

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-37-44>
УДК: 635.652.2:631.531.027.34

О.А. Коцюбинская^{1*}, Е.В. Бондаренко²,
Н.Г. Казыдуб¹, Я.А. Блинова²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» (Омский ГАУ) 644008, Россия, г. Омск, Институтская пл., д. 1

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ) 249035, Россия, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1

*Автор для переписки: oa.kotsyubinskaya@omgau.org

Вклад авторов: Коцюбинская О.А.: существенный вклад в замысел и дизайн исследования, подготовка и выполнение экспериментальных работ, сбор данных, анализ и интерпретация результатов, подготовка статьи. Бондаренко Е.В.: существенный вклад в дизайн исследования, статистическая обработка, визуализация, анализ и интерпретация данных, подготовка статьи. Казыдуб Н.Г.: существенный вклад в замысел и дизайн исследования, руководство планированием и выполнением исследования, анализ и интерпретация результатов, редактирование рукописи. Блинова Я.А.: подготовка семян к облучению, статистическая обработка и анализ данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Благодарности. Соавторы благодарят канд. биол. наук Чича Тараса Васильевича (НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ) за облучение семян.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Коцюбинская О.А., Бондаренко Е.В., Казыдуб Н.Г., Блинова Я.А. Влияние гамма-облучения семян на развитие растений *Phaseolus vulgaris* L. *Овощи России*. 2025;(1):37-44. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-37-44>

Поступила в редакцию: 11.07.2024

Принята к печати: 28.10.2024

Опубликована: 28.12.2024

Olga A. Kotsyubinskaya^{1*},
Ekaterina V. Bondarenko², Nina G. Kazydub¹,
Yana A. Blinova²

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Ploshchad, Omsk,
Omsk region, 644008, Russia

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre "Kurchatov Institute" 249035, 1, building 1, Kievskoe shosse, Obninsk, Kaluga region, Russia

*Correspondence Author:

oa.kotsyubinskaya@omgau.org

Authors' Contribution: Kotsyubinskaya O.A.: conceptualization, planning and execution of experimental works, data collection, analysis and interpretation of results, manuscript writing. Bondarenko E.V.: conceptualization, statistical processing, visualization, analysis and interpretation of data, manuscript writing. Kazydub N.G.: conceptualization, supervision of planning and execution of the study, analysis and interpretation of results, manuscript editing. Blinova Ya.A.: preparation of seeds for irradiation, statistical processing and analysis of data. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Acknowledgments. The co-authors thank the cand. of biol. sciences Taras Chizh (NRC "Kurchatov Institute" – RIRAE) for irradiation of seeds.
Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kotsyubinskaya O.A., Bondarenko E.V., Kazydub N.G., Blinova Ya.A. Effect of gamma irradiation of seeds on the development of *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(1):37-44. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-37-44>

Received: 11.07.2024

Accepted for publication: 28.10.2024

Published: 28.12.2024

Влияние гамма-облучения семян на развитие растений *Phaseolus vulgaris* L.

Check for updates



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Современное направление селекции фасоли сфокусировано на увеличении содержания белка в семенах и зеленых бобах, а также витаминов, фолиевой кислоты, биологически активных веществ и антиоксидантов, улучшении органолептических свойств и уменьшении содержания антипитательных веществ. При создании исходного материала для селекции важны такие признаки, как: устойчивость к биотическим и абиотическим факторам, стабильный высокий урожай, технологичность, кустовой тип и прямостоячая форма, высокая симбиотическая активность. Эффективным подходом к увеличению генетического разнообразия исходного материала является радиационный мутагенез. Цель исследований – изучить влияние γ -облучения семян на всхожесть, морфометрические параметры и продолжительность фенотипических фаз отечественных сортов фасоли, и определить оптимальные дозы γ -излучения для протокола радиационного мутагенеза. **Материалы и методы.** Объекты исследования – 3 сорта фасоли селекции Омского ГАУ. Семена были γ -облучены (источник – ^{60}Co) в дозах 50–200 Гр (мощность дозы 60 Гр/час). Семена проращивали в контролируемых условиях; оценивали энергию прорастания и всхожесть. У проростков измеряли длину гипокотилля, количество и длину корней. У растений оценивали продолжительность фаз развития и продуктивность. Статистический анализ проводили в R (вер. 4.3.3) и MS Office Excel 2019.

Результаты. Для дозы γ -излучения 50 Гр отмечен гормезисный эффект, который проявился в более высоких значениях энергии прорастания и всхожести семян (сорт Памяти Рыжковой), длины гипокотилля (сорта Маруся и Памяти Рыжковой) и в уменьшении продолжительности фенотипических фаз (сорт Омский Рубин). Гамма-облучение во всех применимых дозах статистически значимо ингибировало развитие корней. Длина корней, как наиболее чувствительный к облучению параметр, была выбрана для расчета дозы, вызывающей 50-процентное сокращение роста (RD50). Для сорта Маруся RD₅₀ составила 40 Гр, для сортов Памяти Рыжковой и Омский Рубин – 60 Гр.

Заключение. В реакции на облучение семян установлена сортоспецифичность. Для изучения гормезисных эффектов γ -облучения семян фасоли могут быть использованы дозы 50 Гр и менее (10–50 Гр). Дозы 100 и 200 Гр оказались летальны. В протоколах радиационного мутагенеза отечественных сортов фасоли рекомендуются стартовые дозы 40–60 Гр.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

радиобиология, радиационный мутагенез, ионизирующее излучение, фасоль зерновая, фасоль овощная, гормезис

Effect of gamma irradiation of seeds on the development of *Phaseolus vulgaris* L. plants

ABSTRACT

Relevance. The modern direction of bean breeding is focused on increasing the protein content in seeds and green beans, as well as vitamins, folic acid, biologically active substances and antioxidants, improving organoleptic properties and reducing the content of anti-nutritional substances. When creating the initial material for breeding, the following traits are important: resistance to biotic and abiotic factors, stable high yield, technological effectiveness, bush type and upright form, high symbiotic activity. An effective approach to increasing the genetic diversity of the initial material is radiation mutagenesis.

Purpose of research. To study the effect of γ -irradiation of seeds on germination, morphometric parameters and duration of phenophases of Russian bean varieties and to determine the optimal dose of γ -irradiation for the radiation mutagenesis protocol.

Materials and Methods. Objects of the study – 3 bean varieties bred by Omsk State Agrarian University. The seeds were γ -irradiated (source – ^{60}Co) at doses of 50–200 Gy (dose rate 60 Gy/hour). The seeds were germinated under controlled conditions; germination energy and germination were assessed. The hypocotyl length, number and length of roots were measured in seedlings. The duration of development phases and productivity of plants were assessed. Statistical analysis was performed in R (ver. 4.3.3) and MS Office Excel 2019.

Results. Hormesis effect was noted for 50 Gy γ -irradiation dose, which was manifested in higher values of germination energy and seed germination (variety Pamyati Ryzhkova), hypocotyl length (variety Marusya and Pamyati Ryzhkova) and in a decrease in the phenophases duration (variety Omskiy Rubin). Gamma irradiation at all applicable doses statistically significantly inhibited root development. Root length, as the most sensitive parameter to radiation, was chosen to calculate the dose causing a 50% growth reduction (RD50). For the Marusya variety, RD50 was 40 Gy, for the Pamyati Ryzhkova and Omskiy Rubin varieties – 60 Gy.

Conclusion. Variety specificity was established in the reaction to seed irradiation. Doses of 50 Gy or less (10–50 Gy) can be used to study the hormetic effects of γ -irradiation of bean seeds. Doses of 100 and 200 Gy turned out to be lethal. Starting doses of 40–60 Gy are recommended for the radiation mutagenesis protocols of Russian bean varieties.

KEYWORDS:

radiobiology, radiation mutagenesis, ionizing radiation, grain beans, vegetable beans, hormesis

Введение

Успешная работа селекционера растений зависит, во многом, от исходного материала и от достаточного разнообразия целевого признака. Увеличить генетическое разнообразие можно с помощью индуцированного мутагенеза. В конце 1920-х годов Л. Стадлер показал, что ионизирующее излучение способно индуцировать мутации у растений [1], вследствие чего в середине/второй половине прошлого столетия использование ионизирующего излучения для индукции мутаций внесло значительный вклад в глобальную продовольственную безопасность и адаптацию сельскохозяйственных культур к изменению климата. Одним из доказательств этого утверждения служит база данных мутантных сортов, поддерживаемая объединенным центром Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), как хранилище информации об официально выпущенных мутантных сортах сельскохозяйственных культур (<http://mvgs.iaea.org>). К настоящему времени из 3 433 полученных с помощью мутационной селекции сортов для *Phaseolus vulgaris* L. зарегистрировано 59 записей, из них всего 4 принадлежат СССР/Российской Федерации и только 2 были получены при помощи радиационного мутагенеза: мутантный сорт Харьковская-8 (1985 год; γ -облучение в дозе 150 Гр) и Сапарке-75 (1967 год; γ -облучение в дозе 70 Гр).

Благодаря прогрессу молекулярной генетики, современным геномным и биоинформатическим подходам и новым знаниям молекулярных основ мутагенеза, с начала XXI века мутационная селекция претерпевает свое возрождение. Создание новых мутантных сортов сельскохозяйственных культур, в том числе фасоли, необходимо для сохранения урожайности в условиях изменения климата (потепления, частых засух, быстрого засоления почв и трансграничного распространения вредителей и болезней).

Практические успехи селекции за последние годы свидетельствуют об имеющемся потенциале повышения продуктивности сортов растений. Однако идеальных сортов нет в производстве, их создание считается делом отдаленной перспективы. Современное направление селекции фасоли нацелено на увеличение содержания белка в семенах и зеленых бобах, а также витаминов, фолиевой кислоты, биологически активных веществ, антиоксидантов, улучшение органолептических свойств и уменьшение содержания антипитательных веществ и т. д. При создании исходного материала для селекции также важны следующие признаки:

устойчивость к биотическим и абиотическим факторам, стабильный высокий урожай, технологичность, кустовой тип и прямостоячая форма [2-5]. Кроме представленных признаков отбор исходного материала фасоли обыкновенной ведется на высокую симбиотическую активность [6, 7]. Высокоэффективные растительно-микробные системы в агроценозах могут создаваться путем селекции новых сортов бобовых с высоким симбиотическим потенциалом [7] или путем выращивания органическим способом [8].

Учитывая межвидовые и внутривидовые различия в уровне радиочувствительности [9], для успешного применения γ -излучения в качестве мутагенного агента в селекции фасоли необходимо проведение ряда радиобиологических исследований. Целью данного исследования является изучение влияния γ -облучения семян на всхожесть, морфометрические параметры и продолжительность фазов отечественных сортов фасоли и определение оптимальной дозы γ -излучения для протокола радиационного мутагенеза.

Материалы и методы

Объектами исследования стали сорта *Phaseolus vulgaris* L. селекции Омского ГАУ: 2 сорта фасоли овощной: Маруся, Памяти Рыжковой, и сорт фасоли зерновой – Омский Рубин [10-12].

Сухие семена (урожай 2023 года) фасоли подвергли γ -облучению на уникальной научной установке ГУР-120 (источник – ^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ) в дозах 50, 100 и 200 Гр с мощностью дозы 60 Гр/час в трех повторностях (по 35 семян в каждой). Диапазон доз выбирался, исходя из рекомендуемых для облучения семян фасоли доз 80-160 Гр [13].

После облучения семена проращивали на песке в контролируемых условиях при температуре 22...23°C в термостате учебной лаборатории ФГБОУ ВО Омского ГАУ. Посевные качества семян устанавливали по ГОСТ-12038-84: энергию прорастания определяли на 4-е сутки, всхожесть – на 7-е сутки.

У 50 проростков каждой группы измеряли длину hypocotyle, количество и длину корней на 7-е сутки.

Для оценки последующих фаз развития и семенной продуктивности по 15 растений каждой группы (по 60 растений каждого сорта) пересаживали в кассеты и стаканчики, наполненные почвосмесью для овощной рассады. Растения выращивались при освещении люминесцентными лампами (OSRAM Fluora) в условиях 24-ти часового светового периода при температуре 22-23 °C и влажности 85-90,5%.

Для статистического анализа использовали среду программирования R версии 4.3.3 и MS Office Excel 2019. Гипотезу о нормально распределенной совокупности проверяли при выполнении теста Шапиро-Уилка. После подтверждения необходимости применения непараметрических подходов для сравнения показателей исследуемых сортов применяли непараметрический дисперсионный анализ (критерий Крускала-Уоллеса с апостериорным тестом Данна (с поправкой на множественность FDR (False Discovery Rate))). Для попарного сравнения использовался тест Манна-Уитни (U -тест). Корреляционный анализ выполнен при помощи ранговой корреляции Спирмена. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Сравнение данных в описании результатов приве-

дены в виде медианы и межквартильного размаха (Me [IQR]).

Результаты и обсуждение

Гамма-облучение семян фасоли не повлияло на энергию прорастания и всхожесть семян сорта Маруся (табл. 1). Облучение в дозе 50 Гр статистически значимо увеличило оба оцениваемых параметра прорастания у сорта Памяти Рыжковой. Для семян сорта Омский Рубин доза 100 Гр статистически значимо ингибировала энергию прорастания (табл. 1). Ингибирующий эффект, однако, был менее очевиден на 7-ой день после закладки на прорастание.

Следует отметить, что изучаемые сорта различаются по энергии прорастания и всхожести семян

Таблица 1. Энергия прорастания и всхожесть семян фасоли в зависимости от доз облучения, %
Table 1. Germination energy and germination capacity of bean seeds depending on irradiation doses, %

Дозы, Гр	Маруся		Памяти Рыжковой		Омский Рубин	
	Me	IQR	Me	IQR	Me	IQR
Энергия прорастания, %						
контроль	31,4	8,6	25,7	11,5	82,9	12,9
50	48,6	10,0	48,6*(p=0,02)	7,2	20,0	10,0
100	42,9	11,5	37,1	8,6	14,3*(p=0,01)	10,0
200	42,9	18,6	34,3	15,8	77,1	8,6
Всхожесть, %						
контроль	57,1	8,6	45,7	5,8	80,0	5,7
50	54,3	8,6	57,1*(p=0,03)	5,7	25,7	11,4
100	65,7	12,9	51,4	8,6	25,7	5,7
200	54,3	12,9	42,9	17,2	94,3	7,2

Me – медиана; IQR – межквартильный размах / Me – median; IQR – interquartile range

* – статистически значимые различия от контроля (критерий Манна-Уитни) / * – statistically significant differences from control (Mann-Whitney test)

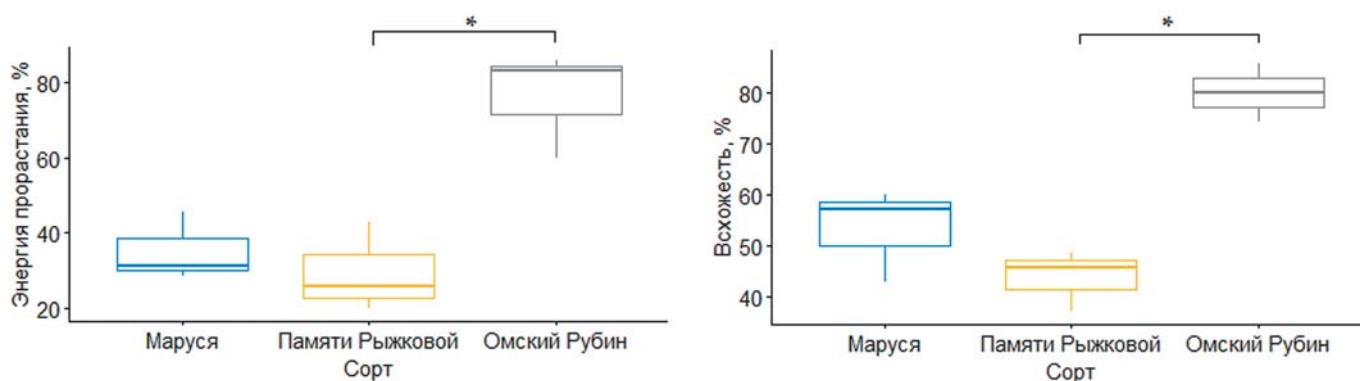


Рис. 1. Энергия прорастания и всхожесть контрольных групп семян фасоли

* – статистически значимые различия (критерий Манна-Уитни, $p < 0,05$)

Fig. 1. Germination energy and germination capacity of control bean seeds

* – statistically significant differences (Mann-Whitney test, $p < 0,05$)

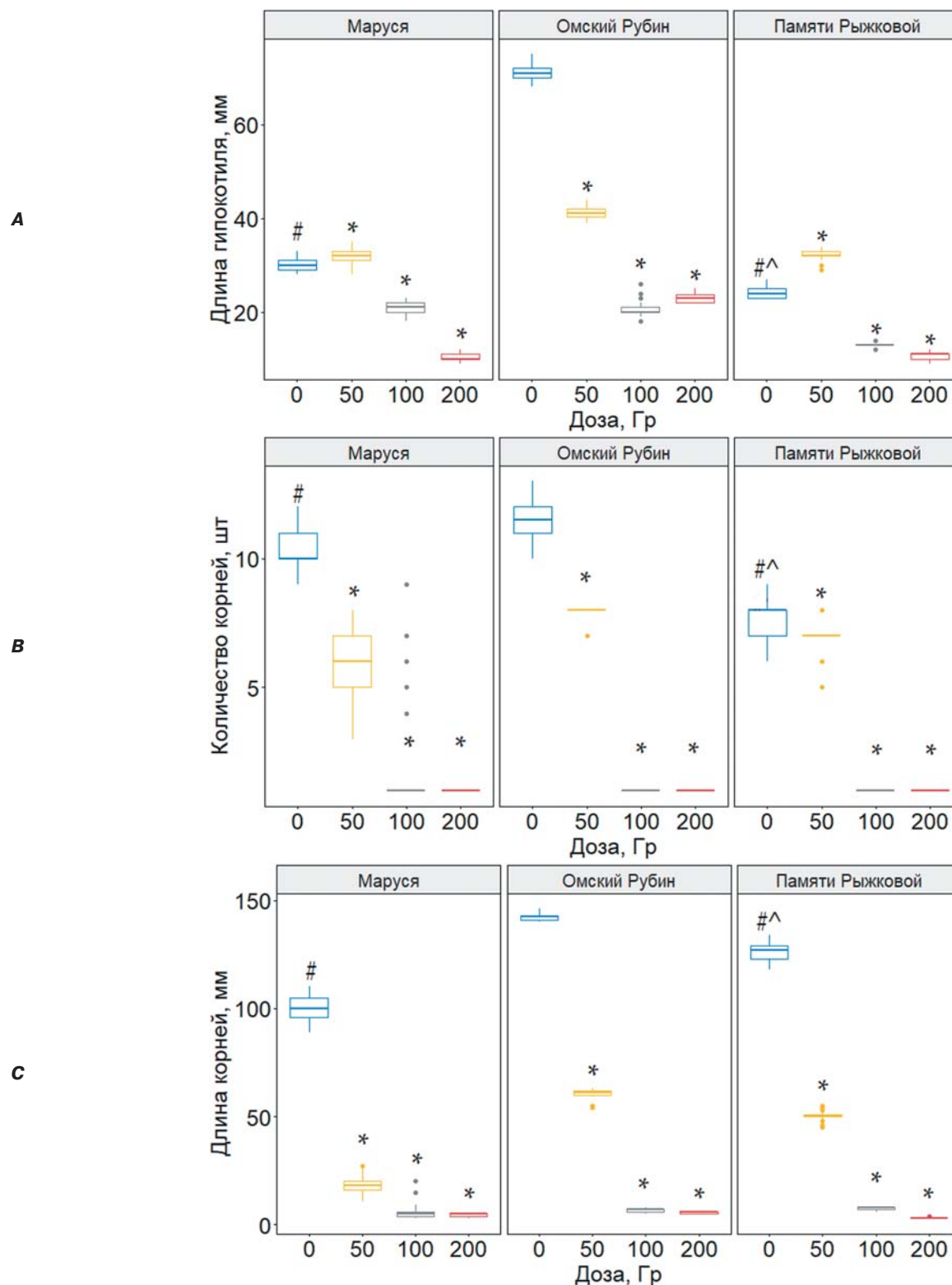


Рис. 2. Длина hypocotила, количество и длина корней у проростков, выросших из γ -облученных семян
 * – статистически значимые различия от контроля (0) того же генотипа, № – статистически значимые различия от контроля сорта Омский Рубин, ^ – статистически значимые различия от контроля сорта Маруся (критерий Крускала-Уоллеса)
Fig. 2. Hypocotyl length, number and length of roots in seedlings grown from γ -irradiated seeds
 * – statistically significant differences from the control (0) of the same genotype, № – statistically significant differences from the control variety Omskiy Rubin, ^ – statistically significant differences from the control variety Marusya (Kruskal-Wallis test)

в контроле. Наилучшие показатели (82,9 и 80,0 %, соответственно) отмечены для фасоли зерновой Омский Рубин (рис. 1).

Дальнейшее развитие проростков оценивали по длине hypocotила, количеству и длине корней. В контроле исследуемые сорта статистически значимо различались по этим параметрам (рис. 2A-C).

Наибольшие значения зафиксированы для сорта Омский Рубин. Между сортами фасоли овощной также отмечены статистически значимые различия: сорт Маруся выделяется большей длиной hypocotила (30[2] мм) и количеством корней (10[1] шт.), по сравнению с сортом Памяти Рыжковой (24[2] мм и 8[1] шт., соответственно). Несмотря на меньшее

количество боковых корней, общая длина корней статистически значимо выше у сорта Памяти Рыжковой (127[6] мм) по отношению к сорту Маруся (100[9] мм).

Гамма-облучение во всех применимых дозах статистически значимо влияло на длину hypocotyla, количество и длину корней у всех исследованных

сортов. Дозозависимый ингибирующий эффект на количество и длину корней зарегистрирован для всех трех сортов. Снижение длины корней в зависимости от дозы и мощности дозы описано у люпина желтого при изучении влияния γ -облучения семян на внутрисортную изменчивость количественных признаков [13].

A



B



C



Рис. 3. Примеры развития корневой системы сортов
A) Маруся, B) Памяти Рыжковой, C) Омский Рубин
К – контроль (необлученный), 1-50 – облученные в дозе 50 Гр,
2-100 – облученные в дозе 100 Гр, 3-200 – облученные в дозе 200 Гр
Fig. 3. Examples of the root system development in varieties
A) Marusya, B) Pamyati Ryzhkovoj, C) Omskij Rubin
К – control (non-irradiated), 1-50 – irradiated at a dose of 50 Gy,
2-100 – irradiated at a dose of 100 Gy, 3-200 – irradiated at a dose of 200 Gy

Пример развития корневой системы фасоли представлен на рисунке 3. Под влиянием γ -облучения в дозах 100 и 200 Гр корневая система не развивалась и растения погибали.

В случае с длиной hypocotyle, кроме ингибирующего эффекта в дозах 100 и 200 Гр, отмечено явное стимулирующее действие в дозе 50 Гр для сортов фасоли овощной Маруся и Памяти Рыжковой (рис. 2А), что интересно, так как считается, что hypocotyle относительно нечувствителен к облучению, поскольку рост здесь определяется главным образом удлинением клеток, а не их делением [9, стр. 173].

Корреляционный анализ показал статистически значимую положительную корреляцию между длиной hypocotyle и длиной корней как в контроле ($\rho=0,45$ при $p<0,0001$), так и у облученных проростков (Маруся: $\rho=0,75$ при $p<0,0001$; Памяти Рыжковой: $\rho=0,77$ при $p<0,0001$; Омский Рубин: $\rho=0,82$ при $p<0,0001$). Следует отметить, что сила корреляции выше у облученных растений.

Влияние облучения проявилось и на длине растений во время образования бутонов (рис. 4). В контроле наивысшие значения этого параметра зарегистрированы у сорта зерновой фасоли Омский Рубин (52[5,5] см), а наименьшие – у сорта Маруся (20[3] см). Гамма-излучение в дозе 50 Гр статистически значимо ингибировало длину растений на стадии образования бутонов у всех исследованных генотипов (рис. 4).

Вследствие нарушений развития корней, из 630 семян трех сортов, облученных в дозах 100 и 200 Гр, выжило только 6 растений сорта Омский Рубин в группе 100 Гр. Длина этих 6 растений была статистически значимо больше, чем в контрольной группе: 73,5[13,5] см и 52[5,5] см, соответственно (рис. 4).

Облучение семян изменило сроки наступления и продолжительность фаз. У сорта Маруся период «образование бутонов – цветение» длился 30 суток в контрольной группе и 34 – в группе 50 Гр;

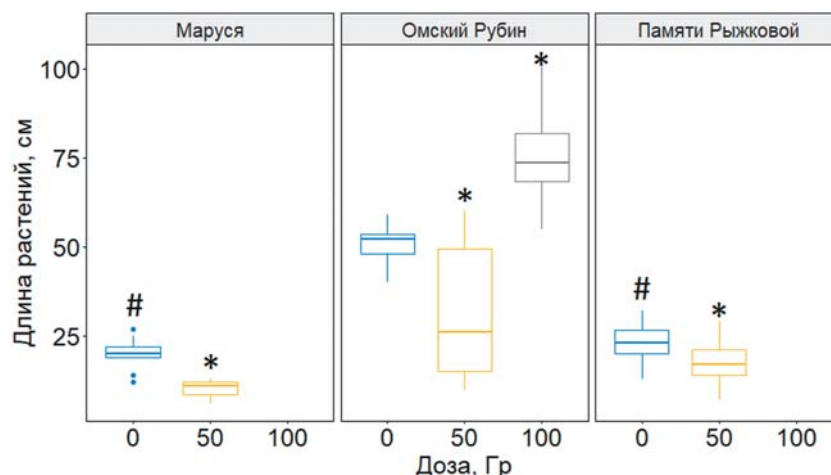


Рис. 4. Длина растений во время образования бутонов

* – статистически значимые различия от контроля (0) того же генотипа, № – статистически значимые различия от контроля сорта Омский Рубин (критерий Крускала-Уоллеса)

Fig. 4. Plant length during bud formation

* – statistically significant differences from the control (0) group of the same genotype, № – statistically significant differences from the control group of the variety Omskiy Rubin (Kruskal-Wallis test)

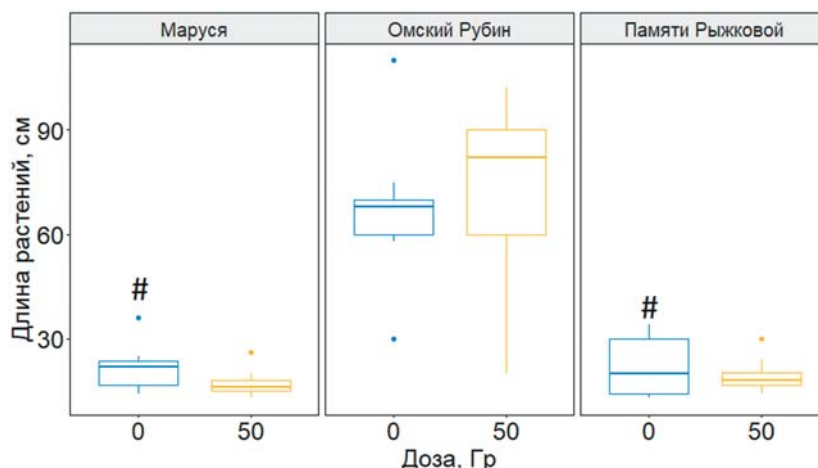


Рис. 5. Длина растений во время развития бобов

№ – статистически значимые различия от контроля сорта Омский Рубин (критерий Крускала-Уоллеса)

Fig. 5. Plant length during bean formation

№ – statistically significant differences from the control group of the variety Omskiy Rubin (Kruskal-Wallis test)

период «цветение – техническая спелость» увеличился с 44 суток в контроле до 52 суток в группе облучения; вегетационный период также увеличился до 109 суток у облученных растений, в сравнении с 92 у необлученных. У сорта Памяти Рыжковой не отмечено явных изменений в периоде «образование бутонов – цветение»; продолжительность «цветение – техническая спелость» и вегетационный период увеличились на 2 суток (с 48 и 90 суток в контроле до 50 и 92 суток в группе облучения, соответственно). Для сорта Омский Рубин, наоборот, отмечено ускорение переходов фаз под влиянием γ -облучения в дозе 50 Гр: период «образование бутонов – цветение» и вегетационный период уменьшились с 37 и 92 суток в контроле до 35 и 89 суток у облученных растений, соответственно.

Длина растений повторно измерялась во время образования бобов (рис. 5). Не отмечено статистически значимого влияния γ -излучения в дозе 50 Гр на этот показатель, в то время как влияние генотипа сохранилось (из необлученных растений наибольшие значения длины зарегистрированы у сорта Омский Рубин – 68[10] см, по сравнению с 22[7] см у сорта Маруся и 20[16] см у Памяти Рыжковой).

Из шести выживших растений сорта Омский Рубин в группе 100 Гр только одно растение зацвело (рис. 6) и образовало 1 боб с 1 семенем.

В результате исследований были получены семена М2 сортов фасоли овощной Маруся, Памяти Рыжковой и фасоли зерновой Омский рубин, высеянные в июне 2024 года в поле Учебно-опытного хозяйства Омского ГАУ для дальнейшего наблюдения.

Таким образом, в ходе пилотного эксперимента по γ -облучению трех сортов *P. vulgaris* L. селекции Омского ГАУ в дозах 50, 100 и 200 Гр, для дозы 50 Гр отмечен гормезисный эффект [14], который проявился в более высоких значениях энергии прорастания и всхожести семян (сорт Памяти Рыжковой), длины hypocotyla (сорта Маруся и Памяти Рыжковой) и в уменьшении продолжительности фенофаз (сорт Омский Рубин). Дозы менее 50 Гр, возможно, проявят более выраженный стимулирующий эффект. Для сортов фасоли турецкой селекции, к примеру, показано, что γ -облучение семян в дозах 10 и 20 Гр нивелировали негативные последствия выращивания на фоне засухи и улучшили вегетативный рост за счет изменений аминокислотного профиля [15]. Участие свободных аминокислот (γ -аминомасляная кислота, β -аланин, аргинин, лизин, глутамин, метионин) и сигнальной молекулы метилглиоксала в проявлении эффекта

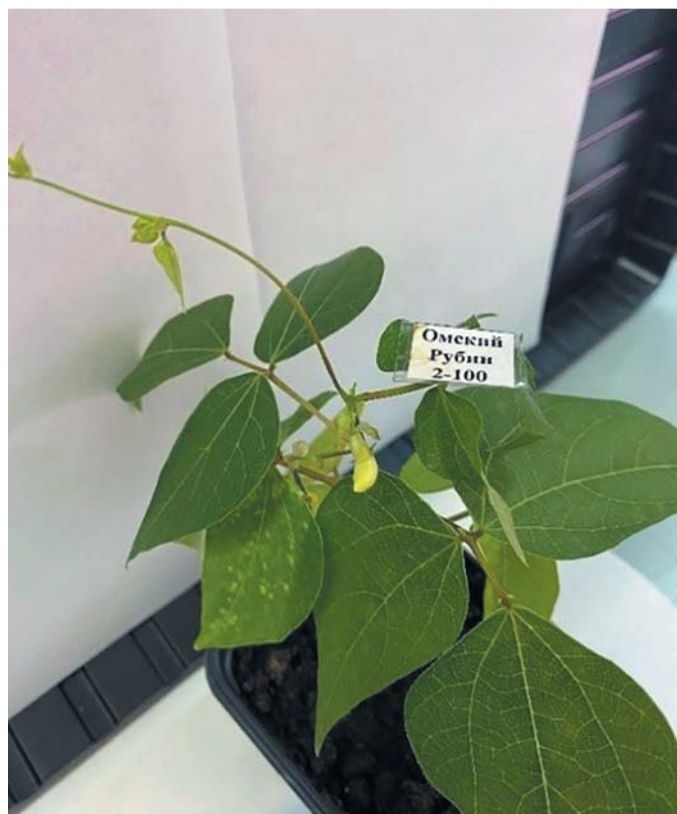


Рис. 6. Образование бутона у растения сорта Омский Рубин в группе облучения 100 Гр
Fig. 6. Bud development in a plant of the Omskiy Rubiny variety in the 100 Gy irradiation group

радиационного гормезиса после малых доз γ -облучения было также доказано для семян ячменя [16].

Гамма-облучение во всех применимых дозах статистически значимо ингибировало развитие корней, поэтому длина корней, как наиболее чувствительный к облучению параметр, была выбрана для расчета RD_{50} (50% growth reduction dose) – дозы, вызывающей 50-процентное сокращение роста. Для сорта Маруся RD_{50} составила примерно 40 Гр и 60 Гр – для сортов Памяти Рыжковой и Омский Рубин.

Заключение

Установлена сортоспецифичность в реакции на облучение семян, в большей степени выделив сорт фасоли зерновой Омский Рубин, который оказался более устойчив, чем сорта фасоли овощной Памяти Рыжковой и Маруся.

Для изучения гормезисных эффектов γ -облучения семян фасоли, в том числе в комбинации с другими стрессовыми факторами (дефицит воды, повышенные температуры, засоление) могут быть использованы дозы 50 Гр и менее (10-50 Гр).

В протоколах радиационного мутагенеза отечественных сортов фасоли рекомендуются стартовые дозы 40-60 Гр. Дозы 100 и 200 Гр оказались летальными.

• Литература

1. Stadler L.J. Mutations in Barley Induced by X-Rays and Radium. *Science*. 1928;68(1756):186–7.
2. Beaver J.S., Osorno J.M. Achievements and limitations of contemporary common bean breeding using conventional and molecular approaches. *Euphytica*. 2009;(168):145–175. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9911-x>
3. Казыдуб Н.Г., Кузьмина С.П., Уфимцева С.В., Смирнов И.В. Сортовые и технологические особенности выращивания фасоли обыкновенной на семена в южной лесостепи западной Сибири как фактор устойчивости сельских территорий. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2020;(84):164–168. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-84-164-168> <https://www.elibrary.ru/vauozo>
4. Lanna A.C., Silva R.A., Ferraresi T.M., Mendonça J.A., Coelho G.R.C., Moreira A.S., Valdisser P.A.M.R., Brondani C., Vianello R.P. Physiological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under abiotic stresses for breeding purposes. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(31):31149–31164. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3012-0>
5. Appiah-Kubi D., Asibuo J.Y., Butare L., Yeboah S., Appiah-Kubi Z., Kena A.W., Tuffour H.O., Akromah R. Heat Stress Tolerance: A Prerequisite for the Selection of Drought- and Low Phosphorus-Tolerant Common Beans for Equatorial Tropical Regions Such as Ghana. *Plants*. 2022;11(18):2352. <https://doi.org/10.3390/plants11182352>
6. Garipova S.R., Markova O.V., Samigullin S.N. Productiveness and nodule ability of different varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Urals conditions. *Agricultural Biology*. 2015;50(1):55–62. <https://doi.org/10.15389/agrobio.2015.1.55rus> <https://elibrary.ru/tneopj>
7. Якубенко О.Е., Паркина О.В., Ван Ч., Нгуен Н. Оценка сортов фасоли овощной (*Phaseolus vulgaris*) на адаптивность и клубенькообразующую способность в условиях лесостепи Приобья. *Овощи России*. 2023;(2):35–40. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-2-35-40> <https://elibrary.ru/rifaws>
8. Park H.E., Nebert L., King R.M., Busby P., Myers J.R. Influence of organic plant breeding on the rhizosphere microbiome of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Front Plant Sci*. 2023;14:1251919. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1251919>
9. Shu Q.Y., Forster B.P., Nakagawa H. Plant mutation breeding and biotechnology. Cambridge, Mass: CAB International; 2012. 608 p.
10. Казыдуб Н.Г., Коцюбинская О.А., Коваленко А.Н. Агроэкологический паспорт сорта фасоли овощной Маруся. *Овощи России*. 2022;(1):39–45. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-1-39-45> <https://elibrary.ru/clijzz>
11. Коцюбинская О.А., Казыдуб Н.Г., Антошкин А.А. Продуктивность сортов фасоли овощной селекции Омского ГАУ в южной лесостепи Западной Сибири. *Овощи России*. 2020;(1):64–69. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-1-64-69> <https://elibrary.ru/byscfn>
12. Казыдуб Н.Г., Коцюбинская О.А., Кузьмина С.П., Плетнева М.М. Фасоль зерновая и овощная в Западной Сибири: селекция, агротехника, использование. Омск : Омский ГАУ, 2022. 226 с. ISBN 978-5-907507-38-8. <https://elibrary.ru/aggctw>
13. Новик Н.В., Гераскин С.А., Якуб И.А. Влияние γ -облучения семян на внутрисортовую изменчивость количественных признаков люпина желтого. *Радиационная биология. Радиозкология*. 2022;62(6):620–628. <https://doi.org/10.31857/S086980312206008X> <https://elibrary.ru/xisbra>
14. Volkova P.Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*. 2022;(30):100334. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>
15. Ulukapi K., Nasircilar A.G. Hormetic Response of Low Dose Gamma on *Phaseolus Vulgaris* L. Under Drought Stress: Proteinogenic Amino Acids Profile. *Gesunde Pflanzen*. 2023;(75):1087–1098. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00769-1>
16. Pishenin I., Gorbatova I., Kazakova E., Podobed M., Mitsenik A., Shesterikova E., Dontsova A., Dontsov D., Volkova P. Free Amino Acids and Methylglyoxal as Players in the Radiation Hormesis Effect after Low-Dose γ -Irradiation of Barley Seeds. *Agriculture*. 2021;(11):918. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100918>

• References

1. Stadler L.J. Mutations in Barley Induced by X-Rays and Radium. *Science*. 1928;68(1756):186–7.
2. Beaver J.S., Osorno J.M. Achievements and limitations of contemporary common bean breeding using conventional and molecular approaches. *Euphytica*. 2009;(168):145–175. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9911-x>
3. Kazydub N.G., Kuzmina S.P., Ufimtseva S.V., Smirnov I.V. Study of some receipts of making new varieties of fruits on seeds in conditions of southern forest-steppe of Western Siberia. *Proceedings of the Kuban State Agricultural University*. 2020;(84):164–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1999-1703-84-164-168> <https://www.elibrary.ru/vauozo>
4. Lanna A.C., Silva R.A., Ferraresi T.M., Mendonça J.A., Coelho G.R.C., Moreira A.S., Valdisser P.A.M.R., Brondani C., Vianello R.P. Physiological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under abiotic stresses for breeding purposes. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(31):31149–31164. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3012-0>
5. Appiah-Kubi D., Asibuo J.Y., Butare L., Yeboah S., Appiah-Kubi Z., Kena A.W., Tuffour H.O., Akromah R. Heat Stress Tolerance: A Prerequisite for the Selection of Drought- and Low Phosphorus-Tolerant Common Beans for Equatorial Tropical Regions Such as Ghana. *Plants*. 2022;11(18):2352. <https://doi.org/10.3390/plants11182352>
6. Garipova S.R., Markova O.V., Samigullin S.N. Productiveness and nodule ability of different varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Urals conditions. *Agricultural Biology*. 2015;50(1):55–62. <https://doi.org/10.15389/agrobio.2015.1.55rus> <https://elibrary.ru/tneopj>
7. Yakubenko O.E., Parkina O.V., Wang Zh., Nguyen N. Evaluation of green beans (*Phaseolus vulgaris*) varieties for adaptability and noble-forming ability in the conditions of the forest-steppe of Western Siberia. *Vegetable crops of Russia*. 2023;(2):35–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-2-35-40> <https://elibrary.ru/rifaws>
8. Park H.E., Nebert L., King R.M., Busby P., Myers J.R. Influence of organic plant breeding on the rhizosphere microbiome of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Front Plant Sci*. 2023;14:1251919. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1251919>
9. Shu Q.Y., Forster B.P., Nakagawa H. Plant mutation breeding and biotechnology. Cambridge, Mass: CAB International; 2012. 608 p.
10. Kazydub N.G., Kotsyubinskaya O.A., Kovalenko A.N. Agroecological passport of the Marusya green bean variety. *Vegetable crops of Russia*. 2022;(1):39–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-1-39-45> <https://elibrary.ru/clijzz>
11. Kotsyubinskaya O.A., Kazydub N.G., Antoshkin A.A. The productivity of common beans vegetable selection Omsk State Agrarian University in southern forest-steppe of Western Siberia. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(1):64–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-1-64-69> <https://elibrary.ru/byscfn>
12. Kazydub N.G., Kotsyubinskaya O.A., Kuzmina S.P., Pletneva M.M. Grain and vegetable beans in Western Siberia: selection, agricultural technology, use. Omsk State Agrarian University, 2022. 226 p. ISBN 978-5-907507-38-8. (In Russ.) <https://elibrary.ru/aggctw>
13. Novik N.V., Geras'kin S.A., Yakub I.A. Effect of γ -irradiation of seeds on intravariety variability of quantitative characters of yellow lupin. *Radiation biology. Radioecology*. 2022;62(6):620–628. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S086980312206008X> <https://elibrary.ru/xisbra>
14. Volkova P.Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants. *Current Opinion in Toxicology*. 2022;(30):100334. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2022.02.007>
15. Ulukapi K., Nasircilar A.G. Hormetic Response of Low Dose Gamma on *Phaseolus Vulgaris* L. Under Drought Stress: Proteinogenic Amino Acids Profile. *Gesunde Pflanzen*. 2023;(75):1087–1098. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00769-1>
16. Pishenin I., Gorbatova I., Kazakova E., Podobed M., Mitsenik A., Shesterikova E., Dontsova A., Dontsov D., Volkova P. Free Amino Acids and Methylglyoxal as Players in the Radiation Hormesis Effect after Low-Dose γ -Irradiation of Barley Seeds. *Agriculture*. 2021;(11):918. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100918>

Об авторах:

Ольга Андреевна Коцюбинская – кандидат с.-х. наук, старший преподаватель кафедры садоводства, лесного хозяйства и защиты растений, <https://orcid.org/0000-0003-1479-772X>, Scopus ID 5719776571, SPIN-код: 9266-8577, автор для переписки, oa.kotsyubinskaya@omgau.org

Екатерина Валерьевна Бондаренко – кандидат биол. наук, зав. лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, <https://orcid.org/0000-0002-7937-3824>, Scopus ID 57200545555, SPIN-код: 6141-9343

Нина Григорьевна Казыдуб – доктор с.-х. наук, профессор кафедры садоводства, лесного хозяйства и защиты растений, <https://orcid.org/0000-0002-2234-9647>, Scopus ID 571962559502, SPIN-код: 8100-7068

Яна Александровна Блинова – младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии, <https://orcid.org/0000-0002-3670-5876>, Scopus ID 57200545555, SPIN-код: 6965-5837

About the Authors:

Olga A. Kotsyubinskaya – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Lecturer at the Department of Horticulture, Forestry and Plant Protection, <https://orcid.org/0000-0003-1479-772X>, Scopus ID 57197765715, SPIN-code: 9266-8577, Correspondence Author, oa.kotsyubinskaya@omgau.org

Ekaterina V. Bondarenko – Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory of Molecular and Cellular Radiobiology, <https://orcid.org/0000-0002-7937-3824>, Scopus ID 57200545555, SPIN-code: 6141-9343

Nina G. Kazydub – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Horticulture, Forestry and Plant Protection, <https://orcid.org/0000-0002-2234-9647>, Scopus ID 571962559502, SPIN-code: 8100-7068

Yana A. Blinova – Junior Researcher at the Laboratory of Molecular and Cellular Radiobiology, <https://orcid.org/0000-0002-3670-5876>, Scopus ID 57200545555, SPIN-code: 6965-5837