает образование в облучаемом материале свободных радикалов (парамагнитных частиц). Их количество зависит от поглощенной дозы излучения. Один из наиболее чувствительных методов идентификации факта облучения – спектрометрия на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Он предусматривает изучение материалов с неспаренными электронами. Идентификация происходит путем поглощения магнитного поля объектом исследования и продуцированием квантовых переходов между энергетическими уровнями. Этот метод регламентируют российские (ГОСТ 31672-2012, ГОСТ 31652-2012, ГОСТ Р 52529-2006 и др.) и европейские (EN13708:2001, EN 1787:2000 и т.д.) стандарты.

Цель исследования – выявление возможности применения ЭПР-спектрометрии для идентификации факта облучения низкоэнергетическими электронами семян яровой пшеницы.

Для ее достижения решали следующие задачи: оценить связи между интенсивностью ЭПР-сигнала семян пшеницы и дозой облучения; изучить изменения динамики сигнала ЭПР со временем; проанализировать возможности и ограничения использования метода ЭПР-спектрометрии для определения факта облучения.

**Методика.** Объектом исследования служили семена яровой пшеницы сорта Ирень урожая 2023 г. I репродукции. Их облучали спустя год после сбора урожая на широкоапертурном ускорителе электронов «Дуэт» (Томск, Россия) с энергией 100 и 120 кэВ в диапазоне доз от 1 до 5 кГр с шагом 1 кГр. Необлученные семена использовали в качестве контроля. После облучения их помещали в полиэтиленовые пакеты и до пробоподготовки хранили при комнатной температуре без доступа света и относительной влажности не более 60 % в течение 14 суток. Далее семена измельчали в кофемолке «Kitfort» и просеивали через сито 0,5 мм. Из каждого образца отбирали по 30 мг вещества и помещали в кварцевую пробирку диаметром 4 мм. ЭПР-спектры образцов регистрировали с использованием спектрометра ESR70-03 XD/2 (Минск, Беларусь) на микроволновой полосе X. Частота СВЧ составляла 9,4 ГГц.

Для повторных учетов (через 28 дней, 3 и 6 месяцев) образцы хранили в этих же пробирках в течение всего срока измерений. Эксперименты проводили в трех повторностях, по три пробирки на каждую повторность.

Параметры ЭПР-спектрометра во время регистрации были следующими: середина поля – 3350 Э; диапазон поля – 1000 Э; частота модуляции – 100 кГц; модуляция – 4 Э; мощность СВЧ – 50 мВт; коэффициент усиления – 50; время снятия спектра – 600 с.

G-фактор – параметр, который позволяет установить спин электрона и определить свойства парамагнитного центра. Его определяли по формуле:

$$h_{\nu} = g\mu_B B$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – СВЧ-частота X-диапазона;  $\mu_B$  – магнетон Бора;  $B$  – выбранная точка магнитного поля (Тл).

Результаты анализировали с использованием Microsoft Excel 2022. Для каждой точки измерений рассчитывали среднее значение и стандартную ошибку. Статистическую значимость различий между облученными образцами и контролем, а также между опытными группами, полученными при различных энергиях (100 и 120 кэВ) и при одинаковых дозах, оценивали с при-

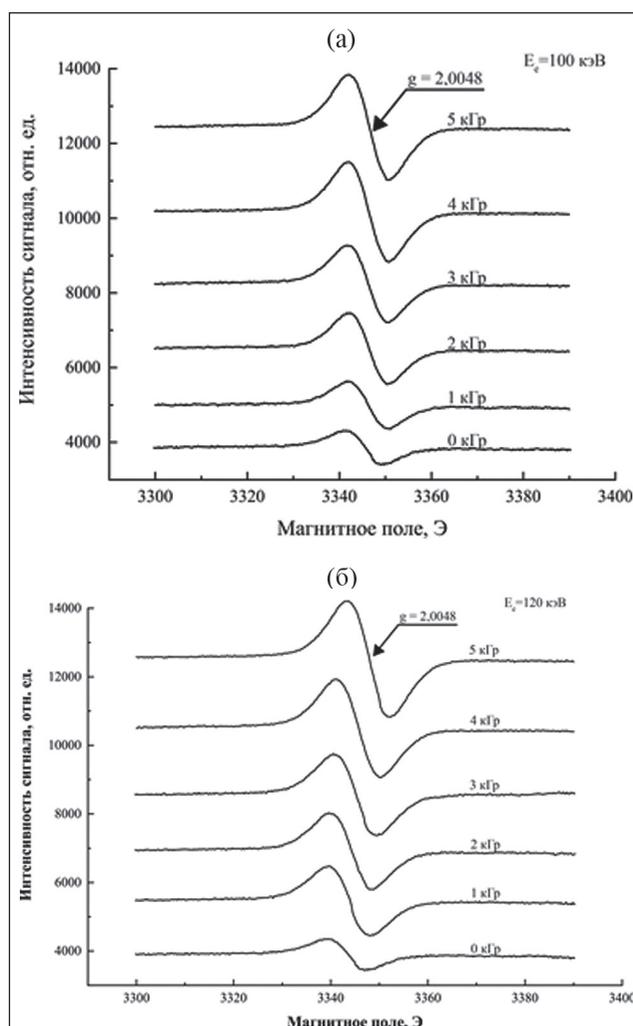
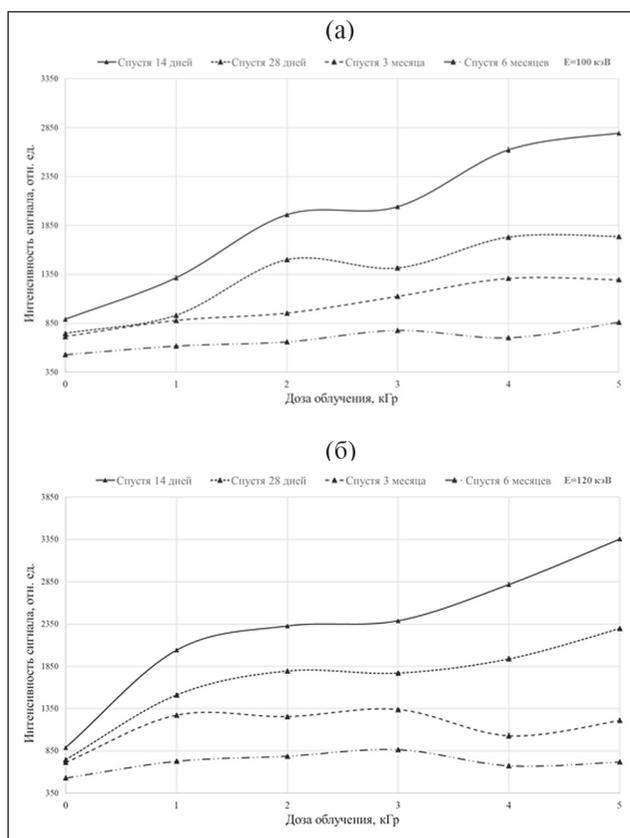


Рис. 1. ЭПР-спектры образцов семян пшеницы, зарегистрированные спустя 14 дней после облучения электронами: а) энергия 100 кэВ; б) энергией 120 кэВ.

менением t-критерия Стьюдента. Уровень значимости принимали равным  $p \leq 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** Результаты анализа ЭПР-спектров семян пшеницы, полученных через 14 дней после радиационной обработки, демонстрируют увеличение интенсивности сигнала прямо пропорционально поглощенной дозе. Этот факт свидетельствует о перспективности использования ЭПР-спектрометрии для идентификации облученных семян пшеницы. Следует отметить, что контрольный образец также демонстрировал наличие слабого сигнала, обусловленного естественным фоновым уровнем свободных радикалов. Отмечена зависимость между энергией электронов и количеством образующихся свободных радикалов. В частности, амплитуда сигнала образца, облученного дозой 1 кГр при энергии электронов 100 кэВ, составляла 1260 отн. ед., а образца, облученного той же дозой, но при энергии электронов 120 кэВ, – 2190 отн. ед. (рис. 1). Увеличение амплитуды сигнала с ростом энергии электронов зарегистрировано для всех исследованных образцов. Это, вероятно, связано с увеличением проникающей способности электронов при повышении их энергии, что приводит к образованию свободных радикалов в более глубоких слоях зерна пшеницы. Известно [6], что глубина проникновения низкоэнергетического излучения с энергией 100 кэВ составляет 0,1 мм (100 мкм), 120 кэВ – 0,15 мм (150 мкм), это подтверждает выявленную закономерность увеличения интенсивности ЭПР-сигнала при повышении энергии электронов из-за образования свободных радикалов в более глубоких слоях зерна. Значение g-фактора для всех образцов оставалось стабильным и составляло 2,0048, что указывает на наличие углерод-центрированных радикалов.



**Рис. 2.** Кинетика распада свободных радикалов в образцах пшеницы, облученных электронами, с течением времени: а) энергия 100 кэВ ; б) энергия 120 кэВ .

Для образцов, подвергнутых воздействию электронов с энергией 100 кэВ, спустя 14 дней после облучения в дозах 1...5 кГр средняя интенсивность сигнала варьировала от  $892 \pm 15,4$  до  $2793,7 \pm 3,8$  отн. ед., демонстрируя отчетливую дозозависимую закономерность. В дальнейшем наблюдали постепенное снижение интенсивности, обусловленное распадом свободных радикалов, индуцированных ионизирующим излучением. Через 28 дней регистрируемая интенсивность уменьшилась в среднем на 16...38 % в зависимости от дозы облучения, что соответствовало диапазону значений от  $746,7 \pm 4,2$  до  $1739 \pm 4,2$  отн. ед. В последующие месяцы скорость затухания сигнала замедлилась, что свидетельствует о дифференцированной кинетике распада радикалов различной природы. Через 3 месяца интенсивность снизилась до  $715,7 \pm 7,4...1295,3 \pm 5,2$  отн. ед., что эквивалентно дополнительному ослаблению сигнала на 5...25 %, по сравнению с предыдущим этапом наблюдений. По истечении 6 месяцев она достигла  $530,7 \pm 6,5...862,7 \pm 1,8$  отн. ед., отражая снижение на 26...33 % относительно данных трехмесячного периода (рис. 2). Общее снижение интенсивности сигнала спустя 6 месяцев, по сравнению с 14-и дневным периодом для образцов, облученных электронами с энергией 100 кэВ, составило 41...69 % в зависимости от дозы облучения. Во всех случаях различия между облученными образцами и контролем были статистически значимыми ( $p \leq 0,05$ ).

Аналогичные закономерности отмечены и для образцов, облученных электронами с энергией 120 кэВ. Однако, как было отмечено ранее, на 14-е сутки интенсивность ЭПР-сигнала в этой группе оказалась несколько выше и находилась в диапазоне  $892 \pm 15,4...3357 \pm 7,8$  отн. ед. в зависимости от дозы, что обусловлено увеличением глубины проникновения электронов и формированием большего количества радикалов в структуре зерна. К 28-у дню снижение составило 16...32 %, а интенсивность соответствовала диапазону  $746,7 \pm 4,2...2298,7 \pm 9,6$  отн. ед. Далее темпы затухания сигнала несколько замедлились, что отразилось в снижении интенсивности через 3 месяца до  $715,7 \pm 7,4...1209,7 \pm 24,3$  отн. ед. Это эквивалентно ослаблению сигнала на 5...47 %, по сравнению с предыдущим этапом. Спустя 6 месяцев интенсивность составила  $530,7 \pm 6,5...720,7 \pm 2,2$  отн. ед., что отражает уменьшение на 26...41 %, по сравнению с трехмесячными данными (см. рис. 2). Общее снижение интенсивности сигнала спустя 6 месяцев относительно 14-и дневного периода для образцов, облученных электронами с энергией 120 кэВ, составило 41...78 % в зависимости от дозы облучения. Во всех случаях различия между облученными образцами и контролем были статистически значимыми ( $p \leq 0,05$ ).

Сопоставление результатов, полученных при различных энергиях облучения, демонстрирует, что на ранних этапах (14...28 дней) интенсивность сигнала при 120 кэВ была достоверно выше, чем при 100 кэВ. Разница в зависимости от дозы через 14 дней составляла от 8 до 55 %, через 28 дней – от 12 до 62 % ( $p \leq 0,05$  для всех доз). Особенно заметное усиление интенсивности сигнала при 120 кэВ наблюдали в интервале доз 1...3 кГр. Помимо эффекта от увеличения глубины проникновения электронов в структуру зерна, это также свидетельствует о повышенной эффективности генерации стабильных радикальных форм в группе, облученной при 120 кэВ. Однако на поздних сроках хранения (3 и 6 месяцев) различия между двумя сериями становились менее выраженными. Через 3 месяца превосходство 120 кэВ

при дозах 1...3 кГр все еще сохранялось (разница составляла 15...44 %,  $p \leq 0,05$ ), но для высоких доз (4...5 кГр) оно нивелировалось. Через 6 месяцев различия были незначительными или даже в отдельных случаях наблюдали большее затухание сигнала в группе 120 кэВ, что, вероятно, связано с ускоренной релаксацией радиационно-индуцированных радикалов при более глубоком проникновении электронов. Это указывает на схожие кинетические закономерности деструкции парамагнитных центров в обоих вариантах облучения на поздних этапах.

В ходе регистрации сигнала на протяжении всего эксперимента все образцы находились в кварцевых пробирках с крышкой в атмосферном воздухе и при комнатной температуре. Подобный режим хранения мог способствовать ускоренному распаду радиационно-индуцированных радикалов из-за влияния кислорода и отсутствия герметичной среды. Даже в контрольных образцах, не подвергавшихся облучению, регистрировали постепенное снижение интенсивности сигнала – с  $892 \pm 15,4$  отн. ед. на 14-е сутки до  $530,7 \pm 6,5$  отн. ед. через 6 месяцев. Это, вероятно, связано с распадом природных стабильных радикалов, уже присутствующих в структуре зерна до начала эксперимента. Фоновый ЭПР-сигнал в контрольной группе мог быть обусловлен воздействием ультрафиолетового и коротковолнового солнечного излучения в период вегетации растения, что способствовало накоплению фотохимически индуцированных свободных радикалов в клеточных структурах. Кроме того, возможным источником сигнала служит естественное радиационное фоновое излучение окружающей среды, а также процессы окислительно-восстановительного характера в составе биоматериала – в частности, самопроизвольное образование свободных радикалов в результате окисления липидов и других компонентов при хранении. Совокупность этих факторов могла сформировать исходный уровень сигнала в контрольных образцах, который демонстрировал тенденцию к снижению интенсивности с течением времени.

Такие результаты согласуются с ранее опубликованными данными [10], указывающими на аналогичную динамику изменения ЭПР-сигнала во времени в облученных органических матрицах. Авторами представлен общий вид спектров радиационно-индуцированного сигнала ЭПР после облучения образцов пшеницы в дозах от 1 до 27 кГр низкоэнергетическим пучком электронов с энергией 500 кэВ. Характер спектров схож с результатами, полученными в нашей работе, хотя энергия низкоэнергетических электронов была гораздо ниже – 100...120 кэВ. Кинетику распада радикалов в условиях эксперимента прослеживали спустя полгода наблюдений.

Особенность обработки низкоэнергетическим излучением – формирование высокой поглощенной дозы только в поверхностных слоях зерна пшеницы. При этом ростовые показатели (энергия прорастания, всхожесть, длина ростка и корешка) не нарушаются, поскольку зародыш семени занимает малую площадь в нижней части спинной стороны зерновки и количество импульсов низкоэнергетических электронов в зародыше меньше, чем в самой зерновке [6, 7].

**Выводы.** Результаты исследований свидетельствуют о наличии потенциала у использования спектрометрии электронного парамагнитного резонанса в качестве метода выявления факта облучения семян пшеницы в диапазоне доз от 1 до 5 кГр при энергии электронов 100 и 120 кэВ, что подтверждает линейная зависимость интенсивности сигнала от поглощенной дозы. Снижение

различий между сигналами образцов с разными дозами в течение времени ограничивает применение метода для точного дозиметрического контроля. Спустя 6 месяцев после облучения интенсивность сигнала в зависимости от дозы уменьшилась на 41...69 % (100 кэВ) и 41...78 % (120 кэВ), по сравнению с данными, полученными на 14-е сутки после облучения, что необходимо учитывать при идентификации факта облучения продукции спустя продолжительный период после процесса радиационной обработки.

Сравнение результатов при энергиях 100 и 120 кэВ показало, что на ранних этапах (14 и 28 суток) во всех дозовых группах интенсивность сигнала при 120 кэВ была статистически достоверно ( $p \leq 0,05$ ) выше, что связано с большей глубиной проникновения электронов и, как следствие, более выраженным эффектом радиационного воздействия. Разница при отдельных дозах достигала 55 %. На более поздних сроках (3 и 6 месяцев) различия между сериями частично сохранялись, однако статистические различия наблюдали не во всех дозовых группах. Величина g-фактора, равная 2,0048, указывает на наличие в исследуемых образцах углерод-центрированных радикалов.

Кинетика затухания сигнала ЭПР носит двухфазный характер. В первые 14...28 дней после облучения происходит его интенсивное снижение, достигающее в зависимости от дозы облучения 16...38 % (100 кэВ) и 16...32 % (120 кэВ), по сравнению с результатами, зафиксированными на 14 день после, что связано с распадом короткоживущих радикалов. В последующий период скорость затухания снижается и спустя 3 месяца интенсивность сигнала уменьшается в среднем на 4...25 % (100 кэВ) и 4...47 % (120 кэВ), по сравнению с предыдущим этапом наблюдений, что свидетельствует о формировании более стабильных радикальных форм, сохраняющихся в течение длительного времени. По истечении 6 месяцев интенсивность сигнала уменьшилась на 26...33 % (100 кэВ) и 26...41 % (120 кэВ) отн. ед. относительно данных трехмесячного периода.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по Программе деятельности Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (проект 5ф6.1).

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. *FAO. Moving forward on food loss and waste reduction / FAO – The State of Food and Agriculture 2019. – Rome: FAO, 2019. 182 p. ISBN 978-92-5-131789-1. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/biistreams/11f9288f-dc78-4171-8d02-92235b8d7dc7/content> (дата обращения: 04.03.2025). doi: 10.4060/CA6030EN.*
2. *Spence N., Hill L., Morris J. How the global threat of pests and diseases impacts plants, people, and the planet // Plants, People, Planet. 2020. Vol. 2. No. P. 5–13. doi: 10.1002/ppp3.10088.*
3. *Козьмин Г. В., Гераськин С. А., Санжарова Н. И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.*

4. Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee. *Wholesomeness of irradiated food. Technical report Series 659*. Geneva: World Health Organization, 1981. 34 p.
5. Закладной Г. А. Радиационная дезинсекция зерна монография. М.: Центр подготовки специалистов, 2020. 150 с.
6. Предпосевная обработка семян яровой пшеницы импульсным электронным пучком в атмосфере / С. Ю. Дорошкевич, К. П. Артемов, Н. Н. Терещенко и др. // *Химия высоких энергий*. 2021. Т. 55. № 4. С. 326–332. doi: 10.31857/S0023119321040069.
7. Действие предпосевого электронного излучения на развитие проростков ячменя и активность ферментов и фитогормонов / Н. Н. Лой, Н. И. Санжарова, Е. А. Казакова и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023. № 2. С. 21–24. doi: 10.31857/S2500262723020059.
8. Zanardi E., Caligiani A., Novelli E. *New insights to detect irradiated food: an overview* // *Food Analytical Methods*. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 224–235. doi: 10.1007/s12161-017-0992-1.
9. Guzik G. P., Michalik J. *European inter-comparison studies as a tool for perfecting irradiated food detection methods* // *Nukleonika*. 2021. Vol. 66. No. 3. P. 91–97. doi: 10.2478/nuka-2021-0013.
10. *Electron paramagnetic resonance signal in wheat seeds irradiated with low-energy electron beam* / R. A. Vazirov, A. A. Narkhova, E. N. Vazirova, et al. // *Radiation Physics and Chemistry*. 2023. Vol. 208. Article 110934. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X23001792?via%3Dihub> (дата обращения: 04.03.2025). doi: 10.1016/j.radphyschem.2023.110934.

**Поступила в редакцию 07.03.2025**  
**После доработки 24.03.2025**  
**Принята к публикации 15.04.2025**