

Создание новых форм льна, устойчивых к антракнозу и повышенной кислотности почвы

В. С. Зотова[✉], аспирант

Н. В. Пролётова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»

172002, РФ, Тверь, Комсомольский проспект, 17/56

[✉]v.erofeeva.sml@fncl.ru

Резюме. В статье рассматриваются результаты исследований, проведенных в 2022-2024 гг. в Смоленской и Тверской областях. Основная цель заключалась в создании новых форм льна, устойчивых к антракнозу и повышенной кислотности почвы с использованием усовершенствованных элементов методики *in vitro*. В результате *in vitro* созданы новые линии льна-долгунца, устойчивые к антракнозу (НО-65 из R3, Л 2053-5-11 из R1, Л 2053-5-11 из R2, Л 2053-5-11 из R3, Л 2053-6-10 из R1, Л 2053-6-10 из R2, Л 2053-6-10 из R3) и повышенной кислотности почвы (Смолич пф, Импульс пф, Феникс пф, Лидер пф, С-108 пф), которые в первом поколении проявили высокий уровень хозяйственно-ценных признаков. Созданная форма льна НО-65 из R3 на среднекислом фоне была наиболее продуктивна по количеству семян на растении и массе семян (43,9 шт. и 6,64 г соответственно). У регенеранта Л-2053-6-10 из R1 отмечена наибольшая высота растений (99,6 см) и техническая длина стебля (93,4 см), а также наибольшее количество коробочек на растении (9,8 шт.). Сочетание этих характеристик указывает на высокий потенциал данных генотипов в качестве исходного селекционного материала. Высокая эффективность гибридизации достигалась благодаря оптимальным погодным условиям в период скрещиваний и тщательной кастрации цветков перед опылением, что обеспечивало высокий процент завязывания коробочек и получения семян (67...100 %). В результате исследований получено 204 шт. семян от 45 опыленных цветков, с наибольшей продуктивностью при скрещивании генотипов С-108 Пф и Л-2053-6-10 из R3. Отмечено, что генотип С-108 пф хорошо зарекомендовал себя в качестве материнского компонента в скрещиваниях, что подчеркивает его перспективность для селекции льна-долгунца.

Ключевые слова: лён, незрелый зародыш, гипокотильный сегмент, устойчивость, антракноз, регенерант, сорт, повышенная кислотность.

Для цитирования: Зотова В. С., Пролётова Н. В. Создание новых форм льна, устойчивых к антракнозу и повышенной кислотности почвы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3 (71). С. 68-77. doi:10.18286/1816-4501-2025-3-68-77

Creation of new forms of flax resistant to anthracnose and increased soil acidity

V. S. Zotova[✉], N. V. Proletova

FSBEI Federal Scientific Center of Bast Crops

172002, Russian Federation, Tver, Komsomolsky Ave., 17/56, E-mail: [✉]v.erofeeva.sml@fncl.ru

Abstract. The article dwells upon results of the studies conducted in 2022-2024 in Smolensk and Tver regions. The main goal was to create new forms of flax resistant to anthracnose and increased soil acidity using improved elements of *in vitro* technique. As a result, new lines of fiber flax resistant to anthracnose (NO-65 im em R3, L 2053-5-11 im em R1, L 2053-5-11 im em R2, L 2053-5-11 im em R3, L 2053-6-10 im em R1, L 2053-6-10 im em R2, L 2053-6-10 im em R3) and high soil acidity (Smolich PF, Impuls PF, Feniks PF, Lider PF, S-108 PF) were created *in vitro*, which showed a high level of economically valuable traits in the first generation. The created flax form NO-65 im em R3 on a medium-acid background was the most productive in terms of the number of seeds per plant and seed weight (43.9 pcs. and 6.64 g, respectively). The regenerant L-2053-6-10 im em R1 has the highest plant height (99.6 cm) and technical stem length (93.4 cm), as well as the highest number of capsules per plant (9.8 pcs). The combination of these characteristics indicates a high potential of these genotypes as initial breeding material. High hybridization efficiency was achieved due to appropriate weather conditions during the crossing period and careful castration of flowers before pollination, which ensured a high percentage of capsule setting and seed production (67 - 100%). As a result of the research, 204 seeds were obtained from 45 pollinated flowers, with the highest productivity when crossing the genotypes S-108 PF and L-2053-6-10 im em R3. It was noted that the genotype C-108 pf has recommended itself as a maternal component in crosses, which emphasizes its potential for fiber flax selection.

Keywords: flax, immature embryo, hypocotyl segment, resistance, anthracnose, regenerant, variety, increased acidity.

For citation: Zotova V. S. Proletova N. V. Creation of new forms of flax resistant to anthracnose and increased soil acidity// Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025.3 (71): 68-77 doi:10.18286/1816-4501-2025-3-68-77

Исследования выполнены в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования ФГБНУ ФНЦ ЛК по теме № FGSS-2024-0004.

Введение

Лён – ценнейшая техническая культура с расширенным ареалом произрастания. Это уникальное растение, которое является источником полноценного растительного белка, витаминов, микроэлементов и клетчатки [1]. Лён представляет собой сырьевой материал, используемый в разных видах промышленности: бумажной, текстильной, химической, а также автомобильной и военной [2, 3].

Повышенная кислотность почвы – одна из причин снижения продуктивности различных сельскохозяйственных культур, включая лен-долгунец. В мире площадь кислых почв составляет около 50 % от общей площади пахотных земель [4, 5]. Подкисление происходит, как правило, вследствие кислотных осадков, применения минеральных удобрений, а также в результате деятельности человека [6].

При повышении уровня кислотности почвенного раствора биологическая продуктивность различных культур, включая лен-долгунец, в производственных условиях значительно снижается. Отмечается, что одной из причин снижения продуктивности может являться сокращение в Российской Федерации в 15...20 раз количества посевных площадей, на которых проводится известкование почвы, соответственно, процесс подкисления почвы пропорционально увеличивается [7, 8]. Использование минеральных удобрений на кислых почвах сопровождается сокращением их эффективности на 30...40 %, а неблагоприятные почвенные условия приводят к значительному увеличению разрыва между потенциальным и фактическим урожаем сельскохозяйственных культур, в том числе льна-долгунца [9].

Многие сорта льна, несмотря на высокие показатели урожайности, восприимчивы к наиболее опасным грибным заболеваниям, таким как: фузариозное увядание, ржавчина, антракноз, пасмо, полиспороз. При проявлении этих патогенов в посевах урожайность льнопродукции (льноволокно, семена) резко снижается. При этом снижается качество волокна – основное условие при выборе сорта сельхозтоваропроизводителями для возделывания [10, 11]. Антракноз распространён повсеместно, поскольку ежегодно создаются благоприятные условия для его проявления в посевах льна-долгунца. Селекционное создание новых, устойчивых к наиболее опасным болезням сортов льна-долгунца – процесс многолетний и достаточно трудоемкий. В то же время использование биотехнологических методов позволяет значительно сократить селекционный процесс и создавать новые генотипы с заданными параметрами хозяйственно ценных признаков [12, 13].

Скрещивание и гибридизация льна-долгунца (*Linum usitatissimum*) играют ключевую роль в

современном растениеводстве и селекции, что имеет большое значение для повышения его продуктивности и устойчивости [14].

Гибридизация позволяет создавать новые сорта льна, которые обладают более высокой урожайностью, что особенно важно в условиях растущего спроса на волокно и масло, производимые из льна-долгунца. Скрещивание различных сортов часто используется для введения генов устойчивости к болезням и вредителям, что снижает потребность в пестицидах и увеличивает экономическую эффективность производства. Также гибриды могут быть получены с учетом специфических климатических условий, что позволяет увеличить площадь возделывания льна в различных регионах и повысить его устойчивость к засухе, холодам или другим неблагоприятным факторам [15, 16].

Цель исследования – создание новых форм льна, устойчивых к антракнозу и повышенной кислотности почвы с использованием методов и методик *in vitro*.

Материалы и методы

Исследования проводили на базе лабораторий селекционных технологий ОП Смоленский НИИСХ и ОП НИИЛ ФГБНУ ФНЦ ЛК в полевых и вегетационных условиях по методическим указаниям:

Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца (2014 г.) (*Селекция и первичное семеноводство льна-долгунца: методические указания* / В. П. Понажев, Л. Н. Павлова, Т. А. Рожмина, и др. Тверь: Тверской гос. ун-т, 2014. 140 с.);

Методические указания по селекции льна-долгунца (1956, 2004 гг.) (*Методические указания по селекции льна-долгунца* / Под ред. А. Р. Рогаш; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т льна. Сектор селекции и семеноводства. 2-е изд. Торжок: б. и., 1956. 18 с.; *Методические указания по селекции льна-долгунца*. Москва, 2004. 44 с.)

Методы создания *in vitro* растений-регенерантов льна-долгунца, устойчивых к антракнозу (*Colletotrichum lini* Manns et Bolley) и токсичным ионам алюминия (2014 г.) (*Виноградова Е. Г., Пролётова Н. В., Кудрявцева Л. П. Методы создания in vitro растений-регенерантов льна-долгунца, устойчивых к антракнозу (Colletotrichum lini Manns et Bolley) и токсичным ионам алюминия* - Тверь: Тверской гос. ун-т, 2014. 18 с.)

Объект исследований – селекционные линии льна Л-2053-5-11, Л-2053-6-10, НО-65, регенеранты, полученные в 2022-2023 гг. на основе этих линий - НО-65 из R3 (регенерант, полученный от линии НО-65 на основе незрелых зародышей, номер 3), Л 2053-5-11 из R1 (регенерант, полученный от линии Л 2053-5-11 на основе незрелых зародышей, номер 1), Л 2053-5-11 из R2 (регенерант, полученный от линии

Л 2053-5-11 на основе незрелых зародышей, номер 2), Л 2053-5-11 из R3 (регенерант, полученный от линии Л 2053-5-11 на основе незрелых зародышей, номер 3), Л 2053-6-10 из R1 (регенерант, полученный от линии Л 2053-6-10 на основе незрелых зародышей, номер 1), Л 2053-6-10 из R2 (регенерант, полученный от линии Л 2053-6-10 на основе незрелых зародышей, номер 2), Л 2053-6-10 из R3 (регенерант, полученный от линии Л 2053-6-10 на основе незрелых зародышей, номер 3), а также сорта Смолич, Импульс, Феникс, Лидер, С-108 и формы льна-долгунца, полученные при отборе из этих сортов на кислом фоне – Смолич пф, Импульс пф, Феникс пф, Лидер пф, С-108 пф.

Таблица 1. Состав питательных сред, используемых в экспериментах

Компоненты среды	Концентрация, мг/л	
	MS	Sh-2
NH ₄ NO ₃	1650	1650
KNO ₃	1900	1900
KH ₂ PO ₄	170	170
CaCl ₂ x 2H ₂ O (6		435
MgSO ₄ x 7 H ₂ O	370	370
MnSO ₄ x 4 H ₂ O	33,6	22,3
H ₃ BO ₃	62	6,2
ZnSO ₄ x 7 H ₂ O	15,0	8,6
KJ	0,83	0,75
CuSO ₄ x 5 H ₂ O	0,025	0,025
Na ₂ MoO ₄ x 2 H ₂ O	0,5	0,25
CoCl ₂ x 6 H ₂ O	0,025	0,025
FeSO ₄ x 7 H ₂ O	27,8	27,8
Na ₂ EDTA x H ₂ O	37,3	37,3
Инозитол	100	100
Са-пантотенат		4
Никотиновая кис-	1	0,5
Рибофлавин	0,015	
Пиридоксин HCl	0,5	0,5
Тиамин HCl	0,2	0,1
Аспарагин		250
Глицин		2
Г лутамин		25
L-серин		125
6-бензиладенин	1	1
Нафтилуксусная	0,05	0,05
Сахароза	30000	30000
Агар	8000	8000
pH	5,6 – 5,8	5,6 – 5,8

Примечание: pH устанавливали перед автоклавированием 1N раствором NaOH

Для создания новых, устойчивых к антракнозу форм льна с использованием биотехнологических приёмов, незрелые зародыши генотипов НО-65, Л 2053-5-11, Л.2053-6-10, 0-12901-6-3-2, 0-12901-1-2-1, извлекали из коробочек на 8...9 сутки после опыления и помещали на селективную среду. Регенеранты получены в селективных условиях на среде Sh-2 (табл. 1) с добавлением в неё культурального фильтрата штаммов возбудителя антракноза *Colletotrichum lini*. Концентрация культурального фильтрата в среде культивирования незрелых зародышей составляла 35 мл/л. Морфогенный каллус,

сформированный на основе незрелых зародышей, а также семена регенерантов переносили на свежую среду Sh-2, содержащую культуральный фильтрат возбудителя антракноза в концентрации 40 мл/л. Дальнейшее культивирование каллуса проводили на неселективной среде Sh-2 до формирования побегов и растений-регенерантов.

Для оценки на устойчивость к антракнозу семена регенерантов проращивали в чашках Петри на культуральном фильтрате штаммов возбудителя антракноза в концентрации 40 мл/л.

Укоренение сформированных побегов проводили на среде с питательными веществами без регуляторов роста. На финальном этапе растения извлекали из пробирок, корешки промывали от остатков среды, высаживали в грунт в условия влажной камеры, постепенно адаптируя регенеранты к обычным условиям окружающей среды.

Для создания новых генотипов льна-долгунца, устойчивых к повышенной кислотности почвы использовали раствор AlCl₃. Гипокотильные сегменты пяти сортов льна-долгунца Импульс, Феникс, С-108, Союз, Лидер, размером 5...8 мм, культивировали на селективной среде Мурасиге-Скуга (MS) в нашей модификации (внесение в состав среды аминокислот – аспарагин, глутамин, глицин, L-серин) (табл. 1) с добавлением AlCl₃ в концентрациях 44, 64, 84 мг/л. Первичный и пересадочный каллус с признаками морфогенеза культивировали на селективной среде MS с добавлением AlCl₃ в тех же концентрациях. Отбор морфогенных каллусов проводили до четвертого пассажа. Затем культивирование каллуса проводили на неселективной среде MS до формирования побегов и растений-регенерантов. Укоренение растений-регенерантов, устойчивых к раствору AlCl₃, осуществляли так же, как и регенерантов, устойчивых к культуральному фильтрату *Colletotrichum lini*.

Агрометеорологические условия вегетационного периода льна-долгунца 2022-2024 гг. представлены в таблице 2. Использованы данные регистрации метеорологических факторов ближайшей метеостанции города Рославль (Смоленская область).

В 2022 г. в мае наблюдали значительное снижение температуры, отклонившееся от климатической нормы на 2,3 °С. В июне температура превысила норму на 1,6 °С, а в августе отмечено максимальное отклонение, где температура была на 3,1 °С выше нормы. В мае также зафиксировано избыточное количество осадков, составившее 108 % от нормы, что может свидетельствовать о неблагоприятных метеорологических условиях месяца. В июне количество осадков сократилось до 75 % от нормы, что повлияло на дефицит влаги в почве, тогда как июль стал наиболее дождливым месяцем с рекордными осадками, в два раза превышающими норму (196 %). В августе количество осадков значительно снизилось, составив всего 29 % от нормы. Однако это уже не повлияло на урожайные показатели льна-долгунца.

Таблица 2. Агрометеорологические условия 2022-2024 г.

2022 г.							
Месяц	Норма средне- месячной тем- пературы, °С	Фактиче- ская тем- пература воздуха, °С	Отклонение от нормы, °С	Норма суммы осадков, мм	Сумма осад- ков, мм	% от нормы осад- ков	ГТК увлажне- ния по Селя- нину
май	12,7	10,4	-2,3	73,0	79,0	108,0	1,8
июнь	16,1	17,7	1,6	82,0	61,0	75,0	1,2
июль	18,2	17,6	-0,6	88,0	172,0	196,0	3,1
август	16,7	19,8	3,1	84,0	24,0	29,0	0,4
2023 г.							
	Норма средне- месячной тем- пературы, °С	Фактиче- ская тем- пература воздуха, °С	Отклонение от нормы, °С	Норма суммы осадков, мм	Сумма осад- ков, мм	% от нормы осад- ков	ГТК увлажне- ния Селяни- нова
май	12,7	11,9	-0,8	73,0	31,0	43,0	1,0
июнь	16,1	16,4	0,3	82,0	32,0	39,0	0,7
июль	18,2	17,5	-0,7	88,0	59,0	67,0	1,0
август	16,7	19,4	2,7	84,0	87,0	103,0	1,4
2024 г.							
	Норма средне- месячной тем- пературы, °С	Фактиче- ская тем- пература воздуха, °С	Отклонение от нормы, °С	Норма суммы осадков, мм	Сумма осад- ков, мм	% от нормы осад- ков	ГТК увлажне- ния Селяни- нова
май	12,7	13,0	0,3	73,0	61,0	83,0	1,5
июня	16,1	18,2	2,1	82,0	189,0	231,0	3,5
июль	18,2	20,1	1,9	88,0	88,0	100,0	1,4
август	16,7	18,6	1,9	84,0	50,0	59,0	0,9

В 2023 г. в мае и июле отмечены пониженные температуры с отклонениями на -0,8 °С и -0,7 °С соответственно. В июне температура несколько возросла (+0,3 °С), а в августе наблюдались более высокие показатели с отклонением +2,7 °С. Гидротермический коэффициент (ГТК) в мае и июле составил 1,0, что свидетельствует о нормальном уровне увлажнения. Однако в июне он снизился до 0,7, что указывает на нехватку влаги. В июле количество осадков увеличилось до 67 % от нормы, однако дефицит влаги сохранялся. Август стал наиболее дождливым месяцем с осадками, превышающими норму (103 %). В августе ГТК возрос до 1,4, указывая на переувлажнение.

В 2024 г. весенне-летний период характеризовался превышением температурных норм. В мае количество осадков составило 61,0 мм, что составило 83 % от нормы. Июнь стал аномально дождливым с 189,0 мм осадков, что составляет 231 % от нормы. В июле осадки полностью соответствовали норме (100 %), достигнув 88,0 мм. В августе осадков было мало, что уже не влияло на урожайность льнопродукции.

С целью изучения адаптивных свойств льна-долгунца к повышенной кислотности почвы в 2022-2023 гг. закладывали провокационный питомник. Установленные средние рекомендуемые дозы для внесения карбоната кальция были основаны на результатах многолетних стационарных исследований.

Дозу CaCO_3 (т/га) на сдвиг реакции среды определяли по формуле:

$$D_{\text{CaCO}_3} = \Delta \text{pH}_{\text{KCl}} \times H / 0,1$$

где $\Delta \text{pH}_{\text{KCl}}$ = (рН план. – рН исх.);

рН план. – планируемый уровень pH_{KCl} ;

рН исх. – исходный уровень pH_{KCl} ;

H – норма расхода CaCO_3 для сдвига рН на 0,1 единицы.

Семена льна-долгунца в питомнике высевали рядовым способом с площадью питания одного растения 3,75 см². Норма посева составляла 100 семян на каждый ряд.

В 2024 г. был заложен селекционный питомник льна-долгунца для проведения скрещивания и оценки гибридного материала.

Закладку опытов, проведение учетов и наблюдений проводили в соответствии с утвержденными методическими указаниями, что обеспечивало стандартизацию и достоверность полученных данных (Доспехов Б. А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. С. 231-239.).

Посев в селекционном питомнике осуществляли вручную, что позволяло точно контролировать глубину заделки семян и равномерность распределения. Применяли рядовой способ посева, для этого использовали специальный маркер с междурядьями 10 см.

Высевали по 200 семян на рядок генотипов льна-долгунца, устойчивых к повышенной кислотности почвы и по 50...60 семян регенерантов, устойчивых к антракнозу.

Площадь деланки составляла 1 м², повторность опыта – трехкратная.

Почва опытного участка дерново-подзолистая среднесуглинистая среднеоккультуренная со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса – 2 %, рН почвенного раствора – 4,9, содержание подвижного фосфора (P_2O_5) – 173 мг/кг, содержание обменного калия K_2O – 90 мг/кг.

Агротехнические мероприятия соответствовали рекомендациям для льна-долгунца. Уход за посевами проводили в течение всей вегетации. Он заключался в прополке льна от сорняков и поддержании в чистом состоянии дорожек между деланками.

Для осуществления скрещиваний в качестве материнских форм использовали генотипы С-108 пф, Импульс пф, Лидер пф, Смолич пф, Феникс пф. В качестве отцовских форм для скрещивания взяты регенеранты НО-65 нз R3, Л 2053-5-11 нз R1, Л 2053-5-11 нз R2, Л 2053-5-11 нз R3, Л 2053-6-10 нз R1, Л 2053-6-10 нз R2, Л 2053-6-10 нз R3. Проведено 35 комбинаций по 5 скрещиваний на комбинацию.

Техника гибридизации у льна была следующей. Накануне дня цветения проводили кастрацию, захватывая пинцетом верхушку конуса свернутых лепестков и удаляя их. Затем один за другим удаляли все пять пыльников. Кастрированный цветок сразу же изолировали. Для этого расправляли комочек ваты в тонкую пластинку и заворачивали в нее цветок. Чтобы вата не опала, слегка скручивали ее над цветком и у цветоножки. Опыление проводили на следующее утро между 7 и 9 часами.

Для этого срывали распустившийся цветок сорта-опылителя, водили вскрывшимися пыльниками по рыльцам кастрированного цветка. После опыления цветок вновь обертывали ватным изолятором, а на цветоножку ниткой привязывали этикетку с необходимыми сведениями (дата проведения скрещивания, отцовский компонент).

Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета программ Microsoft Excel с

использованием метода первичной статистической обработки результатов эксперимента – определения выборочной средней величины.

Результаты

Регенеранты, проявляющие устойчивость к культуральному фильтрату штаммов возбудителя антракноза, получали путём отбора морфогенных клеток в селективных условиях.

Для культивирования незрелых зародышей в питательную среду Sh-2 добавляли культуральный фильтрат (кф) штаммов возбудителя антракноза льна 527. 516, 608 в концентрации 35 мл/л.

Стимулирование пролиферации каллуса отмечено у 88,6...91,7 % незрелых зародышей при наличии в селективной среде КФ. Причём это было характерно при использовании всех штаммов антракноза и для всех генотипов, включенных в исследования (табл. 3).

Морфогенный каллус, сформированный на основе незрелых зародышей, переносили на свежую среду Sh-2, содержащую культуральный фильтрат возбудителя антракноза в концентрации 40 мл/л. Дальнейшее культивирование каллуса проводили на неселективной среде Sh-2. В результате селекции *in vitro* были получены как побеги, так и регенерантные растения. Количество регенерантных растений, выраженное в отношении к объёму сформированного каллуса, при использовании концентрации кф 35 мл/л варьировалось в зависимости от штамма патогена в небольшом диапазоне от 0,61 до 0,65 шт. на каллус.

Таблица 3. Влияние КФ на морфогенез льна в эмбриокультуре (среднее по генотипам, n=350, , среда Sh-2, концентрация кф – 35 мл/л)

Штамм патогена	Сформировано каллусов		Из них морфогенных		Получено в результате селекции <i>in vitro</i>					
					почек		побегов		регенерантов	
	шт.	%	шт.	%	шт.	шт./	шт.	шт./	шт.	шт./
527	324	92,6	310	88,6	402	1,24	243	0,75	217	0,62
516	341	97,4	321	91,7	395	1,16	267	0,78	227	0,65
608	328	93,7	314	89,7	323	0,98	246	0,75	217	0,61
НСР _{0,05}		4,42		3,12						

В результате проведённых исследований получены устойчивые к культуральному фильтрату растения-регенеранты НО-65 нз R3, Л 2053-5-11 нз R1, Л 2053-5-11 нз R2, Л 2053-5-11 нз R3, Л 2053-6-10 нз R1, Л 2053-6-10 нз R2, Л 2053-6-10 нз R3, которые были оценены в селективных условиях *in vitro* на устойчивость к антракнозу.

Проращивание семян регенерантов на культуральном фильтрате штаммов возбудителя антракноза в концентрации 40 мл/л показало, что все полученные регенеранты были устойчивы к антракнозу на уровне 65,5...68,0 %, поскольку такое количество семян проросло и в течение 5 суток на их основе формировались гипокотили (табл. 4).

Таблица 4. Устойчивость регенерантов *in vitro* к антракнозу

Генотип	Количество проросших семян, % $\pm$ Sp
НО-65 нз R3	68,0 $\pm$ 0,3*
Л 2053-5-11 нз R1	66,7 $\pm$ 0,5*
Л 2053-5-11 нз R2	65,5 $\pm$ 0,7*
Л 2053-5-11 нз R3	66,5 $\pm$ 0,7*
Л 2053-6-10 нз R1	67,3 $\pm$ 0,4*
Л 2053-6-10 нз R2	65,8 $\pm$ 0,2*
Л 2053-6-10 нз R3	66,2 $\pm$ 0,4*

*- достоверно при $p < 0,001$

С целью проведения селекции *in vitro* и получения новых форм льна, устойчивых к повышенной кислотности почвы, проведены исследования по культивированию гипокотильных сегментов (ГС) и

морфогенных очагов на селективных средах, содержащих токсичные ионы алюминия в форме $AlCl_3$.

На 21 сутки с момента культивирования морфогенного каллуса, полученного на основе ГС в условиях *in vitro*, новые каллусные клетки формировались во всех вариантах исследований. Причем, в основном, консистенция каллуса была рыхлой, от светло-зелёного до светло-коричневого цвета. Отмечено, что у генотипов во всех вариантах исследований формировался морфогенный каллус. В тоже время, новообразования на каллусах в форме почек

и побегов, формировались с более высокой частотой – от 0,3 до 2 шт./каллус в вариантах добавления в среду $AlCl_3$ в концентрациях 44 и 64 мг/л, как показано в таблице 5. Отмечено, что сорта Феникс и Импульс в условиях *in vitro* проявляли повышенную способность формировать новообразования в меристематических очагах как в контроле, так и на селективном фоне. Тогда как сорта Лидер, С-108, Союз отличались меньшей способностью к морфогенезу в условиях *in vitro*.

Таблица 5. Формирование новообразований в селективных условиях на каллусах, полученных на основе ГС

Генотип / Концентрация раствора $AlCl_3$, мг/л	Количество почек и побегов, сформированных в меристематических очагах, шт./каллус, $\pm Sp$			
	0 (контроль)	44,0	64,0	84,0
Феникс	$2,7 \pm 0,1^*$	$2,0 \pm 0,6^*$	$2,0 \pm 0,6^*$	$1,5 \pm 0,1^*$
Импульс	$1,8 \pm 0,05^*$	$1,3 \pm 0,1^*$	$1,7 \pm 0,3^*$	$1,0 \pm 0,05^*$
Лидер	$1,0 \pm 0,1^*$	$0,5 \pm 0,1^*$	$0,4 \pm 0,1^*$	$0,3 \pm 0,1$
С-108	$1,0 \pm 0,1^*$	$0,3 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$	0
Союз	$1,1 \pm 0,1^*$	$0,6 \pm 0,1^*$	$0,5 \pm 0,1^*$	$0,1 \pm 0,1$

*- достоверно при $p < 0,001$

Побеги используемых сортов льна-долгунца, полученные в результате отбора морфогенных очагов на селективных средах, переносили на среду MS, содержащую 64 мг/л $AlCl_3$ и оценивали на устойчивость к токсичному действию ионов алюминия. Проявившие устойчивость побеги продолжали развиваться, т.е. образовывали корешки или, в месте среза, каллусную ткань с морфогенными очагами. Восприимчивые к ионам алюминия побеги в селективных условиях темнели и погибали. Их количество составило 84 % от сформированных в селективных условиях.

В результате исследований выявлено, что сорта Феникс, Импульс, С-108, Смолич, проявили способность прорастать и формировать проростки на растворе $AlCl_3$ с pH_{KCl} 4,0. Исключение составил сорт Лидер, у которого семена прорастали, но проростки в дальнейшем не формировались.

В результате исследований получены побеги и растения-регенеранты льна-долгунца Смолич пф, Импульс пф, Феникс пф, Лидер пф, С-108 пф, которые оценивались на провокационном фоне по устойчивости к повышенной кислотности почвы и в последующем являлись исходными формами для проведения скрещиваний.

Оценка растений, полученных в селективных условиях, показала, что на провокационном фоне в полевых условиях регенеранты проявили высокую устойчивость к низким значениям pH почвенного раствора. Это проявилось в их способности хорошо расти в течение вегетации, несмотря на неблагоприятные погодные и почвенные условия, и сформировать высокие показатели хозяйственно-ценных признаков (семена, техническая длина).

На основании полученных данных о различных генотипах в условиях повышенной кислотности почвы можно выделить наиболее генотипы льна, продуктивные по ключевым показателям, а, соответственно, и наиболее устойчивые к этому фактору. Наибольшей высотой растений характеризовался регенерант Л-2053-6-10 из R1 (99,6 см), что значительно выше среднего значения (87,97 см). Наименьшая высот отмечена у НО-65 из R3 (72,8 см).

Техническая длина стебля льна-долгунца – важный показатель продуктивности, от величины которого зависит урожай волокна. У растений генотипов С-108 пф, Импульс пф, Смолич пф, Феникс пф, Лидер пф техническая длина практически на одном уровне – 88,2...91,1 см. У материнских форм наибольшая техническая длина фиксировалась у регенеранта Л-2053-6-10 из R1 (93,4 см), наименьшая – у НО-65 из R3 (66 см) (табл. 6).

Составной частью структуры урожая семян льна-долгунца является количество семенных коробочек на растении и семян в них. У изучаемых образцов количество коробочек варьировало от 3,9 шт. (Л-2053-6-10 из R3) до 9,8 шт. (Л-2053-6-10 из R1).

Несмотря на высокую влажность в период цветения, в сформировавшихся на всех растениях коробочках завязались семена. Количество семян с растения варьировало от 28,1 шт. у регенеранта Л-2053-6-10 из R3 до 69,7 шт. – у НО-65 R3 при среднем значении этого признака 43,9 шт. При меньшем количестве коробочек, у НО-65 R3 в коробочках завязывалось большее количество семян, поэтому он характеризовался наибольшей семенной продуктивностью.

Таблица 6. Характеристика образцов льна-долгунца по продуктивности (среднее по повторностям)

Генотип	Количество растений в снопе, шт.	Высота растений, см	Техническая длина, см	Количество коробочек на растении, шт.	Количество семян с растения, шт.	Масса 1000 семян, г
С-108 пф	38,7	89,8	84,1	6,8	46,5	5,1
Импульс пф	39,3	89,0	83,0	4,6	33,9	3,8
Смолич пф	44,7	88,2	83,5	5,8	37,4	4,7
Феникс пф	44,0	91,1	85,1	5,6	31,2	4,9
Лидер пф	37,7	88,3	83,0	7,2	47,7	5,7
НО-65 нз R3	35	72,8	66,0	8,8	69,7	6,64
Л-2053-5-11 нз R1	23	86,5	82,4	7,0	48,6	3,92
Л-2053-5-11 нз R2	28	83,85	77,05	6,3	48,5	5,15
Л-2053-5-11 нз R3	34	89,2	82,4	6,5	33,0	3,61
Л-2053-6-10 нз R1	28	99,6	93,4	9,8	67,4	6,02
Л-2053-6-10 нз R2	77	89,45	83,9	4,8	36,0	5,7
Л-2053-6-10 нз R3	88	87,8	83,1	3,9	28,1	4,13
Среднее		87,97	82,2	7,7	43,9	4,9
НСР _{0,5}		3,2	3,4	0,4	2,2	0,2

Показатель «Масса 1000 семян» заложен у генотипа на генетическом уровне и не зависел от погодных условий. Наибольшая масса 1000 штук семян в исследованиях отмечена у генотипа НО-65 нз R3 (6,64 г), что также превышало средний показатель (4,9 г). Генотип Л-2053-5-11 нз R3 характеризовался наименьшей массой семян (3,61 г).

Таким образом, сравнительный анализ различных генотипов показал, что генотип НО-65 нз R3 выделялся как самый продуктивный по количеству и массе семян. Генотип Л-2053-6-10 нз R1 отличался наибольшей высотой, технической длиной, а также имел наибольшее количество коробочек на растении.

При проведении скрещиваний ставилась цель передачи генов устойчивости к антракнозу и повышенной кислотности почвы.

В результате исследований выявлено, что завязываемость у льна во всех комбинациях скрещиваний была высокой. Этому способствовала оптимальная температура воздуха и влажность в период проведения скрещиваний. Высокая эффективность гибридизации достигалась также благодаря тщательной кастрации цветков перед опылением, что обеспечивало высокий процент завязывания коробочек и получения семян. Всего в опыте получено 204 семени льна-долгунца от искусственного опыления.

Результаты эксперимента показали, что в качестве материнского компонента в скрещиваниях хорошо зарекомендовал себя С-108 пф. Наибольшее количество гибридных семян получено при опылении С-108 пф х Л-2053-6-10 нз R2 (всего 31 штуки). Завязываемость коробочек при скрещивании С-108 пф х Л-2053-6-10 нз R2 составила 100 %.

В других комбинациях эффективность скрещиваний составляла 100 %, кроме комбинаций Л-2053-5-11 нз R2 х С-108 Пф (67 %), Л-2053-6-10 нз R3 х С-108 Пф (60 %), Л-2053-5-11 нз R3 х Лидер Пф (75 %), Л-2053-5-11 нз R3 х Феникс Пф (50 %). В зависимости от комбинации скрещиваний получено от 2 до 18 семян.

Важным шагом в работе стало успешное осуществление скрещиваний между формами, полученными на кислом фоне, и регенерантами, устойчивыми к антракнозу. Возможность передачи генов устойчивости к антракнозу и повышенной кислотности почвы в последующих поколениях путём проведения скрещиваний реальна.

Обсуждение

Создание новых высокопродуктивных сортов льна-долгунца, устойчивых к наиболее опасным болезням и абиотическим стрессам, – процесс непрерывный, многолетний и достаточно трудоемкий [17, 18]. Методами классической селекции выведены, например, сорта льна-долгунца А-93, Альфа, Визит, Надежда, Факел, Атлант, Универсал, Шанс, Смолич и др., включенные в Госреестр селекционных достижений РФ [19]. Вместе с тем, всё большее внимание уделяется использованию биотехнологических методов, которые позволяют значительно сократить селекционный процесс и создавать новые ценные генотипы с заданными параметрами хозяйственно ценных признаков за 5...7 лет. Исследования многих авторов показывают возможность создания ценного исходного материала сельскохозяйственных культур, в том числе льна-долгунца, используя методы *in vitro* [20, 21]. Наши исследования подтверждают возможность использования биотехнологических методов для создания новых форм льна-долгунца с изменёнными признаками. Из восприимчивых к антракнозу сортов созданы устойчивые к антракнозу линии льна-долгунца с устойчивостью более 60 %. Помимо устойчивости к патогену созданные формы обладали и повышенными показателями хозяйственно-ценных признаков. Созданы формы, устойчивые к повышенной кислотности почвы, проявляющие высокие показатели продуктивности. Созданные генотипы могут служить ценным исходным материалом в селекции на устойчивость к антракнозу, повышенной кислотности почвы при создании новых высокопродуктивных сортов льна-долгунца.

Заклучение

Созданы *in vitro* линии льна-долгунца, устойчивые к антракнозу (НО-65 нз R3, Л 2053-5-11 нз R1, Л 2053-5-11 нз R2, Л 2053-5-11 нз R3, Л 2053-6-10 нз R1, Л 2053-6-10 нз R2, Л 2053-6-10 нз R3) и повышенной кислотности почвы (Смолич пф, Импульс пф, Феникс пф, Лидер пф, С-108 пф), которые в первом поколении проявили высокий уровень хозяйственно-ценных признаков. Наиболее продуктивным по количеству семян на растении и массе семян был генотип НО-65 нз R3 (43,9 шт. и 6,64 г соответственно). У Л-2053-6-10 нз R1 отмечена наибольшая высота растений (99,6 см) и техническая длина стебля (93,4 см), а также наибольшее количество коробочек на растении (9,8 шт.). Сочетание этих характеристик

указывает на высокий потенциал данных генотипов в качестве исходного селекционного материала. Высокая эффективность гибридизации достигалась благодаря оптимальным погодным условиям в период скрещиваний и тщательной кастрации цветков перед опылением, что обеспечивало высокий процент завязывания коробочек и получения семян. В результате исследований получено 204 шт. семян от 45 опыленных цветков с наибольшей продуктивностью при скрещивании генотипов С-108 пф и Л-2053-6-10 нз R3. Отмечено, что генотип С-108 пф хорошо зарекомендовал себя в качестве материнского компонента в скрещиваниях, что подчеркивает его перспективность для селекции льна-долгунца.

Литература

1. Понажев В. П., Пролётова Н. В., Ушаповский И. В. Совершенствование селекции и семеноводства – важнейшего ресурса для эффективного развития льноконопльной отрасли в Российской Федерации // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 3 (13). С. 25-35.
2. Скрининг сортообразцов льна-долгунца коллекции ВИР по урожайности льноволокна и параметрам адаптивности в условиях Северо-Западного региона / А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21. № 2. С. 141-151.
3. Рожмина Т.А., Мельникова Н.В., Дмитриев А.А. и др. Поиск перспективных генотипов льна-долгунца с высоким качеством волокна // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 10. С. 70-75.
4. Growth, yield and quality improvement of flax (*Linum usitatissimum* L.) grown under tarai region of Uttarakhand, India through integrated nutrient management practices / A. Kumar, B. Pramanick, B. Mahapatra, et al. // Ind. Crop. Prod. 2019. Vol. 140. P. 111710.
5. Понажев В. П., Пролётова Н. В., Ушаповский И. В. Совершенствование селекции и семеноводства – важнейшего ресурса для эффективного развития льноконопльной отрасли в Российской Федерации // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 3 (13). С. 25-35.
6. Скрининг сортообразцов льна-долгунца коллекции ВИР по урожайности льноволокна и параметрам адаптивности в условиях Северо-Западного региона / А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21. № 2. С. 141-151.
7. A comparative study between Europe and China in crop management of two types of flax: linseed and fibre flax / K. Heller, Q. C. Sheng, F. Guan, et al. // Ind. Crops Prod. 2015. Vol. 68. P. 24–31.
8. Устойчивость образцов генофонда льна к эдафическому стрессу, вызванному пониженной кислотностью / Т. А. Рожмина, А. А. Жученко Мл, Н. В. Мельникова и др. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. Т. 21. № 2. С. 133-140
9. Кадыров А. М. Селекционный процесс как объект оптимизационных исследований: идеи, реализация, приоритеты. Минск: Беларус. наука, 2012. 219 с.
10. Новые источники селекционно-значимых признаков льна, адаптивные к условиям Центрального Нечерноземья / Т. А. Рожмина, А. А. Жученко, Н. Ю. Рожмина и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 8. С. 50-55.
11. Рогаш А. Р. Создание высоковолокнистых источников для селекции льна-долгунца // Селекция, семеноводство и агротехника возделывания льна-долгунца: сб. науч. тр. Торжок, 1988. Вып. 25. С. 46–48.
12. Оценка перспективных линий льна-долгунца по основным селекционно-значимым признакам, пластичности и адаптивности в условиях Северо-Западного региона России / А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева и др. // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Т. 18. № 4. С. 36-50.
13. Пролётова Н. В., Зотова В. С. Разнообразие форм льна, полученных при селекции *in vitro* на устойчивость к антракнозу (*Colletotrichum lini*) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4 (68). С. 41-49.
14. Павлова Л. Н., Герасимова Е. Г., Румянцева В. Н. Современное состояние, направления и перспективы развития селекции льна-долгунца во ВНИИЛ Лен – стратегическая культура XXI века: Матер. II межд. науч.-практ. конф., посв. 105-летию образования ФГБНУ «Псковский научно-исследовательский институт сельского хозяйства», Псков, 2-4 июля 2015 г. Псковский НИИСХ. М., 2015. С. 87-90
15. Хамутовский П. Р., Хамутовская Е. М., Балашенко Д. В. Сорт – основа повышения эффективности льноводства // Земледелие и защита растений. Приложение №4. 2017. С. 16-18.

- 16.. Flax stems: from a specific architecture to an instructive model for bioinspired composite structures / C. Baley, C. Goudenhooft, M. Gibaud, et al. // *Bioinspir Biomim.* 2018. No. 13 (2). P. 26007
17. Дробыш А. В., Тарануха Г. И. Использование внутривидовой гибридизации в селекции озимой мягкой пшеницы // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.* 2017. № 2. С. 30-33.
18. Поиск перспективных генотипов льна-долгунца с высоким качеством волокна / Т. А. Рожмина, Н. В. Мельникова, А. А. Дмитриев и др. // *Достижения науки и техники АПК.* 2024. Т. 38. № 10. С. 70-75. doi:10.53859/02352451_2024_38_10_70. EDN DHOODP.
19. Этапы создания нового сорта льна-долгунца с высокими пряжильными свойствами / Е. Г. Герасимова, Л. Н. Павлова, Л. П. Кудрявцева и др. // *Кормопроизводство.* 2023. № 9. С. 11-15.
20. Герасимова Е. Г. Оценка влияния условий выращивания на урожайность и качество льнопродукции // *Достижения науки и техники АПК.* 2023. Т. 37, № 4. С. 15-20.
21. Gibaud M., Bourmaud A., Baley C. Understanding the lodging stability of green flax stems; The importance of morphology and fibre stiffness // *Biosyst. Eng.* 2015. Vol. 137. P. 9-21.

References

1. Ponazhev V. P., Proletova N. V., Ushchapovsky I. V. Improvement of breeding and seed production - the most important resource for effective development of the flax-hemp industry in the Russian Federation // *Technical crops. Scientific agricultural journal.* 2024. No 3 (13). P. 25-35.
2. Screening of flax varieties from the VIR collection for flax fiber yield and adaptability parameters in the conditions of the North-West region / A. D. Stepin, M. N. Rysev, T. A. Ryseva, et al. // *Agrarian science of the Euro-North-East.* 2020. Vol. 21. No 2. P. 141-151.
- 3.. Search for promising genotypes of fiber flax with high fiber quality / T. A. Rozhmina, N. V. Melnikova, A. A. Dmitriev, et al. // *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex.* 2024. Vol. 38, No 10. P. 70-75.
4. Growth, yield and quality improvement of flax (*Linum usitatissimum* L.) grown under tarai region of Uttarakhand, India through integrated nutrient management practices / A. Kumar, B. Pramanick, B. Mahapatra, et al. // *Ind. Crop. Prod.* 2019. Vol. 140. P.
5. Ponazhev V. P., Proletova N. V., Ushchapovsky I. V. Improvement of breeding and seed production - the most important resource for the effective development of the flax-hemp industry in the Russian Federation // *Technical crops. Scientific agricultural journal.* 2024. No 3 (13). P. 25-35.
6. Screening of flax varieties from the VIR collection for flax fiber yield and adaptability parameters in the conditions of the North-West region / A. D. Stepin, M. N. Rysev, T. A. Ryseva, et al. // *Agrarian science of the Euro-North-East.* 2020. Vol. 21. No 2. P. 141-151.
7. A comparative study between Europe and China in crop management of two types of flax: linseed and fibre flax / K. Heller, Q. C. Sheng, F. Guan, et al. // *Ind. Crops Prod.* 2015. Vol. 68. P. 24–31.
8. Resistance of flax gene pool samples to edaphic stress caused by low acidity / T. A. Rozhmina, A. A. Zhuchenkon., N.V. Melnikova, et al. // *Agrarian science of the Euro-North-East.* 2020. Vol. 21. No 2. P. 133-140
9. Kadyrov A.M. Breeding process as an object of improvement research: ideas, implementation, priorities. Minsk: Belarus. science, 2012. 219 p.
10. New sources of breeding-significant traits of flax, adaptive to the conditions of the Central Non-Black Soil Region / T. A. Rozhmina, A. A. Zhuchenko, N. Yu. Rozhmina, et al. // *Achievements of science and technology of the agro-industrial complex.* 2020. Vol. 34, No 8. P. 50-55.
11. Rogash A. R. Creation of high-fiber sources for selection of fiber flax // *Selection, seed production and agricultural technology of fiber flax cultivation: collection of scientific works.* Torzhok, 1988. Issue 25. P. 46-48.
12. Evaluation of promising lines of fiber flax by the main breeding-significant traits, plasticity and adaptability in the conditions of the North-West region of Russia / A. D. Stepin, M. N. Rysev, T. A. Ryseva, et al. // *Far Eastern Agrarian Vestnik.* 2024. Vol. 18. No 4. P. 36-50.
13. Proletova N. V., Zotova V. S. Diversity of flax forms obtained by in vitro selection for resistance to anthracnose (*Colletotrichum lini*) // *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy.* 2024. No 4 (68). P. 41-49.
14. Pavlova L. N., Gerasimova E. G., Rumyantseva V. N. Current state, directions and prospects for development of fiber flax breeding at the All-Russian Research Institute of Flax. Flax is a strategic crop of the 21st century: Materials of II international scientific-practical conference dedicated to the 105th anniversary of the formation of Pskov Research Institute of Agriculture, Pskov, July 2–4, 2015. Pskov Research Institute of Agriculture. M., 2015. P. 87-90
15. Khamutovsky P. R., Khamutovskaya E. M., Balashenko D. V. Variety as a basis for increasing the efficiency of flax cultivation // *Agriculture and Plant Protection. Supplement No 4.* 2017. P. 16-18.
16. Flax stems: from a specific architecture to an instructive model for bioinspired composite structures / C. Baley, C. Goudenhooft, M. Gibaud, et al. // *Bioinspir Biomim.* 2018. No 13 (2). P. 26007
17. Drobysch A. V., Taranukho G. I. Usage of intraspecific hybridization in breeding of winter soft wheat // *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy.* 2017. No 2. P. 30-33.

18. Search for promising flax genotypes with high fibre quality / T. A., Rozhmina, A. N. Melnikov. A. A. Dmitriev et al. // Dostizheniya nauki i tekhniki APK2024. T. 38. № 10. С. 70-75. doi:10.53859/02352451_2024_38_10_70. EDN DHOODP.
19. Stages of creating a new variety of fiber flax with high spinning properties / E. G. Gerasimova, L. N. Pavlova, L. P. Kudryavtseva, et al. // Feed production. 2023. No 9. P. 11-15.
20. Gerasimova E. G. Assessment of the influence of growing conditions on yield and quality of flax products // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2023. Vol. 37. No 4. P. 15-20.
21. Gibaud M., Bourmaud A., Baley C. Understanding the lodging stability of green flax stems; The importance of morphology and fibre stiffness // Biosyst. Eng. 2015. Vol. 137. P. 9–21.