

УДК 575.224.4:633.367.1:581.14:57.084.1:539.1.047

## ВЛИЯНИЕ $\gamma$ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА ВНУТРИСОРТОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ЛЮПИНА ЖЕЛТОГО

© 2022 г. Н. В. Новик<sup>1</sup>, С. А. Гераскин<sup>2,\*</sup>, И. А. Якуб<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт люпина — филиал “Федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса”, Брянск, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

\*E-mail: stgeraskin@gmail.com

Поступила в редакцию 29.12.2021 г.

После доработки 11.08.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

С целью получения мутантных форм люпина желтого (*Lupinus luteus* L.) семена сорта Булат (обычный морфотип) и селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1 эп (эпигональный морфотип) облучали на установке ГУР-120 (<sup>60</sup>Co) при следующих соотношениях доза/мощность дозы: 200 Гр (60 Гр/ч); 300 Гр (60 Гр/ч); 400 Гр (60 Гр/ч); 200 Гр (100 Гр/ч); 300 Гр (100 Гр/ч); 400 Гр (100 Гр/ч); 300 Гр (150 Гр/ч); 400 Гр (150 Гр/ч). В ходе лабораторного эксперимента установлены статистически значимые различия по длине главного корня и длине гипокотила у всех вариантов по сравнению с контролем. Значимые различия были выявлены также между вариантами с разной мощностью при дозе облучения 200 Гр, при дозах 300 и 400 Гр различия сглаживались. Установлена критическая доза (ЛД<sub>50</sub>) для люпина желтого — 400 Гр при мощности 60 и 100 Гр/ч. В полевом эксперименте выявлено влияние предпосевного облучения семян на всхожесть и выживаемость, на элементы продуктивности растений в поколениях М<sub>1</sub> и М<sub>2</sub>, а также на биохимические показатели семян. Установлена сортоспецифичность в реакции на облучение семян, проявившаяся в повышении адаптивности у ультраскороспелого селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1 эп.

**Ключевые слова:** радиационный мутагенез, люпин желтый

**DOI:** 10.31857/S086980312206008X

За счет зернобобовых культур удовлетворяется 16% потребности населения мира в протеинах. Для производства продуктов животноводства также используется значительная доля их продукции [1]. Вместе с ростом населения планеты растут требования к урожайности сортов культур этой стратегически важной группы растений. Основной угрозой стабильности урожая и качества зерновых бобовых культур является воздействие неблагоприятных абиотических и биотических факторов, связанных напрямую или опосредованно с современными глобальными проблемами антропогенного загрязнения и климатических изменений. Классические методы селекции — гибридикация, индуцированный мутагенез и отбор еще не исчерпали свой потенциал и дают возможность создания сортов, отвечающих новым требованиям.

Одним из действенных методов селекции остается индуцированный мутагенез. В селекции зернобобовых культур метод индуцированного мутагенеза особенно эффективен в получении

скороспелых форм с лучшим химическим составом, устойчивых к болезням сортов, а также для усиления изменчивости количественных признаков в популяциях растений [2–4].

Создание менее чем за полвека новых культурных растений — желтого и узколистного кормовых люпинов, обладающих малоалкалоидностью, мягкокожурностью семян, нерастрескиваемостью бобов, быстрым начальным ростом и отсутствием опушения на бобах стало возможным благодаря отбору спонтанных мутаций. Так, из 1.5 млн растений горького люпина в 1927–1928 гг. в Германии Р. Зенгбушем было найдено три практически безалкалоидных растения желтого люпина и два узколистного. В 1939 г. Х. Троллем найдена мутация, влияющая на образование у люпина желтого гладких бобов, ускоряющих его созревание. А позднее, Г. Крессом (1952) и Н. Ламбертсом (1955) найдены растения, бобы которых покрыты короткими волосками [5]. Многие мутации люпина, найденные в естественных условиях, воспро-

изводились впоследствии в ходе экспериментального мутагенеза [6].

С помощью ионизирующих излучений получены измененные формы люпина, обладающие хозяйственно ценными признаками. Так, путем облучения получены образцы, характеризующиеся увеличенным числом бобов [7] и семян [8], одновременным образованием и развитием бобов и семян [9]. В результате облучения семян люпина получены формы с увеличенным содержанием белка, нуклеиновых кислот и уменьшенным количеством алкалоидов [10, 11]. Нередко при этом возникали изменения, не имеющие практического значения, например деформация листьев и стебля.

Скрининг мировой коллекции люпина желтого показал отсутствие многих желаемых хозяйственно-ценных признаков в его генофонде. Однако известно, что такие признаки имеются у некоторых других видов многочисленного рода *Lupinus*. Следовательно, согласно закону Н.И. Вавилова “О гомологических рядах в наследственной изменчивости”, их можно попробовать получить методом экспериментального мутагенеза.

Целью нашей работы был анализ влияния разных доз  $\gamma$ -облучения и их мощностей на люпин желтый в зависимости от морфотипа, а также выявление индуцированных радиацией изменений количественных признаков с целью получения мутантных форм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлся люпин желтый (*Lupinus luteus* L.). С целью получения мутантных форм семена сорта Булат (обычный морфотип) и селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1эп (эпигональный морфотип) – по 1000 шт. каждого – подвергали воздействию облучения на установке ГУР-120 ( $^{60}\text{Co}$ , ВНИИ радиологии и агроэкологии, г. Обнинск) в 2019 г. при следующих соотношениях доза/мощность дозы: 200 Гр (60 Гр/ч); 300 Гр (60 Гр/ч); 400 Гр (60 Гр/ч); 200 Гр (100 Гр/ч); 300 Гр (100 Гр/ч); 400 Гр (100 Гр/ч); 300 Гр (150 Гр/ч); 400 Гр (150 Гр/ч). Дозу излучения оценивали с помощью дозиметра ДКС-101 (Политехформ-М, паспортная относительная погрешность измерений 4%). В качестве контроля использовали необлученные семена.

Для определения оптимального соотношения доза/мощность дозы по угнетающему действию облучения на проростки был проведен лабораторный эксперимент. Семена проращивали в бумажно-полиэтиленовых рулонах по 50 шт. на вариант в четырех повторностях. У 8-дневных проростков оценивали морфофизиологические показатели [12].

На основании результатов лабораторного эксперимента для полевых испытаний были выбраны два варианта предпосевного облучения семян – 400 Гр (60 Гр/ч) и 400 Гр (100 Гр/ч). Семена вручную высевали в поле на однорядковых делянках площадью 1 м<sup>2</sup> в 20-кратной повторности. В каждом рядке размещали по 50 семян (500000/га). Учеты в питомниках мутагенеза вели в соответствии с [13]. Во время уборки подсчитывали количество продуктивных растений, при камеральной оценке определяли выживаемость и сохранность, а также структуру семенной продуктивности (число бобов, семян в соцветии и бобе, их масса в соцветии и масса 1000 штук). Статистический анализ данных выполняли методом однофакторного дисперсионного анализа [14]. Вычисленная в результате анализа предельная ошибка разности средних (НСР) позволяет установить существенность различий между вариантами опыта.

В поколении  $M_2$  в каждом из вариантов индивидуально отбирали отклоняющиеся, в основном по признакам продуктивности, растения.

Почва опытных участков серая лесная легкосуглинистая, развивающаяся на лессовидном карбонатном суглинке. Метеоусловия вегетационных периодов 2019 и 2020 г. характеризовались следующими показателями: среднемесячная температура в 2019 г. – 17,4°C, в 2020 г. – 16,9°C при среднемноголетних показателях 16,1°C, осадков выпадало 235 и 406 мм соответственно при среднемноголетних показателях 304 мм. Осадки выпадали неравномерно, особенно в 2019 г., когда 29% пришлось на август и, следовательно, растениями люпина практически не использовались. В 2019 г. на межфазный период бутонизация-цветение пришлось засушливая жаркая погода, что отрицательно сказалось на завязываемости бобов и урожае семян. В 2020 г. избыток осадков на фоне повышенных температур в июне и июле способствовал развитию эпифитотии антракноза и росту заболеваемости другими грибными болезнями люпина. В третьей декаде июня (цветение люпина желтого) осадков выпало в 3,5 раза выше среднемноголетней нормы. В целом за период вегетации люпина ГТК равнялся 2,2.

Мониторинг алкалоидности селекционных номеров вели в несколько этапов: метод оттиска черешков листьев на фильтровальной бумаге, пропитанной реактивом Драгендорфа в фазу бутонизации; метод определения алкалоидности семян окрашиванием их дерти в растворе Бухарда в двух концентрациях, позволяющих выделить без-, мало- и алкалоидные образцы; метод определения количественного содержания алкалоидов по методике Ф.К. Терехова в модификации ВНИИ люпина [15]. Количественное содержание алкалоидов в семенах и содержание сырого про-

**Таблица 1.** Структура жизнеспособности проростков  $\gamma$ -облученных семян люпина желтого  
**Table 1.** Viability structure of the  $\gamma$ -irradiated lupin seeds

Вариант	Распределение проростков по баллам степени их развития, %					Аномальные проростки, %	Всхожесть, %	Сила роста, %
	5	4	3	2	1			
сорт Булат								
Контроль	18	25	36	8	1	12	98	79
200 Гр 60 Гр/ч	2	48	14	2	2	32	68	64
300 Гр 60 Гр/ч	0	18	22	10	8	42	58	40
400 Гр 60 Гр/ч	0	12	18	12	10	48	52	30
200 Гр 100 Гр/ч	0	44	28	0	6	22	78	72
300 Гр 100 Гр/ч	0	34	22	12	6	26	74	56
400 Гр 100 Гр/ч	2	30	12	22	2	32	68	44
300 Гр 150 Гр/ч	0	26	24	20	2	28	72	50
400 Гр 150 Гр/ч	0	24	16	32	2	26	74	40
с.н. 12-11-02-2-4-1								
Контроль	42	38	8	0	4	8	92	88
200 Гр 60 Гр/ч	32	34	20	0	8	6	94	86
300 Гр 60 Гр/ч	6	66	12	6	2	8	92	84
400 Гр 60 Гр/ч	4	46	24	8	2	16	84	74
200 Гр 100 Гр/ч	4	58	20	2	2	14	86	82
300 Гр 100 Гр/ч	2	62	16	2	4	14	86	80
400 Гр 100 Гр/ч	0	34	16	10	6	34	66	50
300 Гр 150 Гр/ч	0	54	16	12	0	18	82	70
400 Гр 150 Гр/ч	0	46	28	12	4	10	90	74

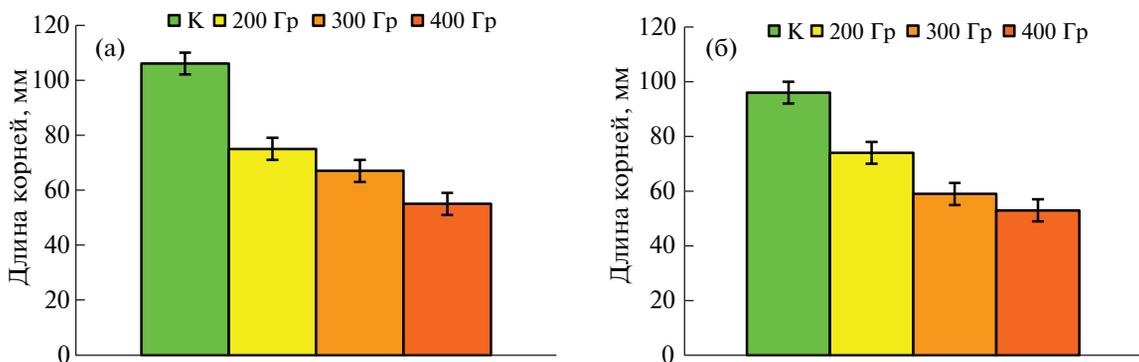
теина определяли в лаборатории физиологии ВНИИ люпина.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение оптимального соотношения дозы/мощность дозы облучения семян по повреждающему эффекту у проростков и ювенильных растений. Семена сорта Булат и с.н.12-11-02-2-4-1эп репродукции 2018 г. подвергли  $\gamma$ -облучению за день до начала проращивания в широком диапазоне доз и мощностей доз. Облучение снижало лабораторную всхожесть и силу роста, увеличивало долю аномально развитых проростков (табл. 1). Гибель семян на стадии проростков у сорта Булат в вариантах 400 Гр (60 Гр/ч) и 400 Гр (100 Гр/ч) составляла соответственно 47 и 31%, в среднем для дозы 400 Гр – 39%. Гибель семян при дозе 200 Гр – 25%, при дозе 300 Гр – 32%. У с.н. 12-11-02-2-4-1 доля погибших семян была значительно ниже. При оценке ювенильных растений (фаза двух настоящих листьев) также было отмечено угнетающее действие облучения (рис. 1–4). Длина корней обоих образцов закономерно снижалась с дозой облучения (рис. 1). У растений сорта Булат уста-

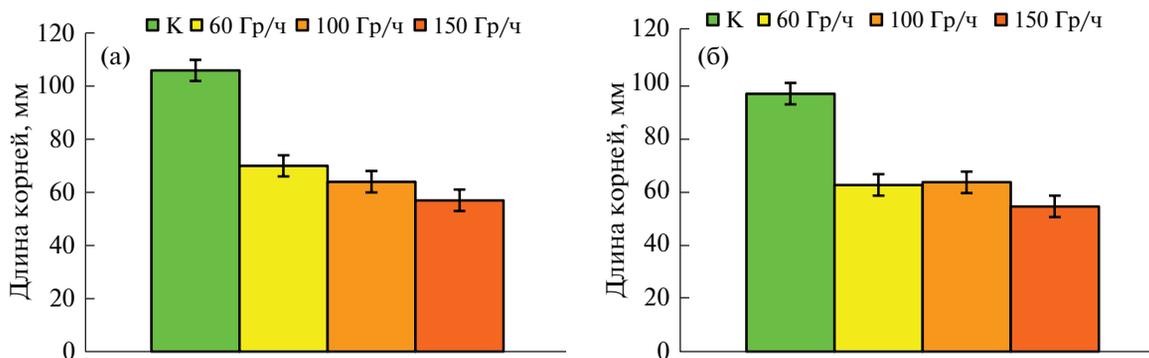
новлены статистически значимые различия длины корней при разных мощностях дозы, но пропорциональное уменьшение их прослеживалось только при дозе облучения 200 Гр, при дозах 300 и 400 Гр различия сглаживались (рис. 2, а). У растений с.н. 12-11-02-2-4-1эп влияние мощности дозы также выявлено лишь в варианте с дозой 200 Гр и статистически значимые различия зафиксированы в варианте с мощностью дозы 150 Гр, в вариантах с мощностями облучения 60 и 100 Гр/ч показатели были идентичными (рис. 2, б). Сорт Булат оказался менее устойчивым к облучению по сравнению с с.н. 12-11-02-2-4-1эп, так как длина корней у него снижалась с дозой на 29–48%, а у селекционного номера на 23–45%. Увеличение же мощности дозы в равной степени сказывалось на длине корней обоих образцов: у растений сорта Булат она снижалась на 34–46%, у растений селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1эп – на 35–45%.

Длина гипокотили ювенильных растений существенно снижалась по сравнению с контрольными вариантами у обоих образцов (рис. 3–4). У растений сорта Булат длина гипокотили умень-



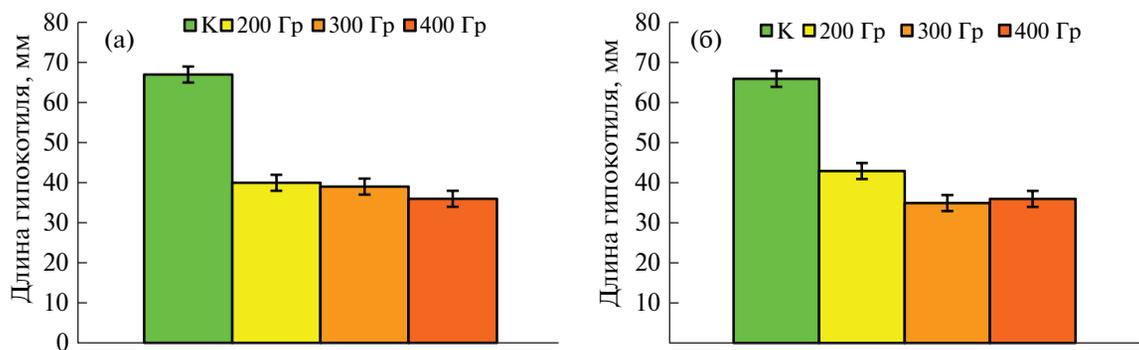
**Рис. 1.** Длина корней в зависимости от дозы облучения (вариант с минимальной мощностью облучения – 60 Гр/ч): а) сорт Булат; б) с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

**Fig. 1.** Effect of irradiation dose on root length (variant of the lowest irradiation power – 60 Gy/hour): a) the var. Bulat; b) BL 12-11-02-2-4-1ep.



**Рис. 2.** Длина корней в зависимости от мощности дозы (вариант с минимальной дозой облучения – 200 Гр): а) сорт Булат; б) с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

**Fig. 2.** Effect of irradiation energy on root length (variant of the lowest irradiation dose – 200 Gy): a) the var. Bulat; b) BL 12-11-02-2-4-1ep.



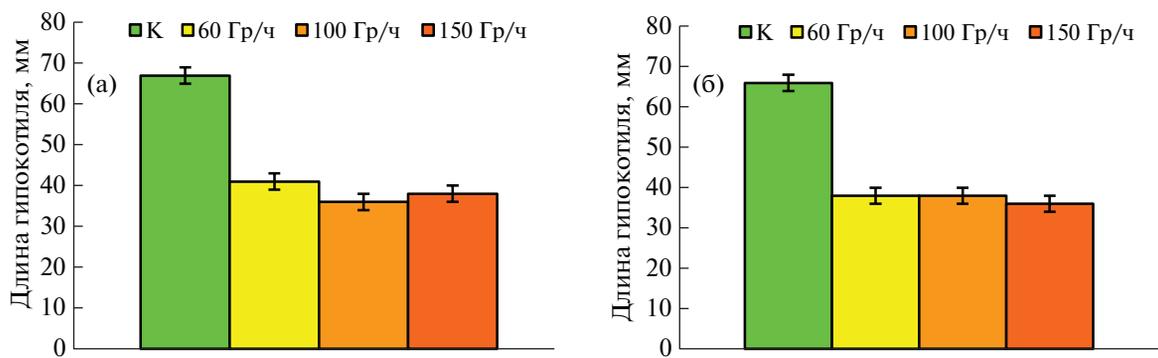
**Рис. 3.** Длина гипокотыля в зависимости от дозы облучения (вариант с минимальной мощностью облучения – 60 Гр/ч): а) сорт Булат; б) с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

**Fig. 3.** Effect of irradiation dose on hypocotyl length (variant of the lowest irradiation power – 60 Gy/hour): a) the var. Bulat; b) BL 12-11-02-2-4-1ep.

шилась на 40–46%, у с.н. 12-11-02-2-4-1эп – на 35–47%.

Различия между опытными вариантами у сорта Булат были незначительны (рис. 3, а – 4, а), у

с.н. 12-11-02-2-4-1эп существенно различались варианты с дозами 200 и 300 Гр (рис. 3, б) (эффект доз 300 и 400 Гр значимо не различался). Действие мощности дозы, так же как и в случае с кор-



**Рис. 4.** Длина гипокотыля в зависимости от мощности дозы (вариант с минимальной дозой облучения – 200 Гр): а) сорт Булат; б) с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

**Fig. 4.** Effect of irradiation energy on hypocotyl length (variant of the lowest irradiation dose – 200 Gy): a) the var. Bulat; b) BL 12-11-02-2-4-1ep.

нем, наблюдалось только при дозе 200 Гр у обоих образцов. При этом значимые различия выявлены во всех вариантах у растений сорта Булат, а у с.н. 12-11-02-2-4-1эп только в варианте 150 Гр/ч. Меньшая чувствительность длины гипокотыля по сравнению с длиной корня объясняется глубиной залегания зародышевых органов в семени.

Таким образом, были установлены статистически значимые различия по длине главного корня и длине гипокотыля у всех вариантов по сравнению с контролем. Значимые различия были выявлены также между вариантами с разной мощностью при дозе облучения 200 Гр, при дозах 300 и 400 Гр различия сглаживались. Выявлены сортовые реакции на облучение семян. В ходе лабораторного эксперимента установлена критическая доза ( $LD_{50}$ ) для люпина желтого – 400 Гр. Для полевого эксперимента были отобраны варианты 400 Гр (60 Гр/ч) и 400 Гр (100 Гр/ч).

*Полевой эксперимент и наблюдения в питомнике.* 25.04.2019 г. по 1000 семян каждого сорта были облучены в соответствии с отобранными на предыдущем этапе исследований вариантами соотношения доза/мощность дозы. Облученные семена были посеяны в поле 26.04.2019 г. Всего полевой опыт включал четыре варианта и два контроля. Площадь делянки 15 м<sup>2</sup>.

Всходы начали появляться 6 мая, на десятый день после посева был проведен их первый подсчет. Во всех вариантах опыта растения имели мелкие семядольные листочки. Полевая всхожесть в контроле и вариантах опыта достигла максимума к 18 мая, на 22-е сутки после посева:

Контроль I – 99%.

Вариант 1. Булат 400 Гр (60 Гр/ч) – 88%.

Вариант 2. Булат 400 Гр (100 Гр/ч) – 89%.

Контроль II – 97%.

Вариант 1. с.н. 12-11-02-2-4-1эп 400 Гр (60 Гр/ч) – 91%.

Вариант 2. с.н. 12-11-02-2-4-1эп 400 Гр (100 Гр/ч) – 89%.

При следующем подсчете спустя трое суток отмечена гибель всходов, которые засыхали на корню без внешних признаков повреждения. Частичная гибель всходов наблюдалась до начала фазы стеблевания. Анализ динамики полевой всхожести (рис. 5, 6) однозначно свидетельствует о том, что повышенная частота гибели всходов обусловлена радиационным воздействием, причем максимальный эффект наблюдался у обоих образцов при мощности дозы 100 Гр/ч.

Угнетающее действие высоких доз облучения проявлялось и на последующих этапах онтогенеза. Так, если у родительской формы сорта Булат в фазе формирования третьего настоящего листа высота стебля составила  $8.0 \pm 0.5$  см, то в варианте с  $\gamma$ -облучением в дозе 400 Гр (60 Гр/ч) –  $7.3 \pm 0.2$  см ( $p < 0.001$ ); в дозе 400 Гр (100 Гр/ч) –  $6.5 \pm 0.22$  см ( $p < 0.001$ ). В фазе бутонизации стебель люпина желтого сорта Булат в контроле достиг высоты  $23.0 \pm 1.2$  см ( $p < 0.001$ ), а в вариантах с облучением он был статистически значимо меньше 400 Гр (60 Гр/ч) –  $19.5 \pm 1.0$  см ( $p < 0.001$ ); 400 Гр (100 Гр/ч) –  $19.0 \pm 1.0$  см ( $p < 0.001$ ). Сходная зависимость роста растений от дозы  $\gamma$ -излучения установлена в фазах цветения и созревания. Такая же закономерность проявилась в эксперименте с селекционным номером с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

С фазы бутонизации у обоих образцов проявилось значительное поражение вирусными болезнями. В результате цветки большинства сохранившихся ко времени цветения растений были стерильны. Высота растений сорта Булат к моменту созревания семян достигала в вариантах опыта лишь 33–35 см при высоте растений контроля 56 см. У с.н. 12-11-02-2-4-1эп в контроле растения имели высоту 48 см, в вариантах опыта – 29 и 27 см соответственно.

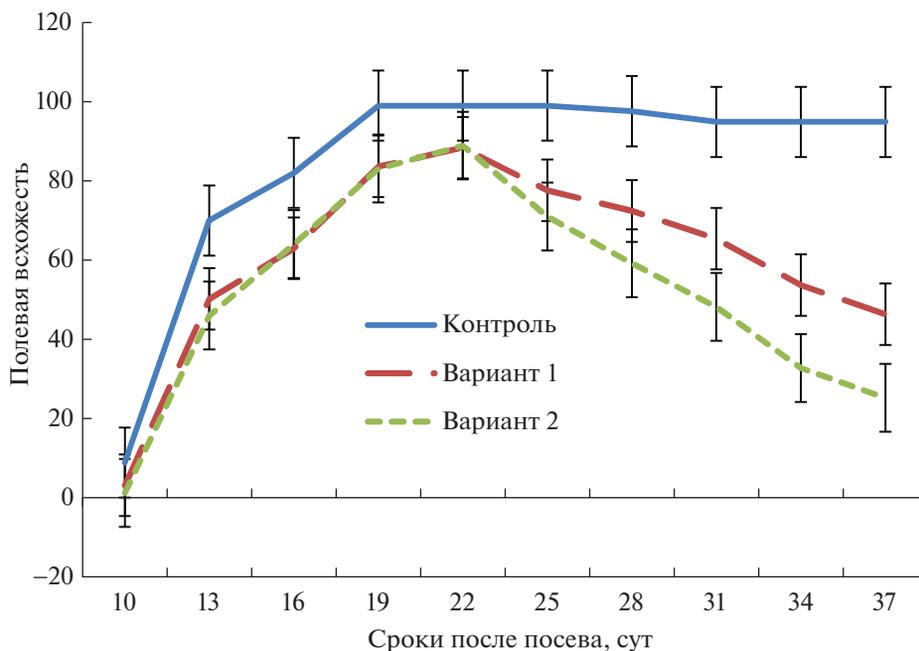


Рис. 5. Динамика полевой всхожести, сорт Булат.

Fig. 5. Dynamics of field viability, the var. Bulat.

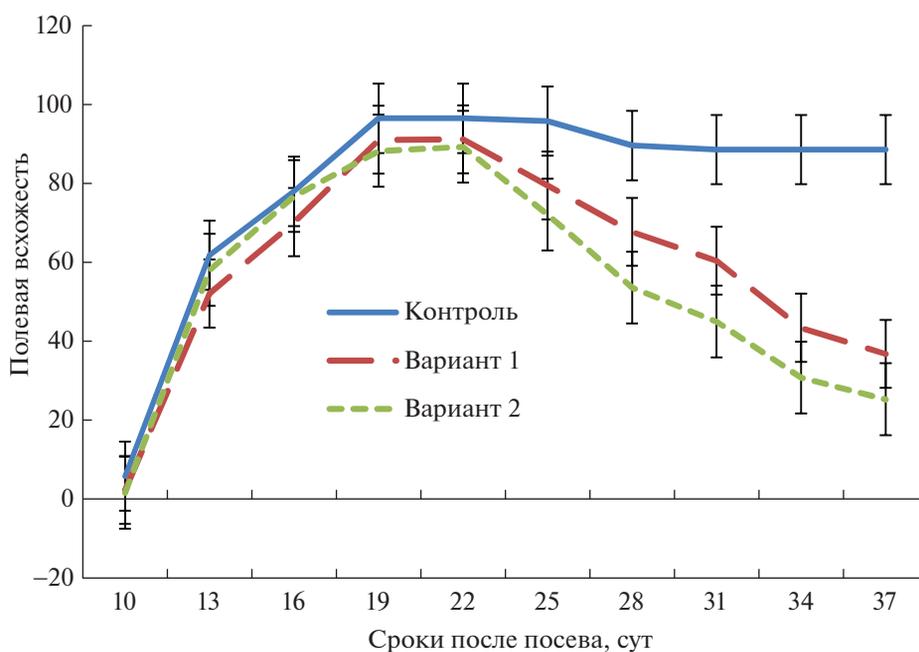


Рис. 6. Динамика полевой всхожести, с.н. 12-11-02-2-4-1.

Fig. 6. Dynamics of field viability, the BL 12-11-02-2-4-1 var.

Облучение семян изменило сроки наступления и продолжительность фазов развития люпина. Варианты с облучением характеризовались задержкой развития растений. Так, в поколении  $M_1$  с опозданием на 5–9 дней от исходной формы за-

цветали и с такой же задержкой вступали в фазу созревания образцы сорта Булат без различий между вариантами опыта. Таким образом, продолжительность онтогенеза у подвергшихся облучению растений увеличилась.

**Таблица 2.** Влияние  $\gamma$ -облучения семян люпина желтого на семенную продуктивность и морфологические признаки растений в поколениях  $M_1$  и  $M_2^*$ **Table 2.** Effect of  $\gamma$ -irradiation of yellow lupin seeds on their productivity and plants' morphological characters of  $M_1$  and  $M_2^*$  progenies

Показатели	сорт Булат			с.н. 12-11-02-2-4-1		
	контроль	400 Гр (60 Гр/ч)	400 Гр (100 Гр/ч)	контроль	400 Гр (60 Гр/ч)	400 Гр (100 Гр/ч)
Количество бобов на растение, шт.	11.2/14.1	6.3/10.6	7.6/10.7	8.6/11.4	4.00/12.8	5.9/13.2
НСП <sub>0,05</sub>	1.26/2.17			2.25/1.26		
Количество семян на растение, шт.	37.3/47.4	20.2/34.1	22.0/34.5	30.1/25.6	10.5/37.0	16.2/37.5
НСП <sub>0,05</sub>	5.22/6.18			3.41/6.88		
Количество семян в бобе, шт.	3.3/3.4	3.2/3.2	2.9/3.2	3.5/2.2	2.6/2.9	2.7/2.8
НСП <sub>0,05</sub>	0.08/0.26			0.15/0.34		
Масса семян с растения, г	4.40/5.93	2.52/4.37	2.48/4.41	3.46/2.61	0.96/3.88	1.43/3.87
НСП <sub>0,05</sub>	1.37/1.59			1.84/1.09		
Масса 1000 семян, шт.	118/125	125/129	113/130	115/102	91/106	88/105
НСП <sub>0,05</sub>	6.96/6.92			9.11/2.45		
Средняя масса боба, г	0.80/0.86	0.83/0.77	0.77/0.76	0.79/0.45	0.47/0.56	0.49/0.55
НСП <sub>0,05</sub>	0.05/0.06			0.10/0.16		
Средняя длина боба, мм	49.1/51.3	44.0/46.8	43.4/46.3	42.6/43.2	37.9/41.7	38.6/42.8
НСП <sub>0,05</sub>	4.39/3.68			3.48/2.15		
Доля створок боба, %	50.7/51.2	51.7/46.5	51.0/46.1	49.2/48.6	50.3/45.8	52.0/47.3

\* $M_1/M_2$  – в числителе представлены показатели растений  $M_1$ , в знаменателе – растений  $M_2$ .

У обоих исследуемых образцов люпина желтого при облучении обнаружили большое количество стерильных и полустерильных растений, поэтому в вариантах опыта с  $M_1$  было собрано малое количество продуктивных растений: контроль I – 129 шт.; сорт Булат 400 Гр (60 Гр/ч) – 13 шт.; сорт Булат 400 Гр (100 Гр/ч) – 33 шт.; контроль II – 167 шт.; с.н. 12-11-02-2-4-1эп 400 Гр (60 Гр/ч) – 26 шт.; с.н. 12-11-02-2-4-1эп 400 Гр (100 Гр/ч) – 25 шт. Таким образом, из всего питомника  $M_1$  были собраны семена 97 растений, работа с которыми продолжалась в  $M_2$  в 2020 г.

В поколении  $M_2$  (табл. 2) влияние облучения оставалось заметным у обоих исследованных сортов, однако проявилось оно по-разному. Если во втором поколении у сорта Булат было заметно некоторое восстановление, хотя значения большинства показателей оставались ниже контроля, то у мутантов с.н. 12-11-02-2-4-1эп в  $M_2$  наблюдался эффект повышенной адаптивности к неблагоприятным условиям среды по сравнению с его исходной формой. Так, завязываемость плодов и семян, количество семян в бобе, масса семян с растения и масса их 1000 шт. в вариантах опыта превышали контроль.

В  $M_1$  также уменьшалась средняя длина боба (табл. 2) у обоих образцов в опытных вариантах на 4–5 мм по сравнению с контролем, в  $M_2$  эта тенденция сохранялась. Изменения затронули и створки боба, которые у растений  $M_1$  утолщались по сравнению с контролем, а у растений  $M_2$  – становились значительно тоньше. Так, в  $M_2$  сорт Булат вариант 400 Гр (100 Гр/ч) доля створок в бобе составила 46%, что на 5% ниже контроля. Этот тренд является положительным с точки зрения хозяйственной ценности мутаций. Средняя масса боба у образцов изменялась по годам и вариантам неоднозначно. Так, в поколении  $M_1$  существенное снижение массы по отношению к контролю наблюдалось только у с.н. 12-11-02-2-4-1эп, а у сорта Булат она оставалась на уровне контроля. В  $M_2$  это снижение было заметно на сорте Булат, а с.н. 12-11-02-2-4-1эп в целом (контроль включительно) сформировал шуплые плоды и семена. Селекционный номер с.н. 12-11-02-2-4-1эп характеризуется ксероморфностью и метеорологические условия 2020 г. не способствовали реализации его продуктивного потенциала.

Биохимический анализ семян с растений  $M_2$  выявил повышенное содержание сырого протеи-

**Таблица 3.** Содержание сырого протеина и алкалоидов в семенах люпина желтого в поколении  $M_2$ , %  
**Table 3.** Content of raw protein and alkaloid in yellow lupin seeds of the  $M_2$  progeny, %

Варианты	Содержание сырого протеина	Алкалоидность
сорт Булат		
Контроль	44.48	0.056
400 Гр – 60 Гр/ч	44.73	0.047
400 Гр – 100 Гр/ч	45.43	0.040
НСР <sub>0.05</sub>	0.810	0.010
с.н. 12-11-02-2-4-1		
Контроль	38.15	0.035
400 Гр – 60 Гр/ч	38.78	0.055
400 Гр – 100 Гр/ч	39.67	0.031
НСР <sub>0.05</sub>	0.850	0.012

на в опытных вариантах с мощностью облучения 100 Гр/ч у обоих образцов (табл. 3). Статистически значимое снижение уровня алкалоидов в семенах обнаружено у сорта Булат в варианте 400 Гр (100 Гр/ч). У селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1эп алкалоидность повысилась в варианте 400 Гр (60 Гр/ч) на 0.02% и осталась на уровне контроля в варианте 400 Гр (100 Гр/ч). Этот разброс в показателях объясняется недостаточной селекционной обработкой образца.

В основном по признакам продуктивности в  $M_2$  выполнены индивидуальные отборы. Отбирали здоровые растения со следующими значениями критериев: более пяти выполненных бобов на растении при высоте стебля более 50 см у сорта Булат и более шести бобов при высоте стебля более 35 см у с.н. 12-11-02-4-1. Из  $M_2$  сорта Булат отобрано 141 растение, из с.н. 12-11-02-2-4-1эп – 118 растений. Данный материал будет размножен линейно с целью поиска мутаций в третьем и последующих поколениях.

Таким образом, на основании проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Доза 400 Гр при мощности 60 и 100 Гр/ч является критической для выживаемости проростков люпина желтого (*Lupinus luteus* L.).

2. Эксперименты по анализу эффекта мощности дозы эффективно проводить при дозах не более 200 Гр.

3. Облучение семян влияет на элементы продуктивности растений в поколениях  $M_1$  и  $M_2$ , а также на биохимические показатели семян.

4. Сортоспецифичность в реакции на облучение семян проявилась в повышении свойств адаптивности у ультраскороспелого селекционного номера с.н. 12-11-02-2-4-1эп.

5. По признакам продуктивности и устойчивости к антракнозу отобраны растения из  $M_2$  сорта Булат – 141 растение, из с.н. 12-11-02-2-4-1эп – 118 растений.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2021-1068 от 28.09.2021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зернобобовые культуры / Под общ. ред. Д. Шпаара. Минск: ФУАинформ, 2000. 264 с. [Zernobobovye kul'tury / Pod obshh. red. D. Spaar. Minsk: FUAinform, 2000. 264 s. (In Russ.)]
2. Анохина В.С., Дебелый Г.А., Конорев П.М. Люпин: селекция, генетика, эволюция. Минск: БГУ, 2012. 271 с. [Anokhina V.S., Debelyj G.A., Konorev P.M. Ljupin: selekcija, genetika, jevoljucija. Minsk: BGU, 2012. 271 s. (In Russ.)]
3. Бернацкая М.Л., Шошина З.В., Иванченкова Т.И. Использование химических мутагенов в селекции люпина желтого // Ускорение научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе Брянской области: Тез. докл. науч.-практ. конференции. Брянск, 1992. С. 134–138. [Bernatskaja M.L., Shoshina Z.V., Ivanchenkova T.I. Ispol'zovanie himicheskih mutagenov v selekcii ljupina zheltogo // Uskorenie nauchno-tehnicheskogo progressa v agropromyshlennom komplekse Brjanskoj oblasti: Tez. dokl. nauch.-prakt. konferencii. Brjansk, 1992. S. 134–138. (In Russ.)]
4. Дебелый Г.А. Зернобобовые культуры в Нечерноземной зоне РФ. Москва–Немчиновка, 2009. 258 с. [Debelyj G.A. Zernobobovye kul'tury v Nechernozemnoj zone RF. Moskva–Nemchinovka, 2009. 258 s. (In Russ.)]
5. Майсуриан Н.А., Атабекова А.И. Люпин. М.: Колос, 1974. 463 с. [Maissurian N.A., Atabekova A.I. Ljupin. M.: Kolos, 1974. 463 s. (In Russ.)]
6. Чекалин Н.М., Корсаков Н.И., Варлахов М.Д. и др. Селекция зернобобовых культур. М.: Колос, 1981. С. 60–81. [Chekalin N.M., Korsakov N.I., Varlakhov M.D. i dr. Selekcija zernobobovyh kul'tur. M.: Kolos, 1981. S. 60–81. (In Russ.)]
7. Анохина В.С. Влияние скарификации и алкалоидности семян люпина на предпосевную обработку некоторыми мутагенами // Генетика и цитология. Минск, 1967. С. 75–84. [Anokhina V.S. Vlijanie skarifikacii i alkaloidnosti semjan ljupina na predposevnuju obrabotku nekotorymi mutagenami // Genetika i citologija. Minsk, 1967. S. 75–84. (In Russ.)]
8. Проскура И.П., Михайлец В.И., Шелест С.К. Селекция люпина в западных районах УССР // Селекция, семеноводство и приемы возделывания люпина. Вып. 2. Орел, 1974. С. 207–211. [Proskura I.P., Mikhajlets V.I., Shelest S.K. Selekcija ljupina v zapadnyh rajonah USSR // Selekcija, semenovodstvo i priemy vozdeljvanija ljupina. V. 2. Orel, 1974. S. 207–211. (In Russ.)]

9. Коновалов Ю.Б., Клочко Н.А., Анисеева Н.Ф. Слабоветвящийся индуцированный мутант люпина узколистного // Изв. ТСХА. 1985. № 4. С. 179–181. [Konovalov Ju.B., Klotchko N.A., Aniseeva N.F. Slabovetvjashhijsja inducirovannyj mutant ljupina uzkolistnogo // Izvestija TSHA. 1985. № 4. S. 179–181. (In Russ.)]
10. Мироненко А.В., Полищук Н.Е. Влияние предпосевного облучения семян люпина гамма-лучами  $Co^{60}$  на рост, развитие, урожайность и содержание общего белкового азота // Физиолого-биохимические основы растений. Минск, 1967. С. 132–139. [Mironenko A.V., Polishhuk N.E. Vlijanie predposevnogo obluchenija se-mjan ljupina gamma-luchami  $Co^{60}$  na rost, razvitie, urozhajnost' i sodержanie obshhego belkovogo azota // Fiziologo-biohimicheskie osnovy rastenij. Minsk, 1967. S. 132–139. (In Russ.)]
11. Головченко В.И., Солодюк Н.В. Получение биохимических мутаций пониженного содержания алкалоидов у *Lupinus albus* с помощью физических и химических мутагенных факторов // Практика химического мутагенеза. М., 1971. С. 116–124. [Golovchenko V.I., Solodjuk N.V. Poluchenie biohimicheskikh mutacij ponizhennogo sodержanija alkaloidov u *Lupinus albus* s pomoshh'ju fizicheskikh i himicheskikh mutagennyh faktorov // Praktika himicheskogo mutagenеза. М., 1971. S. 116–124. (In Russ.)]
12. Лихачев Б.С. Основные направления исследований по семеноведению и семеноводству люпина // Селекция и семеноводство. 1966. № 1–2. С. 61–66. [Likhachev B.S. Osnovnye napravlenija issledovanij po semenovedeniju i semenovodstvu ljupina // Selekcija i semenovodstvo. 1966. № 1–2. S. 61–66. (In Russ.)]
13. Дебелый Г.А., Бережной П.П. Методические рекомендации по использованию метода индуцированного мутагенеза в селекции зернобобовых культур. М.: ВАСХНИЛ, 1983. 19 с. [Debelyj G.A., Berezhnoj P.P. Metodicheskie rekomendacii po ispol'zovaniju metoda inducirovannogo mutagenеза v selekcii zernobobovyh kul'tur. М.: VASHNIL. 1983. 19 s. (In Russ.)]
14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. [Dospexhov B.A. Metodika polevogo opyta. М.: Agropromizdat, 1985. 351 s. (In Russ.)]
15. Артюхов А.И., Яговенко Т.В., Афонина Е.В., Трошина Л.В. Количественное определение алкалоидов в люпине. Брянск: Читай-город, 2012. 16 с. [Artyukhov A.I., Yagovenko T.V., Afonina E.V., Troshina L.V. Kolichestvennoe opredelenie alkaloidov v ljupine. Brjansk: Chitaj-gorod, 2012. 16 s. (In Russ.)]

## Effect of $\gamma$ -Irradiation of Seeds on Intravariety Variability of Quantitative Characters of Yellow Lupin

N. V. Novik<sup>a</sup>, S. A. Geras'kin<sup>b,#</sup>, and I. A. Yakub<sup>a</sup>

<sup>a</sup>All-Russian Lupin Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams Research Center of Forage Production & Agroecology, Bryansk, Russia

<sup>b</sup>Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

<sup>#</sup>E-mail: stgeraskin@gmail.com

Seeds of the var. Bulat (traditional morphotype) and of the BL 12-11-02-2-4-1ep (epigonal morphotype) were irradiated with the equipment GUR-12 0( $^{60}Co$ ) to develop mutant lines of yellow lupine. The irradiation dose/energy was as following: 200 Gy (60 Gy/hour); 300 Gy (60 Gy/hour); 400 Gy (60 Gy/hour); 200 Gy (100 Gy/hour); 300 Gy (100 Gy/hour); 400 Gy (100 Gy/hour); 300 Gy (150 Gy/hour); 400 Gy (150 Gy/hour). Statistical significant differences for the length of the main root and hypocotyl for each variant compared to the standard one were revealed in the laboratory tests. Significant differences were also revealed between variants with different energy at the irradiant dose 200 Gy; at the doses 300 and 400 Gy the differences are smoothed out. The LD<sub>50</sub> for yellow lupine made 400 Gy at the energy 60 and 100 Gy/hour. In a field experiment the effect of pre-sowing seeds' irradiation on seeds' viability, on elements of plant productivity in M<sub>1</sub> and M<sub>2</sub> generations as well as on biochemical characteristics of their seeds is revealed. The specificity of varieties in response to seeds irradiation was revealed too. It means the increase of adaptability of the ultra-maturing breeding line 12-11-02-2-4-1ep.

**Keywords:** radiation mutagenesis, yellow lupin