

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЯЧМЕНЯ ОБЫКНОВЕННОГО

Афони́на С.О., Атамановская Г.А., Комарова Л.Н.

ИАТЭ НИЯУ МИФИ,
249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1



Одно из приоритетных направлений развития РФ – продовольственная безопасность и устойчивое развитие всего агропромышленного комплекса нашей страны. Одним из способов повышения экономической эффективности выращивания сельскохозяйственных культур является предпосевное облучение семян. Целью этого агроприема является ускорение роста и развития растений, сокращение периода вегетации и повышение урожая. Однако из-за нестабильности стимулирующего эффекта в полевых и лабораторных условиях технология предпосевого облучения семян так и не стала широко распространенной. В связи с этим требуются исследования для анализа механизмов стимуляции и обоснования применения технологии предпосевого облучения семян.

Выявлено стимулирующее действие гамма-облучения на длину ростка и главного корня ячменя обыкновенного при дозах 15 и 20 Гр. Продемонстрировано, что гамма-облучение семян ячменя в дозах 2, 5, 10, 15, 20 и 25 Гр не приводит к изменению митотического индекса, облучение в дозе 50 Гр снижает митотический индекс в 2,5 раза. Показано дозозависимое увеличение частоты аберрантных клеток в корневой меристеме пророщенных семян после гамма-облучения, за исключением дозы гамма-облучения 2 Гр. Транскрипционная активность гена, кодирующего мембранный белок РМ19L, в зародышах ячменя обыкновенного повышалась после гамма-облучения в дозах 15, 20, 25 и 50 Гр.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, радиационная стимуляция, семена, ячмень, гамма-облучение, длина ростка, длина корня, митотический индекс, частота аберрантных клеток.

Для цитирования: Афони́на С.О., Атамановская Г.А., Комарова Л.Н. Исследование влияния гамма-облучения на морфологические и генетические показатели ячменя обыкновенного. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 166–174. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.13>

© Афони́на С.О., Атамановская Г.А., Комарова Л.Н., 2024

ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния ионизирующего излучения на биообъекты в зависимости от качества, дозы и мощности облучения стало основой для разработки и внедрения в сельское хозяйство предпосевного облучения семян. Понятие «радиационный гормезис» было введено в радиобиологию в 80-е годы XX в. и постулировало, что если большие дозы радиации оказывают отрицательное влияние на живые организмы (угнетают рост, развитие и деление клеток), то малые дозы стимулируют практически все физиологические процессы [1]. Конкретные величины малых доз зависят от вида и сорта растения.

Было показано существование этого явления в разных лабораториях и на различных объектах, но эффект не всегда проявляется, и его природа неодинаково объясняется исследователями. В основе эффекта стимуляции, возможно, лежит несколько механизмов, включая активацию белков теплового шока, протеасом, киназных каскадов, изменения азотистого обмена, фитогормонального баланса и, в целом, процессов репарации и антиоксидантного ответа [2]. Как итог – увеличение длины ростка и главного корня у проростков ячменя [3].

Из-за нестабильности стимулирующего эффекта в полевых и лабораторных условиях технология предпосевного облучения семян не нашла широкого распространения, хотя осталась по-прежнему очень привлекательной для внедрения в агропромышленный комплекс. Радиационную стимуляцию также можно использовать для выявления генов-кандидатов, контролируемых повышением продуктивности и (или) качества урожая [4]. Поэтому изучение биологических эффектов малых доз ионизирующего излучения и накопление экспериментальных данных является перспективным направлением для обоснования применения ядерных методов в сельском хозяйстве.

Целью работы является изучение влияния гамма-излучения на морфологические и генетические показатели ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.)

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментальной работы был выбран объект – ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ладны, который характеризуется стабильной урожайностью (средняя урожайность составляет 57,8 ц/га, максимальная – 94,1 ц/га). Сорт устойчив к грибным болезням и полеганию. Масса 1000 семян в среднем составляет 47,2 г. Содержание белка в зерне – 13,4%, крахмала – 59% [5].

Облучение семян гамма-квантами проводили на уникальной научной установке радиационного облучения ГУР-120 (<https://gur120.rirae.ru>; регистрационный номер 2795259 на портале scr-rf.ru) на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (г. Обнинск), исследуемые дозы 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 Гр при мощности дозы 58 Гр/ч.

Семена облучали в бумажных конвертах с площадью поверхности 25 см². В каждом конверте находилось по 30 семян, три конверта на каждую дозу гамма-облучения. Серии опытов повторяли три раза.

Облученные и контрольные семена проращивали в рулонных культурах согласно рекомендациям Р.С. Бабаяна [6] с модификациями. Рулон ставили в химический стакан с дистиллированной водой (100 мл) и помещали в термостат при температуре 23°C в тем-

ноте. На второй день прорастания для исследования цитогенетических показателей часть корешков фиксировали в смеси ледяной уксусной кислоты и 96%-го этилового спирта в пропорции 1:3 в течение 24 ч, после чего переносили в 70%-ный этиловый спирт и хранили в холодильнике при 4°C. Также на второй день прорастания отбирали часть семян, извлекали из них зародыши и фиксировали в жидком азоте до экстракции РНК для исследования экспрессии гена стрессового ответа HORVU5HrIG125450, кодирующий мембранный белок PM19L. На пятые сутки проращивания рулонные культуры помещали под фитолампу OsramFluora L 18W/77 (Германия), световой поток – 550 лм, мощность – 18 Вт. На седьмые сутки проводили измерение длины наземного побега и главного корня для всех образцов.

Для определения митотического индекса (МИ) и частоты aberrантных клеток (ЧАК) использовали стандартный метод давленных препаратов с окрашиванием ацетокармином [7]. Давленные препараты просматривали под световым микроскопом Микмед-5 (Ломо, Россия) при 1000-кратном увеличении. На каждом препарате учитывали общее количество просмотренных клеток, количество делящихся клеток в каждой фазе митотического цикла, учитывая aberrации на стадиях ана- и телофазы.

Митотический индекс (МИ) рассчитывали по формуле

$$\text{МИ} = (\text{П} + \text{М} + \text{А} + \text{Т}) / \text{N} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где П – количество клеток в профазе; М – количество клеток в метафазе; А – количество клеток в анафазе; Т – количество клеток в телофазе; N – общее количество просмотренных клеток.

Частоту aberrантных клеток (ЧАК) рассчитывали по формуле

$$\text{ЧАК} = \text{ХА} / (\text{А} + \text{Т}), \quad (2)$$

где ХА – количество клеток с aberrациями; А – количество клеток в анафазе; Т – количество клеток в телофазе.

Для определения экспрессии генов фиксированные в жидком азоте зародыши гомогенизировали и выделяли РНК при помощи реагента для выделения суммарной РНК ExtractRNA (Евроген, Россия) согласно протоколу производителя. Концентрации РНК определяли на спектрофотометре NanoDrop ND-1000 UV-Vis (ThermoScientific, США). Синтез кДНК на матрице РНК, амплификацию и детекцию проводили в одной пробирке при помощи набора реагентов для одноэтапного анализа транскриптов РНК OneTube RT-PCR SYBR (Евроген, Россия). Уровень транскрипционной активности генов определяли с помощью ПЦР в реальном времени на амплификаторе QuantStudio 5 (ThermoScientific, США). В качестве референтного выбрали ген 18SrRNA, который кодирует 18S субъединицу рРНК. В качестве праймеров применяли следующие последовательности.

Референтный ген 18SrRNA:

Праймер Forward – GTGACGGGTGACGGAGAATT;

Праймер Reverse – GACACTAATGCGCCCGGTAT.

Исследуемый ген HORVU5HrIG125450, кодирующий мембранный белок PM19L:

Праймер Forward – GCGTTCGGGATGTACGAGAT;

Праймер Reverse – GAACTCGTCAAGCTGAGCA.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки гипотезы о нормальном распределении использовали критерий Шапиро – Уилка. В ходе статистической обработки использовали параметрический критерий

Стьюдента и непараметрический расширенный критерий Манна–Уитни, когда длина вариационного ряда не превышала пяти значений в каждой повторности. Для расчета относительного уровня транскрипционной активности целевого гена использовали метод $2^{-\Delta\Delta CT}$. Наблюдаемые различия считали статистически значимыми при уровне значимости $p < 0.05$. Полученные экспериментальные данные проверяли на наличие выбросов, которые исключали из дальнейшего анализа. На диаграммах представлены средние значения \pm стандартные ошибки.

Вычисления проводили с использованием компьютерного пакета программ MicrosoftOfficeExcel 2016. Графические изображения созданы в программе SigmaPlot 11.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведена зависимость длины проростков от дозы на седьмые сутки после гамма-облучения. Отмечено, что при действии гамма-излучения в дозах 15 и 20 Гр длина ростков статистически значимо превышает контрольные значения. Показано, что максимальное увеличение длины ростка происходит при гамма-облучении семян в дозе 20 Гр (на 24% по сравнению с контролем). Облучение в дозе 50 Гр значительно снижает длину ростков, что свидетельствует о большом количестве возникших повреждений меристематических клеток зародыша и отражается на способности растений к росту.

На рисунке 2 показано изменение длины главного корня у проростков ячменя, облученных в тех же диапазонах доз.

Наблюдаются схожие результаты, как по длине ростка, максимальное увеличение длины главного корня на 25% по сравнению с контрольной группой также наблюдалось при облучении гамма-квантами в дозе 20 Гр. Как и в предыдущем случае, ионизирующее излучение в дозе 50 Гр оказывает угнетающее действие. Полученные данные хорошо соотносятся с результатами других исследований, выявленными при гамма-облучении злаковых растений [8].

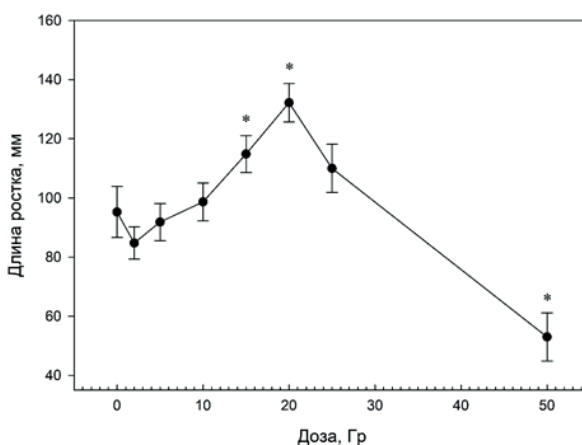


Рис. 1. Зависимость длины ростка облученных семян от дозы гамма-облучения на седьмые сутки проращивания: * – статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

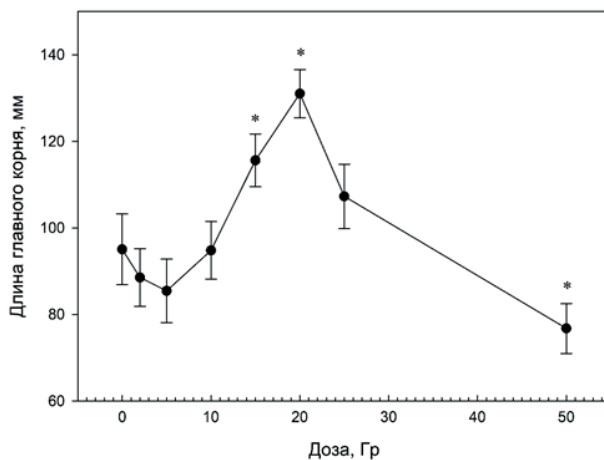


Рис. 2. Зависимость длины главного корня облученных семян от дозы гамма-облучения на седьмые сутки проращивания: * – статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

Слабые внешние воздействия гамма-излучения активируют внутриклеточные системы, что в свою очередь через сложную цепочку сигнальных путей приводит к изменению метаболических путей. При этом малые дозы вызывают такое воздействие на генетические структуры семян, которое может даже полностью нивелироваться репарационными системами растения [9].

Из рисунка 3 можно увидеть, что нет существенных различий между МИ у контрольных образцов и у гамма-облученных семян практически при всех исследуемых дозах гамма-облучения. Уменьшение МИ наблюдается только для дозы гамма-облучения в 50 Гр.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что стимулирующий эффект гамма-облучения в дозах 15 и 20 Гр, наблюдаемый по увеличению длины главного корня и роста, не связан с усилением деления клеток меристематических тканей про-

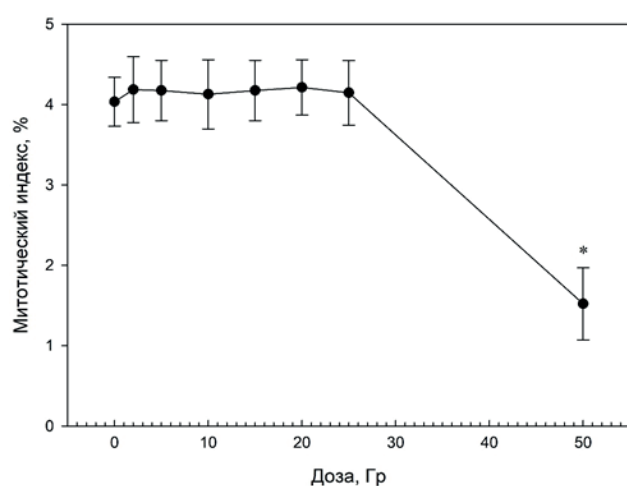


Рис. 3. Зависимость митотического индекса в корневой меристеме ячменя от дозы гамма-облучения на первые сутки прорастания: * – статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

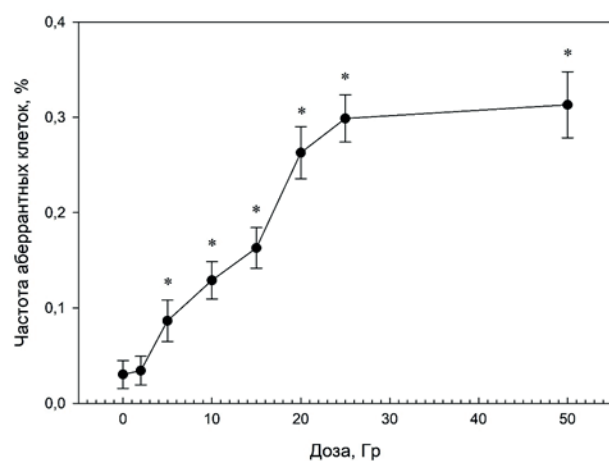


Рис. 4. Зависимость частоты абберрантных клеток в корневой меристеме ячменя от дозы гамма-облучения на первые сутки прорастания: * – статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

ростков *Hordeum vulgare* L. [10]. Данный эффект следует в таком случае объяснять не через повышение активности деления клеток в корневой меристеме, а через увеличение клеток растяжением. В защиту этой гипотезы говорит исследование [11], показавшее, что при гамма-облучении стимулирующими дозами семян ячменя сорта Нур повышаются уровни фитогормонов из группы ауксинов, которые отвечают за так называемый «кислый рост». При «кислом росте» происходит растяжение клеточных стенок за счет активизации ауксинами работы мембранных H^+ -АТФаз, что создает закисление пространства между плазмалеммой и клеточной стенкой. Под действием кислой среды активируются экспансины, разрушающие водородные связи между целлюлозными микрофибриллами, позволяя клетке расширяться под действием тургорного давления [10].

Результаты влияния гамма-облучения на ЧАК представлены на рис. 4.

Гамма-облучение привело к зависимому от дозы увеличению частоты клеток с хромосомными аномали-

ями в меристеме корней проростков ячменя обыкновенного, за исключением дозы гамма-облучения 2 Гр. Максимальная частота aberrантных клеток обнаружена после гамма-облучения в дозе 50 Гр. Также стоит отметить, что при дозе гамма-облучения 50 Гр у большей части просмотренных клеток были слипшиеся хромосомы, которые не были замечены при других исследуемых дозах. Объяснить это можно тем, что при таких повреждениях хромосомы вследствие набухания теряют свои нормальные очертания и слипаются, превращаясь в комковатые массы. В таком случае расхождения хромосом не происходит, и клетки погибают [12].

Изучение механизмов формирования эффекта радиационной стимуляции при облучении семян сельскохозяйственных культур на молекулярном уровне является перспективным подходом для поиска генов-кандидатов, задействованных в повышении продуктивности и стрессоустойчивости. Поэтому следующим этапом исследования стало изучение влияния гамма-облучения на транскрипционную активность гена HORVU5HrIG125450, кодирующего мембранный белок PM19L. Статистически значимое дозозависимое увеличение экспрессии данного гена наблюдается после гамма-облучения в дозах 15, 20, 25 и 50 Гр.

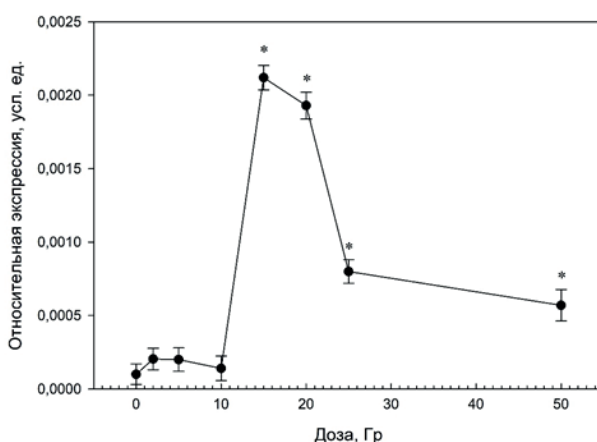


Рис. 5. Зависимость относительной экспрессии гена HORVU5HrIG125450, кодирующего мембранный белок PM19L в зародышах ячменя, от дозы гамма-облучения на первые сутки проращивания: * – статистически значимое отличие от контроля при $p < 0.05$

Как известно из исследований гена PIPM19L у пиона (*Paeonia lactiflora* Pall.) (гомологичного гену PM19L у *Hordeum vulgare* L.), он задействован в адапционных механизмах засухоустойчивости. Предполагается, что это возможно благодаря уменьшению количества перекиси водорода, прямым следствием чего является хорошо адаптированная работа ферментативных систем и улучшение способности к фотосинтезу в условиях стресса [13]. Также отмечено, что увеличение экспрессии этого мембранного белка ведет к увеличению концентрации абсцизовой кислоты (АБК), задействованной в стабилизации водного баланса [14]. АБК является основным соединением, переводящим растения и их органы в состояние покоя. Следовательно, возможным является то, что увеличение экспрессии рассматриваемого гена в дозах 15 и 20 Гр, которые являются стимулирующими по морфологическим показателям, хоть и вызывают накопление АБК на ранних этапах онтогенеза, в конечном итоге не приводит к задержке прорастания семян ячменя. Предположительно,

увеличение транскрипционной активности гена PM19L является частью генетической программы растения к адаптациям в условиях стресса абиотического происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках экспериментальной работы эффект стимуляции у ячменя обыкновенного сорта Ладны проявляется в дозах 15 и 20 Гр при равномерном облучении гамма-излучением мощностью 58 Гр/ч. Стимулирующий эффект по длине ростка и главного корня, который наиболее ярко выражен после облучения в дозе 20 Гр, связан с усилением роста клеток растяжением, а не с усилением митотического деления. Несмотря на отсутствие статистически значимых отличий МИ (за исключением дозы облучения гамма-квантами 50 Гр) увеличение клеток с хромосомными аномалиями имеет дозозависимый характер начиная с дозы гамма-облучения 5 Гр. Показано, что повышение уровней транскрипционной активности гена, кодирующего мембранный белок PM19L, происходит после гамма-облучения в диапазоне доз 15 – 50 Гр.

Литература

1. Лазаревич Н.В., Сергеева И.И., Лазаревич С.С. Радиобиология: курс лекций: в 4 ч. Ч.2. Радиобиология растений. – Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2011. – 84 с.
2. Volkova P.Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants. // Current Opinion in Toxicology. – 2022. – V. 30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>
3. Чурюкин Р.С., Гераськин С.А. Влияние облучения (^{60}Co) семян ячменя на развитие растений на ранних этапах онтогенеза. // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22. – № 3. – С.80–92.
4. Geras'kin S.A. Plant adaptation to ionizing radiation: Mechanisms and patterns. // The Science of the total environment. – 2024. – V. 916. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.170201](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170201)
5. Позняк Е.И. Исходный материал для селекции пивоваренного ячменя. // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2011. – № 47. – С. 240–247.
6. Бабаян Р.С. Проращивание семян в рулонах из фильтровальной бумаги и полиэтиленовой пленки. // Сельскохозяйственная биология. – 1981. – № 3. – С.473–475.
7. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. – М.: Агропромиздат, 1988. – 271 с.
8. Казакова Е.А., Макаренко Е.С., Подлуцкий М.С. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян. // Зерновое хозяйство России. – 2020. – № 2. – С. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28>
9. Волкова П.Ю. Изменения профиля экспрессии генов в зародышах гамма-облученных семян ячменя. / Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии. – М.: ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 2019. – С. 34–35.
10. Волкова П.Ю., Чурюкин Р.С., Казакова Е.А. Анализ митотической активности в корневой меристеме проростков γ -облученных семян ячменя. // Актуальные вопросы сельскохозяйственной радиобиологии: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. – 2019. – Т.2. – С. 98–100.
11. Битаршвили С.В., Волкова П.Ю., Гераськин С.А. Влияние гамма-облучения семян ячменя на содержание фитогормонов в динамике прорастания. // Физиология растений. – 2018. – Т. 65. – №3. – С.223–232.

12. Дикарев В.Г., Гераськин С.А., Дикарев А.В., Дикарева Н.С. Сравнительный анализ эффективности использования интеркалярных и апикальных меристем ячменя для биоиндикации генотоксического действия свинца. // Экологическая генетика. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 37–46.

13. Meng J. Analysis and Functional Verification of PIPM19L Gene Associated with Drought-Resistance in *Paenialactiflora* Pall. // International journal of molecular sciences. – 2022. – V. 23 DOI: 10.3390/ijms232415695

14. Битаршвили С.В. Экспрессия генов метаболизма фитогормонов в семенах ячменя после γ -облучения. / Современные вопросы радиационной генетики, Дубна, 27–28 июня 2019. – Дубна: ОИЯИ, 2019. – С.25–27.

Поступила в редакцию 08.04.2024

Авторы

Афонина Светлана Олеговна, начальник Центра биотехнологий,
E-mail: astakhina@list.ru

Атамановская Глафира Александровна, студент магистратуры,
E-mail: quinonfleret@yandex.ru

Комарова Людмила Николаевна, профессор Отделения биотехнологий, д.б.н.,
E-mail: komarova_l411@mail.ru

UDC: 631.8

Study of the Effect of Gamma Irradiation on the Morphological and Genetic Parameters of Barley

Afonina S.O., Atamanovskaya G.A., Komarova L.N.

IATE MEPHI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

One of the priority areas for the development of the Russian Federation is food security and sustainable development of the entire agro-industrial complex of our country. One of the ways to increase the economic efficiency of growing crops is pre-sowing irradiation of seeds. The purpose of this agricultural technique is to accelerate the growth and development of plants, shorten the growing season and increase yield. However, due to the instability of the stimulating effect in field and laboratory conditions, the technology of pre-sowing seed irradiation has not become widespread. In this regard, research is required to analyze the mechanisms of stimulation and justify the use of pre-sowing seed irradiation technology.

The present study identified the stimulating effect of gamma irradiation on the length of the shoot and main root of common barley at doses of 15 and 20 Gy. It has been demonstrated that gamma irradiation of barley seeds at doses of 2, 5, 10, 15, 20 and 25 Gy does not lead to a change in the mitotic index; irradiation at a dose of 50 Gy reduces the mitotic index by 2.5 times. A dose-dependent increase in the frequency of aberrant cells in the root meristem of germinated seeds after gamma irradiation was shown, with the exception of a gamma irradiation dose of 2 Gy. The transcriptional activity of the gene encoding the PM19L membrane protein in common barley embryos increased after gamma irradiation at doses of 15, 20, 25 and 50 Gy.

Keywords: food security, radiation stimulation, seeds, barley, gamma irradiation, shoot length, root length, mitotic index, aberrant cell frequency.

For citation: Afonina S.O., Atamanovskaya G.A., Komarova L.N. Study of the Effect of Gamma Irradiation on the Morphological And Genetic Parameters of Barley. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 166 – 174; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.13> (in Russian).

References

1. Lazarevich N.V., Sergeyeva I.I., Lazarevich S.S. *Radiobiology: course of lectures: 4 parts. Part 2. Radiobiology of plants*. Gorki. Belarusian State Agricultural Academy Publ., 2011, 84 p. (in Russian).
2. Volkova P.Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*. 2022, v. 30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>
3. Churyukin R.S., Geras'kin S.A. Effects of barley seed irradiation (^{60}Co) on the plant development. *Radiatsiya i risk*. 2013, v. 22, no. 3, pp. 80 – 92 (in Russian).
4. Geras'kin S.A. Plant adaptation to ionizing radiation: Mechanisms and patterns. *The Science of the total environment*. 2024, v. 916. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2024.170201](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170201)
5. Poznyak Ye.I. Source material for the selection of malting barley. *Zemlyadeliye i selektsiya v Belarusi*. 2011, no. 47, pp. 240 – 247 (in Russian).
6. Babayan R.S. Germination of seeds in rolls of filter paper and polyethylene film. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 1981, no. 3, pp. 473 – 475 (in Russian).
7. Pausheva Z.P. *Workshop on plant cytology*. Moscow. Agropromizdat Publ., 1988, 271 p. (in Russian).
8. Kazakova Ye.A., Makarenko Ye.S., Podlutskiy M.S. Radiosensitivity of varieties of winter and bright barley according to the severity of the morphological effect of low-dose gamma irradiation of original seeds. *Zernovoye khozyaystvo Rossii*. 2020, no. 2, pp. 23 – 28 DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28> (in Russian).
9. Volkova P.Yu. Modifications in the gene expression profile in the embryos of gamma-irradiated barley seeds. *Biotechnology in crop production, livestock production and agricultural microbiology*. Moscow, FGBNU, Apr. 15-16, 2019, pp. 34 – 35 (in Russian).
10. Volkova P.Yu., Churyukin R.S., Kazakova E.A. Analysis of mitotic activity in the root meristem of seedlings of gamma irradiated barley seedlings. *Aktualnyye voprosy selskokhozyaystvennoy radiobiologii: Trudy FGBNU VNIIRAE*. Obninsk, FGBNU VNIIRAE. 2019, v. 2, pp. 98 – 100 (in Russian).
11. Bitarishvili S.V., Volkova P.YU., Geras'kin S.A. Effects of the barley seed gamma irradiation on the content of phytohormones in the dynamics of germination. *Fiziologiya rasteniy*. 2018, v. 65, no. 3, pp. 223 – 232 (in Russian).
12. Dikarev V.G., Geras'kin S.A., Dikarev A.V., Dikareva N.S. Comparative analysis of the efficiency of using barley intercalary and apical meristems for bioindication of the genotoxic effect of lead. *Ekologicheskaya genetika*. 2018, v.16, no. 3, pp. 37 – 46 (in Russian).
13. Meng J. Analysis and Functional Verification of PIP19L Gene Associated with Drought-Resistance in *Paeonialactiflora* Pall. *International journal of molecular sciences*. 2022, v. 23. DOI: [10.3390/ijms232415695](https://doi.org/10.3390/ijms232415695)
14. Bitarishvili S.V. Expression of phytohormone metabolism genes in barley seeds after γ -irradiation. *Modern issues of radiation genetics, Dubna, June 27-28, 2019*. Dubna, OIYAI Publ., 2019, pp. 25 – 27 (in Russian).

Authors

Svetlana O. [Afonina](#), Head of the Biotechnology Center

E-mail: astakhina@list.ru

Glafira A. [Atamanovskaya](#), master's student,

E-mail: quinonfleret@yandex.ru

Luidmila N. [Komarova](#), Professor at the Department of Biotechnology, Dr. Sci. (Biology),

E-mail: komarova_l411@mail.ru