

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТОРМОЗНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА СНИЖЕНИЕ НИТРИТОВ И НИТРАТОВ В КОРНЕПЛОДАХ И КЛУБНЕВОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

¹Р.У. УАЖАНОВА , ¹Ж.С. НАБИЕВА , ²И.В. ДАНЬКО ,
¹Ш.С. АМАНОВА , ²Г.Р. КУРТИБАЕВА 

(¹ АО «Алматинский технологический университет», Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Толе би, 100
² РГП НА ПХВ «Институт ядерной физики» МЭ РК, Казахстан, 050032, г. Алматы, ул. Ибрагимова, 1)
Электронная почта автора корреспондента: raushan_u67@mail.ru

В последние десятилетия проблема накопления нитратов и нитритов в овощах и корнеплодах стала актуальной из-за роста использования минеральных удобрений и увеличения нагрузки на агропромышленный сектор. Избыточное содержание данных соединений представляет угрозу здоровью человека, снижая пищевую ценность продукции и способствуя образованию канцерогенных соединений. Целью настоящего исследования было изучение влияния тормозного (рентгеновского) излучения на снижение концентрации нитратов в корнеплодах и клубневой сельскохозяйственной продукции, а также определение оптимальных доз обработки для практического применения в пищевой промышленности. Научная значимость работы заключается в поиске эффективного метода радиационной обработки, обеспечивающего безопасность и долговременное хранение продукции. Методология включала облучение образцов картофеля, моркови и свёклы с использованием промышленного ускорителя электронов ИЛУ-10 при дозах 0,1–0,5 кГр и последующее определение содержания нитратов потенциометрическим методом. Результаты показали, что при дозах выше 0,2 кГр содержание нитратов в картофеле и свёкле значительно снижалось, тогда как в моркови наблюдалась обратная тенденция к накоплению. Данные свидетельствуют о различной чувствительности культур к радиационному воздействию, что связано с физиологическими и сортовыми особенностями. Вклад исследования заключается в уточнении механизмов изменения нитратного обмена под действием ионизирующего излучения и в разработке подходов к применению тормозного излучения как метода снижения содержания нитратов. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения радиационной обработки в агропищевую отрасль Казахстана и других стран для обеспечения безопасности продукции и увеличения сроков хранения.

Ключевые слова: корнеплоды и клубневая сельскохозяйственная продукция, нитраты, радиационная обработка тормозным излучением.

ТАМЫР ДАҚЫЛДАРЫ МЕН ТҮЙНЕКТІ АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ӨНІМДЕРІНДЕГІ НИТРИТТЕР МЕН НИТРАТТАРДЫҢ ТӨМЕНДЕУІНЕ РАДИАЦИЯЛЫҚ ТЕЖЕГІШ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ

¹Р.У. УАЖАНОВА, ¹Ж.С. НАБИЕВА, ²И.В. ДАНЬКО,
¹Ш.С. АМАНОВА, ²Г.Р. КУРТИБАЕВА

(¹ «Алматы технологиялық университеті» АҚ, Қазақстан, 050012, Алматы қ., Төле би к-сі, 100
² ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» ШЖҚ РМК, Қазақстан, 050032, Алматы қ., Ибрагимов к-сі, 1)
Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: raushan_u67@mail.ru

Соңғы онжылдықтарда көкөністер мен тамыр дақылдарында нитраттар мен нитриттердің жиналуы мәселесі минералды тыңайтқыштарды қолданудың артуына және агроөнеркәсіптік сектордағы жүктеменің көбеюіне байланысты өзекті болып отыр. Бұл қосылыстардың артық мөлшері адам денсаулығына қауіп төндіріп, өнімнің тағамдық құндылығын төмендетеді және канцерогенді қосылыстардың түзілуіне ықпал етеді. Осы

зерттеудің мақсаты – тамыр дақылдары мен түйнекті ауылшаруашылық өнімдеріндегі нитраттардың мөлшерін азайтуға тежегіш (рентгендік) сәулеленудің әсерін зерттеу және азық-түлік өнеркәсібінде қолдануға арналған оңтайлы өңдеу дозаларын анықтау. Жұмыстың ғылыми маңыздылығы – өнімнің қауіпсіздігін және ұзақ сақталуын қамтамасыз ететін тиімді радиациялық өңдеу әдісін іздеу. Әдістеме ретінде картоп, сәбіз және қызылша үлгілері 0,1–0,5 кГр дозада ИЛУ-10 үдеткішімен сәулелендірілді, кейіннен нитраттардың мөлшері потенциометриялық әдіспен анықталды. Нәтижелер көрсеткендей, 0,2 кГр-ден жоғары дозада картоп пен қызылшада нитрат мөлшері айтарлықтай төмендеді, ал сәбізде керісінше жиналу үрдісі байқалды. Бұл деректер дақылдардың радиациялық әсерге әртүрлі сезімталдығын және олардың физиологиялық, сорттық ерекшеліктерімен байланысты екенін көрсетті. Зерттеудің үлесі – иондаушы сәулеленудің әсерінен нитрат алмасуының өзгеру механизмдерін нақтылау және нитрат мөлшерін төмендетудің әдісі ретінде тежегіш сәулеленуді қолдану жолдарын ұсыну. Практикалық маңыздылығы – ауылшаруашылық өнімдерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету және сақтау мерзімін ұзарту үшін Қазақстан мен басқа елдердің агроазық-түлік саласына радиациялық өңдеуді енгізу мүмкіндігі.

Негізгі сөздер: тамыр дақылдары және түйнекті ауылшаруашылық өнімдері, нитраттар, радиациялық тежегіш сәулеленуімен өңдеу.

THE EFFECT OF RADIATION TREATMENT WITH BRAKING RADIATION ON THE REDUCTION OF NITRITES AND NITRATES IN ROOT CROPS AND TUBEROUS AGRICULTURAL PRODUCTS

¹R.U. UAZHANOVA, ¹J.S. NABIEVA, ²I.V. DANKO,
¹S.S. AMANOVA, ²G.R. KURTIBAYEVA

(¹ Almaty Technological University JSC, 100 Tole bi str., 050012, Almaty, Kazakhstan

² RSE on the REM “Institute of Nuclear Physics” of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, 050032, Almaty, 1 Ibragimov Street, Kazakhstan)

Corresponding author e-mail: raushan_u67@mail.ru

In recent decades, the accumulation of nitrates and nitrites in vegetables and root crops has become a pressing issue due to the increasing use of mineral fertilizers and the growing demand on the agro-industrial sector. Excessive levels of these compounds pose risks to human health, reducing the nutritional value of products and contributing to the formation of carcinogenic compounds. The aim of this study was to investigate the effect of braking (X-ray) radiation on the reduction of nitrates in root crops and tuberous agricultural products, as well as to determine optimal treatment doses for practical use in the food industry. The scientific significance of the work lies in identifying an effective radiation treatment method that ensures product safety and prolongs storage life. The methodology included irradiation of potato, carrot, and beet samples using the ILU-10 industrial electron accelerator at doses of 0.1–0.5 kGy, followed by nitrate determination using the potentiometric method. Results demonstrated that nitrate content in potatoes and beets significantly decreased at doses above 0.2 kGy, whereas carrots exhibited an opposite trend with increased accumulation. This indicates crop-specific sensitivity to radiation exposure related to physiological and varietal characteristics. The contribution of this research is the clarification of nitrate metabolism alterations under ionizing radiation and the development of approaches for applying braking radiation as a method for nitrate reduction. The practical significance lies in the potential application of radiation treatment in the agro-food sector of Kazakhstan and beyond to enhance food safety and extend shelf life.

Keywords: root crops and tuberous agricultural products, nitrates, radiation treatment with brake radiation.

Введение

Овощи и фрукты полезны и совершенно необходимы. В них содержится множество

полезных и незаменимых нутриентов: витамины, растительная клетчатка, кислоты, ценные минералы и пр. Кроме полезных веществ в овощах и фруктах могут содержаться и вредные для организма нутриенты, такие как нитраты, пестициды, тяжелые

металлы. Предельно допустимый уровень нитратов в продуктах растениеводства установлен Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» из фруктов и овощей. Свекла может накапливать до 1400 мг/кг нитратов (это предельно допустимая концентрация), ПДК нитратов у большинства овощей и фруктов значительно меньше (мг/кг): картофель - до 250, ранняя морковь - до 400, поздняя - до 250. Поскольку нитраты, как отмечалось выше, являются нормальным продуктом обмена азота в растениях, то они максимально накапливаются в период наибольшей активности их созревания. Чаще всего она проявляется перед началом уборки урожая. В результате быстрого роста населения мира и ограниченности сельскохозяйственных площадей, достаточное снабжение корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции для продовольствия становится все более сложной задачей. Были проведены обширные исследования, включающие физические обработки для улучшения сохранности корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции, что привело к повышению безопасности и устойчивости пищевых продуктов. Обработки, обсуждаемые в этой статье, были оценены на предмет их способности снижать нитриты без ущерба для улучшения безопасности и качества корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции.

Кроме того, такие технологии обладают преимуществами в аспекте экологичности и потребительской приемлемости [1]. Вместе с тем, как уже отмечалось ранее, радиационная обработка рассматривается как более эффективный и перспективный подход к обеспечению сохранности пищевых продуктов.

К распространённым пищевым загрязнителям корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции относятся нитриты, нитраты и пестициды.

Чрезмерное поступление нитритов и нитратов с пищевыми продуктами может оказывать негативное влияние на здоровье человека. В частности, нитриты способны окислять гемоглобин, превращая его в метгемоглобин, что снижает способность крови переносить кислород. Кроме того, данные соединения уменьшают пищевую ценность продуктов за счёт снижения биодоступности витамина А, витаминов группы В, йода и белков. Дополнительно следует отметить, что нитриты участвуют в образовании канцерогенных

N-нитрозосоединений. Основным источником нитратов (до 87%) и нитритов (до 43%) в рационе человека являются овощи [2]. В исследовании авторов [3] представлены данные о содержании нитратов в четырёх популярных видах свежих овощей (луке, картофеле, моркови и томатах), проанализировано влияние способов термической обработки (традиционная варка, варка в микроволновой печи и жарка) на уровень нитратного азота, при этом наименьшее снижение нитратов наблюдалось при варке в микроволновой печи, а также проведено сравнение полученных результатов с данными по содержанию нитратов в овощах из других стран.

Радиолитическое разложение загрязняющих веществ в последние годы применяется для очистки природных вод и отходов различного происхождения, а также для очистки питьевой воды [4,5]. Более того, гамма-облучение становится важной технологией в пищевой промышленности, включая проблемы безопасности пищевых продуктов, такие как сохранение фруктов и овощей для снижения количества патогенных микробов [6]. С другой стороны, хотя облучение пищевых продуктов изучалось многими учеными, ограниченное число исследований было сосредоточено на эффекте гамма-излучения для удаления остатков пестицидов [7, 8, 9].

Ионизирующее излучение может вызывать химические изменения в пищевых продуктах, включая окислительно-восстановительные реакции, которые могут изменить содержание нитратов и нитритов. Нитриты (NO_2^-) могут образовываться в результате восстановления нитратов (NO_3^-), естественным образом присутствующих в продуктах. В работе [10] отмечено изменение концентрации нитритов в мясных продуктах, подвергнутых облучению. Данный факт объясняется присутствием высокой концентрации аминогрупп ($-\text{NH}_2$), пептидных связей, аммиака и других соединений, способствующих окислению азота, при этом происходит и обратный процесс распада нитрита. При этом, скорость и направление протекания процесса зависит от параметров и режимов ионизирующей обработки. В растительной же матрице меньше свободных аминогрупп, пептидные и белковые структуры представлены значительно слабее, чем в мясе, а основным источником нитритов являются нитраты, накопленные растением в процессе роста.

В работах [11, 12, 13] установлено, что продолжительность хранения картофеля зависит от условий хранения и от дозы излучения. Среди изученного диапазона доз, облучение картофеля гамма-излучением в дозе 100 Гр способствует наилучшему его сохранению. Облучение приводило к снижению содержания аскорбиновой кислоты в первые месяцы после облучения, в дальнейшем ее количество увеличивалось, и данная зависимость сохранялась в течение всего периода хранения. Динамика изменения содержания крахмала, сухого вещества и нитратов имела слабо выраженный переменный характер, не отличаясь от таковой в необлученном контроле.

В работе [14] рассматривается воздействие рентгеновского излучения на прорастание клубней картофеля, установлено, что ингибирование прорастания произошло при дозах свыше 15-21 Гр для различных сортов картофеля, при этом, при дозах облучения до 20 Гр концентрация восстанавливающих сахаров не менялась, при больших дозах их концентрация увеличивалась на 50-70 %.

В работе [15] исследовалось влияние гамма-излучения от источника ^{60}Co на сохранность клубней картофеля. Установлено, что облучение в дозах свыше 120 Гр снижает потери веса и сухого вещества клубней вследствие процессов дыхания и транспирации в процессе хранения в 1,5-2,0 раза по сравнению с необлученным картофелем.

Кодекс надлежащей практики по облучению в целях ингибирования прорастания луковичных и клубнеплодных культур [16] приводит рекомендации по облучению луковичных (лука и чеснока), корнеплодов и клубнеплодов (картофеля и ямса), закладываемых на хранение и теряющих свои товарные качества в процессе хранения. Облучение проводится в целях ингибирования процесса прорастания вышеуказанных культур, но в данном случае не несет в себе цели снижения патогенной микрофлоры, которая может присутствовать в облучаемом материале.

В работе [17] сообщается, что диапазон доз от 0,07 до 0,15 кГр достаточен для подавления прорастания независимо от сорта, времени облучения и температуры хранения после облучения. Уже имеющиеся ростки увядают во время хранения, и развитие новых ростков предотвращается. Дозы, превышающие 0,15–0,20 кГр, могут привести к усилению потемнения или побурения, снижению способности к заживлению

ран, усилению гниения при хранении, порче, подслащиванию, снижению содержания витаминов и изменению химического состава, которые не исчезают при последующем хранении.

Работа [18] показывает, что что гамма-облучение ^{60}Co в дозе 1000 Гр значительно продлило срок хранения картофеля до 180 дней по сравнению с контрольной группой необлученного картофеля, при этом, продолжительность хранения и обработка радиацией повлияли на кислотность картофеля (рН).

Материалы и методы исследований

Наличие нитратов в образцах определяли потенциометрическим методом по ГОСТ 34570-2019. Методика основывается на экстракции нитратов из исследуемой пробы с использованием раствора алюмокалиевых квасцов в качестве экстрагента. Определение концентрации нитрат-ионов в экстракте осуществляется с применением анализатора Экотест -2000 с ионоселективным электродом (ООО «Эконикс», РФ). Пробу массой 10 г точно взвешивают, помещали в стакан на 100 мл, добавляли 50 мл экстрагирующего раствора (алюмокалиевый квасцы $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$) и гомогенизировали 1–2 минуты. Полученную смесь используют для измерений. Перед измерениями электроды промывают водой, вытирают салфеткой и помещают в раствор пробы. Включают мешалку и фиксируют значение ЭДС. Количественное содержание нитратов в образце вычисляется методом экстраполяции по градуировочной кривой, соответствующей потенциалу исходного раствора, с использованием метода двойных добавок или метода Грана. Исследование на содержание нитратов проводилось на второй день после облучения.

Результаты и их обсуждение

Образцы корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции облучались тормозным излучением (Bremsstrahlung/ X-Ray) на промышленном ускорителе электронов ИЛУ-10 [19] на базе Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан, расположенного в городе Алматы.

Образцы корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции, упакованные в герметичные полиэтиленовые пакеты, укладывались на специализированные подъемные столы ножничного типа, расположенные на

роликовом конвейере, которые с установленной скоростью движения проходили под танталовым конвертером через зону облучения. В ходе эксперимента использовался танталовый конвертер с алюминиевой плитой в качестве основания преобразователя и фильтра низкоэнергетической

части спектра тормозного излучения [20]. Облучение проводилось в горизонтальном расположении образцов с двух сторон. Фото фасовки и укладки образцов для облучения на ускорителе ИЛУ-10 представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Фото фасовки и укладки образцов для облучения на ускорителе ИЛУ-10

Поглощенная доза регулировалась путем изменения скорости движения образцов в зоне облучения. Основные параметры технологического процесса при облучении образцов корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции представлены в таблице 1.

Для расчета режимов облучения использовалась калибровочная кривая, полученная методом ЭПР-дозиметрии [21], описывающая зависимость дозы облучения от среднего тока пучка ускоренных электронов I_{cp} при облучении на ускорителе электронов ИЛУ-10 с конвертером.

Таблица 1. Режимы облучения модельных сред

№ режима	Е, МэВ	I _{имп} , мА	f, Гц	I _{ср} , мА	Скорость конвейера, см/сек	Облучение	D _{расч} , кГр
0	0	0	0	0	0	(без облучения)	0
1	5	350	14	3,1	5	2 круга (с переворотом)	0,1
2	5	350	14	3,1	4	2 круга (с переворотом)	0,2
3	5	350	14	3,1	3	2 круга (с переворотом)	0,3
4	5	350	14	3,1	2	2 круга (с переворотом)	0,4
5	5	350	14	3,1	1	2 круга (с переворотом)	0,5

Контроль условий окружающей среды

Контроль температуры и влажности окружающей среды в зоне облучения контролировался с использованием поверенных гигрометров психометрических ВИТ-2. Облучение и хранение образцов до облучения проводилось при температуре +21 °С и относительной влажности

55%. Контрольные образцы транспор-тировались и хранились в одинаковых условиях с облученными.

Эксперименты по облучению корнеплодов осуществлялись с целью выявления влияния доз облучения (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 кГр) на показатели их качества и безопасности. Были предоставлены для исследования следующие образцы (табл. 2).

Таблица 2. Образцы корнеплодов для облучения

№	Обозначение экспериментальной группы	Наименование образцов	Количество, уп	Примечание
1	Исследуемая группа №1	Клубни картофеля, сорт №1	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Сарыагаш
2	Исследуемая группа №2	Клубни картофеля, сорт №2	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Кордай
3	Исследуемая группа №3	Клубни картофеля, сорт №3	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Кыргызстан
4	Исследуемая группа №4	Клубни картофеля, сорт №4	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Павлодар
5	Исследуемая группа №5	Клубни картофеля, сорт №5	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Китай
6	Исследуемая группа №6	Корнеплоды свёклы столовой, сорт №1	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Сарыагаш
7	Исследуемая группа №7	Корнеплоды свёклы столовой, сорт №2	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Кордай
8	Исследуемая группа №8	Корнеплоды моркови, сорт №1	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Сарыагаш
9	Исследуемая группа №9	Корнеплоды моркови, сорт №2	6 (1 контроль + 5 режимов обработки) (Каждая группа содержит по 3 образца)	Кордай

Далее было определено влияние тормозного излучения на показатели пищевой безопасности – нитраты и пестициды.

Таблица 3. Результаты исследования концентрации нитратов в образцах корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции

Режим обработки	Содержание нитратов в образцах по группам, мг/кг								
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9
0 кГр (контроль)	19,09	22,39	15,91	29,37	31,15	172,32	126,66	5,67	15,97
	19,08	22,38	15,92	29,35	31,18	172,24	126,63	5,68	15,98
	19,09	22,4	15,9	29,39	31,12	172,28	126,69	5,66	15,96
0,1 кГр	26,34	29,63	23,14	36,63	38,39	75,26	56,8	21,09	59,4
	26,33	29,62	23,16	36,59	38,38	75,24	57	21,1	59,39
	26,35	29,64	23,15	36,61	38,37	75,28	57,2	21,07	59,41
0,2 кГр	33,57	36,88	30,38	43,85	45,63	97,02	69,66	21,11	59,43
	33,56	36,87	30,4	43,88	45,62	97,01	69,65	21,12	59,4
	33,58	36,86	30,39	43,82	45,64	97,03	69,67	21,1	59,42
0,3 кГр	14,48	16,5	17,48	18,48	19,48	97,26	77	21,21	59,52
	14,47	16,46	17,47	18,47	19,49	97,25	77,2	21,22	59,53
	14,49	16,48	17,49	18,49	19,47	97,24	78,8	21,2	59,51
0,4 кГр	11,85	13,15	8,67	16,13	16,91	98,02	74,66	21,25	59,57
	11,84	13,16	8,68	16,12	16,92	98,01	74,68	21,26	59,58
	11,86	13,17	8,66	16,14	16,9	98,03	74,64	21,27	59,56
0,5 кГр	6,09	7,37	2,91	10,37	11,15	102,2	79,7	21,29	59,6
	6,08	7,41	2,93	10,38	11,15	102,3	80,3	21,28	59,61
	6,07	7,39	2,89	10,36	11,15	102,1	80	21,3	59,59

В результате проведённого анализа образцов корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции видно снижение нитратов. Это свидетельствует об их соответствии требованиям по безопасности пищевой продукции и отсутствию остаточных количеств контролируемых агрохимикатов в исследованных пробах. Полученные данные указывают на надлежащее

соблюдение агротехнических регламентов при выращивании данной продукции.

Также данные по нитратам не превышали нормы приведенные в ТР ТС 021. Однако было важно исследование влияния радиационной обработки тормозным излучением на содержание нитратов в облучаемых культурах.

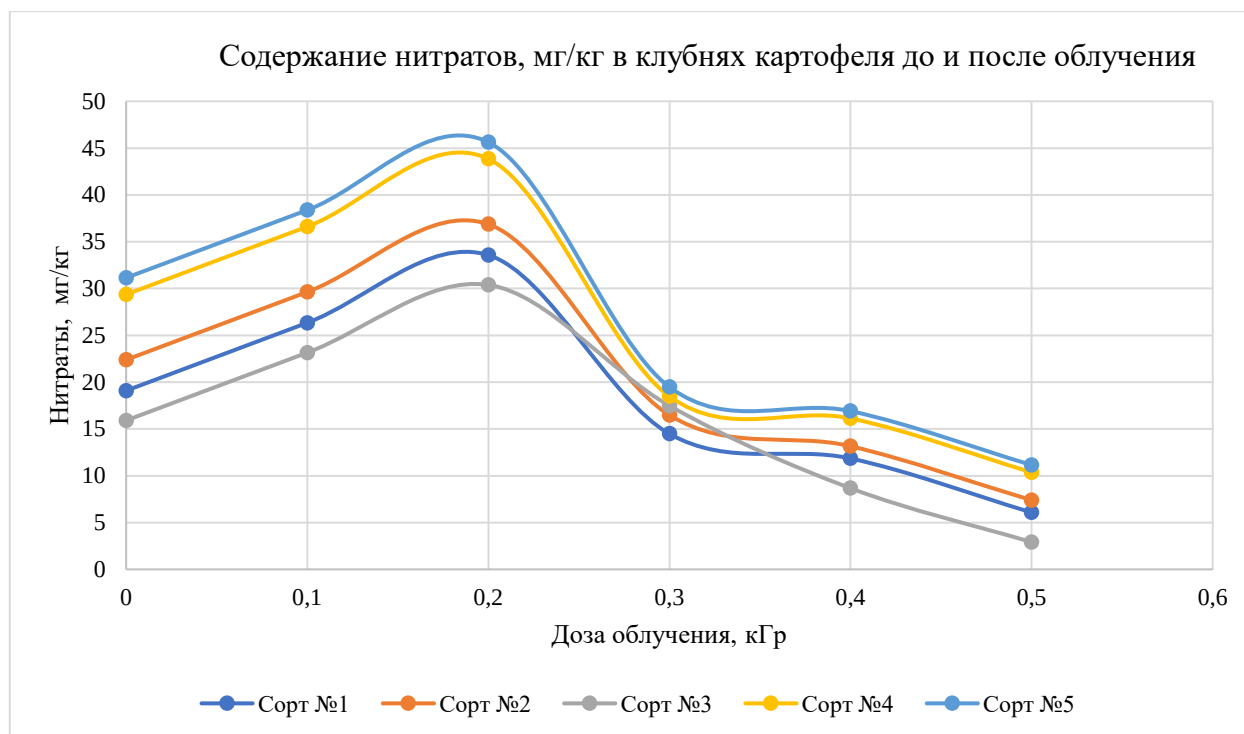


Рисунок 2. Динамика изменения содержания нитратов в клубнях картофеля под действием тормозного излучения

На рисунке 2 представлена динамика изменения содержания нитратов в клубнях картофеля под действием тормозного излучения. Начальный уровень содержания нитратов варьируется в зависимости от сорта: наименьшее содержание наблюдается у сорта №5 (~22 мг/кг), наибольшее — у сорта №1 (~35 мг/кг). При дозах облучения до 0,2 кГр наблюдается увеличение содержания нитратов во всех сортах, достигающее пика примерно на уровне 0,2 кГр. Это может быть связано с активацией метаболических процессов [22] под действием малых доз радиации и с радиационно-химическими реакциями, протекающими при облучении [10].

После превышения дозы облучения 0,2 кГр содержание нитратов резко снижается во всех сортах. При дозах 0,3–0,5 кГр наблюдается стабильно низкий уровень нитратов — около 10–15 мг/кг. Наиболее выраженное снижение нитратов после облучения наблюдается у сорта №1 и сорта №5. У этих сортов содержание нитратов на дозе 0,5 кГр составляет менее 10 мг/кг, что в 3–4 раза ниже начального уровня. Таким образом, радиационная обработка картофеля в дозах свыше 0,2 кГр способствует значительному снижению содержания нитратов, что может быть использовано как метод снижения потенциальной токсичности продукции.

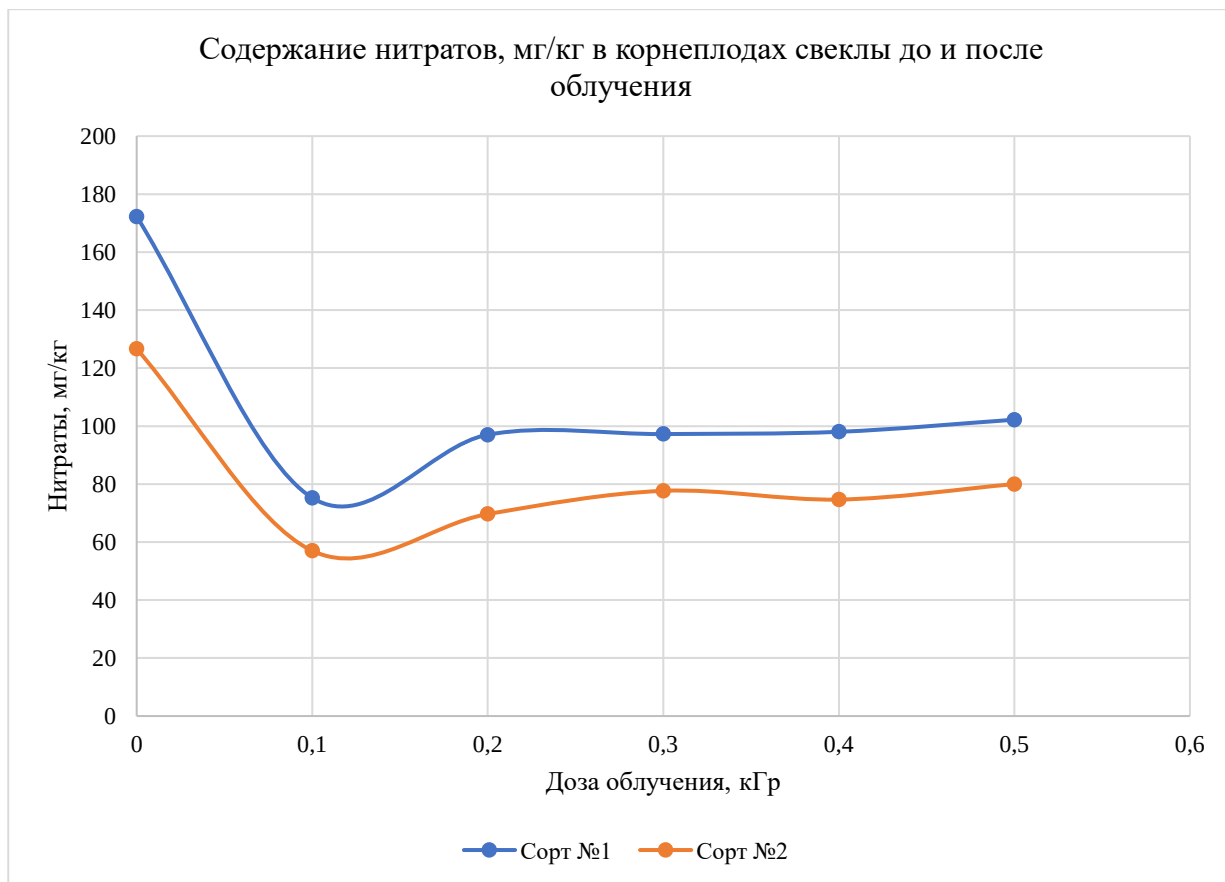


Рисунок 3. Динамика изменения содержания нитратов в корнеплодах свеклы под действием тормозного излучения

На рисунке 3 представлена динамика изменения содержания нитратов в корнеплодах свеклы под действием тормозного излучения. Исходное содержание нитратов в корнеплодах до облучения существенно отличается между сортами: у сорта №1 оно составляет около 180 мг/кг, а у сорта №2 — около 140 мг/кг. При низких дозах облучения (0,1–0,2 кГр) наблюдается резкое снижение содержания нитратов у обоих сортов. Минимальные значения достигаются при дозе 0,1 кГр: около 90 мг/кг у сорта №1 и около 70 мг/кг у сорта №2. Дальнейшее увеличение дозы (от 0,2 до

0,5 кГр) приводит к незначительным колебаниям уровня нитратов, но в целом концентрация остается стабильно ниже исходного уровня. Это может указывать на устойчивое снижение нитратов после первичной радиационной обработки. Наименьшее содержание нитратов достигается при дозе 0,1 кГр, что делает эту дозу потенциально оптимальной для снижения нитратов в свекле без значительного изменения других свойств продукта. Сорт №2 более чувствителен к воздействию облучения, поскольку снижение нитратов у него более выражено по сравнению с сортом №1.

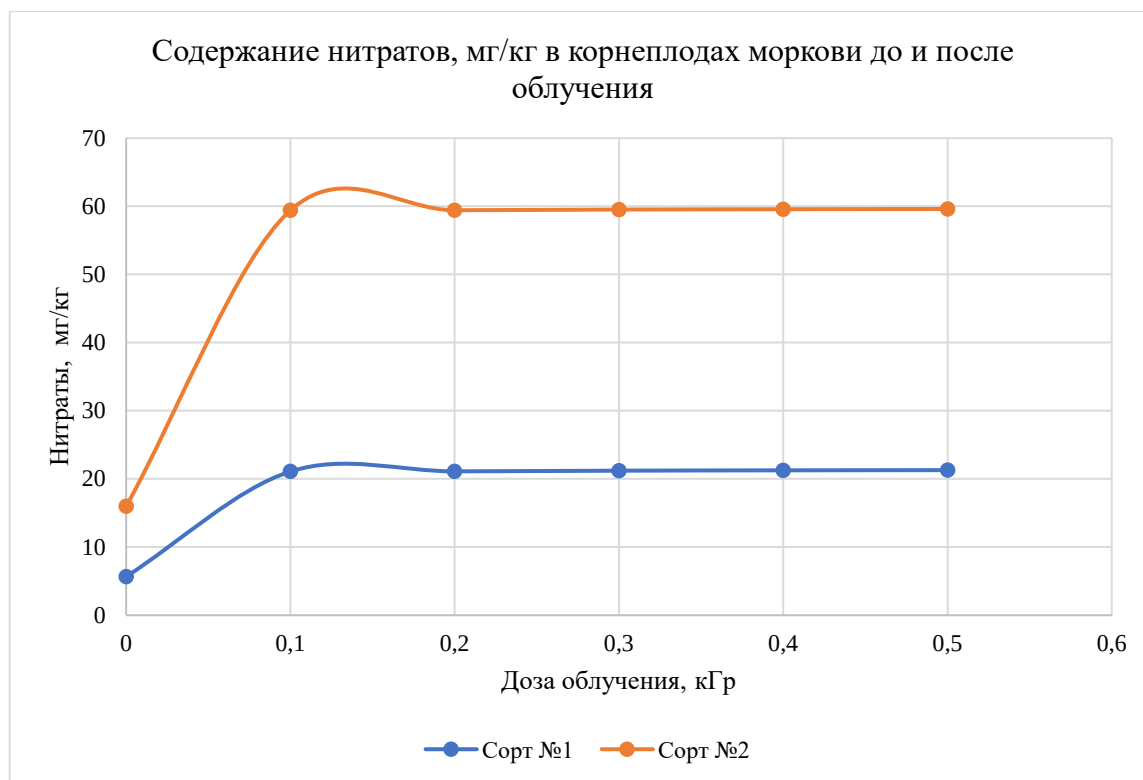


Рисунок 4. Динамика изменения содержания нитратов в моркови от дозы ионизирующего излучения

На рисунке 4 представлена динамика изменения содержания нитратов в моркови от дозы ионизирующего излучения. Исходное содержание нитратов у сорта №1 составляет около 10 мг/кг, а у сорта №2 — около 20 мг/кг. При увеличении дозы облучения до 0,1 кГр происходит резкое повышение содержания нитратов, особенно у сорта №2 — до максимального значения около 65 мг/кг. У сорта №1 также наблюдается рост, но более умеренный — до 22 мг/кг. Рост количества нитратов можно объяснить радиационно-химическими реакциями, протекающими при ионизации.

Начиная с дозы 0,2 кГр и до 0,5 кГр, содержание нитратов остается стабильным, без дальнейшего увеличения или снижения. Это говорит о достижении плато в реакции корнеплодов на радиационное воздействие. В отличие от картофеля и свеклы, у моркови не наблюдается снижения содержания нитратов после облучения. Напротив, эффект выражается в их повышении, особенно при низких дозах. Сорт №2 более чувствителен к облучению: прирост содержания нитратов у него в 3 раза выше, чем у сорта №1. Это указывает на сортовую специфику реакции моркови на радиационное воздействие.

Заключение, выводы:

В результате исследований выявлено, что динамика изменения содержания нитратов для образцов корнеплодов и клубневой сельскохозяйственной продукции была различной. Возможно, могут быть следующие причины:

1. Различия в активности ферментов, отвечающих за метаболизм нитратов. В растениях нитраты восстанавливаются до аммония при участии фермента нитратредуктазы. У моркови, вероятно, после облучения происходит снижение активности нитратредуктазы, что приводит к накоплению нитратов, а не их переработке. У картофеля и свеклы облучение, наоборот, может стимулировать активность ферментов, ускоряя расщепление нитратов.
2. Нарушение нитратного обмена под действием радиации. Морковь более чувствительна к стрессу, ионизирующее излучение вызывает нарушение клеточного метаболизма, в том числе — снижение потребления нитратов на синтез белков. В результате нитраты накапливаются в тканях вместо включения в азотный обмен.
3. Различия в структуре тканей и водном обмене. Морковь обладает высоким содержанием сахаров и

специфической тканевой структурой. Облучение может вызывать локальное повреждение тканей, ухудшение транспорта и переработки нитратов, особенно в зоне корнеплода.

4. Генетические особенности и сортовая чувствительность. Как видно из графика, сорт №2 моркови дал особенно высокий прирост нитратов. Это указывает на высокую сортовую чувствительность. Возможно, в этом сорте генетически слабее регулируется механизм адаптации к радиационному стрессу.

Увеличение нитратов в моркови после облучения объясняется совокупностью факторов: подавлением ферментативной активности нитратредуктазы, которая является ключевым ферментом в усвоении азота и катализирует процесс восстановления нитрата до нитрита, нарушением метаболизма под стрессом, особенностями физиологии культуры и сорта. Это ещё раз подтверждает, что эффективность радиационной обработки как метода снижения нитратов зависит от культуры и дозировки, и не может быть универсальной для всех овощей.

При дальнейшем проведении исследований необходимо исследование влияния следующих факторов на процесс радиационной обработки пищевых продуктов: срок после уборки урожая, типы продукта, мощность и тип излучения, температуру продукта, срок хранения продукта после облучения.

Благодарность, конфликт интересов (финансирование)

Представленные исследования профинансированы Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2024-2026 годы АР23490268 «Разработка и экспериментальная апробация радиационной обработки для обеспечения сохранности сельскохозяйственной и пищевой продукции».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Castell-Perez ME, Moreira RG. Irradiation and Consumers Acceptance. Innovative Food Processing Technologies. 2021;122–35. doi: 10.1016/B978-0-12-815781-7.00015-9. Epub 2020 Sep 1. PMID: PMC7329293.
- 2.Leszczynska T. et al. Effects of some processing methods on nitrate and nitrite changes in cruciferous vegetables //Journal of Food Composition and Analysis, 2009. – Vol. 22., I.4 – P. 315-321. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.10.025>

- 3.Vahed S. et al. Effect of some processing methods on nitrate changes in different vegetables //Journal of Food Measurement and Characterization. – 2015. – Vol. 9., I. 3. – P. 241-247. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9229-4>

- 4.Basfar A. A., Mohamed K. A., Al-Abduly A. J., Al-Kuraiji T. S., and Al-Shahrani A. A., “Degradation of diazinon contaminated waters by ionizing radiation,” Radiation Physics and Chemistry, vol. 76, no. 8-9, pp. 1474–1479, 2007.

- 5.Basfar A. A., Khan H. M., and Al-Shahrani A. A., “Trihalomethane treatment using gamma irradiation: kinetic modeling of single solute and mixtures,” Radiation Physics and Chemistry, vol. 72, no. 5, pp. 555–563, 2005

- 6.Basfar A. A., Mohamed K. A., Al-Abduly A. J. and Al-Shahrani A. A., “Radiolytic degradation of atrazine aqueous solution containing humic substances,” Ecotoxicology and Environmental Safety, vol. 72, no. 3, pp. 948–953, 2009

- 7.Pogacnik L. and Franko M., “Detection of organophosphate and carbamate pesticides in vegetable samples by a photothermal biosensor,” Biosensors and Bioelectronics, vol. 18, no. 1, pp. 1–9, 2003.

- 8.Alamgir Zaman Chowdhury M., Fakhruddin A., Nazrul Islam M., Moniruzzaman M., Gan S. H., and Khorshed Alam M., “Detection of the residues of nineteen pesticides in fresh vegetable samples using gas chromatography-mass spectrometry,” Food Control, vol. 34, no. 2, pp. 457–465, 2013

- 9.Lepine F. L., “Effects of ionizing radiation on pesticides in a food irradiation perspective: a bibliographic review,” Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 39, no. 12, pp. 2112–2118, 1991

10. Куликовский А.В., Вострикова Н.Л., Горбунова Н.А., Иванкин А.Н. Идентификация накопления химических маркеров облучения в мясе при ионизирующей обработке. // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: матер. Междунар. науч.-практ. конф. -Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. -С. 203-207

11. Лой Н.Н., Санжарова Н.И., Чиж Т.В., Щагина Н.И., Гулина С.Н., Миронова М.П., Кузнецов В.К. Перспектива применения радиационных технологий для увеличения сроков хранения овощей / Инновационные исследования и разработки для научного обеспечения производства и хранения экологически безопасной сельскохозяйственной и пищевой продукции: Сб. матер. II Междунар. научн.-практ. конф. / Краснодар, (05-26 июня 2017 г.). – С. 54-58. URL: http://vniitti.ru/conf/conf2017/sbornik_conf2017.pdf

12. Чиж Т.В., Лой Н.Н., Губарева О.С., Кузнецов В.К., Урсун Н.В., Гулина С.Н. Влияние гамма-излучения на продолжительность хранения и показатели качества картофеля Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: Сборник докладов международной научно-практической конференции / г. Обнинск, (26-28 сентября 2018 г.). – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. – 356 с

13. Лой Н.Н., Чиж Т.В., Гулина С.Н. Влияние гамма-облучения на хранение картофеля / Техногенные системы и экологический риск: Тезисы докладов II Международной (XV Региональной) научной конференции / Под общ. ред. А.А. Удаловой. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – 450 с;.

14. Авдюхина В. М., Близнюк У. А., Борщегоская П. Ю. [и др.] Ингибирование прорастания клубней картофеля после воздействия рентгеновского излучения / Применение химических веществ, ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях: Сборник докладов круглого стола в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, Москва, 21 сентября 2016 года. – Москва, 2016. – С. 47. – EDN XVYVZF

15. Цыгвинцев П. Н., Тихонов А. В., Рачкова В. М. [и др.] Сохранность клубней картофеля после гамма-облучения Применение химических веществ, ионизирующих и неионизирующих излучений в агробиотехнологиях: Сборник докладов круглого стола в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, Москва, 21 сентября 2016 года. – Москва, 2016. – С. 122-127. – EDN XVYWWR.

16. ICGFI, Code of good irradiation practice for sprout inhibition of bulb and tuber crops. ICGFI Document № 8, IAEA, Vienna 1991

17. International Atomic Energy Agency, Irradiation of Bulbs and Tuber Crops-A Compilation of Technical Data for Its Authorization and Control, IAEA (1997)

18. Duc L. D. D., Trieu, L. N., Ha, N. T. N., Sang, N. T. M., & Son, N. A. (2024). Effect of 60Co Gamma Radiation on the Shelf Life of Potato Tubers. *RADIOISOTOPES*, 73(3), 255–264. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.73.255>

19. Bryazgin A.A. 2017. ILU Industrial Electron Accelerators. International Conference on Applications of Radiation Science and Technology (ICARST-2017). URL: <https://www.iaea.org/events/icarst-2017/presentations>

20. Auslender V.L, Bukin A.D, Voronin L.A, Kokin E.N, Korobeinikov M.V, Krainov G.S, Lukin A.N, Radchenko V.M, Sidorov A.V, Tkachenko V.O. 2004. Bremsstrahlung converters for powerful industrial electron accelerators. *Radiation Physics and Chemistry*. 71(1–2): 297– 299. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.007>

21. Mukan Zh.T., Seredavina T.A., Sushkova N.S., Danko I.V., Glushchenko N.V. Study of dosimetry possibilities using electron paramagnetic resonance on alanine for ILU-10 accelerator INP RK. *NNC RK Bulletin*. 2022;(1):36-42. (In Russ.) <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-36-42>.

22. Luckey, T.D. (1980). *Hormesis With Ionizing Radiation* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429276552>

References

1.Castell-Perez, M. E., and R. G. Moreira. Irradiation and Consumers Acceptance. *Innovative Food Processing*

Technologies, 2021: 122–35. doi:10.1016/B978-0-12-815781-7.00015-9.

2.Leszczynska, T., et al. “Effects of Some Processing Methods on Nitrate and Nitrite Changes in Cruciferous Vegetables.” *Journal of Food Composition and Analysis* 22, no. 4 (2009): 315–321. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.10.025>.

3.Vahed, S., et al. “Effect of Some Processing Methods on Nitrate Changes in Different Vegetables.” *Journal of Food Measurement and Characterization* 9, no. 3 (2015): 241–247. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9229-4>.

4.Basfar, A. A., K. A. Mohamed, A. J. Al-Abduly, T. S. Al-Kuraiji, and A. A. Al-Shahrani. “Degradation of Diazinon Contaminated Waters by Ionizing Radiation.” *Radiation Physics and Chemistry* 76, no. 8–9 (2007): 1474–1479.

5.Basfar, A. A., H. M. Khan, and A. A. Al-Shahrani. “Trihalomethane Treatment Using Gamma Irradiation: Kinetic Modeling of Single Solute and Mixtures.” *Radiation Physics and Chemistry* 72, no. 5 (2005): 555–563.

6.Basfar, A. A., K. A. Mohamed, A. J. Al-Abduly, and A. A. Al-Shahrani. “Radiolytic Degradation of Atrazine Aqueous Solution Containing Humic Substances.” *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72, no. 3 (2009): 948–953.

7.Pogacnik, L., and M. Franko. “Detection of Organophosphate and Carbamate Pesticides in Vegetable Samples by a Photothermal Biosensor.” *Biosensors and Bioelectronics* 18, no. 1 (2003): 1–9.

8.Alamgir Zaman Chowdhury, M., A. Fakhruddin, M. Nazrul Islam, M. Moniruzzaman, S. H. Gan, and M. Khorshed Alam. “Detection of the Residues of Nineteen Pesticides in Fresh Vegetable Samples Using Gas Chromatography-Mass Spectrometry.” *Food Control* 34, no. 2 (2013): 457–465.

9.Lepine, F. L. “Effects of Ionizing Radiation on Pesticides in a Food Irradiation Perspective: A Bibliographic Review.” *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 39, no. 12 (1991): 2112–2118.

10. Kulikovskii, A. V., N. L. Vostrikova, N. A. Gorbunova, and A. N. Ivankin. “Identifikatsiya nakopleniya khimicheskikh markerov oblucheniya v myase pri ioniziruyushchei obrabotke [Identification of Accumulation of Chemical Markers of Irradiation in Meat During Ionizing Treatment].” In *Radiatsionnye tekhnologii v sel'skom khozyaistve i pishchevoi promyshlennosti: sostoyanie i perspektivy: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Obninsk: FGBNU VNIIRAE, 2018.(In Russian)

11. Loi, N. N., N. I. Sanzharova, T. V. Chizh, N. I. Shchagina, S. N. Gulina, M. P. Mironova, and V. K. Kuznetsov. “Perspektiva primeneniya radiatsionnykh tekhnologii dlya uvelicheniya srokov khraneniya ovoshchei [Perspective of Applying Radiation Technologies to Extend the Shelf Life of Vegetables].” In *Innovatsionnye issledovaniya i razrabotki dlya nauchnogo obespecheniya proizvodstva i khraneniya ekologicheskii bezopasnoi*

sel'skokhozyaistvennoi i pishchevoi produktsii: materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Krasnodar, June 5–26, 2017, 54–58. (In Russian)

12. Chizh, T. V., N. N. Loi, O. S. Gubareva, V. K. Kuznetsov, N. V. Ursu, and S. N. Gulina. "Vliyanie gamma-izlucheniya na prodolzhitel'nost' khraneniya i pokazateli kachestva kartofelya [Effect of Gamma Irradiation on the Shelf Life and Quality of Potatoes]." In *Radiatsionnye tekhnologii v sel'skom khozyaistve i pishchevoi promyshlennosti: sostoyanie i perspektivy: sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Obninsk, September 26–28, 2018. (In Russian)

13. Loi, N. N., T. V. Chizh, and S. N. Gulina. "Vliyanie gamma-oblucheniya na khraneniya kartofelya [Effect of Gamma Irradiation on Potato Storage]." In *Tekhnogennye sistemy i ekologicheskii risk: tezisy dokladov II Mezhdunarodnoi (XV Regional'noi) nauchnoi konferentsii*, edited by A. A. Udalova. Obninsk: IATE NIYaU MIFI, 2018. (In Russian)

14. Avdyukhina, V. M., U. A. Bliznyuk, and P. Yu. Borshchegovskaya, et al. "Ingibirovanie prorastaniya klubnei kartofelya posle vozdviizhiya rentgenovskogo izlucheniya [Inhibition of Potato Tubers Sprouting After X-ray Irradiation]." In *Primenenie khimicheskikh veshchestv, ioniziruyushchikh i neioniziruyushchikh izlucheni v agrobiotekhnologiyakh: sbornik dokladov kruglogo stola v ramkakh XX Mendeleevskogo sezda po obshchei i prikladnoi khimii*, Moscow, 2016, 47. (In Russian)

15. Tsygvintsev, P. N., A. V. Tikhonov, V. M. Rachkova, et al. "Sokhrannost' klubnei kartofelya posle gamma-oblucheniya [Preservation of Potato Tubers After Gamma Irradiation]." In *Primenenie khimicheskikh veshchestv, ioniziruyushchikh i neioniziruyushchikh izlucheni v agrobiotekhnologiyakh: sbornik dokladov*

kruglogo stola v ramkakh XX Mendeleevskogo sezda, Moscow, 2016, 122–127. (In Russian)

16. ICGFI. Code of Good Irradiation Practice for Sprout Inhibition of Bulb and Tuber Crops. ICGFI Document № 8, IAEA, Vienna, 1991.

17. International Atomic Energy Agency. Irradiation of Bulbs and Tuber Crops – A Compilation of Technical Data for Its Authorization and Control. IAEA, 1997.

18. Duc, L. D. D., L. N. Trieu, N. T. N. Ha, N. T. M. Sang, and N. A. Son. "Effect of ^{60}Co Gamma Radiation on the Shelf Life of Potato Tubers." *Radioisotopes* 73, no. 3 (2024): 255–264. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.73.255>.

19. Bryazgin, A. A. "ILU Industrial Electron Accelerators." International Conference on Applications of Radiation Science and Technology (ICARST-2017). Vienna: IAEA, 2017. <https://www.iaea.org/events/icarst-2017/presentations>.

20. Auslender, V. L., A. D. Bukin, L. A. Voronin, E. N. Kokin, M. V. Korobeinikov, G. S. Krainov, A. N. Lukin, V. M. Radchenko, A. V. Sidorov, and V. O. Tkachenko. "Bremsstrahlung Converters for Powerful Industrial Electron Accelerators." *Radiation Physics and Chemistry* 71, no. 1–2 (2004): 297–299. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.007>.

21. Mukan, Zh. T., T. A. Seredavina, N. S. Sushkova, I. V. Danko, and N. V. Glushchenko. "Study of Dosimetry Possibilities Using Electron Paramagnetic Resonance on Alanine for ILU-10 Accelerator INP RK." *NNC RK Bulletin* (2022): 36–42. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-1-36-42>.

22. Luckey, T. D. *Hormesis With Ionizing Radiation*. Boca Raton: CRC Press, 1980. <https://doi.org/10.1201/9780429276552>.