

Влияние ионизирующего излучения на ферментативную активность клубней картофеля

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

Т.З. Минбагисов, И.С. Селезнева, М.А. Безматерных, А.А. Баранова

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Тимур Зарифович Минбагисов
E-mail: tz-minbagisov@yandex.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Минбагисов, Т.З., Селезнева, И.С., Безматерных, М.А., & Баранова, А.А. (2025). Влияние ионизирующего излучения на ферментативную активность клубней картофеля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(3), 82-106. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.647>

ПОСТУПИЛА: 6.05.2025

ПРИНЯТА: 15.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: В Российской Федерации потери картофеля при хранении достигают 14 % от объема урожая, что обусловлено прорастанием и нарушением биохимического баланса клубней. Использование ионизирующего излучения признано эффективным методом ингибирования прорастания, однако его влияние на ферментативную активность и белковый профиль клубней недостаточно изучено.

Цель: Оценить влияние тормозного излучения в дозах 50–150 Гр (рекомендованных МАГАТЭ) на механическую прочность, белковый состав и активность ферментов антиоксидантной системы и обмена веществ в клубнях картофеля.

Материалы и методы: Объектом исследования были клубни картофеля сорта Ред Скарлетт. Использовали тормозное излучение (10 МэВ), дозы 0, 50, 100 и 150 Гр. Измеряли твердость (пенетрометрия), проводили высаливание белков сульфатом аммония, определяли содержание общего белка (метод Лоури), а также активность кислой фосфатазы и каталазы (спектрофотометрически и титриметрически).

Результаты: Установлено увеличение твердости клубней при дозе 150 Гр на 34 % по сравнению с контролем. При 100 Гр масса белковых осадков достигала максимума, превысив контроль в 8,8 раз. При 150 Гр количество общего белка превышало контроль в 6,6 раз. Активность кислой фосфатазы возрастала до 2,8 раза при 100 Гр, после чего снижалась. Активность каталазы увеличивалась с ростом дозы и достигала максимума при 150 Гр (в 2,14 раза выше контроля).

Выводы: Полученные результаты подтверждают чувствительность метаболических и структурных параметров картофеля к дозам ионизирующего излучения и демонстрируют потенциал применения облучения в технологии хранения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ионизирующее излучение; клубни картофеля; ферментативная активность кислой фосфатазы; ферментативная активность каталазы; профиль осаждения белка; общее содержание белка; механическая прочность; постуборочная обработка

Impacts of Ionizing Radiation on the Potato Tuber Enzymatic Activity

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

Timur Z. Minbagisov, Irina S. Selezneva, Maxim A. Bezmaternykh, Anna A. Baranova

CORRESPONDENCE:

Timur Z. Minbagisov

E-mail: tz-minbagisov@yandex.ru

FOR CITATIONS:

Minbagisov, T.Z., Selezneva, I.S., Bezmaternykh, M.A., & Baranova, A.A. (2025). Impacts of ionizing radiation on the potato tuber enzymatic activity. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(3), 82-106. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.647>

RECEIVED: 6.05.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Potato losses caused by germination and changes in the biochemical balance of tubers during the storage reach 14% of the whole harvest volume around the Russian Federation. The application of the ionizing radiation is known as an effective method of germination inhibiting but its effect on the enzymatic activity and protein precipitation profile of potato tubers has not been sufficiently studied.

Purpose: To evaluate the effect of bremsstrahlung at doses of 50–150 Gy recommended by the IAEA (International Atomic Energy Agency) on mechanical firmness, protein structure as well as enzyme activity of the potato antioxidant system and metabolism.

Materials and Methods: Red Scarlett variety of potatoes is the subject of the given study. The research aims to apply bremsstrahlung (10 MeV) at doses of 0, 50, 100 and 150 Gy and as a result to measure mechanical firmness by a penetrometer, to carry out salting out of protein with ammonium sulfate, to determine the total protein content by Lowry's method as well as to define the activity of acid phosphatase and catalase (spectrophotometrically and titrimetrically).

Results: The research has shown that firmness of potato tubers at a dose of 150 Gy increases by 34% as compared with the controlled one. Mass of protein precipitation at a dose of 100 Gy reaches its maximum exceeding the control by 8.81 times. The total protein content exceeds the control by 6.60 times at a dose of 150 Gy. The activity of acid phosphatase increases up to 2.8 times at a dose of 100 Gy leading to its further decrease. According to the given research, the activity of catalase increases with an increasing dose and reaches a maximum at a dose of 150 Gy (2.14 times higher than the control).

Conclusion: The obtained results confirm the sensitivity of the metabolic and structural parameters of potatoes to ionizing radiation doses and demonstrate the greatest potential of the ionizing radiation application for the storage technology.

KEYWORDS

ionizing radiation; potato tubers; acid phosphatase activity; catalase activity; protein precipitation profile; total protein content; mechanical firmness; post-harvest treatment

ВВЕДЕНИЕ

Картофель относится к числу базовых продовольственных культур и играет ключевую роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности. По данным ФАО (2024), мировой объем его производства достигает порядка 400 млн т в год, а сама культура интегрирована в аграрные системы примерно 160 стран. Тем не менее даже при этих масштабах производства проблема потерь на этапах хранения остается неразрешенной и усугубляет ситуацию с продовольственной обеспеченностью: по оценкам международных организаций, около 735 млн человек в мире продолжают испытывать дефицит пищи¹. Для Российской Федерации характерны сопоставимые вызовы: на этапе хранения утрачивается до 14 % урожая картофеля, что связано прежде всего с прорастанием и нарушением биохимического баланса клубней (Kim et al., 2020). Существенную долю этих потерь формируют прорастание, развитие болезней и процессы гниения (Алимов и соавт., 2017), что обуславливает необходимость разработки и оптимизации постуборочных технологий, направленных на замедление указанных процессов без ухудшения потребительских и технологических свойств продукции.

Радиационные технологии рассматриваются как один из наиболее перспективных инструментов решения данной задачи. Согласно данным Отмаховой и соавт. (2020), применение ионизирующего излучения позволяет снизить затраты на обработку плодоовощной продукции на 10–20 %, при этом технология позиционируется как эффективная и безопасная с точки зрения снижения микробной обсемененности и сохранения биоорганических соединений (Akhila et al., 2021; Bisht et al., 2021). В ряде работ подчеркивается, что для ингибирования прорастания клубней картофеля достаточно доз до 150 Гр, не приводящих к существенному ухудшению качества продукции (Панов & Козьмин, 2025; Shik et al., 2024; Son et al., 2022), а рекомендации МАГАТЭ² согласуются с использованием низких и умеренных доз для пищевых продуктов.

Сформировавшийся корпус исследований по радиационной обработке картофеля позволяет выявить ряд устойчивых закономерностей, однако он имеет выраженную тематическую и методологическую фрагментацию. Существенная часть работ сосредоточена на морфологических и структурно-механических характеристиках клубней. Так, при изучении сорта Куфри-Джиоти было показано, что γ -облучение (^{60}Co) в дозе 100 Гр приводит к увеличению твердости и прочности на сдвиг, тогда как при 200 Гр положительный эффект ослабевает, возрастает склонность к гниению и фиксируется потемнение кожуры; при этом ингибирование прорастания при обеих дозах сохраняется (Sarkar & Mahato, 2020). Аналогичные тенденции выявлены Dhali et al. (2017) для того же сорта при дозах 150 и 500 Гр: умеренная доза повышала твердость и прочность на сдвиг, тогда как более высокая сопровождалась выраженным ухудшением состояния клубней (гниение, потемнение, появление черных пятен), несмотря на эффективное подавление прорастания. В исследованиях Soares et al. (2018) и Liu et al. (2024) также показано, что дозы 100–150 Гр (γ -излучение, ^{60}Co) обеспечивают эффективное подавление гниения и биопоражения при хранении в течение 20–35 дней, а при 1000 Гр картофель сохраняет устойчивость к плесени и потере массы до 50 дней, хотя при столь высоких дозах возрастает риск негативного влияния на качественные характеристики.

Другая важная линия исследований связана с реакцией антиоксидантной системы картофеля на ионизирующее излучение. В работах Afify et al. (2012) показано, что облучение клубней сорта Бриллиант дозами 10–200 Гр (γ -излучение, ^{60}Co) с оценкой через 3, 6 и 9 недель приводит к увеличению активности пероксидазы (POD) и полифенолоксидазы (PPO) с максимумом на третьей неделе; снижению активности супероксиддисмутазы (SOD) и дозозависимому росту активности каталазы (CAT) для отдельных доз, сопровождающемуся снижением уровня перекисного окисления липидов. Mohamed et al. (2021), исследуя каллус картофеля сортов Леди Розетта, Бриллиант, Золото и Санта-

¹ FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2024). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 — Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>

² IAEA. (2015). *Manual of good practice in food irradiation: Sanitary, phytosanitary and other applications*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/10801/manual-of-good-practice-in-food-irradiation>

на, облученный дозой 20 Гр (γ -излучение, ^{137}Cs), также отмечают усиление активности POD и PPO у всех вариантов. В других работах фокус смещается на отдельные элементы антиоксидантной системы: преимущественно изучаются POD и PPO (Peng et al., 2025; Mohamed et al., 2021; Afify et al., 2012; Рубин & Метлицкий, 1959), а также каталаза (Iratova et al., 2025), в том числе при прямом облучении фермента.

Третье направление касается ферментов обмена веществ и низкомолекулярных метаболитов. Etemadinasab et al. (2020) показали, что облучение клубней картофеля сортов Аринда, Буррен, Санте, Агрива и Марфона электронным пучком в дозе 1000 Гр приводит к увеличению активности α -амилазы как до начала хранения, так и после 180 дней. В то же время Afify et al. (2012) фиксировали снижение активности α -амилазы в клубнях сорта Бриллиант на 3, 6 и 9 неделе хранения после γ -облучения в диапазоне 30–200 Гр, что свидетельствует о сложной дозо- и сортозависимой реакции ферментативных систем. Musin et al. (2022) сообщают о снижении концентрации углеводов, липидов, кето-каротина и аминокислот в картофеле, облученном дозой 30 кГр (γ -излучение), тогда как Dhali et al. (2017) обнаружили повышение содержания витамина С и преимущественное уменьшение общего количества крахмала и растворимых сахаров при дозах 150 и 500 Гр. В совокупности эти данные демонстрируют, что радиационная обработка затрагивает ключевые звенья углеводного и антиоксидантного обмена, однако спектр изученных ферментов и метаболитов остается ограниченным.

Наконец, отдельные исследования ориентированы на разработку индикаторных подходов для идентификации облученных образцов и оценки поглощенных доз. В работе Shik et al. (2023) предложен метод «отпечатков пальцев» для картофеля, облученного рентгеновским излучением в диапазоне 0,01–10 кГр, основанный на использовании карбоцианиновых красителей. По интенсивности флуоресценции в ближнем ИК-диапазоне и поглощению в видимой области спектра, с применением линейного дискриминантного анализа авторы достигли достоверного разделения необлученных и облученных клубней, что подчеркивает интерес к созданию быстрых аналитических инструментов контроля постуборочной обработки.

При обобщении существующих данных выявляется ряд методологических ограничений, определяющих текущий пробел в знаниях. Во-первых, большинство исследований, посвященных состоянию клубней картофеля после облучения, используют γ -излучение от источника ^{60}Co (Liu et al., 2024; Sarkar & Mahato, 2020; Soares et al., 2018; Dhali et al., 2017; Afify et al., 2012; Рубин & Метлицкий, 1959) и, как правило, анализируют уже хранившиеся клубни с отсроченной оценкой (Sarkar & Mahato, 2020; Dhali et al., 2017; Afify et al., 2012). Во-вторых, чаще всего используются дозы от 100 Гр и выше (Liu et al., 2024; Shik et al., 2023; Sarkar & Mahato, 2020; Dhali et al., 2017) либо рассматривается одна фиксированная доза, как 20 Гр (Mohamed et al., 2021) или 100 Гр (Рубин & Метлицкий, 1959), что затрудняет построение детализированной дозо-ответной зависимости в диапазоне низких доз, рекомендованных МАГАТЭ (до 150 Гр). В-третьих, структурные свойства, такие как удельный вес, масса проростков, влагосодержание, твердость, прочность на сдвиг и текстура (Sarkar & Mahato, 2020; Soares et al., 2018; Dhali et al., 2017), обычно рассматриваются изолированно от биохимических показателей и практически не интерпретируются как маркеры метаболической перестройки.

Фокус на антиоксидантной системе в большинстве работ ограничивается отдельными ферментами, преимущественно POD и PPO (Peng et al., 2025; Mohamed et al., 2021; Afify et al., 2012; Рубин & Метлицкий, 1959) или каталазой (Iratova et al., 2025). Хотя Iratova et al. (2025) показали снижение активности напрямую облученной каталазы при дозе 100 Гр, а Peng et al. (2025) зафиксировали повышение активности каталазы в облученном картофеле при дозах 300–500 Гр после длительного хранения. Данные о прямой ферментативной реакции в свежих клубнях при дозе 150 Гр отсутствуют даже в исследованиях, где эта доза включалась в дизайн (Soares et al., 2018; Dhali et al., 2017). Существенным пробелом является и отсутствие сведений о реакции кислой фосфатазы на ионизирующее излучение: в доступных работах по картофелю и другим корнеплодам данный фермент обмена фосфорсодержащих соединений не анализировался, несмотря на его значимую роль в энергетическом и пластическом метаболизме. В частности, в исследованиях Mohamed et al. (2021) и Peng et al. (2025) оценивались POD, PPO, SOD и CAT при дозах 20–500 Гр, а в работе Musin et al. (2022) фиксирова-

лось снижение содержания углеводов, липидов, кето-каротина и аминокислот, но ферменты обмена веществ, включая кислую фосфатазу, не изучались.

Ещё одним аспектом недостаточной изученности является отсутствие систематического сопоставления ферментативной активности и общего содержания белка в одних и тех же образцах. Несмотря на то что в ряде работ анализировались удельный вес клубней, содержание растворимых белков и их растворимость (Sarkar & Mahato, 2020; Etemadinasab et al., 2020; Dhali et al., 2017; Zhang et al., 2017), практически не рассматривались возможные дозозависимые изменения массы высаливаемых белковых фракций и характера их осаждения под влиянием облучения. В результате остается неясным, как структурные показатели (например, твердость свежих, не хранившихся клубней) связаны с биохимическими маркерами метаболической активности, включая ферменты антиоксидантной системы и обмена веществ.

Современные представления о радиационно-индуцированных изменениях в растительных клетках подчеркивают центральную роль активных форм кислорода. Как показано Jomova et al. (2023), воздействие ионизирующего излучения приводит к образованию активных форм кислорода (АФК, ROS), что инициирует вовлечение антиоксидантной системы и, в частности, усиленный синтез каталазы как защитной реакции на накопление пероксида водорода. В этой связи каталаза рассматривается как чувствительный биомаркер окислительного стресса, пригодный для количественной оценки радиационного воздействия (Ipatova et al., 2025). Одновременно предполагается, что в условиях облучения возрастает активность кислой фосфатазы, отражающей перестройку фосфатного и энергетического обмена и выступающей биомаркером изменения метаболического статуса клетки (Zaman et al., 2023). Эти эффекты коррелируют с феноменом радиационного гормезиса, описываемым Kim J. H. (2025) и Godínez-Mendoza et al. (2023) как благоприятная биологическая реакция растений на умеренные стрессоры, включая низкие дозы ионизирующего излучения, при превышении которых реализуется уже угнетающее действие. Изучение таких биомаркеров в диапазоне доз, рекомендованных международными агентствами (IAEA, EFSA, FAO) для обработки пищевых продуктов, критически важно для обоснования безопас-

ных и одновременно технологически эффективных режимов облучения.

Исходя из изложенного, можно констатировать, что комплекс ферментативных показателей (активность каталазы при дозе 150 Гр, активность кислой фосфатазы, сопоставление ферментативной активности с содержанием общего белка) и структурных характеристик (твердость свежих, не хранившихся клубней как интегральный индикатор метаболической активности) остается практически неисследованным. Особенно заметен дефицит данных по действию низкодозного ионизирующего излучения (≤ 150 Гр), рекомендованного МАГАТЭ для ингибирования прорастания пищевых продуктов, на свежие клубни картофеля до начала хранения.

В рамках настоящей работы мы исходили из гипотезы о том, что низкодозное облучение (≤ 150 Гр) будет сопровождаться стресс-индуцированной активацией метаболизма (радиационным гормезисом), что проявится в увеличении общего содержания белка, усилении активности кислой фосфатазы, мобилизующей неорганический фосфат, и каталазы, расщепляющей пероксид водорода, а также в росте твердости клубней как структурного маркера метаболической перестройки.

Целью исследования являлась оценка влияния низкодозного ионизирующего облучения (тормозное излучение, 10 МэВ, 50–150 Гр) на метаболические и механические характеристики свежих клубней картофеля сорта Ред Скарлетт с особым акцентом на активность кислой фосфатазы и каталазы, общее содержание белка, профиль высаливания белков и твердость клубней. Для реализации данной цели были поставлены следующие исследовательские вопросы:

RQ1: Как меняется твердость клубней картофеля под действием облучения в диапазоне доз 50–150 Гр?

RQ2: Приводит ли облучение к изменению характера высаливания белков и увеличению массы белковых осадков?

RQ3: Как воздействие различных доз облучения влияет на общее содержание белка в клубнях картофеля?

RQ4: Вызывает ли облучение стимуляцию ферментативной активности кислой фосфатазы и каталазы, и в каких дозах этот эффект наиболее выражен?

RQ5: Существует ли дозозависимая взаимосвязь между метаболическими показателями (ферментативная активность, содержание белка) и уровнем облучения, а также между метаболическими и структурными параметрами клубней?

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты

В качестве объекта исследования использовали клубни картофеля сорта Ред Скарлетт, полученные от агрофирмы «Дажь» (г. Богданович, Свердловская область, Россия). Двести клубней были случайным образом отобраны в четыре группы для экспериментальных работ, три из которых облучили разными дозами, клубни 4-й группы не облучали и использовали в качестве контрольных образцов. В результате облучения поглощенные дозы клубнями 1–3-й групп составили 50, 100 и 150 Гр соответственно. Эксперимент проведен в соответствии с ГОСТ 28372–93 (ИСО 2165–74), где установлены сроки и методы длительного хранения картофеля различных сортов. Учтено, что настоящий стандарт в основной части устанавливает только общие правила хранения ввиду значительного разнообразия ботанических сортов картофеля и влияния на их лежкость климатических и агротехнических факторов. Как облученные, так и контрольные образцы хранили в холодильнике при температуре +5 °С.

Оборудование

Клубни картофеля облучали тормозным излучением от пучка электронов с энергией 10 МэВ с помощью ускорителя электронов УЭЛР-10–10С (ИВЦ Радиационной стерилизации, УрФУ). Эксперимент проводился в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ для применения в пищевой промышленности.

Для определения массы образцов использовали аналитические весы марки AND модели HR-60 с пределом взвешивания 60 г и дискретностью 0,1 мг. Оборудование произведено в 2014 г.

Твердость клубней картофеля определяли пенетрометром марки Spectro Lab модели Gy-3. Оборудование произведено в 2016 г.

Перемешивание и нагрев проводили на магнитной мешалке марки Heidolph модели MR Hei-Standard, обеспечивающей нагрев до 300 °С и перемешивание до 1400 об/мин. Оборудование произведено в 2015 г.

Для центрифугирования экстрактов применяли центрифугу с функцией охлаждения марки BioSan модели LMC-4200R, обеспечивающую поддержание температуры в рабочей зоне в диапазоне –10...+25 °С и вращение в диапазоне 100...4200 об/мин. Оборудование произведено в 2017 г.

Для измерения оптической плотности растворов белковых фракций, выделенных из клубней картофеля, применяли спектрофотометр марки Shimadzu модели UV-1800. Определение активности ферментов проводили при длине волны 405 нм, а содержание общего белка – при 750 нм. Оборудование произведено в 2015 г.

Определение pH проводили pH-метром марки Mettler Toledo модели FiveEasy F20, обеспечивающим диапазон измерений pH 0...14 при температуре 0...+100 °С с погрешностью pH 0,01. Оборудование произведено в 2015 г.

Процедура и методы исследования

Перед началом экспериментальной части была определена последовательность этапов работы, исходя из применяемых методов или наборов подготавливаемых проб и образцов. Это позволило выстроить логику и направленность планируемого процесса, охватывающего поставленные исследовательские вопросы. Эксперимент включал ряд стадий, которые определили его дизайн. Описание экспериментального дизайна представлено в Таблице 1.

Определение поглощенной дозы

Первым этапом работы было вычисление поглощенной дозы тормозного излучения в клубнях картофеля расчетным путем в прикладной программе PCLab по встроенной калибровочной кри-

Таблица 1

Описание экспериментального дизайна

Table 1

Description of the Experimental Design

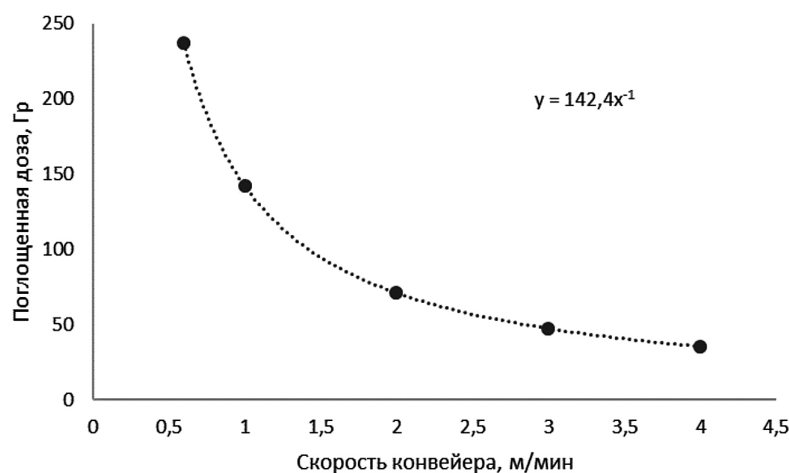
№ п/п	Этапы исследования	Применяемый метод	Подготовка проб и образцов к анализу
1	Определение поглощенной дозы	–	Облучение клубней тормозным излучением
2	Определение твердости клубней картофеля	Пенетрометрия	–
3	Высаливание белковых фракций из клубней картофеля	Осаждение сульфатом аммония	Натирание клубней, перемешивание с 0,2 М ацетатным буфером, фильтрация
4	Подготовка образцов к определению общего белка	–	Растворение белковых осадков в 0,2 М ацетатном буфере
5	Определение общего белка по методу Лоури	Метод Лоури; спектрофотометрия	Смешивание с реактивом С, разбавленным реактивом Фолина
6	Подготовка образцов к определению активности кислой фосфатазы	–	Растворение белковых осадков в 0,2 М ацетатном буфере
7	Определение активности кислой фосфатазы	Спектрофотометрия	Термостатирование (30 °С); внесение субстрата (р-нитрофенилфосфат); инкубация 15 мин; внесение раствора едкого натра
8	Подготовка образцов к определению активности каталазы	–	Натирание клубней; нейтрализация (рН); фильтрация; инактивация каталазы
9	Определение активности каталазы в клубнях картофеля	Перманганатометрия	–

Рисунок 1

График зависимости поглощенной дозы от скорости конвейера

Figure 1

The Graph of the Absorbed Dose in Relation to the Conveyor Speed



вой (Рисунок 1). Согласно зависимости скорости конвейера, необходимые для достижения доз 50, 100 и 150 Гр составили 2,85, 1,42 и 0,95 м/мин соответственно.

Тормозное излучение генерировалось при прохождении электронного излучения через мишень из алюминиевых пластин общей толщиной 2 см, соответствующей пробегу используемых электро-

нов в данном материале. Таким образом, первичное излучение полностью поглощалось тормозной мишенью. Клубни картофеля располагали непосредственно за алюминиевым конвертером. При облучении контролировали скорость конвейера.

Задачей данного этапа являлось достижение целевых доз облучения.

Определение твердости клубней картофеля

На каждом этапе для всех клубней картофеля проводили испытания в двух параллельных измерениях (при определении активности каталазы — в трех) спустя 1 неделю после облучения. Вторым этапом работы было измерение твердости клубней картофеля пенетрометром. Для этого выбирали центральную часть боковой поверхности клубня картофеля, удаляли кожицу с намеченной и противоположной внешней точек клубня, формируя ровные оголенные зоны радиусом около 1 см. Располагали клубень на ровной поверхности, после чего плавно, равномерно и без рывков осуществляли введение накопника пенетрометра в мякоть клубня.

Задачей данного этапа являлась проверка предположения о росте твердости клубней с увеличением дозы облучения. Измерения проводили на клубнях картофеля, облученных разными дозами, в сравнении с контрольными образцами.

Высаливание белковых фракций из клубней картофеля

В дальнейшем на третьем этапе работы выделяли белковые фракции из экспериментальных и контрольных образцов клубней картофеля сульфатом аммония по описанной методике с небольшими изменениями³. Для этого использовали три варианта концентрации соли в растворе: 30, 60 и 90 %⁴. Выбор обусловлен необходимостью охватить максимальный диапазон содержания соли в растворе — с широким шагом, однако 100 % насыщение раствора сульфатом аммония исключалось из-за известного эффекта сильного соосаждения⁵.

Задача этапа заключалась в выделении белковых фракций из клубней картофеля с выявлением характера их высаливания.

Необлученные и облученные клубни очищали от кожуры и натирали на пластмассовой терке. Полученную мякоть взвешивали, помещали в стеклянный стакан с известной массой объемом 250 мл, добав-

ляли 100 мл 0,2 М ацетатного буфера, предварительно охлажденного до 5 °С. Смесь перемешивали на магнитной мешалке в течение 25 мин, фильтровали через двойной слой марли в коническую колбу вместимостью 250 мл. Измеряли объем полученного фильтрата, 10 мл переносили в коническую колбу на 25 мл и помещали в морозильную камеру (–21 °С). В дальнейшем его использовали в качестве контрольного образца (без добавления соли аммония).

Количество сульфата аммония предварительно рассчитывали по формуле (1), брали навеску и добавляли в колбу с экстрактом клубней картофеля до тех пор, пока не было достигнуто 30 % содержание соли в экстракте. После этого смесь перемешивали на магнитной мешалке 15 мин при 600 об/мин. Затем колбу со смесью экстракта и раствора соли выдерживали на льду в течение 30 мин. В процессе добавления соли в экстракт происходит высаливание белков, поскольку соль разрушает гидратную оболочку белков и нейтрализует их заряд. Раствор центрифугировали 10–12 мин при скорости 3000 об/мин и температуре –5 °С. В результате образовался серо-коричневый осадок. Осадок переносили в предварительно взвешенный стеклянный стакан. Массу осадка определяли по разнице масс стакана с осадком и без него. Супернатант отбирали для повторного добавления сульфата аммония. Аналогичным образом были достигнуты 60 и 90 % содержания соли. Таким же образом отделяли осадки. Последний супернатант отбрасывали. Осадки помещали в морозильную камеру (–21 °С) и использовали на следующих этапах работы с белковыми фракциями.

Формула расчета количества добавляемого сульфата аммония (1):

$$m_{\text{соль}} = \frac{0,515 \cdot V \cdot (C_2 - C_1)}{1 - 0,272 \cdot C_2}, \quad (1)$$

где $m_{\text{соль}}$ — масса сульфата аммония, г;
0,515; 0,272 — эмпирические коэффициенты;
 V — объем экстракта из клубней картофеля, мл;
 C_2, C_1 — конечное и начальное содержание соли в растворе⁶.

³ Кочетов, Г. А. (1980). Практическое руководство по энзимологии. С. Е. Северин (Ред.), Фракционирование солями (2-е изд., с. 14–17). Москва: Высшая школа.

⁴ Грачева, И. М., Грачев, Ю. П., Мосичев, М. С., Борисенко, Е. Г., Богатков, С. В., & Гернет М. В. (1982). *Лабораторный практикум по технологии ферментных препаратов*. Москва: Легкая и пищевая промышленность.

⁵ Грачева, И. М. (1987). *Технология ферментных препаратов* (2-е изд.). Москва: Агропромиздат.

⁶ Кочетов, Г. А. (1980). Практическое руководство по энзимологии. С. Е. Северин (Ред.), Фракционирование солями (2-е изд., с. 14–17). Москва: Высшая школа.

Подготовка образцов к определению общего белка

Четвертым этапом работы была подготовка образцов к определению общего белка по известной методике⁷. Для подготовки образцов к определению активности кислой фосфатазы и общего белка полученные осадки растворяли в 10 мл 0,2 М ацетатного буфера. Задачей данного этапа являлось растворение осадков, выделенных на втором этапе работы, и получение реакционных смесей согласно методике. С этой целью осадки растворяли в 10 мл 0,2 М ацетатного буфера при перемешивании.

Определение общего белка по методу Лоури

Пятым этапом работы было определение содержания общего белка спектрофотометрически по известному методу (метод Лоури)⁸. Задачей данного этапа являлось выявление содержания общего белка в белковых фракциях как косвенного показателя состояния метаболизма клеток картофеля, а также анализ изменения содержания общего белка в зависимости от дозы облучения.

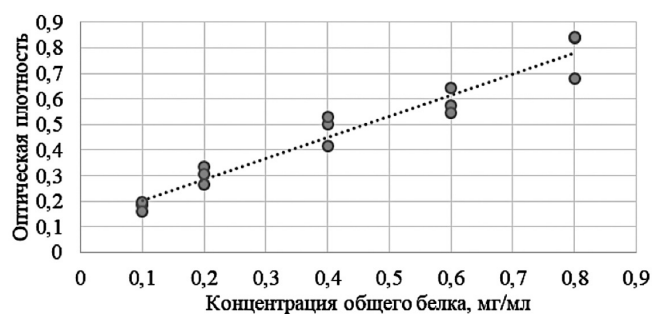
Оптическую плотность образцов из клубней картофеля измеряли при длине волны 750 нм с использованием дистиллированной воды в качестве раствора сравнения. По результатам величины

Рисунок 2

Калибровочный график для определения содержания общего белка

Figure 2

The Calibration Graph for Total Protein Content Determination



⁷ Шмелева, В. Г. (2006). *Определение белков и аминокислот в микробной биомассе*. Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ).

⁸ Шмелева, В. Г. (2006). *Определение белков*. Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ).

⁹ Шмелева, В. Г. (1997). *Методы определения активности ферментов. Методические указания* (с. 29–33). Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ).

¹⁰ Биссвангер, Х. (2015). *Практическая энзимология*. В Т. И. Почкаева & И. С. Беленькая (Ред.), *Ферментативные реакции*. Москва: Бином. Лаборатория знаний.

¹¹ Шмелева, В. Г. (1997). *Методы определения активности ферментов. Методические указания* (с. 29–33). Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ).

оптической плотности построили калибровочную кривую (Рисунок 2), по которой определяли содержание общего белка.

Подготовка образцов к определению активности кислой фосфатазы

Шестым этапом работы была подготовка образцов к определению активности кислой фосфатазы по известной методике⁹. Задачей данного этапа являлось получение раствора сравнения и растворение в ацетатном буфере осадков, полученных на третьем этапе работы. В качестве раствора сравнения использовали смесь: 1,6 мл 0,2 М ацетатного буфера, 0,2 мл 0,038 М раствора п-нитрофенилфосфата (субстрат), 1 мл 1 М раствора едкого натра и добавленных в самом конце 0,2 мл раствора осадка (из контрольного образца необлученного клубня).

Определение активности кислой фосфатазы

Кислая фосфатаза (фосфомоноэстераза, КФ 3.1.3.2), представляющая собой двухъядерную металлогидролазу (Schenk et al., 2008), гидролизует сложноэфирные связи в моноэфирах ортофосфорной кислоты при оптимуме pH 5,5¹⁰. В ходе этого процесса фосфат высвобождается из фосфатсодержащих субстратов (моноэфиров ортофосфорной кислоты) (Рисунок 3). Кислая фосфатаза растений имеет М. м. около 110 кДа (Schenk et al., 2008).

Седьмым этапом работы было определение активности кислой фосфатазы в полученных белковых фракциях спектрофотометрически по известной методике¹¹. Задачей данного этапа являлось выявление активности кислой фосфатазы как показателя состояния метаболизма клеток картофеля, а также анализ динамики её изменения в зависимости от дозы облучения.

Оптическую плотность образцов из необлученных клубней картофеля измеряли при длине волны 405 нм относительно раствора сравнения. По полученным данным построили калибровочную кри-

Рисунок 3

Схема дефосфорилирования фосфатсодержащего субстрата под действием кислой фосфатазы

Figure 3

Phosphatic Substrate Dephosphorylation Scheme Under the Action of Acid Phosphatase



вую (Рисунок 4), по которой определяли активность кислой фосфатазы с пересчетом.

Гидролазную активность (ГА) раствора фермента рассчитывали по формуле (2) в Е/мл:¹²

$$ГА = \frac{Д \cdot 3}{0,2 \cdot МЭ \cdot c \cdot t} \cdot \frac{Е}{мл}, \quad (2)$$

где Д — оптическая плотность при длине волны 405 нм;

3 — объем инкубационной среды, мл;

0,2 — объем раствора фермента, мл;

МЭ — молярный коэффициент экстинкции п-нитрофенола, рассчитанный по калибровочной кривой, мкмоль/мл;

c — концентрация белка в 1 мл раствора фермента, мг/мл;

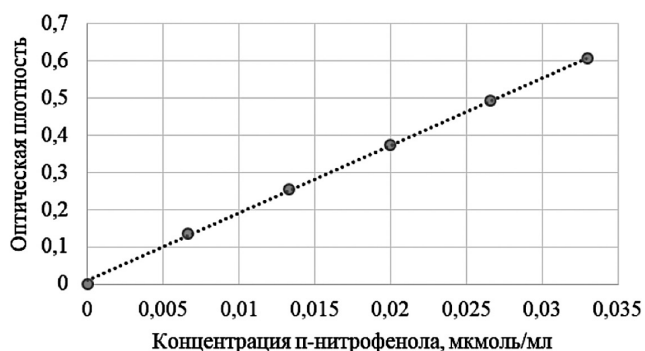
t — время инкубации, t = 15 минут.

Рисунок 4

Калибровочная кривая зависимости оптической плотности от концентрации п-нитрофенола

Figure 4

The Calibration Curve of Optical Density Dependence on p-Nitrophenol Concentration



Подготовка образцов к определению активности каталазы

Восьмым этапом работы была подготовка образцов к определению активности каталазы. Задачей данного этапа являлось выделение каталазы из клубней картофеля и изучение её активности в реакции разложения перекиси водорода. Экспериментальные и контрольные клубни картофеля очищали от кожуры, по отдельности натерли на мелкой пластмассовой терке до получения однородной кашицы. Сок, выделившийся при измельчении, отделяли и использовали для определения pH. Далее брали навески кашицы-пюре из клубней картофеля массой 3 г и переносили их в химические стаканы на 100 мл согласно дозам. В каждый стакан с пюре при непрерывном перемешивании медленно вносили по 50 мл дистиллированной воды и постепенно добавляли порциями порошок CaCO₃ для снижения кислотности смеси (подъем pH с 6,2–6,4 до 6,8–7). Наблюдали выделение пузырьков газа (CO₂). Полученные суспензии перенесли в стаканы и довели объем смеси дистиллированной водой до 100 мл. Через 10 мин растворы отфильтровали через фильтровальную бумагу (красная лента).

Для получения контрольных образцов из каждого фильтрата отобрали пробу по 20 мл и перенесли в предварительно пронумерованные колбы, которые поместили в кипящую водяную баню на 1 мин для инактивации фермента, а затем охладили до комнатной температуры. После этого в каждый стакан с фильтратом внесли по 20 мл дистиллированной воды и по 3 мл 1% раствора перекиси водорода, смесь тщательно перемешали и выдерживали

¹² Шмелева, В. Г. (1997). *Методы определения активности ферментов. Методические указания* (с. 29–33). Санкт-Петербург: СПбГТИ (ТУ).

при комнатной температуре 30 минут. По завершении выдержки в каждую пробу добавили по 5 мл 10% раствора серной кислоты для заключительной инактивации фермента.

Величину активности каталазы рассчитывали по следующей формуле (3):

$$X = \frac{(a - b) \cdot T \cdot 50 \cdot 100}{m \cdot 20 \cdot 30}, \quad (3)$$

где X — активность каталазы, Е/г;

$(a - b)$ — разница между объемами контрольной и опытной проб, использованных для титрования, мл;

T — титр 0,05 М раствора KMnO_4 , использованного для титрования, $T = 0,00316$ г/мл;

50 — коэффициент пересчета на мкмоль H_2O_2 ;

100 — объем приготовленного отфильтрованного раствора, полученного из экстракта картофеля, мл;

m — масса анализируемого образца, $m = 3$ г;

20 — объем фильтрата, полученного из экстракта картофеля и использованного для анализа, мл;

30 — время инкубации, мин.

Определение активности каталазы в клубнях картофеля

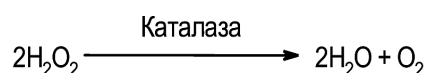
Каталаза (КФ 1.11.1.6) представляет собой хромопротеин с M_r около 240 кДа (Костерина, 2016). Биологическая роль каталазы заключается в расщеплении перекиси водорода (Рисунок 5), которая образуется в ходе физиологических окислительно-восстановительных процессов в клетках организма и является токсичной для клеток и тканей¹⁵. Расщепление перекиси водорода происходит по схеме:

Рисунок 5

Схема реакции расщепления пероксида водорода под действием каталазы

Figure 5

The Scheme of the Hydrogen Peroxide Decomposition Reaction under the Action of Catalase



Девятым этапом работы было определение активности каталазы титриметрическим методом (Ко-

стерина, 2016). Задачей данного этапа являлось выявление активности каталазы как адаптивного ответа клеток клубней картофеля на облучение и состояния метаболизма, а также анализ динамики изменения ферментативной активности в зависимости от дозы облучения. Определение велось в трех параллелях.

В каждой пробе избыток перекиси водорода оттитровывали 0,02 М водным раствором перманганата калия до образования розовой окраски титруемого раствора, не исчезающей в течение 1 мин. Величину активности каталазы определяли расчетным путем.

Анализ данных

В ходе анализа полученных данных устанавливали влияние величины дозы облучения клубней картофеля на их свойства: содержание общего белка, ферментативную активность кислой фосфатазы и каталазы. С этой целью проводили корреляционный анализ, который оказался подходящим способом для обработки данных, полученных в ходе работы. Для анализа был выбран коэффициент корреляции Спирмена (ρ), так как измерялись количественные данные и во всех экспериментах наблюдался нелинейный характер связи между дозой облучения и остальными параметрами. Уровень значимости коэффициента корреляции был принят $p \leq 0,05$ (доверительная вероятность $P = 0,95$). Для определения доли дисперсии зависимой переменной (исследуемые параметры), которая обусловлена влиянием фактора воздействия (доза облучения), был дополнительно рассчитан коэффициент детерминации R (ρ^2) (Баврина & Борисов, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В разделе представлены количественные результаты воздействия ионизирующего излучения в дозах 50–150 Гр на структурные и биохимические показатели клубней картофеля через одну неделю после обработки. Рассмотрены изменения твердости тканей, масс осадков белковых фракций, общего содержания белка, а также активности ферментов кислой фосфатазы и каталазы.

¹⁵ Шлейкин, А. Г., Скворцова, Н. Н., & Бландов, Н. Н. (2019). *Прикладная энзимология: Учебное пособие* (с. 98–99). Санкт-Петербург: Университет ИТМО.

Твердость клубней

С ростом дозы облучения наблюдалось последовательное увеличение твердости клубней (Таблица 2; Рисунок 6). При дозе 150 Гр твердость составила $19,5 \pm 0,1$ кг/см², что на 34% превышает значение контрольной группы ($14,5 \pm 0,1$ кг/см²). Зафиксирована высокая положительная корреляция между дозой и твердостью: $\rho = 0,750$; $R^2 = 0,562$; $p \leq 0,05$.

Таблица 2

Результаты определения твердости клубней картофеля

Table 2

Results of the Potato Tuber Hardness Determination

Показатели	Доза облучения, Гр			
	0	50	100	150
Твердость, кг/см ²	$14,5 \pm 0,1$	$16,9 \pm 0,1$	$17,0 \pm 0,1$	$19,5 \pm 0,1$

Рисунок 6

Зависимость твердости клубней картофеля от поглощенной дозы

Figure 6

Dependence of the Potato Tuber Hardness on the Absorbed Dose

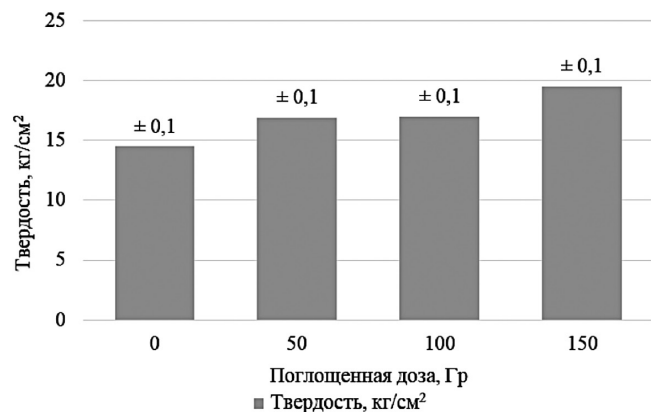


Таблица 3

Масса осадка

Table 3

Mass of the Precipitate

Доза, Гр	Средняя масса осадка, в пересчете на 100 г клубня, г			Суммарно (среднее), г
	Содержание сульфата аммония, %			
	30	60	90	
0	$0,083 \pm 0,002$	$0,359 \pm 0,012$	$0,906 \pm 0,009$	$1,347 \pm 0,023$
50	$2,595 \pm 0,014$	$0,635 \pm 0,007$	$1,181 \pm 0,007$	$4,410 \pm 0,028$
100	$4,752 \pm 0,027$	$0,856 \pm 0,048$	$1,336 \pm 0,015$	$6,943 \pm 0,090$
150	$8,866 \pm 0,009$	$1,076 \pm 0,009$	$1,936 \pm 0,024$	$11,878 \pm 0,042$

Масса белковых осадков

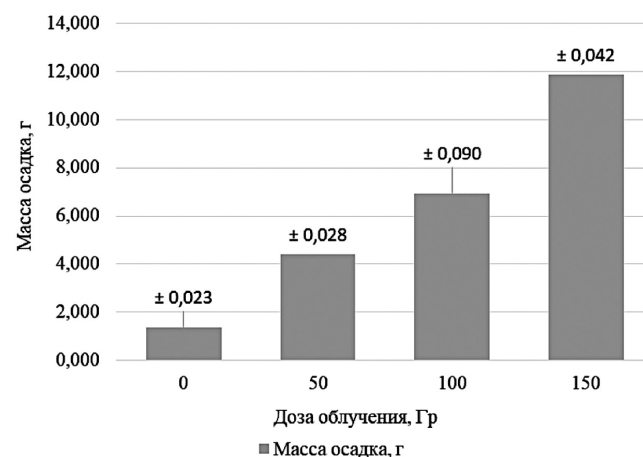
Облучение картофеля повлияло как на массу, так и на характер высаливания белков (Таблица 3; Рисунок 7). Если в контрольных образцах максимальная масса осадка выпадала при 90% насыщении раствора сульфатом аммония, то в облученных образцах — уже при 30%. При дозе 150 Гр общая масса осадков составила $11,878 \pm 0,042$ г/100 г клубней против $1,347 \pm 0,023$ г в контроле (увеличение в 8,8 раз; $\rho = 0,594$; $R^2 = 0,353$).

Рисунок 7

Зависимость массы высаленного осадка от поглощенной дозы

Figure 7

Salted Out Precipitate Mass Dependence on the Absorbed Dose



Содержание общего белка

Содержание общего белка в белковых фракциях увеличивалось пропорционально дозе облучения (Таблица 4; Рисунок 8). При 150 Гр оно достигло $1,99 \pm 0,06$ мг/мл по сравнению с $0,30 \pm 0,02$ мг/мл в контрольной группе (увеличение в 6,6 раз). Установлена сильная положительная корреляция ($\rho = 0,776$; $R^2 = 0,603$; $p \leq 0,05$).

Активность кислой фосфатазы

Активность кислой фосфатазы возрастала при увеличении дозы до 100 Гр, достигая максимума $(4,66 \pm 0,32) \times 10^{-2}$ Е/мг (Таблица 5; Рисунок 9), что в 2,8 раза превышает контроль $((2,63 \pm 0,12) \times 10^{-2}$ Е/мг). При дальнейшем повышении дозы до 150 Гр активность несколько сни-

Рисунок 8

Зависимость содержания общего белка от поглощенной дозы

Figure 8

Dependence of the Total Protein Content on the Absorbed Dose

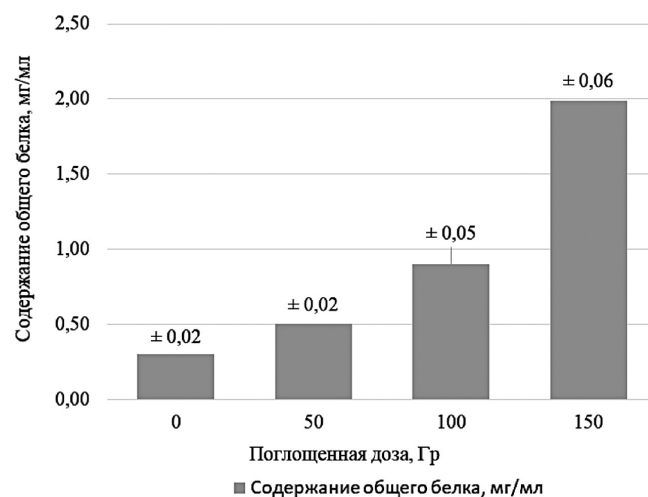


Таблица 4

Содержание общего белка

Table 4

Total Protein Content

Доза, Гр	Среднее содержание общего белка (в пересчете на 100 г клубней картофеля), мг/мл				Среднее значение содержания общего белка, мг/мл
	Содержание сульфата аммония, %				
	0	30	60	90	
0	$0,63 \pm 0,01$	$0,24 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,02$
50	$0,67 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$
100	$0,70 \pm 0,04$	$0,73 \pm 0,02$	$1,67 \pm 0,08$	$0,50 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,05$
150	$0,91 \pm 0,08$	$0,84 \pm 0,03$	$4,54 \pm 0,06$	$1,67 \pm 0,08$	$1,99 \pm 0,06$

Таблица 5

Активность кислой фосфатазы

Table 5

Acid Phosphatase Activity

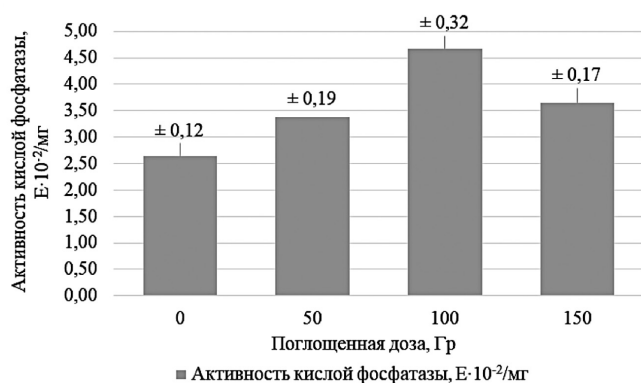
Доза, Гр	Средняя активность кислой фосфатазы (в пересчете на 100 г клубней картофеля), $E \cdot 10^{-2}$ /мг				Среднее значение активности, $E \cdot 10^{-2}$ /мг
	Содержание сульфата аммония, %				
	0	30	60	90	
0	$2,52 \pm 0,02$	$3,10 \pm 0,17$	$2,57 \pm 0,19$	$2,35 \pm 0,10$	$2,63 \pm 0,12$
50	$2,95 \pm 0,13$	$4,60 \pm 0,30$	$3,01 \pm 0,23$	$2,94 \pm 0,09$	$3,38 \pm 0,19$
100	$3,11 \pm 0,22$	$8,61 \pm 0,54$	$3,69 \pm 0,30$	$3,24 \pm 0,22$	$4,66 \pm 0,32$
150	$2,89 \pm 0,27$	$5,08 \pm 0,05$	$3,37 \pm 0,28$	$3,22 \pm 0,07$	$3,64 \pm 0,17$

Рисунок 9

Зависимость активности кислой фосфатазы от поглощенной дозы

Figure 9

Dependence of the Acid Phosphatase Activity on the Absorbed Dose



жалась, оставаясь выше контрольных значений ($(3,64 \pm 0,17) \times 10^{-2}$ Е/мг; превышение на 64%). Зафиксирована средняя положительная корреляция ($\rho = 0,576$; $R^2 = 0,332$).

Активность каталазы

Активность каталазы демонстрировала стабильный рост по мере увеличения дозы (Таблица 6; Рисунок 10). При дозе 150 Гр она составила $(87,78 \pm 8,78) \times 10^{-4}$ Е/г, что в 2,14 раза превышает контрольное значение ($(40,96 \pm 5,07) \times 10^{-4}$ Е/г). Установлена сильная положительная корреляция: $\rho = 0,800$; $R^2 = 0,641$; $p \leq 0,05$.

Все проанализированные параметры показали дозозависимые изменения в пределах 50–150 Гр, что указывает на комплексное влияние ионизирующего облучения на метаболизм и структуру картофельных клубней.

Таблица 6

Результаты расчетов активности каталазы

Table 6

Results of the Catalase Activity Calculations

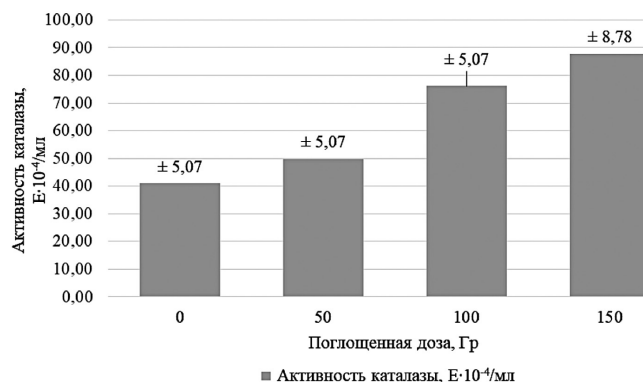
Доза облучения, Гр	0	50	100	150
Активность каталазы, $X \cdot 10^{-4}$, Е/г	40,96 ± 5,07	49,74 ± 5,07	76,07 ± 5,07	87,78 ± 8,78

Рисунок 10

Зависимость активности каталазы от дозы облучения

Figure 10

Dependence of the Catalase Activity on the Absorbed Dose



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании показано, что однократное облучение клубней картофеля тормозным излучением в диапазоне 50–150 Гр через 7 дней после сбора вызывает дозозависимые изменения сразу нескольких групп показателей, характеризующиеся согласованн. Зафиксировано увеличение твердости тканей (до +34% при 150 Гр по сравнению с контролем), рост массы белковых осадков (максимум при 150 Гр, превышающий контроль в 8,8 раза), увеличение общего содержания белка (в 6,6 раза при 150 Гр) и усиление активности кислой фосфатазы (до 2,8-кратного повышения при 100 Гр) и каталазы (до 2,14-кратного повышения при 150 Гр). Таким образом, низкодозовое облучение в интервале, рекомендованном МАГАТЭ для пищевых продуктов, вызывает у свежих клубней картофеля комплексную структурно-метаболическую перестройку, характер которой вписывается в рамки радиационного гормезиса.

Структурные изменения и их сопоставление с данными по твердости и хранимости

Увеличение твердости клубней при дозах 100–150 Гр соответствует результатам, ранее полученным для картофеля в условиях γ -облучения. В частности, Sarkar & Mahato (2020) показали рост твердости и прочности на сдвиг у клубней сорта Куфри-Джиоти при дозе 100 Гр (γ -излучение, ^{60}Co) после 2 и 4 недель хранения, тогда как при 200 Гр эффект ослабевал и возрастала склонность к гниению и потемнению кожуры. Dhali et al. (2017) также зафиксировали увеличение твердости и прочности на сдвиг при 150 Гр и выраженное ухудшение состояния клубней (гниение, потемнение, черные пятна) при 500 Гр. Наши данные в целом согласуются с тем, что умеренные дозы (100–150 Гр) повышают механическую устойчивость клубней, однако важным отличием является то, что аналогичный эффект выявлен уже на 7-й день после обработки и на свежесобранных клубнях. Этот результат указывает на то, что структурная перестройка запускается на ранних этапах и затем может поддерживаться в ходе хранения.

Полученные нами результаты косвенно укладываются в представление об ускоренном старении и уплотнении тканей под действием ионизирующего излучения, о чём ещё в ранних работах упоминали Рубин & Метлицкий (1959). В то же время данные по другим видам растительного сырья показывают, что временной профиль изменения твердости может отличаться. Так, Sharma et al. (2021) при γ -облучении чеснока дозами 0,5–2,5 Гр наблюдали более низкую твердость по сравнению с контролем в первую неделю, но начиная со второй недели обработанные образцы становились более жесткими, после чего твердость постепенно снижалась. На этом фоне наш результат для картофеля через 7 дней, уже без начальной фазы «размягчения», подчеркивает видовую и дозозависимую специфику реакции.

Работы, посвященные сохранности картофеля, демонстрируют, что дозы порядка 100–150 Гр эффективно подавляют гниение и биопоражения при краткосрочном хранении. Soares et al. (2018) показали, что γ -облучение дозами 100 и 150 Гр предотвращает гниение клубней сорта Агата в течение 35 дней, тогда как Liu et al. (2024) сообщили о сохранении картофеля из Наньнина при дозах

200–1000 Гр без биопоражения в течение 20 дней, а при 1000 Гр — до 50 дней без плесени и значимой потери массы. В совокупности с нашими данными это позволяет предположить, что ранний рост твердости может быть одним из структурных компонентов, способствующих повышению устойчивости клубней к порче, хотя прямая связь между измеренной твердостью и фактическими потерями при хранении в данном исследовании не оценивалась.

Белковый профиль и общее содержание белка

Наиболее выраженные отличия наших результатов от ряда опубликованных данных касаются общего содержания белка. В настоящей работе уже через 7 дней после облучения обнаружено монотонное увеличение общей концентрации белка с дозой: при 150 Гр показатель оказался в 6,6 раза выше контроля. Это контрастирует с результатами Soares et al. (2018), которые при γ -облучении картофеля дозами до 150 Гр после 35 дней хранения фиксировали уменьшение общего белка, а повышение наблюдали только при существенно более высокой дозе 2 кГр. Сходное снижение общего белка при умеренных или длительно действующих дозах описано в работе Мальцева и соавт. (2022), где при 50 Гр (γ -излучение) после хранения отмечалось падение содержания белка, а также у Kumar et al. (2024), показавших уменьшение общего белка при облучении UV-C (106 Гр) в динамике 90–240 дней.

Наличие как положительных, так и отрицательных сдвигов содержания белка под действием излучения неоднократно демонстрировалось и на других растениях. Vyšniauskienė & Rancėlienė (2014) показали, что в листьях различных сортов картофеля под действием UV-B облучения общее содержание белка может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от сорта. Nithia et al. (2005) при UV-B воздействии отмечали повышение содержания белка в редисе на фоне снижения у моркови на протяжении всего эксперимента. Aly et al. (2023) при γ -облучении красного редиса выявили рост общего белка при дозах до 40 Гр с последующим снижением при 80 Гр.

Таким образом, наши данные о равномерном увеличении общего белка в диапазоне 50–150 Гр после недели хранения добавляют к существующей кар-

тине ещё один тип дозо- и временной зависимости. В отличие от работ, в которых оценка проводилась спустя месяцы хранения (Soares et al., 2018; Мальцев и соавт., 2022; Kumar et al., 2024), мы зафиксировали ранний адаптивный ответ, что позволяет интерпретировать увеличение белка в первую очередь как проявление стресс-индуцированной активации синтеза и/или накопления белковых компонентов, предшествующее возможной последующей деградации при длительном хранении.

Изменение массы и профиля высаливания белков также свидетельствует о качественной перестройке белкового пула. Суммарная масса осадков при 150 Гр превышала контроль в 8,8 раза, а при 150 Гр общее количество белка достигало максимума, при этом максимум выпадающей фракции смещался из зоны 90 % насыщения сульфатом аммония (контроль) к 30 % в облученных образцах. В отличие от работ Sarkar & Mahato (2020), Etemadinasab et al. (2020), Dhali et al. (2017) и Zhang et al. (2017), где внимание уделялось удельному весу, содержанию растворимых белков и их растворимости, в нашем исследовании показано, что ионизирующее облучение существенно меняет именно характер распределения белков по солерастворимым фракциям. Это свидетельствует не только о количественных сдвигах, но и о серьезной реорганизации белкового состава, что ранее для картофеля в контексте доз до 150 Гр не описывалось.

При сопоставлении с результатами Musin et al. (2022), сообщивших о снижении содержания углеводов, липидов, кето-каротина и аминокислот в картофеле при очень высоких дозах (30 кГр, γ -излучение), наши данные укладываются в общую концепцию дозозависимого перехода от стимулирующих эффектов к повреждающим. На низком уровне доз (50–150 Гр) наблюдается накопление белка, тогда как при сверхвысоких дозах преобладают процессы деградации и истощения метаболитов.

Ферментативная активность антиоксидантной системы: каталаза

Полученный в нашей работе монотонный рост активности каталазы с увеличением дозы облучения, достигающий 2,14-кратного превышения контроля при 150 Гр, частично согласуется с ранее описанными данными для картофеля и других растений. Afify

et al. (2012) показали, что при γ -облучении клубней сорта Бриллиант дозами 10–200 Гр активность каталазы через 3 недели после обработки превышала контроль для доз 100 и 200 Гр, причем наблюдалась общая тенденция к росту активности с увеличением дозы (с отдельными исключениями, такими как 20 Гр). Peng et al. (2025) продемонстрировали усиление активности каталазы в облученном картофеле при дозах 300–500 Гр после хранения более 100 дней. Таким образом, наши результаты подтверждают, что каталаза является одним из наиболее стабильных и чувствительных ферментативных индикаторов радиационного воздействия на картофель, причем в нашем случае значимое усиление активности фиксируется уже через 7 дней и в диапазоне сравнительно низких доз (50–150 Гр).

Вместе с тем данные Ipatova et al. (2025), показавших снижение активности каталазы при облучении растворов фермента электронным пучком в диапазоне 100–1000 Гр, подчеркивают важность матриксного эффекта. В цельном клубне фермент защищен клеточными структурами, что, вероятно, позволяет наблюдать преимущественно стимулирующее влияние доз до 150 Гр, тогда как в системе очищенных ферментов доминирует прямое повреждающее действие излучения. Аналогичные по направлению эффекты усиления активности каталазы при умеренных дозах описаны и для других видов: Veuyaz (2016) обнаружил увеличение активности каталазы в горошке посевном при дозе 100 Гр (γ -излучение) через 2 недели, а Zhang et al. (2016) — рост активности каталазы у Резуховидки Таля (*Arabidopsis thaliana*) при 50 Гр (γ -излучение, ^{60}Co). Это позволяет рассматривать наш результат как часть более широкой закономерности радиационно-индуцированной активации антиоксидантной защиты растений при умеренных дозах.

С точки зрения механизмов, полученные данные хорошо укладываются в представления Jomova et al. (2023), согласно которым ионизирующее излучение индуцирует образование активных форм кислорода (ROS), требующих усиленной работы антиоксидантной системы. С учетом того, что каталаза является ключевым ферментом детоксикации пероксида водорода, рост её активности при увеличении дозы в диапазоне 50–150 Гр можно интерпретировать как количественно измеряемый маркер окислительного стресса, находящегося в пределах адаптивного, а не повреждающего диапазона.

Ферменты обмена: кислая фосфатаза

Особый интерес представляет выявленный в настоящем исследовании дозозависимый профиль активности кислой фосфатазы. В отличие от каталазы, активность кислой фосфатазы достигала максимума при 100 Гр (увеличение в 2,8 раза относительно контроля) и снижалась при 150 Гр, оставаясь, однако, выше исходного уровня. Такой «колоколообразный» характер дозо-ответной кривой указывает на наличие оптимального диапазона доз, в котором активация метаболизма наиболее выражена, и на формирование начальных признаков ингибирования при приближении к верхней границе исследованного интервала.

В доступной литературе, посвященной облучению картофеля и других корнеплодов, реакция кислой фосфатазы практически не описана. Mohamed et al. (2021) и Peng et al. (2025) фокусировались на ферментах антиоксидантной системы (POD, PPO, SOD, CAT), а Musin et al. (2022) анализировали изменение уровней низкомолекулярных метаболитов (углеводы, липиды, кето-каротин, аминокислоты), не затрагивая фосфатазы. На этом фоне наши данные представляют собой, по сути, первое количественное описание реакции кислой фосфатазы клубней картофеля на ионизирующее облучение в диапазоне доз до 150 Гр без хранения.

Тем не менее аналогичный по форме «пиковый» характер ферментативного ответа описан для других моделей. Nakagawa et al. (2004) показали, что активность протеинкиназы в дендритных клетках под действием UV-B (0–1600 Дж/м²) возрастает до определенного порога, после чего снижается. Li et al. (2018) при γ -облучении капустной моли (*Plutella xylostella*) дозой 200 Гр (⁶⁰Co) с оценкой через 24–72 ч наблюдали скачкообразное повышение активности фермента с последующим падением. Эти данные, хотя и получены на других объектах, подтверждают, что для ряда ферментативных систем характерна типичная горметическая кривая: стимуляция при умеренных дозах и/или ранних сроках, сменяющаяся ингибированием при усилении стресса.

С позиций метаболизма клетки, интерпретация наших результатов согласуется с подходом Zaman et al. (2023), рассматривающих кислую фосфатазу как маркер перестройки энергетического и фосфатно-

го обмена. Рост её активности при 50–100 Гр может отражать усиленную мобилизацию неорганического фосфата для поддержания стресс-адаптивных процессов, в то время как снижение при 150 Гр, вероятно, указывает на достижение порога, после которого повреждающее действие излучения начинает преобладать над стимулирующим.

Радиобиологическая интерпретация: радиационный гормезис и позиционирование результата

Совокупность изменений твердости, общего содержания белка, массы белковых осадков и активности каталазы и кислой фосфатазы демонстрируют классическую картину радиационного гормезиса. В диапазоне доз 50–100 Гр преобладают адаптивные эффекты: усиление антиоксидантной защиты, мобилизация фосфатного обмена, накопление белка и повышение механической устойчивости. При 150 Гр способность системы к адаптации сохраняется (рост твердости, каталазы, общего белка), но для отдельных показателей (кислая фосфатаза) проявляются первые признаки ограничения ответа. Это соответствует трактовке Kim (2025) и Godínez-Mendoza et al. (2023), рассматривающих радиационный гормезис как благоприятную реакцию растений на умеренные стрессоры. При превышении оптимального диапазона доз развивается угнетение.

Важно подчеркнуть, что выбранный нами диапазон доз (50–150 Гр) соответствует уровню, рекомендуемому международными регуляторными структурами (IAEA, EFSA, FAO) для обработки пищевых продуктов с целью ингибирования прорастания и снижения микробной обсемененности. В этом контексте наши результаты дополняют имеющиеся исследования по хранимости (Soares et al., 2018; Liu et al., 2024) и качеству (Sarkar & Mahato, 2020; Dhali et al., 2017), предлагая набор биохимических и структурных маркеров, чувствительных к дозе уже на ранних сроках после обработки. Наряду с методами быстрой идентификации облученных продуктов на основе оптических «отпечатков пальцев» (Shik et al., 2023), комплекс показателей «твердость — общий белок — профиль высаливания — активность каталазы и кислой фосфатазы» может рассматриваться как перспективный инструмент для тонкой настройки режимов радиационной обработки клубней картофеля.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Во-первых, анализ проводился в одной временной точке (7-й день после облучения), что не позволяет проследить временную динамику выявленных эффектов и их связь с фактическими показателями хранимости (прорастание, гниение, потеря массы). Во-вторых, исследован один сорт (Ред Скарлетт), тогда как данные Vyšniauskienė & Raščelienė (2014) и других авторов указывают на существенную сортовую вариабельность реакций. В-третьих, применен интегральный подход к белковому и ферментативному анализу без разделения по тканям (кожура, мякоть, проводящая система) и без идентификации отдельных белков и изоформ ферментов.

Дальнейшие направления исследований

С учетом этих ограничений дальнейшие исследования целесообразно направить на (1) построение временных рядов изменений структурных и ферментативных показателей в процессе хранения; (2) сопоставление нескольких сортов картофеля с различной устойчивостью к хранению; (3) углубленный протеомный и ферментный анализ для идентификации конкретных белков и путей, вовлеченных в радиационно-индуцированную адаптацию; (4) установление связи между ранними биохимическими маркерами (каталаза, кислая фосфатаза, белковый профиль) и конечными технологическими параметрами (прорастание, потери массы, развитие гнилей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что однократное облучение клубней картофеля сорта Ред Скарлетт тормозным излучением (10 МэВ) в дозах 50–150 Гр, соответствующих рекомендациям МАГАТЭ для пищевых продуктов, приводит уже через 7 дней после обработки к выраженной дозозависимой перестройке как структурных, так и метаболических характеристик. Установлено, что при 150 Гр твердость клубней возрастает на 34 % по сравнению с контролем, масса высаленных белков достигает максимума, превышая контроль в 8,8 раза, а общее содержание белка увеличивается в 6,6 раза. Активность кислой фосфатазы демонстрирует типичный

горметический профиль с максимумом при 100 Гр (2,8-кратное превышение контроля) и снижением при 150 Гр, тогда как активность каталазы монотонно возрастает с дозой и при 150 Гр в 2,14 раза превышает исходный уровень.

Сопоставление с опубликованными данными по картофелю и другим культурным растениям показывает, что выявленные изменения твердости и ферментативной активности согласуются с представлениями о радиационно-индуцированной активации антиоксидантной системы и о дозозависимом переходе от стимулирующих эффектов к повреждающим. В то же время обнаруженный устойчивый рост общего белка и существенная перестройка профиля высаливания белков на ранних сроках после обработки расширяют имеющиеся представления о белковом ответе клубней картофеля на низко- и умеренно-дозовое облучение. Впервые для картофеля количественно описана реакция кислой фосфатазы в диапазоне доз до 150 Гр, что позволяет рассматривать данный фермент, наряду с каталазой, как информативный биомаркер метаболического ответа на технологически значимые дозы ионизирующего излучения.

Практическая значимость работы заключается в том, что комбинация показателей «твердость — общий белок — профиль высаливания — активность каталазы и кислой фосфатазы» может быть использована для оценки чувствительности клубней к радиационной обработке и для оптимизации режимов облучения, направленных на снижение потерь при хранении. Дальнейшие исследования, включающие временную динамику, сортовое сравнение и расширенный спектр молекулярных маркеров, необходимы для перевода полученных фундаментальных результатов в конкретные технологические регламенты хранения и переработки картофеля.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Тимур Зарифович Минбагисов: формальный анализ; проведение исследования; администрирование данных; создание черновика; создание рукописи и её редактирование; визуализация.

Ирина Станиславовна Селезнева: концептуализация; методология; ресурсы; верификация; администрирование данных; создание черновика; создание рукописи и её редактирование; руководство исследованием.

Максим Алексеевич Безматерных: ресурсы; верификация; создание рукописи и её редактирование; визуализация.

Анна Александровна Баранова: ресурсы; проведение исследования.

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Timur Z. Minbagisov: formal analysis; investigation; data curation; writing — original draft preparation; writing — review & editing, vizualization.

Irina S. Selezneva: conceptualization, methodology; resources; validation; writing — original draft preparation; writing — review & editing, supervision.

Maxim A. Bezmaternykh: resources; validation; writing — review & editing; vizualization.

Anna A. Baranova: resources; investigation.

ЛИТЕРАТУРА

- Алимов, А. С., Близнюк, У. А., Борщеговская, П. Ю., Варзарь, С. М., Еланский, С. Н., Ишханов, Б. С., Литвинов, Ю. Ю., Матвейчук, И. В., Николаева, А. А., Розанов, В. В., Студеникин, Ф. Р., Черняев, А. П., Шведун, В. И., & Юров, Д. С. (2017). Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов. *Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая*, 81(6), 819–823. <https://doi.org/10.7868/S0367676517060035>
- Баврина, А. П., & Борисов, И. Б. (2021). Современные правила применения корреляционного анализа. *Медицинский альманах*, (3), 70–79.
- Ким, В. В., Галактионова, Е. А., & Антоневич, К. В. (2020). Продовольственные потери и пищевые отходы на потребительском рынке РФ. *Международный сельскохозяйственный журнал*, 63(4). <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10191>
- Костерина, В. В. (2016). Каталаза как представитель биологических катализаторов и ее активность в разных сортах картофеля. *Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области*, 1(4), 30–33.
- Мальцев, С. В., Андрианов, С. В., Князева, Е. В., & Тимошина, Н. А. (2022). Эффективность гамма-облучения при хранении продовольственного и предназначенного для переработки картофеля. *Картофель и овощи*, 6, 34–37. <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.90.62.006>
- Отмахова, Ю. С., Девяткин, Д. А., Крескин, А. Д., & Усенко, Н. И. (2020). Анализ научного и патентного ландшафтов современных радиационных технологий облучения пищевых продуктов и сырья. *Информационное общество*, 1, 57–70.
- Панов, А. В., & Козьмин, Г. В. (2025). Создание международной системы обучения и профессиональной подготовки специалистов в области агроядерных технологий. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*, 1, 175–188. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.13>
- Рубин, Б. А., & Метлицкий, Л. В. (1959). Изучение действия ионизирующих излучений на обмен веществ клубней картофеля в связи с проблемой его круглогодичного хранения. *Получение и применение изотопов* (с. 374–386). Издательство Главного управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР.

- Affify, A. E. M. R., El-Beltagi, H. S., Aly, A. A., & El-Ansary, A. E. (2012). Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation as biomarker compounds for potato tuber stored by gamma radiation. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(3), S1548–S1555. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(12\)60451-1](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(12)60451-1)
- Affify, A. E. M. R., El-Beltagi, H. S., Aly, A. A., & El-Ansary, A. E. (2012). The impact of γ -irradiation, essential oils and iodine on biochemical components and metabolism of potato tubers during storage. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 40(2), 129. <https://doi.org/10.15835/nbha4028268>
- Akhila, P. P., Sunooj, K. V., Aaliya, B., Navaf, M., Sudheesh, C., Sabu, S., Sasidharan, A., Mir, S. A., George, J., & Khaneghah, A. M. (2021). Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 114(4), 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.013>
- Aly, A. A., Maraei, R. W., Sharafeldin, R. G., & Safwat, G. (2023). Yield traits of red radish seeds obtained from plants produced from γ -irradiated seeds and their oil characteristics. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 2089–2099. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00859-8>
- Beyaz, R. (2019). Impact of gamma irradiation pretreatment on the growth of common vetch (*Vicia sativa* L.) seedlings grown under salt and drought stress. *International Journal of Radiation Biology*, 96(2), 257–266. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1688885>
- Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M. S., Sinhmar, R., Rathi, N., & Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables — A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 372–385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002>
- Dhali, K., Basak, N., & Bhattacharya, S. (2017). Effect of gamma irradiation on potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers influencing post-harvest quality parameters. *Journal of Crop and Weed*, 13(2), 129–135.
- Emmadinasab, H., Zahedi, M., Ramin, A. A., Kadivar, M., & Shirmardi, S. P. (2020). Effects of electron beam irradiation on physicochemical, nutritional properties and storage life of five potato cultivars. *Radiation Physics and Chemistry*, 177(5), 109093. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.10909>
- Godínez-Mendoza, P. L., Rico-Chávez, A. K., Ferrusquía-Jimenez, N. I., Carbajal-Valenzuela, I.A., Villagómez-Aranda, A. L., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2023). Plant hormesis: Revising of the concepts of biostimulation, elicitation and their application in a sustainable agricultural production. *Science of the Total Environment*, 894, 164883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164883>
- Ipatova, V., Bliznyuk, U., Borshchegovskaya, P., Chernyaev, A., Toropygina, A., Kim, V., Nikitchenko, A., Kozlov, A., Yurov, D., Beklemishev, M., Rodin, I., & Kozlova, E. (2025). Assessment of catalase inhibition under e-beam irradiation. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4358. <https://doi.org/10.3390/ijms26094358>
- Jomova, K., Raptova, R., Alomar, S. Y., Saleh, H. A., Nepovimova, E., Kamil, K., & Valko, M. (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of Toxicology*, 97, 2499–2574. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03562-9>
- Kiani, D., Borzouei, A., Ramezanpour, S., Soltanloo, H., & Saadati, S. (2022). Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents. *Scientific Reports*, 12(1), 11082. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14949-6>
- Kim, J. H. (2025). Radiation hormesis and reactive oxygen species-mediated stress priming in plants. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 359, 112602. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112602>
- Kumar, S., Bandyopadhyay, N., Saxena, S., Hajare, S. N., More, V., Tripathi, J., Dahia, Y., & Gautam, S. (2024). Differential gene expression in irradiated potato tubers contributed to sprout inhibition and quality retention during a commercial scale storage. *Scientific Reports*, 14(1), 13484. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58949-0>
- Li, X., Luo, L., Karthi, S., Zhang, K., Luo, J., Hu, Q., & Weng, Q. (2018). Effects of 200 Gy ^{60}Co - γ radiation on the regulation of antioxidant enzymes, hsp70 genes, and serum molecules of *Plutella xylostella* (Linnaeus). *Molecules*, 23(5), 1011. <https://doi.org/10.3390/molecules23051011>

- Liu, H., Xiong, Z., Chen, Q., Wang, L., & Wang, C. (2024). Study on the preservation effect of ^{60}Co - γ ray irradiation on potatoes. *Scientific Reports*, 14(1), 21811. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71151-6>
- Mohamed, E. A., Osama, E., Manal, E., Samah, A., Salah, G., Hazem, K. M., Jacek, W., & Nabil, E. (2021). Impact of gamma irradiation pretreatment on biochemical and molecular responses of potato growing under salt stress. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00233-8>
- Musin L., Nigmatullina, L., Laikov, A., Morozov, V., Nizamov, R., Gainullin, R., Vasilevskiy, N., Kamalova, Z., Nefedova, R., & Borisov, D. (2022). Study of the molecular-structural composition of alcoholic extracts of radio-induced potato tubers by mass spectrometry and EPR. *Food Chemistry*, 396(2), 133665. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133665>
- Nakagawa, S., Ohtani, T., Mizuashi, M., Mollah, Z. U., Ito, Y., Tagami, H., & Aiba, S. (2004). P38 mitogen-activated protein kinase mediates dual role of ultraviolet B radiation in induction of maturation and apoptosis of monocyte-derived dendritic cells. *The Journal of Investigative Dermatology*, 123(2), 361–370. <https://doi.org/10.1111/j.0022-202X.2004.23238.x>
- Nithia, S. M. J., Shanthi, N., & Kulandaivelu, G. (2005). Different responses to UV-B enhanced solar radiation in radish and carrot. *Photosynthetica*, 43(2), 307–311. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0051-9>
- Peng, X., Li, Y., Wang, S., Gao, Y., Lei, X., & Ren, Y. (2025). Electron beam irradiation inhibited potato sprouting by regulating the metabolism of membrane lipid peroxidation and antioxidant. *Potato Research*, 68, 391–407. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09722-3>
- Sarkar, P., & Mahato, S. K. (2020). Effect of gamma irradiation on sprout inhibition and physical properties of Kufri Jyoti variety of potato. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(7), 1066–1079. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.907.125>
- Schenk, G., Elliott, T. W., Leung, E., Carrington, L. E., Mitić, N., Gahan, L. R., & Guddat, L. W. (2008). Crystal structures of a purple acid phosphatase, representing different steps of this enzyme's catalytic cycle. *BMC Structural Biology*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1472-6807-8-6>
- Sharma, P., Sharma, S. R., Dhall, R. K., Mittal, T. C., & Kumar, S. (2021). Variation in quality and acceptability of minimally processed garlic in response to γ -irradiation and packaging during refrigerated storage. *Radiation Physics and Chemistry*, 180, 109193. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109193>
- Shik, A.V., Skorobogatov, E.V., Bliznyuk, U.A., Chernyaev, A.P., Avdyukhina, V.M., Borshegovskaya, P.Yu., Zolotov, S.A., Baytler, M.O., Doroshenko, I. A., Podrugina, T. A., & Beklemishev, M. K. (2023). Estimation of doses absorbed by potato tubers under electron beam or X-ray irradiation using an optical fingerprinting strategy. *Food Chemistry*, 414, 135668. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135668>
- Shik, A. V., Sobolev, P. V., Zubritskaya, Y. V., Baytler, M. O., Stepanova, I. A., Chernyaev, A. P., Borshegovskaya, P. Yu., Zolotov, S. A., Doroshenko, I. A., Podrugina, T. A., Bliznyuk, U. A., Rodin, I. A., & Beklemishev, M. K. (2024). Rapid testing of irradiation dose in beef and potatoes by reaction-based optical sensing technique. *Journal of Food Composition and Analysis*, 127, 105946. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105946>
- Soares, I. G. M., Silva, E. B. D., Amaral, A. J., Machado, E. C. L., & Silva, J. M. (2016). Physico-chemical and sensory evaluation of potato (*Solanum tuberosum* L.) after irradiation. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 88(2), 941–950. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620140617>
- Son, N. A., Nguyet, H. N. T., Minh, S. N. T., Dinh, D. L. D., & Trieu, L. N. (2022). Effects of low energy (160 keV) X-ray on microbial inactivation, sprouting inhibition and genetic variation in potato. *Food Bioscience*, 47, 101555. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101555>
- Van Kooij, J., Leveling, H., & Schubert, J. (1981). Food preservation by irradiation. *IAEA Bulletin*, 23(3), 33–36.
- Vyšniauskienė, R., & Rančelienė, V. (2014). Effect of UV-B radiation on growth and antioxidative enzymes activity in Lithuanian potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars. *Zemdirbyste-Agriculture*, 101(1), 51–56. <https://doi.org/10.13080/z-a.2014.101.007>
- Zaman, U., Khan, S. U., Hendi, A. A., Rehman, K. U., Badshah, S., Refat, M. S., Alsuhaibani, A. M., Ullah, K., & Wahab, A. (2023). Kinetic and thermodynamic studies of novel acid phosphatase

- isolated and purified from *Carthamus oxyacantha*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 30–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.025>
- Zhang, D. Q., Mu, T. H., Sun, H. N., Chen, J. W., & Zhang, M. (2017). Comparative study of potato protein concentrates extracted using ammonium sulfate and isoelectric precipitation. *International Journal of Food Properties*, 20(9), 2113–2127. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1230873>
- Zhang, L., Zheng, F., Qi, W., Wang, T., Ma, L., Qiu, Z., & Li, J. (2016). Irradiation with low-dose gamma ray enhances tolerance to heat stress in *Arabidopsis* seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.025>

REFERENCES

- Alimov, A. S., Bliznyuk, U. A., Borshegovskaya, P. U., Varzar, S. M., Elansky, S. N., Ishkhanov, B. S., Litvinov, Y. Y., Matveychuk, I. V., Nikolaeva, A. A., Rozanov, V. V., Studenikin, F. R., Chernyaev, A. P., Shvedunov, V. I., & Yurov, D. S. (2017). Using accelerated electron beams for the radiation processing of foodstuffs and biomaterials. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 81(6), 819–823. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367676517060035>
- Bavrina, A. P., & Borisov, I. B. (2021). Modern rules of the application of correlation analysis. *Medical Almanac*, (3), 70–79. (In Russ.).
- Kim, V. V., Galaktionova, E. A., & Antonevich, K. V. (2020). Food losses and food waste in the consumer market of the Russian Federation. *International Agricultural Journal*, 63(4), 1. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10191>
- Kosterina, V. V. (2016). Catalase is the biological catalyst and its activity in the different sorts of potatoes. *Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of the Chelyabinsk Region*, 1(4), 30–33. (In Russ.).
- Maltsev, S. V., Andrianov, S. V., Knyazeva, E. V., & Timoshina, N. A. (2022). The effectiveness of gamma irradiation during storage of ware potatoes and potatoes intended for processing. *Potato and Vegetables*, 6, 34–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.90.62.006>
- Otmakhova, Y. S., Devyatkin, D. A., Kreskin, A. D., & Usenko, N. I. (2020). Methodology for the scientific and patent landscaping of modern food irradiation technologies. *Information Society*, 1, 57–70. (In Russ.).
- Panov, A. V., & Kozmin, F. V. (2025). Development of an international system of education and professional training of specialists in the field of nuclear technologies for food and agriculture. *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy*, 1, 175–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.13>
- Rubin, B. A., & Metlitsky, L. V. (1959). Application of ionizing radiations to regulating potato and vegetables rest and all-year-round storage. *Production and Application of Isotopes* (pp. 374–386). Publishing house of the Atomic Energy Authority under the Council of Ministers of the USSR. (In Russ.)
- Affify, A. E. M. R., El-Beltagi, H. S., Aly, A. A., & El-Ansary, A. E. (2012). Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation as biomarker compounds for potato tuber stored by gamma radiation. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(3), S1548–S1555. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(12\)60451-1](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(12)60451-1)
- Affify, A. E. M. R., El-Beltagi, H. S., Aly, A. A., & El-Ansary, A. E. (2012). The impact of γ -irradiation, essential oils and iodine on biochemical components and metabolism of potato tubers during storage. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 40(2), 129. <https://doi.org/10.15835/nbha4028268>
- Akhila, P. P., Sunooj, K. V., Aaliya, B., Navaf, M., Sudheesh, C., Sabu, S., Sasidharan, A., Mir, S. A., George, J., & Khaneghah, A. M. (2021). Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 114(4), 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.013>

- Aly, A. A., Maraei, R. W., Sharafeldin, R. G., & Safwat, G. (2023). Yield traits of red radish seeds obtained from plants produced from γ -irradiated seeds and their oil characteristics. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 2089–2099. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00859-8>
- Beyaz, R. (2019). Impact of gamma irradiation pretreatment on the growth of common vetch (*Vicia sativa* L.) seedlings grown under salt and drought stress. *International Journal of Radiation Biology*, 96(2), 257–266. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1688885>
- Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M. S., Sinhmar, R., Rathi, N., & Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables — A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 372–385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002>
- Dhali, K., Basak, N., & Bhattacharya, S. (2017). Effect of gamma irradiation on potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers influencing post-harvest quality parameters. *Journal of Crop and Weed*, 13(2), 129–135.
- Etemadinasab, H., Zahedi, M., Ramin, A. A., Kadivar, M., & Shirmardi, S. P. (2020). Effects of electron beam irradiation on physicochemical, nutritional properties and storage life of five potato cultivars. *Radiation Physics and Chemistry*, 177(5), 109093. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.10909>
- Godínez-Mendoza, P. L., Rico-Chávez, A. K., Ferrusquía-Jimenez, N. I., Carbajal-Valenzuela, I. A., Villagómez-Aranda, A. L., Torres-Pacheco, I., & Guevara-González, R. G. (2023). Plant hormesis: Revising of the concepts of biostimulation, elicitation and their application in a sustainable agricultural production. *Science of the Total Environment*, 894, 164883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164883>
- Ipatova, V., Bliznyuk, U., Borshchegovskaya, P., Chernyaev, A., Toropygina, A., Kim, V., Nikitchenko, A., Kozlov, A., Yurov, D., Beklemishev, M., Rodin, I., & Kozlova, E. (2025). Assessment of catalase inhibition under e-beam irradiation. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(9), 4358. <https://doi.org/10.3390/ijms26094358>
- Jomova, K., Raptova, R., Alomar, S. Y., Saleh, H. A., Nepovimova, E., Kamil, K., & Valko, M. (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: chronic diseases and aging. *Archives of Toxicology*, 97, 2499–2574. <https://doi.org/10.1007/s00204-023-03562-9>
- Kiani, D., Borzouei, A., Ramezanpour, S., Soltanloo, H., & Saadati, S. (2022). Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents. *Scientific Reports*, 12(1), 11082. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14949-6>
- Kim, J. H. (2025). Radiation hormesis and reactive oxygen species-mediated stress priming in plants. *Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology*, 359, 112602. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112602>
- Kumar, S., Bandyopadhyay, N., Saxena, S., Hajare, S. N., More, V., Tripathi, J., Dahia, Y., & Gautam, S. (2024). Differential gene expression in irradiated potato tubers contributed to sprout inhibition and quality retention during a commercial scale storage. *Scientific Reports*, 14(1), 13484. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58949-0>
- Li, X., Luo, L., Karthi, S., Zhang, K., Luo, J., Hu, Q., & Weng, Q. (2018). Effects of 200 Gy ^{60}Co - γ radiation on the regulation of antioxidant enzymes, hsp70 genes, and serum molecules of *Plutella xylostella* (Linnaeus). *Molecules*, 23(5), 1011. <https://doi.org/10.3390/molecules23051011>
- Liu, H., Xiong, Z., Chen, Q., Wang, L., & Wang, C. (2024). Study on the preservation effect of ^{60}Co - γ ray irradiation on potatoes. *Scientific Reports*, 14(1), 21811. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71151-6>
- Mohamed, E. A., Osama, E., Manal, E., Samah, A., Salah, G., Hazem, K. M., Jacek, W., & Nabil, E. (2021). Impact of gamma irradiation pretreatment on biochemical and molecular responses of potato growing under salt stress. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00233-8>
- Musin L., Nigmatullina, L., Laikov, A., Morozov, V., Nizamov, R., Gainullin, R., Vasilevskiy, N., Kamalova, Z., Nefedova, R., & Borisov, D. (2022). Study of the molecular-structural composition

- of alcoholic extracts of radio-induced potato tubers by mass spectrometry and EPR. *Food Chemistry*, 396(2), 133665. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133665>
- Nakagawa, S., Ohtani, T., Mizuashi, M., Mollah, Z. U., Ito, Y., Tagami, H., & Aiba, S. (2004). P38 mitogen-activated protein kinase mediates dual role of ultraviolet B radiation in induction of maturation and apoptosis of monocyte-derived dendritic cells. *The Journal of Investigative Dermatology*, 123(2), 361–370. <https://doi.org/10.1111/j.0022-202X.2004.23238.x>
- Nithia, S. M. J., Shanthi, N., & Kulandaivelu, G. (2005). Different responses to UV-B enhanced solar radiation in radish and carrot. *Photosynthetica*, 43(2), 307–311. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0051-9>
- Peng, X., Li, Y., Wang, S., Gao, Y., Lei, X., & Ren, Y. (2025). Electron beam irradiation inhibited potato sprouting by regulating the metabolism of membrane lipid peroxidation and antioxidant. *Potato Research*, 68, 391–407. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09722-3>
- Sarkar, P., & Mahato, S. K. (2020). Effect of gamma irradiation on sprout inhibition and physical properties of Kufri Jyoti variety of potato. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(7), 1066–1079. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.907.125>
- Schenk, G., Elliott, T. W., Leung, E., Carrington, L. E., Mitić, N., Gahan, L. R., & Guddat, L. W. (2008). Crystal structures of a purple acid phosphatase, representing different steps of this enzyme's catalytic cycle. *BMC Structural Biology*, 8(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1472-6807-8-6>
- Sharma, P., Sharma, S. R., Dhall, R. K., Mittal, T. C., & Kumar, S. (2021). Variation in quality and acceptability of minimally processed garlic in response to γ -irradiation and packaging during refrigerated storage. *Radiation Physics and Chemistry*, 180, 109193. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109193>
- Shik, A. V., Skorobogatov, E. V., Bliznyuk, U. A., Chernyaev, A. P., Avdyukhina, V. M., Borschegovskaya, P. Yu., Zolotov, S. A., Baytler, M. O., Doroshenko, I. A., Podrugina, T. A., & Beklemishev, M. K. (2023). Estimation of doses absorbed by potato tubers under electron beam or X-ray irradiation using an optical fingerprinting strategy. *Food Chemistry*, 414, 135668. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135668>
- Shik, A. V., Sobolev, P. V., Zubritskaya, Y. V., Baytler, M. O., Stepanova, I. A., Chernyaev, A. P., Borschegovskaya, P. Yu., Zolotov, S. A., Doroshenko, I. A., Podrugina, T. A., Bliznyuk, U. A., Rodin, I. A., & Beklemishev, M. K. (2024). Rapid testing of irradiation dose in beef and potatoes by reaction-based optical sensing technique. *Journal of Food Composition and Analysis*, 127, 105946. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105946>
- Soares, I. G. M., Silva, E. B. D., Amaral, A. J., Machado, E. C. L., & Silva, J. M. (2016). Physico-chemical and sensory evaluation of potato (*Solanum tuberosum* L.) after irradiation. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 88(2), 941–950. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620140617>
- Son, N. A., Nguyet, H. N. T., Minh, S. N. T., Dinh, D. L. D., & Trieu, L. N. (2022). Effects of low energy (160 keV) X-ray on microbial inactivation, sprouting inhibition and genetic variation in potato. *Food Bioscience*, 47, 101555. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101555>
- Van Kooij, J., Leveling, H., & Schubert, J. (1981). Food preservation by irradiation. *IAEA Bulletin*, 23(3), 33–36.
- Vyšniauskienė, R., & Račelienė, V. (2014). Effect of UV-B radiation on growth and antioxidative enzymes activity in Lithuanian potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars. *Zemdirbyste-Agriculture*, 101(1), 51–56. <https://doi.org/10.13080/z-a.2014.101.007>
- Zaman, U., Khan, S. U., Hendi, A. A., Rehman, K. U., Badshah, S., Refat, M. S., Alsuhaibani, A. M., Ullah, K., & Wahab, A. (2023). Kinetic and thermodynamic studies of novel acid phosphatase isolated and purified from *Carthamus oxyacantha*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 30–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.025>
- Zhang, D. Q., Mu, T. H., Sun, H. N., Chen, J. W., & Zhang, M. (2017). Comparative study of potato protein concentrates extracted using ammonium sulfate and isoelectric precipitation. *International Journal of Food Properties*, 20(9), 2113–2127. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1230873>
- Zhang, L., Zheng, F., Qi, W., Wang, T., Ma, L., Qiu, Z., & Li, J. (2016). Irradiation with low-dose gamma ray enhances tolerance to heat stress in *Arabidopsis* seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 128, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.02.025>

ОБ АВТОРАХ

Минбагисов Тимур Зарифович, аспирант кафедры технологии органического синтеза Химико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Российская Федерация, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-338X>, Researcher ID: NMK-5874-2025, SPIN-код: 1014-5667, tz-minbagisov@yandex.ru

Селезнева Ирина Станиславовна, доцент кафедры технологии органического синтеза Химико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Российская Федерация, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7039-1874>, Scopus ID: 57193404586, SPIN-код: 4745-3470, i.s.selezneva@urfu.ru

Безматерных Максим Алексеевич, доцент кафедры технологии органического синтеза Химико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Российская Федерация, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3286-9179>, Scopus ID: 6506164812, SPIN-код: 1193-4835, AuthorID: 49433, m.a.bezmaternyh@urfu.ru

Баранова Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры экспериментальной физики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). ORCID: 0000-0002-3020-3832, Scopus ID: 56421777700, SPIN-код: 6808-9342, AuthorID: 789057, a.a.baranova@urfu.ru

ABOUT THE AUTHOR

Minbagisov Timur Zarifovich, doctoral candidate of the Technology for Organic Synthesis Department of the Institute of Chemical Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (620002, Russian Federation, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Mira street, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-338X>, Researcher ID: NMK-5874-2025, SPIN-code: 1014-5667, tz-minbagisov@yandex.ru

Selezneva Irina Stanislavovna, Ph.D of Chemical Sciences, Associate Professor of the Technology for Organic Synthesis Department of the Institute of Chemical Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (620002, Russian Federation, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Mira street, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7039-1874>, Scopus ID: 57193404586, SPIN-code: 4745-3470, i.s.selezneva@urfu.ru

Bezmaternykh Maxim Alekseevich, Ph.D of Chemical Sciences, Associate Professor of the Technology for Organic Synthesis Department of the Institute of Chemical Engineering of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (620002, Russian Federation, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Mira street, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3286-9179>, Scopus ID: 6506164812, SPIN-code: 1193-4835, AuthorID: 49433, m.a.bezmaternyh@urfu.ru

Baranova Anna Alexandrovna, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor of the Experimental Physics Department of the Institute of Physics and Technology of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (620002, Russian Federation, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Mira street, 19). ORCID: 0000-0002-3020-3832, Scopus ID: 56421777700, SPIN-code: 6808-9342, AuthorID: 789057, a.a.baranova@urfu.ru