

Экспериментальное исследование интенсивности и временной стабильности ЭПР сигнала гамма-облученных специй

Д. И. ТИТОВА, И. М. МЕДЖИДОВ, В. А. ХАРЛАМОВ, А. Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», площадь Академика Курчатова, 1, Москва, 123182, Российская Федерация

Резюме. Исследование проводили с целью оценки перспективности метода ЭПР-спектроскопии для установления факта воздействия излучением ^{60}Co на сухие специи (лавровый лист и черный перец). Рассматривали следующие поглощенные дозы: 0 (контроль), 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. Снятие спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) проводили в течение 9 месяцев. Определяли зависимость интенсивности сигнала от дозы и его временную стабильность (затухание ЭПР сигнала со временем от момента воздействия гамма-излучения). Для обеих специй g-фактор был равен 2,0042. Образование свободных радикалов в образцах носило дозозависимый характер и выражалось в линейном росте ЭПР сигнала в диапазоне доз от 1 до 10 кГр, то есть выбранные специи были чувствительны к облучению. Интенсивность ЭПР сигнала при измерении сразу после облучения статистически значимо превышала контроль в опытных образцах лаврового листа от 343 % при 1 кГр до 1224 % при 10 кГр, черного перца – от 15 % до 261 % соответственно. Со временем ЭПР сигнал облученных специй затухает. При хранении облученного лаврового листа в течение 7 суток его ЭПР сигнал уменьшился на 78 %, черного перца – на 61 %, относительно величины этого показателя сразу после облучения. ЭПР сигнал облученного черного перца затухает со временем медленнее, чем у лаврового листа. За 9 месяцев хранения он уменьшился, по сравнению с уровнем сразу после облучения, соответственно на 74 % и 90 %. Чувствительность к облучению и диапазон линейности отклика позволяет достоверно различать облученный лавровый лист и черный перец от необлученного контроля. Однако при разработке методик ЭПР-спектроскопии специй следует учитывать факт затухания сигнала в течение 9 месяцев с момента воздействия гамма-излучения.

Ключевые слова: ЭПР-спектрометрия, свободный радикал, интенсивность сигнала, ионизирующее излучение, радиационная обработка

Сведения об авторах: Д. И. Титова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (e-mail: contactforinfo@mail.ru); И. М. Меджидов, научный сотрудник; В. А. Харламов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник; А. Н. Павлов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Для цитирования: Экспериментальное исследование интенсивности и временной стабильности ЭПР сигнала гамма-облученных специй / Д. И. Титова, И. М. Меджидов, В. А. Харламов и др. // Достижения науки и техники АПК. 2026. Т. 40. №4. С. 91–96. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_91.

Experimental study of the intensity and temporal stability of the EPR signal of gamma-irradiated spices

D. I. Titova, I. M. Medzhidov, V. A. Kharlamov, A. N. Pavlov

National Research Center "Kurchatov Institute", ploshchad' Akademika Kurchatova, 1, Moskva, 123182, Russian Federation

Abstract. The study was conducted to evaluate the potential of EPR spectroscopy for determining the effects of ^{60}Co radiation on dried spices (bay leaf and black pepper). The following absorbed doses were examined: 0 (control), 1, 3, 5, 7, and 10 kGy. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectra were recorded over a period of 9 months. The dependence of signal intensity on dose and its temporal stability (the attenuation of the EPR signal over time from the moment of exposure to gamma radiation) were determined. For both spices, the g-factor was 2.0042. The formation of free radicals in the samples was dose-dependent and manifested as a linear increase in the EPR signal in the dose range from 1 to 10 kGy, indicating that the selected spices were sensitive to radiation. The EPR signal intensity measured immediately after irradiation statistically significantly exceeded the control in the bay leaf test samples, ranging from 343% at 1 kGy to 1224% at 10 kGy, and in black pepper, from 15% to 261%, respectively. The EPR signal of irradiated spices attenuates over time. During 7-day storage, the irradiated bay leaf EPR signal decreased by 78%, and that of black pepper by 61%, relative to its value immediately after irradiation. The EPR signal of irradiated black pepper attenuates more slowly over time than that of bay leaf. Over 9 months of storage, it decreased, compared to the level immediately after irradiation, by 74% and 90%, respectively. Sensitivity to irradiation and the linear response range allow for reliable discrimination between irradiated bay leaf and black pepper and the non-irradiated control. However, when developing methods for EPR spectroscopy of spices, it is necessary to consider the fact that the signal attenuates within 9 months of exposure to gamma radiation.

Keywords: EPR spectrometry; free radical; signal intensity; ionizing radiation; radiation treatment.

Author Details: D. I. Titova, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow (e-mail: contactforinfo@mail.ru); I. M. Medzhidov, research fellow; V. A. Kharlamov, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow; A. N. Pavlov, Cand. Sc. (Biol.), senior research fellow.

For citation: Titova DI, Medzhidov IM, Kharlamov VA, et al. [Experimental study of the intensity and temporal stability of the EPR signal of gamma-irradiated spices]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2026;40(4):91–96. Russian. doi: 10.53859/02352451_2026_40_4_91.

В современных условиях в сфере пищевой промышленности и сельского хозяйства актуальными остаются вопросы, связанные с микотоксинами и микробиологической безопасностью продовольственного растительного сырья, а также с необходимостью продления сроков его хранения [1, 2]. Контаминирующие агропродукцию микотоксины высокотоксичные вторичные метаболиты микроскопических грибов – возбудителей болезней сельско-

хозяйственных растений, представляют серьезную опасность здоровью потребителя из-за канцерогенного, мутагенного, иммуносупрессивного воздействия [3, 4, 5]. На территории России сильнее всего распространены фузариоз и альтернариоз злаков [4]. Но плесневые грибы способны продуцировать сотни метаболитов [5], поэтому среди известных и контролируемых микотоксинов все большее распространение получают такие новые или эмерджентные

микотоксины, как тенуазоновая, микофеноловая и фузариевая кислоты, стеригматоцистин, цитринин, тентоксин, фузапролиферин и др. [2]. Загрязнение микотоксинами напрямую связано с распространённостью их продуцентов [4], которые способны вырабатывать токсины, в том числе при низкой влажности продуктов питания, но при высоком содержании углеводов в пищевой продукции [5]. Кроме того, загрязнение микроорганизмами грибной и бактериальной природы приводит к снижению качества растительного сырья и потере сухого вещества [3]. В последние годы отмечается снижение питательной ценности продуктов из-за уменьшения содержания витаминов и минеральных веществ, которые проявляют антирадикальную активность и способствуют повышению антиоксидантной защиты для человека [1, 8]. Проблемы хранения и обеспечения безопасности и качества пищевой продукции связаны с тем, что современные потребители отдают предпочтение «удобным» продуктам (например, готовые салаты), которые легко подвергаются микробиологической порче и потере потребительских свойств [7]. Для решения такой проблемы необходим поиск способов снижения обсемененности микроорганизмами всех ингредиентов готового продукта при их подготовке к переработке [3]. К ингредиентам упомянутых «удобных» продуктов и сложных блюд относятся специи – широко востребованные благодаря вкусо-ароматическим и функциональным свойствам. Однако из-за особенностей производства, транспортировки и хранения они часто подвергаются микробиологическому обсеменению, что может представлять риск для потребителей. Такие традиционные методы, как тепловая стерилизация, сушка, консервирование, не всегда обеспечивают длительное хранение без потери качества либо достаточно энергозатратны [9, 10]. В связи с этим в лабораторных исследованиях апробируются для внедрения новые либо усовершенствованные технологии, например, обработка холодной плазмой или ультрафиолетом, озонирование [6]. Их применение позволяет сохранить пищевую ценность и продлить срок годности продуктов без использования химических консервантов [3, 6]. В дальнейшем такие продукты могут использоваться для производства доброкачественных функциональных изделий для диетического и лечебно-профилактического питания [3].

Наиболее распространённым методом остаётся радиационная обработка продуктов [9, 10, 11]. Ионизирующее излучение (например, γ -излучение) в дозах до 10 кГр признано безопасным и эффективным для снижения микробиологической обсемененности, уничтожения патогенных микроорганизмов и паразитов, а также для сохранения пищевой ценности продуктов и значительного продления сроков годности [12, 13]. Применение радиационных технологий соответствует тенденции спроса на натуральные и безопасные продукты [6] и помогает привести их в соответствие с санитарно-гигиеническими нормами [9]. Радиационные технологии могут способствовать снижению продовольственных потерь на всех этапах логистической цепочки, что особенно актуально в условиях урбанизации и изменения структуры питания [1]. Рынок облученных продуктов растет и может достичь 10,9 млрд долл. США к 2030 г. [14]. Наибольший практический интерес представляет растительная продукция, подвергаемая облучению, в частности, специи, сухие овощи и фрукты. В России действуют

стандарты с требованиями к облучению пряностей, сухих трав и овощных приправ (ГОСТ 33271-2015). Установлены диапазоны минимальных доз облучения для пряностей [13]. Повторное облучение продукции не рекомендовано, поскольку это может привести к ухудшению ее качества [9, 13]. Следует учитывать, что маркировка пищевой продукции, подвергнутой радиационной обработке ионизирующим излучением, должна присутствовать даже если ее проводили только для отдельного составного ингредиента пищевого продукта [13], например, специй [15]. В связи с этим необходимо совершенствовать методы контроля и идентификации облученной продукции, а также контроля доз облучения и соответствия режима обработки установленным требованиям [12].

Факт воздействия ионизирующего излучения можно подтвердить с использованием различных методов, среди которых наибольшее распространение благодаря своей высокой эффективности получила спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [12]. Электронный парамагнитный резонанс, открытый в 1944 г. Е.К. Завойским, широко применяется как метод исследования, основанный на детекции стабильных в течение различных периодов времени свободных радикалов (парамагнитные центры), образование которых индуцирует воздействие ионизирующего излучения [13]. Радиационно-индуцированные свободные радикалы в веществе можно детектировать спектрометром электронного парамагнитного резонанса в виде спектров, которые можно получить даже спустя длительное время после воздействия ионизирующим излучением [13]. Согласно ГОСТ 31672-2012 и ГОСТ 31652-2012, этот метод можно использовать для выявления факта облучения мяса крупного рогатого скота и свиней, содержащего костную ткань; продуктов, содержащих кристаллических сахар; пищевых продуктов, содержащих целлюлозу [9]. Следует отметить, что каждая пищевая продукция, облучённая ионизирующим излучением, имеет характерный спектр ЭПР [13]. Особенности такой обработанной сухой растительной продукции, как специи и травы, с использованием электронного парамагнитного резонанса достаточно хорошо изучены [16]. По результатам этих исследований авторы предложили проводить спектрометрию электронного парамагнитного резонанса для всех видов специй и пряных трав. Накопление экспериментальных данных будет способствовать оптимизации методов контроля и идентификации факта облучения. Это особенно актуально в условиях расширения ассортимента продуктов, подлежащих облучению. Важная практическая задача – разработка методов контроля радиационно-обработанной продукции, особенно при отсутствии маркировки. Перспективным ее решением может быть ЭПР-спектроскопия, с некоторой долей условности открывающая возможности для оценки поглощённой дозы ионизирующего излучения по образованию стабильных свободных радикалов, концентрация которых существенно варьирует в зависимости от материала. Двумя ключевыми параметрами этого метода служат интенсивность радиационного сигнала, регистрируемая непосредственно после облучения, и его временная стабильность, учитывающая характерное для большинства материалов экспоненциальное затухание сигнала.

Цель исследований – оценить потенциал применимости ЭПР-спектроскопии в качестве метода кон-

троля радиационной обработки сухих специй (лавровый лист, черный перец) путем анализа зависимости интенсивности ЭПР сигнала от поглощенной дозы и времени хранения.

Условия, материалы и методы. В работе проводили оценку изменения ЭПР сигнала в зависимости от дозы облучения и временной стабильности ЭПР сигнала – затухания сигнала с течением времени. В исследовании использовали сухие растительные тест-объекты (урожа 2024 г.): лавровый лист (*Laurus nobilis* L.) и черный молотый перец (*Piper nigrum* L.).

Опытные образцы предварительно расфасовывали в полипропиленовые стерильные пробирки (объемом 1 мл). Далее проводили обработку гамма-излучением ^{60}Co на уникальной научной установке (УНУ ГУР-120 № 2795259). Мощность дозы – 5000 Гр/ч. Поглощенные дозы составляли 1, 3, 5, 7 и 10 кГр. Этот диапазон охватывает минимальные (1...3 кГр) и стандартные (5...10 кГр) дозы, применяемые на практике для обеззараживания растительной продукции. Требования по дозиметрии, необходимой при проведении исследований по изучению влияния радиации на пищевые и сельскохозяйственные продукты, соответствовали ГОСТ 34155-2017 и ГОСТ 8.664-2019. После облучения опытные образцы хранили при атмосферном давлении и комнатной температуре без доступа солнечного света. В качестве контроля использовали необлученные образцы (0 кГр). Временную стабильность сигнала оценивали повторными измерениями ЭПР отклика в течение 9 месяцев со следующими интервалами измерения: сразу после облучения (0 сут), спустя 7, 14, 28, 90, 180 и 270 сут.

Пробоподготовку осуществляли путем измельчения в фарфоровой ступке с пестиком, затем просеивали через сито с размером ячеек 0,5 мм. Спектры ЭПР снимали при комнатной температуре. Для их регистрации использовали спектрометр электронного парамагнитного резонанса ESR70-03 XD/2 (Беларусь) X-диапазона. Частота СВЧ составляла 9,4 ГГц. Навеску сухого измельченного образца по 20 мг из каждой пробирки помещали в специальные кварцевые пробирки (Ø 4 мм), которые опускали в полость с магнитным полем на уровне резонатора и регистрировали сигнал. Все образцы исследовали в трехкратной повторности.

Условия получения спектров ЭПР: середина поля – 3350 Э, диапазон поля – 1000 Э, частота модуляции

– 100 кГц, модуляция – 4 Э, мощность СВЧ – 10 мВт. Коэффициент усиления для лаврового листа 10, для черного перца – 50. Время снятия спектра 600 с.

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием стандартных статистических методов анализа. Для сравнения количественных показателей в двух группах применяли критерий Манна-Уитни. Во всех случаях различия считали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$. Результаты на графиках представлены в относительных единицах. Изменение интенсивности сигнала рассчитывали по следующей формуле:

$$\text{Изменение интенсивности (\%)} = [(I_0 - I) / I_0] \cdot 100,$$

где I_0 – интенсивность ЭПР сигнала контрольного образца, отн.ед., I – интенсивность ЭПР сигнала опытного образца, отн.ед.

Критический параметр, который используют для определения спина электрона и характера изучаемого парамагнитного центра, в спектрометрии электронного парамагнитного резонанса – безразмерная величина, называемая g-фактором. Его определяли по формуле:

$$g\text{-фактор} = (h \cdot \nu) / (\beta \cdot B),$$

где $h = 6,62606896 \times 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с; ν – СВЧ-частота X-диапазона, Гц; $\beta = 9,2740 \times 10^{-24}$ – магнетон Бора, Дж/Тл; B – величина магнитного поля, Тл.

Результаты и обсуждение. Полученные спектры ЭПР для необлученных (контрольных) образцов, хорошо соотносились с литературными данными для овощей и специй [17]. В опубликованных работах можно встретить замечания о трудности разделения облученных и необлученных образцов из-за наличия только одной линии спектра ЭПР до и после радиационной обработки. Такая проблема связана с тем, что в органических материалах ЭПР сигналы, индуцированные естественным путем и ионизирующим излучением, имеют одинаковые g-факторы в спектрах X- и Q-диапазонов, близкие к двум, поэтому неразличимы независимо от источника их индуцирования [17, 18]. Радиационно-индуцированный сигнал на спектре специй, в сравнении со спектром необлученных специй, отличается значительным увеличением интенсивности ЭПР сигнала. Это указывает на предшествующее воздействие ионизирующего излучения на специи.

Облучение вызвало появление ЭПР сигналов различной интенсивности во всех образцах специй.

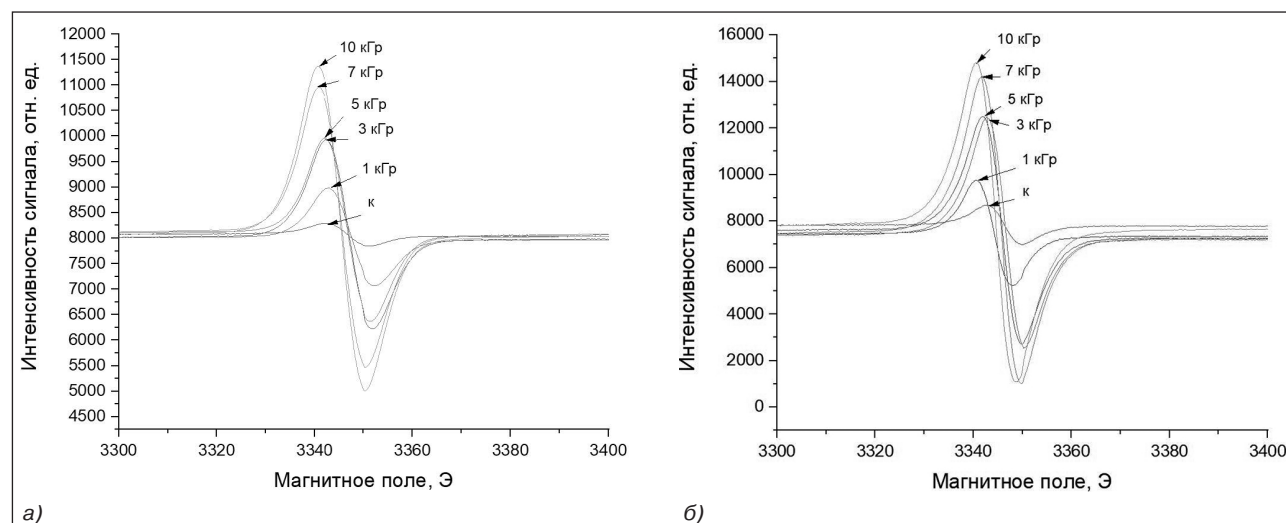


Рис. 1. Общий вид спектров ЭПР сразу после воздействия гамма-излучением ^{60}Co : а) измельченный лавровый лист; б) молотый черный перец.

При этом фиксировали значительное повышение их интенсивности с увеличением дозы.

Есть мнение, что изменение интенсивности радиационно-индуцированного сигнала на спектре ЭПР зависит от содержания воды в образце, а основная масса свободных радикалов, которые образуются в результате облучения, короткоживущие [17]. Причем интенсивность таких сигналов медленно снижается со временем [17, 18].

По результатам нашего исследования, g-факторы всех сигналов в облученных образцах близки к 2 и не различаются даже в третьем знаке после запятой. G-фактор в точке пересечения контура производной с нулевой линией был равен 2,0042. Это свидетельствует о наличии углеродо-содержащих радикалов.

После обработки опытных образцов разными дозами гамма-излучения происходило изменение основного параметра сигнала ЭПР – амплитуды или интенсивности. В нашем исследовании сразу после воздействия гамма-излучения в изучаемых дозах ЭПР сигнал статистически значимо возрастал, по сравнению с контролем, в опытных образцах лаврового листа на 343...1224 %, в опытных образцах черного перца – на 15...261 % (рис. 1).

Таким образом, при воздействии гамма-излучением ⁶⁰Со на опытные образцы лаврового листа и черного перца наблюдали образование свободных радикалов, которые фиксировали в виде характерного широкого синглетного пика ЭПР. Необлученные (контрольные) образцы также имели характерный фиксируемый центральный синглетный ЭПР сигнал.

Следует отметить, что слабый ЭПР сигнал в контрольных (необлученных) образцах обусловлен наличием естественных парамагнитных центров, формирующихся в растительном сырье еще в процессе вегетации. Их возникновение связано с естественными метаболическими процессами, в ходе которых могут образовываться устойчивые органические радикалы: продукты окислительно-восстановительных реакций, ферментативных превращений и фотохимических процессов. Со временем интенсивность этих сигналов снижается вследствие протекания вторичных реакций рекомби-

нации радикалов, взаимодействия их с кислородом, влагообмена и изменения содержания летучих компонентов при хранении. Таким образом, затухание ЭПР сигнала в контроле отражает естественную деградацию радикальных центров.

Наибольшее статистически значимое снижение ЭПР сигнала лаврового листа фиксировали после 7 сут хранения – на 55 % для дозы 1 кГр и на 78 % для дозы 10 кГр относительно значений для этих доз, измеренных сразу после облучения. Для облученного черного перца аналогичное снижение за тот же период составляло соответственно 12 % и 61 % (табл. 1).

Таблица 1. Изменение относительной интенсивности (кинетика затухания) ЭПР сигнала необлученных и облученных в различных дозах образцов с течением времени в относительных единицах

Показатель	Поглощенная доза					
	0 кГр	1 кГр	3 кГр	5 кГр	7 кГр	10 кГр
сразу после облучения (0 сут)						
Среднее арифметическое	443,48	1964,37	3198,61	3781,98	4632,63	5868,37
Медиана	3889,13	4482,49	9827,93	10108,95	13362,38	14035,03
Ошибка среднего арифметического	443,47	1935,44	3143,05	3750,23	4327,78	5830,26
	3889,10	4476,92	9802,47	9929,78	13233,03	13815,13
	5,82	52,16	228,52	158,89	441,99	307,03
	1,09	43,49	286,93	410,07	563,84	869,57
через 7 суток						
Среднее арифметическое	443,48	875,19	792,84	1264,87	1320,34	1306,91
Медиана	3889,11	3929,70	4558,47	4811,99	4933,68	5444,50
Ошибка средней арифметической	443,47	871,83	786,16	1264,82	325,38	1305,23
	3879,00	3909,42	4563,53	4806,92	4928,61	5472,30
	5,82	3,36	17,75	20,36	19,08	27,65
	10,11	20,28	5,08	5,07	48,37	46,06
через 14 суток						
Среднее арифметическое	441,60	659,98	630,87	917,19	898,97	712,79
Медиана	3841,42	3621,05	4121,89	4307,43	4332,2	4737,88
Ошибка средней арифметической	440,39	662,41	633,29	913,55	898,93	724,28
	3831,40	3621,05	4116,88	4312,21	4372,31	4732,81
	3,21	4,38	6,42	7,57	6,31	11,49
	10,02	2,00	5,01	21,62	47,74	21,83
через 1 месяц						
Среднее арифметическое	462,22	572,39	509,42	702,60	686,86	655,38
Медиана	3326,06	3447,84	3599,23	3767,01	3767,01	4039,98
Ошибка средней арифметической	467,93	575,25	510,85	708,33	682,57	648,23
	3338,66	3439,44	3578,63	3767,00	3779,61	4056,78
	5,74	5,16	6,24	10,32	6,56	9,38
	19,25	15,14	20,90	21,82	12,60	30,28
через 3 месяца						
Среднее арифметическое	422,01	488,64	504,51	594,94	552,10	604,46
Медиана	3367,12	3237,02	3558,43	3975,49	3631,13	3787,14
Ошибка средней арифметической	418,84	490,23	499,75	590,18	552,10	599,70
	3363,29	3248,50	3581,39	3960,19	3638,78	3776,53
	3,17	4,20	4,76	4,76	8,25	4,76
	29,88	17,53	35,07	27,59	33,36	23,06
через 6 месяцев						
Среднее арифметическое	420,37	473,18	469,55	524,45	488,07	536,68
Медиана	2983,16	3045,43	3002,18	3528,49	3246,66	3541,30
Ошибка средней арифметической	419,16	472,28	471,10	525,66	484,74	537,49
	2977,97	3045,42	3009,10	3522,08	3240,26	3515,68
	1,62	3,18	2,46	2,69	4,76	2,83
	7,93	3,00	9,63	13,34	9,79	25,62
через 9 месяцев						
Среднее арифметическое	529,80	566,30	566,30	563,11	573,28	586,32
Медиана	3190,35	3180,98	3390,67	4157,46	3358,73	3723,74
Ошибка средней арифметической	526,06	566,29	566,29	563,43	574,87	586,31
	3190,34	3173,49	3381,31	4167,73	3358,72	3874,94
	3,74	2,00	4,40	1,39	4,74	1,65
	12,97	7,49	9,36	10,27	13,35	174,83

*в числителе – измельченный лавровый лист, в знаменателе – молотый черный перец.

Важно, что несмотря на затухание со временем, ЭПР сигнал исследуемых специй оставался детектируемым до 270 сут. хранения. Тем не менее, за этот период у облученного лаврового листа при дозе 10 кГр он значительно снизился, относительно значений, измеренных сразу после облучения, на 90 %, при дозе

Таблица 2. Изменение кинетики затухания ЭПР сигнала со временем для молотого черного перца и измельченного лаврового листа, относительные единицы

Время измерения после облучения	Доза 0 кГр					Доза 10 кГр				
	лавровый лист		черный перец		лавровый лист / черный перец	лавровый лист		черный перец		лавровый лист / черный перец
	мин	макс	мин	макс		мин	макс	мин	макс	
7 суток	433,40	453,55	3879,00	3909,32	-88,60 %	1259,87	1355,62	5354,54	5506,66	-76,00 %
2 недели	436,75	447,67	3831,40	3861,45	-88,50 %	689,81	724,29	4702,86	4777,98	-84,96 %
1 месяц	450,75	467,98	3288,26	3351,25	-86,10 %	643,93	673,98	3981,19	4081,98	-83,78 %
3 месяца	418,84	428,36	3317,38	3420,68	-87,47 %	599,70	613,98	3753,57	3831,32	-84,04 %
6 месяцев	418,36	423,58	2972,78	2998,72	-85,91 %	531,42	541,13	3515,68	3592,54	-84,85 %
9 месяцев	526,06	537,27	3167,87	3212,81	-83,39 %	583,45	589,17	3375,11	3921,17	-84,25 %

5 кГр – на 85 %, у облученного черного перца – соответственно на 73 % и 59 % (см. табл. 1).

Затухание ЭПР сигнала лаврового листа происходило быстрее сигнала черного перца. По сравнению с величиной, измеренной сразу после облучения, за 14 сут. хранения лаврового листа, в варианте с дозой 1 кГр он статистически значимо снизился на 66 %, 3 кГр – на 80 %, 10 кГр – на 88 %; черного перца – соответственно статистически на 19 %, 58 % и 66 % (табл. 2).

Различия в кинетике затухания и интенсивности ЭПР сигнала между лавровым листом и черным перцем, скорее всего, обусловлены их химическим составом и устойчивостью радикалов. Вероятно, ЭПР сигнал сухих специй при комнатной температуре затухает по сложному закону, что может объясняться различными типами механизмов релаксации: рекомбинация радикалов, захват электронов, рекомбинация носителей заряда и передача энергии от матрицы к радикалам. Различные факторы могут усложнить анализ облученных специй: экспонирование солнечным светом, содержание воды, жира и др. Все эти эффекты должны быть исследованы отдельно.

Выводы. Спектры ЭПР всех изученных образцов, включая необлученный контроль, демонстрируют характерный синглетный сигнал с g-фактором 2,0042, что указывает на наличие углеродсодержащих радикалов. Интенсивность ЭПР сигнала статистически значимо возрастает после облучения в прямой зависимости от дозы облучения. ЭПР сигнал облученного лаврового листа при 1 кГр статистически значимо выше, чем в контроле, на 343 %, при 10 кГр – на 1224 %, а облученного черного перца – соответственно на 15 % и на 261 %.

ЭПР сигнал, который появляется у специй после облучения, со временем затухает. Наибольшее снижение происходит в первые полмесяца после облучения с дальнейшим более медленным затуханием в течение нескольких месяцев. ЭПР сигнал лаврового листа, облученного дозой 1 кГр, спустя первые семь суток статистически значимо снижался, относительно значения сигнала, измеренного сразу после облучения, на 55 %, 10 кГр – на 78 %, черного перца – соответственно на 12 % и 61 %.

Методом спектроскопии электронного парамагнитного резонанса возможно выявлять факт облучения, таких сухих специй, как лавровый лист и черный перец, спустя 9 месяцев хранения. Интенсивность ЭПР сигнала достоверно коррелирует с дозой облучения. Все отмеченные различия были статистически значимыми, что подтверждает возможность использования рассматриваемого метода для контроля облученных продуктов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Тимакова Р. Т., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Исследование возможности применения арабиногалактана для хранения охлажденной рыбы // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 10. С. 106-110. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11017.
2. Контаминация плодово-ягодной продукции микотоксигенными плесневыми грибами / Л. П. Минаева, А. Д. Евсюкова, В. А. Кольцов и др. // *Гигиена и санитария*. 2023. Т. 102. № 3. С. 272-278. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-3-272-278.
3. Способы снижения обсемененности зерна пшеницы микроорганизмами при его подготовке к переработке / Т. В. Ваницкая, А. Ю. Шаззо, В. Г. Лобанов и др. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 2-3(386-387). С. 26-29. doi: 10.26297/0579-3009.2022.2-3.5.
4. Анализ продовольственного зерна в Российской Федерации на загрязненность широким спектром микотоксинов (на примере урожая 2018 года) / М. Г. Киселева, И. Б. Седова, З. А. Чалый и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 3. С. 559-577. doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.559rus.
5. Изучение контаминации сухофруктов токсигенными плесневыми грибами / Л. П. Минаева, А. С. Полянина, М. Г. Киселева и др. // *Гигиена и санитария*. 2021. Т. 100. № 7. С. 717-723. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-7-717-723.
6. Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 99-119. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013.
7. Сравнительная характеристика эффективности обработок ингибиторами этилена и электромагнитными полями крайне низких частот при хранении нарезанной капусты белокочанной / Т. В. Першакова, Г. А. Купин, Т. В. Яковлева и др. // *Ползуновский вестник*. 2024. № 1. С. 134-140. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.016.
8. Оценка потребительских предпочтений россиян: «ловушка среднего рациона» / В. В. Горбачев, И. А. Никитин, Д. А. Велина и др. // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2022. № 6(390). С. 90-98. doi: 10.26297/0579-3009.2022.6.3.
9. Неменуцкая Л. А. Обеспечение экологической безопасности при использовании радиационных технологий в АПК // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. № 4(101). С. 94-106. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10216.

10. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для выявления радиационно-обработанных продуктов питания / М. Б. Кувыкина, А. А. Прядка, В. П. Тенишев и др. // Альманах современной метрологии. 2023. № 1(33). С. 222-230.
11. Тимакова Р. Т., Ильюхина Ю. В., Старцев В. Г. Влияние низкодозового γ -излучения на безопасность сублимированного кобыльего молока // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 82-86. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_82.
12. Тимакова Р. Т., Тихонов С. Л., Тихонова Н. В. Современные методы идентификации свинины, обработанной ионизирующим излучением // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 90-92. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11021.
13. Зависимость параметров ЭПР-спектра от вида мяса и рыбы, обработанных ионизирующим излучением / Р. Т. Тимакова, С. Л. Тихонов, О. В. Евдокимова, И. В. Бутенко // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97. № 9. С. 873-876. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-873-876.
14. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue / R. T. Timakova, S. L. Tikhonov, N. V. Tikhonova, et al. // Foods. 2019. Vol. 8. No. 4. Article ID 8040130. doi: 10.3390/foods8040130.
15. Микробиологическая контаминация продовольственного сырья и готовой пищевой продукции (аналитический обзор) / А. С. Хишов, Т. В. Балагула, О. И. Лаврухина и др. // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 486-503. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2451.
16. Khan A. A., Shahid M. K. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique // Journal of Spices & Aromatic Crops. 2021. Vol 30. No. 1. P. 107-116. doi: 10.25081/josac.2021.v30.i1.6855.
17. Aleksieva K. I., Yordanov N. D. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: A review // Food Research International. 2018. Vol. 105. P. 1019-1028. doi: 10.1016/j.foodres.2017.11.072.
18. Использование различных материалов для ЭПР дозиметрии в случаях аварийного облучения / Д. В. Иванов, Д. Р. Байтмиров, С. Ф. Конев и др. // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 3(91). С. 75-81.

References

1. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV. [Investigation of the possibility of using arabinogalactan for storing chilled fish]. Dostizh Nauki Tekhn APK. 2020;34(10):106-10. doi: 10.24411/0235-2451-2020-11017. Russian.
2. Minaeva LP, Evsyukova AD, Kol'tsov VA, et al. [Contamination of fruit and berry products with mycotoxigenic molds]. Gig Sanit. 2023;102(3):272-8. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-3-272-278. Russian.
3. Vanitskaya TV, Shazzo AYU, Lobanov VG, et al. [Methods to reduce microbial contamination of wheat grain during its preparation for processing]. Izv Vyssh Uchebn Zaved Pishch Tekhnol. 2022;(2-3(386-387)):26-9. doi: 10.26297/0579-3009.2022.2-3.5. Russian.
4. Kiseleva MG, Sedova IB, Chalyy ZA, et al. [Analysis of food grains in the Russian Federation for contamination with a wide spectrum of mycotoxins (example of the 2018 harvest)]. S-kh Biol. 2021;56(3):559-77. doi: 10.15389/agrobiology.2021.3.559rus. Russian.
5. Minaeva LP, Polyanina AS, Kiseleva MG, et al. [Study of contamination of dried fruits with toxigenic molds]. Gig Sanit. 2021;100(7):717-23. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-7-717-723. Russian.
6. Burak LCh. [The use of modern processing technologies to extend the shelf life of fruits and vegetables. A review of the subject field]. Polzunovskii Vestn. 2024;(1):99-119. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013. Russian.
7. Pershakova TV, Kupin GA, Yakovleva TV, et al. [Comparative characteristics of the effectiveness of treatments with ethylene inhibitors and extremely low-frequency electromagnetic fields during the storage of chopped white cabbage]. Polzunovskii Vestn. 2024;(1):134-40. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.016. Russian.
8. Gorbachev VV, Nikitin IA, Velina DA, et al. [Assessment of consumer preferences of Russians: «the trap of the average diet»]. Izv Vyssh Uchebn Zaved Pishch Tekhnol. 2022;(6(390)):90-8. doi: 10.26297/0579-3009.2022.6.3. Russian.
9. Nemenushchaya LA. [Ensuring environmental safety when using radiation technologies in the agro-industrial complex]. Tekhnol Tekh Sredstva Mekhaniz Proizv Rastenievod Zhivotnovod. 2019;(4(101)):94-106. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10216. Russian.
10. Kuvyikina MB, Pryadka AA, Tishchev VP, et al. [Application of the electron paramagnetic resonance method for the detection of radiation-processed food products]. Al'manakh Sovrem Metrol. 2023;(1(33)):222-30. Russian.
11. Timakova RT, Il'yukhina YuV, Startsev VG. [The effect of low-dose γ -irradiation on the safety of freeze-dried mare's milk]. Dostizh Nauki Tekh APK. 2023;37(7):82-6. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_82. Russian.
12. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV. [Modern methods for identifying pork treated with ionizing radiation]. Dostizh Nauki Tekh APK. 2018;32(10):90-2. doi: 10.24411/0235-2451-2018-11021. Russian.
13. Timakova RT, Tikhonov SL, Evdokimova OV, Butenko IV. [Dependence of EPR spectrum parameters on the type of meat and fish treated with ionizing radiation]. Gig Sanit. 2018;97(9):873-6. doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-9-873-876. Russian.
14. Timakova RT, Tikhonov SL, Tikhonova NV, et al. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue. Foods. 2019;8(4):130. doi: 10.3390/foods8040130.
15. Khishov AS, Balagula TV, Lavrukhina OI, et al. [Microbiological contamination of food raw materials and finished food products (analytical review)]. Tekhnol Tekhnol Pishch Proizv. 2023;53(3):486-503. doi: 10.21603/2074-9414-2023-3-2451. Russian.
16. Khan AA, Shahid MK. Detection of radiation treatment of spices using Electron Spin Resonance Spectroscopy technique. J Spices Aromat Crops. 2021;30(1):107-16. doi: 10.25081/josac.2021.v30.i1.6855.
17. Aleksieva KI, Yordanov ND. Various approaches in EPR identification of gamma-irradiated plant foodstuffs: A review. Food Res Int. 2018;105:1019-28. doi: 10.1016/j.foodres.2017.11.072.
18. Ivanov DV, Baitimirov DR, Konev SF, et al. [Use of various materials for EPR dosimetry in cases of accidental exposure]. Vopr Radiats Bezop. 2018;(3(91)):75-81. Russian.

Поступила в редакцию 30.05.2025 После доработки 28.10.2025 Принята к публикации 08.12.2025