

АДАПТИВНЫЙ СТАТУС ГЕНОТИПОВ *LINUM USSITATISSIMUM* L. В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Королёв Константин Петрович^{1✉}, Якубенко Алина Николаевна¹,
Собиржонов Давлатбек Бахромжон Угли²

¹ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия

²Международный университет «Туран», Наманган, Узбекистан

¹korolevkonstantin799@gmail.com

Аннотация. Выявление адаптивных генотипов льна и их использование в качестве исходного материала является важным компонентом в стратегии создания новых сортов, при этом необходим учет сложного взаимодействия генотипа и окружающей среды. Цель исследований – определить потенциал генотипов льна по морфоадаптивным показателям при выращивании в различных средовых условиях. Тестирование гибридных линий ($n = 18$) проводили в условиях Нижнетавдинского района Тюменской области. На основании дисперсионного анализа ANOVA установлены достоверные различия между генотипами льна по следующим критериям: полевая всхожесть семян (ПВ, %, $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$, $n = 3$); высота растений (ВР, см, $p \leq 0,05$, $n = 3$); масса стебля (МС, мг, $p \leq 0,05$, $n = 5$); содержание волокна (СВ, %, $p \leq 0,05$, $n = 4$); число коробочек на 1 растении (ЧК, шт., $p \leq 0,05$; $n = 6$); число семян в 1 коробочке (ЧС, шт., $p \leq 0,05$, $n = 7$). Выявлена структура сложного взаимодействия генотипа и среды (GxE) на основе использования анализа АММИ, с установлением высокой достоверной доли компонент (IPCA1, IPCA2) по набору изученных морфобиологических показателей и свойств. Отобраны перспективные генотипы по полевой всхожести семян (G1, G9, G11), высоте растений (G1, G5, G15), массе стебля (G1, G3, G18), содержанию волокна (G1, G4, G5), числу коробочек на 1 растении (G3, G9, G12), числу семян в 1 коробочке (G1, G7, G15), которые могут быть использованы в дальнейших селекционно-генетических исследованиях в условиях Тюменской области.

Ключевые слова: лен-долгунец, гибридная линия, адаптивность, многофакторный дисперсионный анализ, АММИ-метод.

Для цитирования: Королёв К. П., Якубенко А. Н., Собиржонов Д. Б. Адаптивный статус генотипов *Linum ussitatissimum* L. в условиях северной лесостепной зоны Тюменской области // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 2(82). С. 5-13. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_5-13.

Актуальность. Из сельскохозяйственных культур прядильного направления интерес представляет лен [4, 6, 20], который используется во многих отраслях промышленности. Волокна натурального происхождения имеют важное экологическое значение. Для обеспечения текстильной промышленности необходимыми объемами исходной продукции требуется выращивание сортов льна с высоким выходом волокна высокого качества [4, 7, 10], что предъявляет определенные требования и к селекционной науке. Наряду с биологической продуктивностью и показателями качества, они должны обладать также устойчивостью к абиотическим и биотическим факторам

окружающей среды, что возможно за счет использования различных достижений в биотехнологии, генетике, физиологии и молекулярной биологии [1].

Агроклиматические условия различных регионов Российской Федерации обеспечивают относительно высокий уровень реализации продуктивности у создаваемых сортов льна-долгунца, в Госреестр включено свыше 30 сортов [2] различных групп спелости, биологической продуктивности, устойчивости к болезням и полеганию.

Важность исходного материала на начальном этапе селекции остается несомненной в связи с возрастающей частотой и силой кли-

матических изменений. Поэтому адаптивность и стабильность генотипов льна приобретают все большую значимость [5, 6]. С целью повышения эффективности отбора рядом исследователей были предложены различные пара- и непараметрические статистические инструментари [13, 14], с использованием которых были выявлены, например, ценные генотипы пшеницы [11, 12, 15], горчицы сарептской [23], при этом на льне они фрагментарны [7, 9], что вызывает необходимость проведения данных исследований, особенно в Тюменской области, с ее контрастностью климатических и почвенных особенностей. Взаимодействие генотипа и среды является достаточно сложным фактором, определяющим конечную продуктивность сортов, поэтому изучение его структуры и механизма действия позволит внести вклад в его конечную интерпретацию как системообразующего компонента повышения адаптивности и генотипа, и агроценозов в целом [17, 22].

Цель исследований – выявление адаптивности гибридных линий льна-долгунца по морфобиологическим признакам и свойствам при различных условиях выращивания, отбор лучших из них для дальнейшего использования в селекции.

Материал и методы исследования. В качестве объекта исследований использованы 18 гибридных линий льна-долгунца (G_1 - G_{18} ; F_3 - F_5), созданные методом межсортных скрещиваний по неполной диаллельной схеме (4x4), на основе применения в качестве родительских форм следующих сортов: ♀♂Ярок, ♀♂Грант (Республика Беларусь), ♀♂Betertelsdorf 6884/60 (Германия), ♀♂ Alizee (Франция).

Экологическое изучение генотипов проводили в трех средовых условиях (E_1 – 2021 г., E_2 – 2022 г., E_3 – 2023 г.), на биологической станции ТюмГУ «Озеро Кучак» в Нижнетавдинском районе Тюменской области. Полевые опыты были заложены на окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почве со средним содержанием гумуса 3,6 %, подвижных форм P_2O_5 – 433,3 мг/кг, обменного K_2O – 234,0 мг/кг почвы. Повторность опытов – трехкратная, размещение – рандомизированное. Закладку полевых экспериментов, фенологические учеты проводили по общепринятой методике по селекции льна [8].

Климатические условия вегетационных периодов различались по среднесуточной температуре и количеству выпавших осадков, отклонениями от среднепогодных значе-

ний (нормы). Проводили расчет гидротермического коэффициента Селянинова, согласно которому они характеризовались как слабой засушливостью (ГТК = 1,2), так и влажностью (ГТК = 1,6), что позволило дать наиболее объективную оценку генотипов льна-долгунца в данном экологическом пункте.

Обработку полученных результатов выполняли методом дисперсионного анализа [3] и с использованием модели (АММИ) [26]. Выявление достоверных различий (при $p \leq 0,05$ и $p \leq 0,01$) проводили с использованием F-критерия.

Результаты исследований. Использованный материал должен характеризоваться различными фенотипическими особенностями, своей уникальной, генетической природой. В большинстве случаев отобранные генотипы имели различия от исходных материнских форм по окраске семени, лепестков цветка, у некоторых из них присутствовало слабое антоциановое окрашивание гипокотыля, что является важным для дальнейшего селекционного отбора с учетом создания исходного материала с некоторыми маркерными признаками (табл. 1).

Важным свойством культурных растений является их умение приспосабливаться к различным стрессовым факторам окружающей среды, что вызывает необходимость определения различий между сортами, установление сложного взаимодействия генотипа со средой, выявление наиболее ценных из них для отбора, использование в качестве исходного материала в приоритетных селекционных программах [16, 24, 25].

Одним из методов диагностики адаптивных форм растений может быть АММИ, показавший свою эффективность на ряде культур [18, 21, 22]. На первом этапе оценивали гибридные линии с использованием многофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) по 6 тест-признакам.

На основании полученных данных установлено достоверное ($p \leq 0,05$; $p \leq 0,01$) влияние факторов в общей структуре признаков при выращивании в данном агроэкологическом пункте. Следует отметить максимальный долевого вклад генотипических особенностей в формирование полевой всхожести семян (G , 18,44-42,13 %) и массы стебля (G , 15,71-31,16 %). Факторы среды обуславливали проявление высоты растений (E , 21,54-33,06 %), взаимодействие генотипа и среды вызывало наибольший уровень содержания волокна ($G \times E$, 29,93-51,41 %), числа коробочек на 1 растении ($G \times E$, 21,64-46,66 %) и числа семян в 1 коробочке ($G \times E$, 28,99-50,02 %), таблица 2.

Таблица 1 – Характеристика используемых гибридных линий льна-долгунца по происхождению и некоторым признакам, F₃-F₅

Код линии	Исходная популяция отбора	Окраска			Форма семядольных листьев
		семена	лепестки цветка	гипокотиль, +/-	
G1 (1A ₂₋₄)	♀Ярок х ♂Грант	Коричневая	Голубая	+	Округлая
G2 (1A ₁₂₋₃)	♀Ярок х ♂Грант	Коричневая	Светло-синяя	-	Овальная
G3 (1A ₇₋₉)	♀Ярок х ♂Грант	Коричневая	Темно-голубая	-	Округлая
G4 (2A ₅₋₁₀)	♀Ярок х ♂Alizee	Коричневая	Темно-голубая	+	Округлая
G5 (3A ₁₁₋₂)	♀Ярок х ♂Alizee	Коричневая	Голубая	-	Овальная
G6 (3A ₅₋₈)	♀Ярок х ♂Alizee	Коричневая	Голубая	-	Овальная
G7 (4A ₁₃₋₁)	♀ Грант х ♂Ярок	Коричневая	Голубая	-	Округлая
G8 (4A ₂₋₄)	♀ Грант х ♂Ярок	Коричневая	Голубая	+	Округлая
G9 (7A ₈₋₁₂)	♀ Betertelsdorf 6884/60 х ♂ Ярок	Темно-коричневая	Светло-голубая	-	Округлая
G10 (7A ₅₋₁)	♀ Betertelsdorf 6884/60 х ♂ Ярок	Коричневая	Голубая	-	Округлая
G11 (7A ₂₋₄)	♀ Betertelsdorf 6884/60 х ♂ Ярок	Светло-коричневая	Голубая	-	Округлая
G12 (11A ₁₄₋₂)	♀ Alizee х ♂ Betertelsdorf 6884/60	Коричневая	Голубая	+	Удлиненно-овальная
G13 (11A ₃₋₈)	♀ Alizee х ♂ Betertelsdorf 6884/60	Коричневая	Светло-синяя	+	Овальная
G14 (6A ₉₋₈)	♀ Грант х ♂ Alizee	Коричневая	Голубая	-	Овальная
G15 (6A ₁₋₁₅)	♀ Грант х ♂ Alizee	Коричневая	Голубая	+	Овальная
G16 (6A ₂₋₆)	♀ Грант х ♂ Alizee	Темно-коричневая	Темно-голубая	-	Овальная
G17 (6A ₁₁₋₅)	♀ Грант х ♂ Alizee	Темно-коричневая	Светло-голубая	-	Овальная
G18 (6A ₃₋₁₆)	♀ Грант х ♂ Alizee	Коричневая	Светло-синяя	-	Овальная

Примечание: наличие (+) либо отсутствие (-) антоцианового окрашивания гипокотиля в период появления всходов у растений льна-долгунца.

Таблица 2 – Итоги дисперсионного анализа (ANOVA) гибридных линий льна-долгунца, среднее, 2021-2023 гг.

Источник дисперсии	Критерий Фишера			Средний квадрат (M.S.)
	F _{факт}	F _{теор.}		
		0,05	0,01	
Полевая всхожесть семян, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	4,56**	2,08	2,86	65,32
Среда (E)	24,71*	19,47	99,48	91,12
Взаимодействие (GxE)	16,33**	1,76	2,24	105,89
Высота растений, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	9,56*	2,08	2,86	32,56
Среда (E)	35,19*	19,47	99,48	89,93
Взаимодействие (GxE)	12,58**	1,76	2,24	104,68
Масса стебля, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	19,83*	2,08	2,86	56,28
Среда (E)	52,41*	19,47	99,48	102,35
Взаимодействие (GxE)	103,56**	1,76	2,24	77,01
Содержание волокна, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	18,58**	2,08	2,86	133,45
Среда (E)	25,19*	19,47	99,48	92,14
Взаимодействие (GxE)	125,63**	1,76	2,24	177,18

Окончание табл. 2

Источник дисперсии	Критерий Фишера			Средний квадрат (M.S.)
	F _{факт}	F _{теор.}		
		0,05	0,01	
Число коробочек на 1 растении, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	11,22*	2,08	2,86	42,21
Среда (E)	37,90*	19,47	99,48	92,15
Взаимодействие (GxE)	56,22**	1,76	2,24	111,52
Число семян в 1 коробочке, число степеней свободы (d.f.) по фактору: (G) = 17; (E) = 2; (GxE) = 34				
Генотип G	9,45*	2,08	2,86	103,18
Среда (E)	43,69*	19,47	99,48	92,16
Взаимодействие (GxE)	33,11**	1,76	2,24	165,27

Примечание: достоверно при $p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$.

Подбор новых ценных генотипов, сочетающих высокий уровень проявления хозяйственно ценных признаков и свойств, наряду с адаптивностью и стабильностью, является важной компонентой региональных стратегий селекции [23, 24]. Лен, как ценное прядильное растение, характеризуется широким биоклиматическим потенциалом [25], при этом для условий Тюменской области необходимы сорта, отвечающие современным требованиям текстильной промышленности, что вызывает целесообразность создания генотипов с программируемыми параметрами в данном направлении.

С целью более полного понимания генотип-средовых взаимодействий необходимо использование различного статистического инструментария [17, 27]. В связи с этим на следующем этапе работы проводили установление структуры взаимодействия генотипа и среды методом АММИ. Определяющими компонентами в наборе изученных признаков являлись компоненты (IPCA1-IPCA3), при этом наибольший вклад в полевой всхожести семян формировали первые две, из них 83,13 % в общей факториальной структуре показателя, массе стебля – 80,35 %; числа семян в 1 коробочке – 72,25 %; числа коробочек на 1 растении – 70,66 %; содержания волокна в стебле – 68,57 %; высоте растений – 64,18 %.

Полученные данные согласуются с некоторыми исследованиями, в которых также указана определяющая роль первых главных компонент (IPCA) в структуре изменчивости генотип-средового факториала [19, 20], имеющего высокое теоретическое значение для подбора и акклиматизации сортов в новых климатических условиях, закладку основы региональной адаптивной стратегии селекции. Выявлен

различный вклад компонент в уровень проявления признака, исходя из генотип-средового взаимодействия (рис. 1).

Исходя из модели АММИ, в которой при оценке главных компонент используется матрица отклонений, к генотипам с высокой адаптивностью и в ряде случаев с высоким уровнем признака относят те, которые соответствуют выражению: $IPCA1 > 0$, при этом, используя данный метод, можно проводить объединение генотипов со схожими критериальными характеристиками [12, 13].

Выявлены гибридные линии с различными значениями компонент: к наиболее ценным по полевой всхожести семян отнесены: G1 ($IPCA1 = 4,45 \pm 0,98$, $p \leq 0,05$), G9 ($IPCA1 = 2,15 \pm 0,42$, $p \leq 0,05$), G11 ($IPCA1 = 1,32 \pm 0,09$), G15 ($IPCA1 = 1,02 \pm 0,14$, $p \leq 0,05$); высоте растений – G1 ($IPCA1 = 2,03 \pm 0,17$, $p \leq 0,05$), G2 ($IPCA1 = 1,18 \pm 0,09$); G5 ($IPCA1 = 1,15 \pm 0,08$, $p \leq 0,05$); G14 ($IPCA1 = 0,93 \pm 0,12$); массе стебля – G1 ($IPCA1 = 3,16 \pm 0,19$, $p \leq 0,05$), G3 ($IPCA1 = 2,45 \pm 0,34$, $p \leq 0,05$); G8 ($IPCA1 = 1,15 \pm 0,11$, $p \leq 0,05$); G18 ($IPCA1 = 1,11 \pm 0,14$); содержанию волокна – G4 ($IPCA1 = 5,78 \pm 0,97$, $p \leq 0,05$), G5 ($IPCA1 = 3,11 \pm 0,45$, $p \leq 0,05$), G8 ($IPCA1 = 3,09 \pm 0,66$), G11 ($IPCA1 = 2,45 \pm 0,15$, $p \leq 0,05$), G12 ($IPCA1 = 2,07 \pm 0,17$), G14 ($IPCA1 = 1,11 \pm 0,09$), G18 ($IPCA1 = 1,06 \pm 0,13$, $p \leq 0,05$); числу коробочек на 1 растении – G1 ($IPCA1 = 6,23 \pm 0,45$, $p \leq 0,05$), G4 ($IPCA1 = 5,11 \pm 0,87$, $p \leq 0,05$), G5 ($IPCA1 = 5,09 \pm 0,44$), G6 ($IPCA1 = 4,73 \pm 0,33$, $p \leq 0,05$), G7 ($IPCA1 = 4,52 \pm 0,56$), G11 ($IPCA1 = 3,45 \pm 0,39$, $p \leq 0,05$), G14 ($IPCA1 = 3,67 \pm 0,24$), G15 ($IPCA1 = 3,22 \pm 0,11$, $p \leq 0,05$); числу семян в 1 коробочке – G1 ($IPCA1 = 8,45 \pm 0,02$, $p \leq 0,05$), G3 ($IPCA1 = 7,34 \pm 0,11$, $p \leq 0,05$), G6 ($IPCA1 = 6,59 \pm 0,32$), G8 ($IPCA1 = 6,43 \pm 0,17$, $p \leq 0,05$), G15 ($IPCA1 = 6,16 \pm 0,10$, $p \leq 0,05$). Отбор данных генотипов

позволяет их использовать как исходный материал в селекции на адаптивность в данном регионе, при этом известно, что взаимосвязь уровня признака у сортов ограничивается

факторами окружающей среды и предполагает поиск не только адаптивных, но и имеющих максимальную степень проявления хозяйственно ценных признаков [20, 21].

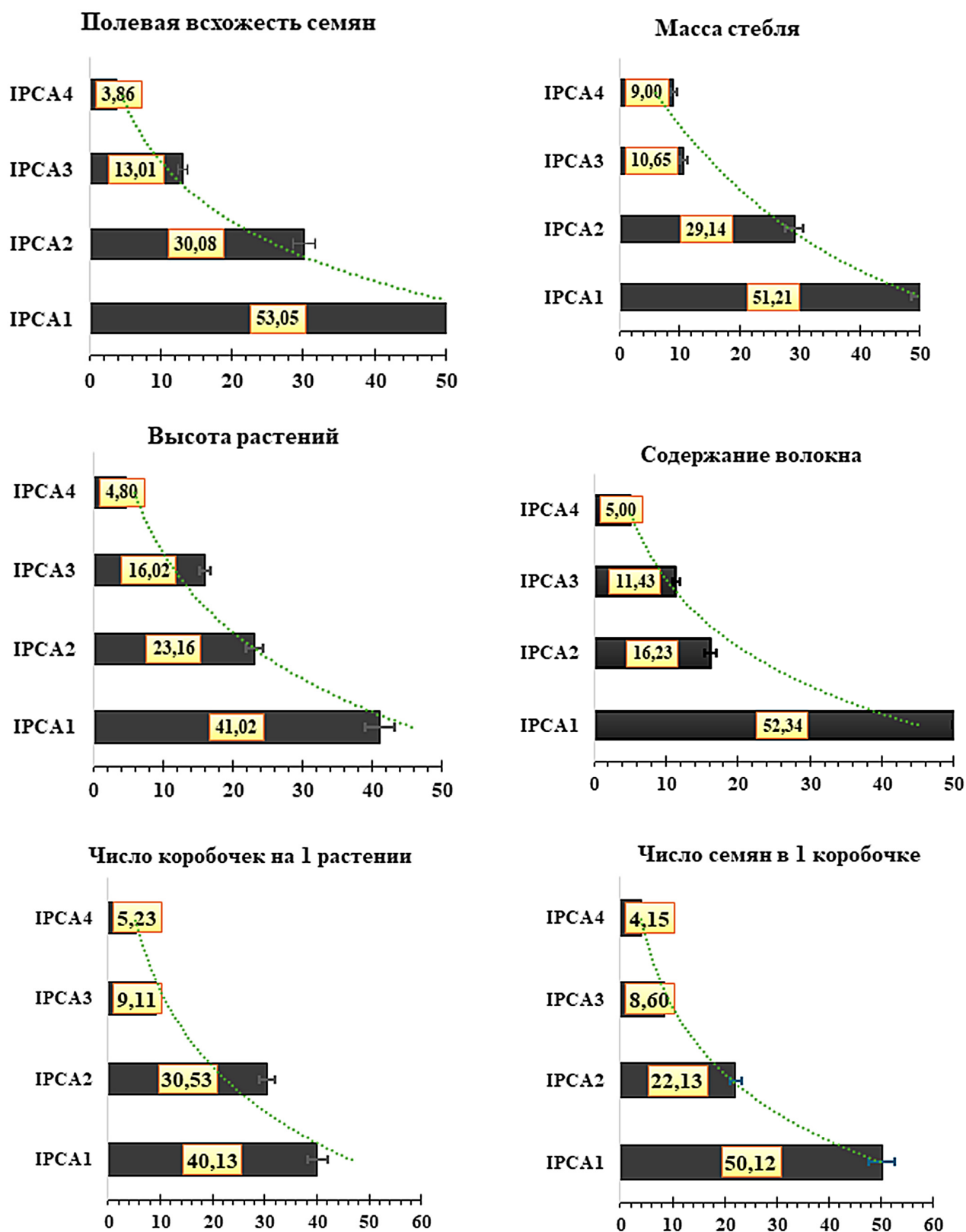


Рисунок 1 – Различия по факториальному вкладу компонент в общей вариабельности структуры генотип-средового взаимодействия, среднее, 2021-2023 гг.: первая (IPCA1), вторая (IPCA2), третья (IPCA3), четвертая (IPCA4) компоненты в структуре генотип-средового взаимодействия (GxE)

Потенциал сорта характеризуется высокой продуктивностью, устойчивостью к абиотическим и биотическим факторам среды [27, 28]. У льна-долгунца в данном экологическом пункте выявлены достоверные ($p < 0,05$; $p < 0,01$) различия между гибридными линиями по набору тест-признаков, сочетающих в своем генотипе несколько показателей, определяющих их перспективный потенциал для дальнейшего использования (рис. 2).

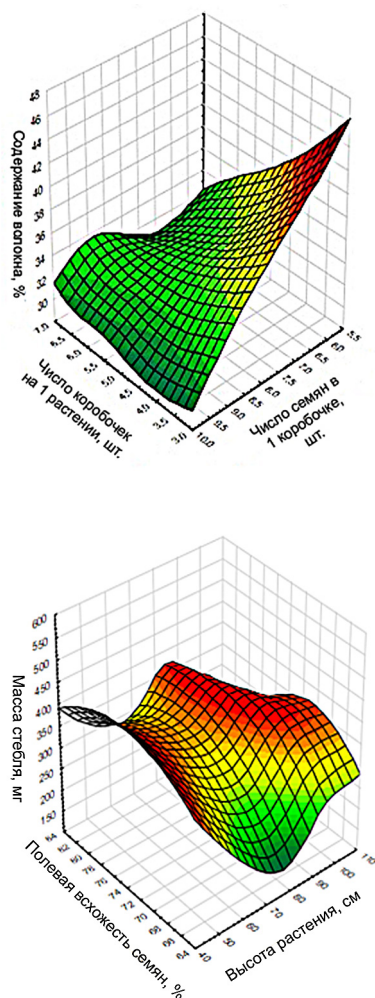


Рисунок 2 – Трехмерный график фенотипических показателей ($n = 6$) у гибридных линий льна-долгунца, среднее, 2021-2023 гг.

Выявлено, что наибольшим уровнем полевой всхожести семян обладали: G1 ($85,9 \pm 1,45$ %, $p \leq 0,01$), G2 ($80,3 \pm 2,11$ %, $p \leq 0,05$), G4 ($75,6 \pm 1,39$ %, $p \leq 0,05$), G9 ($69,3 \pm 2,16$ %, $p \leq 0,05$); высокорослостью: G1 ($115,3 \pm 1,49$ см, $p \leq 0,05$), G5 ($111,4 \pm 2,93$ см, $p \leq 0,05$), G8 ($103,2 \pm 3,42$ см, $p \leq 0,05$), G14 ($101,8 \pm 1,66$ см, $p \leq 0,05$), G16 ($100,1 \pm 1,03$ см, $p \leq 0,05$); содержанием волокна: G1 ($35,2 \pm 1,16$ %, $p \leq 0,05$), G4 ($33,7 \pm 1,49$ %, $p \leq 0,05$), G5 ($32,1 \pm 2,56$ %, $p \leq 0,05$), G10 ($32,9 \pm 1,45$ %, $p \leq 0,05$), G15 ($32,1 \pm 1,45$ %, $p \leq 0,05$), G18 ($32,7 \pm 2,66$ %); числом коробочек на 1 рас-

тении: G1 ($6,1 \pm 0,34$ шт., $p \leq 0,05$), G3 ($5,5 \pm 0,67$ шт., $p \leq 0,05$), G7 ($5,5 \pm 0,31$ шт., $p \leq 0,05$), G10 ($4,6 \pm 0,25$ шт.); G12 ($3,8 \pm 0,25$ шт., $p \leq 0,05$); G15 ($3,5 \pm 0,11$ шт., $p \leq 0,05$), G18 ($3,1 \pm 0,78$ шт., $p \leq 0,05$); числом семян в 1 коробочке: G1 ($9,3 \pm 0,03$ шт., $p \leq 0,05$), G2 ($8,9 \pm 0,18$ шт., $p \leq 0,05$); G3 ($7,5 \pm 0,11$ шт., $p \leq 0,05$); G4 ($7,2 \pm 0,45$ шт.); G6 ($7,1 \pm 0,38$ шт., $p \leq 0,05$); G8 ($6,9 \pm 0,21$ шт., $p \leq 0,05$); G10 ($6,6 \pm 0,25$ шт.), G15 ($6,3 \pm 0,22$ шт., $p \leq 0,05$), G16 ($6,1 \pm 0,10$ шт., $p \leq 0,05$), G18 ($6,1 \pm 0,89$ шт.).

На основании комплексной диагностики были отобраны генотипы, имеющие в своем составе сочетание адаптивности и максимальный уровень признаков. Среди них были линии: G1, G9, G11 – полевая всхожесть семян; G1, G5, G15 – высокорослость; G1, G4, G5 – содержание волокна; G1, G7, G15 – число коробочек на 1 растении; G1, G3, G8, G15 – число семян в 1 коробочке, которые можно использовать для дальнейшей селекционной работы.

Выводы. На основании проведенного полевого тестирования гибридных линий льна-долгунца (F_3 - F_5) установлены достоверные ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$) различия между ними по степени проявления фенотипических признаков.

С использованием АММІ анализа выявлен вклад главных компонент в структуре $G \times E$ с преобладанием IPСА1, IPСА2 при выращивании в различных средовых условиях. На основании этого отобраны генотипы с высоким уровнем проявления тест-признаков.

По результатам комплексной диагностики установлены перспективные гибридные линии льна-долгунца по полевой всхожести семян ($n = 3$), высоте растения ($n = 5$), массе стебля ($n = 7$), содержанию волокна ($n = 6$), числу коробочек на 1 растении ($n = 8$), числу семян в 1 коробочке ($n = 10$).

Список источников

1. Генетические основы селекции растений: монография: в 4 т. / А. В. Кильчевский [и др.]; науч. ред. А. В. Кильчевский, Л. В. Хотылева; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т генетики и цитологии. Минск: Белорусская наука, 2008-.
2. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию [Электронный ресурс]. Т. 1. Сорта растений. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektzionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/> (дата обращения 13.01.2025).
3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Альянс. 2014. 351 с.

4. Качество семян лубяных и масличных культур / В. Н. Гореева, Е. В. Корепанова, И. Ш. Фатыхов [и др.] // Пермский аграрный вестник. 2021. № 4 (36). С. 30–37.
5. Королёв К. П. Сравнительная оценка параметров экологической стабильности образцов льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) в коллекционном питомнике изучения, различающихся по происхождению // Аграрный вестник Верхневолжья. 2015. № 4 (12). С. 18–21.
6. Королёв К. П., Боме Н. А. Оценка генотипов льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) по экологической адаптивности и стабильности в условиях северо-восточной части Беларуси // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № (3). С. 615–621. DOI 10.15389/agrobiology.2017.3.615rus.
7. Куземкин И. А., Рожмина Т. А. Скрининг образцов коллекции льна-долгунца по урожайности и параметрам адаптивности в условиях Северо-Западного региона // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. № 23(5). С. 666–674. DOI 10.30766/2072-9081.2022.23.5.666-674.
8. Методические указания по изучению коллекции льна (*Linum usitatissimum* L.); под ред. В. З. Богдана. Устье: РНДУП «Ин-т льна», 2011. 12 с.
9. Полонецкая Л. М. Анализ параметров стабильности у образцов и сортов масличного льна различного эколого-географического происхождения // Доклады НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 5. С. 73–75.
10. Попова Г. А., Рогальская Н. Б., Трофимова В. М. Мировые генетические ресурсы льна коллекции ВИР в создании сортов Томской селекции // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53. № 4. С. 34–47. DOI 10.26898/0370-8799-2023-4-4.
11. Akcura M., Kaya Y., Taner S., Ayranci R. Parametric stability analysis for grain yield of durum wheat. *Plant Soil Environment Journal*. 2006; 6: 254–261.
12. Adugna W., Labuschagne M. Parametric and non-parametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica*. 2003; 129: 211–218. DOI 10.1023/A:1021979303319.
13. Fioreze A.C.C.L., Parizotto C., Orsi [et al.]. Análise multivariada como ferramenta nas seleções iniciais de linhaça dourada (*Linum usitatissimum* L.). *Revista de Ciências Agroveterinárias*. 2022; 21: 247–255. DOI 10.5965/223811712132022247.
14. Dabalo D. Y., Singh C. S., Weyessa B. Genetic variation and trait association in flaxseed plant (*Linum usitatissimum* L.) grown in Central Ethiopia region. *Saudi J. Biol. Sci.* 2020; 27: 2192–2206.
15. Farshadfar E., Sutka J. Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*. 2006; 54: 459–467. DOI 10.1556/AAgr.54.2006.4.8.
16. Klein J., Zikeli S., Klupein U. [et al.]. Flaxseed (*Linum usitatissimum*) as an oilseed crop in organic farming: abiotic effects on seed ingredients and yield. *Organic Agriculture*. 2016; 7: 1–19.
17. Hakim M., Biswas B., Hasanuzzaman M. [et al.]. Genotype Environment Interaction (G×E) of Heat Tolerant Wheat Genotypes over Locations and Years. *American Journal of Plant Sciences*. 2021; 12: 1633–1645. DOI 10.4236/ajps.2021.1211114.
18. Kaya Y., Akcura M., Taner S. GGE-Biplot Analysis of Multi-Environment Yield Trials in Bread Wheat. *Turkish Journal of Agriculture*. 2006; 30: 325–337.
19. Kaur V., Kumar S., Yadav R. [et al.]. Analysis of genetic diversity in Indian and exotic linseed germplasm and identification of trait specific superior accessions. *J. Environ. Biol.* 2018; 39: 702–709.
20. Kumar N., Kumar V. Assessment of genetic diversity in linseed germplasm using morphological traits. *Electronic Journal of Plant Breeding*. 2021; 12(1): 66–73.
21. Malosetti M., Raibaut J. M., Eeuwijk van F. A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Frontiers Physiology*. 2013; 4: 44. DOI 10/3389/fphys.2013.00044.
22. Matus-Cadiz M. A., Hucl P., Perron C. E. [et al.]. Genotype x environment interaction for grain color in hard white spring wheat. *Crop Science*. 2003; 43: 219–226.
23. Chakraborty S., Kumar A., Kishore C. [et al.]. Multivariate Based Diversity Analysis in Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) Genotypes by Principal Component Analysis. *Biological Forum—An International Journal*. 2021; 13(3): 680–685.
24. Paul S., Bhateria S., Kumari A. Genetic variability and interrelationships of seed yield and yield components in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2015; 47: 375–383.
25. Soto-Cerda B. J., Diederichsen A., Ragupathy R. [et al.]. Genetic characterization of a core collection of flax (*Linum usitatissimum* L.) suitable for association mapping studies and evidence of divergent selection between fiber and linseed types. *BMC Plant Biology*. 2013; 13: 78. DOI 10.1186/1471-2229-13-78.
26. Yan W. N., Tinker A. Biplot analysis of Multi-environment trial data: Principals and applications. *Canadian Journal Plant Science*. 2006; 86: 623–645.
27. Arslanoglu S. F., Sert S., Sahin H. A. [et al.]. Yield and yield criteria of flax fiber (*Linum usitatissimum* L.) as influenced by different plant densities. *Sustainability*. 2022; 14: art.4710. DOI 10.3390/su14084710.
28. Mirzaie A., Mohammadi K., Parvini S. [et al.]. Yield quantity and quality of two linseed (*Linum usitatissimum* L.) cultivars as affected by sowing date. *Industrial Crops & Products*, v.158, art.112947, 2020. DOI 10.1016/j.indcrop.2020.112947.

References

1. Генетические основы селекции растений: монография: в 4 т. / А. В. Кил'чевский [и др.]; науч. ред. А. В. Кил'чевский, Л. В. Хотылева; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т генетики и цитологии. Минск: Белорусская наука, 2008-.
2. Gosudarstvennyj reestr selekcionnyh dostizhenij, dopushchennyh k ispol'zovaniyu [Elektronnyj resurs].

- T. 1. Sorta rastenij. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-seleksionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/> (data obrashcheniya 13.01.2025).
3. Dospekhov B. A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy). Moskva: Al'yans. 2014. 351 s.
4. Kachestvo semyan lubyanyh i maslichnyh kul'tur / V. N. Goreeva, E. V. Korepanova, I. Sh. Fatykhov [i dr.] // Permskiy agrarniy vestnik. 2021. № 4 (36). S. 30–37.
5. Korolyov K. P. Sravnitel'naya ocenka parametrov ekologicheskoy stabil'nosti obrazcov l'na-dolgunca (*Linum usitatissimum* L.) v kollekcionnom pitomnike izucheniya, razlichayushchihsya po proiskhozhdeniyu // Agrarniy vestnik Verhnevolzh'ya. 2015. № 4 (12). S. 18–21.
6. Korolyov K. P., Bome N. A. Ocenka genotipov l'na-dolgunca (*Linum usitatissimum* L.) po ekologicheskoy adaptivnosti i stabil'nosti v usloviyah severovostochnoy chasti Belarusi // Sel'skohozyajstvennaya biologiya. 2017. T. 52. № (3). S. 615–621. DOI 10.15389/agrobiology.2017.3.615rus.
7. Kuzemkin I. A., Rozhmina T. A. Skrining obrazcov kollekcii l'na-dolgunca po urozhajnosti i parametram adaptivnosti v usloviyah Severo-Zapadnogo regiona // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2022. № 23(5). C. 666–674. DOI 10.30766/2072-9081.2022.23.5.666-674.
8. Metodicheskie ukazaniya po izucheniyu kollekcii l'na (*Linum usitatissimum* L.); pod red. V. Z. Bogdana. Ust'e: RNDUP «In-t l'na», 2011. 12 s.
9. Poloneckaya L. M. Analiz parametrov stabil'nosti u obrazcov i sortov maslichnogo l'na razlichnogo ekologo-geograficheskogo proiskhozhdeniya // Doklady NAN Belarusi. 2004. T. 48. № 5. S. 73–75.
10. Popova G. A., Rogal'skaya N. B., Trofimova V. M. Mirovye geneticheskie resursy l'na kollekcii VIR v sozdanii sortov Tomskoj selekcii // Sibirskiy vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki. 2023. T. 53. № 4. S. 34–47. DOI 10.26898/0370-8799-2023-4-4.
11. Akcura M., Kaya Y., Taner S., Ayranci R. Parametric stability analysis for grain yield of durum wheat. *Plant Soil Environment Journal*. 2006; 6: 254–261.
12. Adugna W., Labuschagne M. Parametric and non-parametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica*. 2003; 129: 211–218. DOI 10.1023/A:1021979303319.
13. Fioreze A. C. C. L., Parizotto C., Orsi [et al.]. Análise multivariada como ferramenta nas seleções iniciais de linhaça dourada (*Linum usitatissimum* L.). *Revista de Ciências Agroveterinárias*. 2022; 21: 247–255. DOI 10.5965/223811712132022247.
14. Dabalo D. Y., Singh C. S., Weyessa B. Genetic variation and trait association in flaxseed plant (*Linum usitatissimum* L.) grown in Central Ethiopia region. *Saudi J. Biol. Sci.* 2020; 27: 2192–2206.
15. Farshadfar E., Sutka J. Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*. 2006; 54: 459–467. DOI 10.1556/AAgr.54.2006.4.8.
16. Klein J., Zikeli S., Klaupen U. [et al.]. Flaxseed (*Linum usitatissimum*) as an oilseed crop in organic farming: abiotic effects on seed ingredients and yield. *Organic Agriculture*. 2016; 7: 1–19.
17. Hakim M., Biswas B., Hasanuzzaman M. [et al.]. Genotype Environment Interaction (G×E) of Heat Tolerant Wheat Genotypes over Locations and Years. *American Journal of Plant Sciences*. 2021; 12: 1633–1645. DOI 10.4236/ajps.2021.1211114.
18. Kaya Y., Akcura M., Taner S. GGE-Biplot Analysis of Multi-Environment Yield Trials in Bread Wheat. *Turkish Journal of Agriculture*. 2006; 30: 325–337.
19. Kaur V., Kumar S., Yadav R. [et al.]. Analysis of genetic diversity in Indian and exotic linseed germplasm and identification of trait specific superior accessions. *J. Environ. Biol.* 2018; 39: 702–709.
20. Kumar N., Kumar V. Assessment of genetic diversity in linseed germplasm using morphological traits. *Electronic Journal of Plant Breeding*. 2021; 12(1): 66–73.
21. Malosetti M., Raibaut J. M., Eeuwijk van F. A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Frontiers Physiology*. 2013; 4: 44. DOI 10.3389/fphys.2013.00044.
22. Matus-Cadiz M. A., Hucl P., Perron C. E. [et al.]. Genotype x environment interaction for grain color in hard white spring wheat. *Crop Science*. 2003; 43: 219–226.
23. Chakraborty S., Kumar A., Kishore C. [et al.]. Multivariate Based Diversity Analysis in Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) Genotypes by Principal Component Analysis. *Biological Forum—An International Journal*. 2021; 13(3): 680–685.
24. Paul S., Bhateria S., Kumari A. Genetic variability and interrelationships of seed yield and yield components in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2015; 47: 375–383.
25. Soto-Cerda B. J., Diederichsen A., Ragupathy R. [et al.]. Genetic characterization of a core collection of flax (*Linum usitatissimum* L.) suitable for association mapping studies and evidence of divergent selection between fiber and linseed types. *BMC Plant Biology*. 2013; 13: 78. DOI 10.1186/1471-2229-13-78.
26. Yan W. N., Tinker A. Biplot analysis of Mult environment trial data: Principals and applications. *Canadian Journal Plant Science*. 2006; 86: 623–645.
27. Arslanoglu S. F., Sert S., Sahin H. A. [et al.]. Yield and yield criteria of flax fiber (*Linum usitatissimum* L.) as influenced by different plant densities. *Sustainability*. 2022; 14: art.4710. DOI 10.3390/su14084710.
28. Mirzaie A., Mohammadi K., Parvini S. [et al.]. Yield quantity and quality of two linseed (*Linum usitatissimum* L.) cultivars as affected by sowing date. *Industrial Crops & Products*, v.158, art.112947, 2020. DOI 10.1016/j.indcrop.2020.112947.

Сведения об авторах:

К. П. Королёв^{1✉}, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0001-9595-3493>;

А. Н. Якубенко¹, студент бакалавриата;

Д. Б. Собиржонов², студент

¹ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», ул. Володарского, Тюмень, 6625003

²Международный университет «Туран», ул. Мамарасулова, 10Д, Наманган, Узбекистан

¹korolevkonstantin799@gmail.com

Original article

ADAPTIVE STATUS OF *LINUM USSITATISSIMUM* L. GENOTYPES IN THE NORTHERN FOREST-STEPPE ZONE OF THE TYUMEN REGION

Konstantin P. Korolev^{1✉}, **Alina N. Yakubenko**¹, **Davlatbek B. Sobirzhonov**²

¹University of Tyumen, Tyumen, Russia

²Turan International University, Namangan, Uzbekistan

¹korolevkonstantin799@gmail.com

Abstract. The identification of adaptive flax genotypes and their use as source material is of great significance in the strategy of creating new varieties, and it is also necessary to consider the complex interaction between the genotype and the environment. The aim of the study was to determine the potential of flax genotypes in terms of morphological and adaptive indicators when grown in different environmental conditions. The testing of hybrid lines ($n = 18$) was conducted in the Nizhnetavdinsky district of the Tyumen region. Based on the ANOVA analysis of variance, reliable differences between the flax genotypes were established according to the following criteria: field germination of seeds (FG, %, $p \leq 0.05$, $p \leq 0.01$, $n = 3$); plant height (PH, cm, $p \leq 0.05$; $n = 3$); stem mass (SM, mg, $p \leq 0.05$, $n = 5$); fiber content (FC, %, $p \leq 0.05$; $n = 4$); number of capsules per plant (NC, pcs., $p \leq 0.05$; $n = 6$); number of seeds in 1 capsule (NS, pcs., $p \leq 0.05$, $n = 7$). The structure of the complex interaction between the genotype and the environment (GxE) on the basis of AMMI analysis was revealed and a high reliable proportion of components (IPCA1, IPCA2) in terms of the studied morphological and biological indicators and properties was established. Promising genotypes were selected by the field germination of seeds (G1, G9, G11), by the plant height (G1, G5, G15), by the stem weight (G1, G3, G18), by the fiber content (G1, G4, G5), by the number of capsules per plant (G3, G9, G12), and by the number of seeds in a capsule (G1, G7, G15), which can be used in further selection and genetic research in the Tyumen region.

Key words: fiber flax, hybrid line, adaptability, multivariate analysis of variance, AMMI method.

For citation: Korolev K. P., Yakubenko A. N., Sobirzhonov D. B. Adaptive status of *Linum ussitatissimum* L. genotypes in the northern forest-steppe zone of the Tyumen region. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 2 (82): 5-13. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_2_5-13.

Authors:

K. P. Korolev^{1✉}, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0001-9595-3493>;

A. N. Yakubenko¹, Undergraduate student;

D. B. Sobirzhonov², Undergraduate student

¹University of Tyumen, 6 Volodarsky St., Tyumen, 625003

²Turan International University, 10 Mamarasulova St., Namangan, Uzbekistan

¹korolevkonstantin799@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2025;
принята к публикации 29.05.2025.

The article was submitted 02.10.2024; approved after reviewing 28.02.2025; accepted for publication 29.05.2025.