

Диагностика адаптивных и продуктивных свойств *Linum usitatissimum* L. в различных агроэкологических зонах Тюменской области

✉ Королёв К.П.

Тюменский государственный университет, Школа естественных наук
Тюмень, Россия

✉ e-mail: korolevkonstantin799@gmail.com

Отражены результаты тестирования сортов льна-долгунца (G1, Томский-16), (G2, Грант), (G3, Alizee), (G4, Betertelsdorf 6884/60), (G5, Дукат), (G6, Маяк) по четырем признакам урожайности (соломы, тресты, волокна, семян) и адаптивности. Агроэкологическое изучение сортов льна выполняли в двух средовых условиях Тюменской области (E1 – северная лесостепь, Омутинский район, 56°45' с.ш., 67°70' в.д., E2 – тайга, Тобольский район, 58°11' с.ш., 68°15' в.д.). Между сортами установлены достоверные различия ($p < 0,05$, $p < 0,01$) по продуктивности. Выявлен максимальный уровень урожайности соломы ($563,3 \pm 8,45 - 466,9 \pm 10,30$ г/м²) у генотипов G1, G3 в условиях E2, урожайности тресты – G3, G1 ($504,2 \pm 15,32 - 391,2 \pm 10,44$ г/м²) в E2, урожайности волокна – G3 ($300,4, \pm 4,61$ г/м²) в E2, урожайности семян – G1, G6 ($88,1 \pm 3,60 - 87,5 \pm 1,18$ г/м²) в среде E2, при этом в двух пунктах высокая урожайность соломы и тресты отмечена у G1 и G3. Согласно дисперсионному анализу достоверно значимым ($p < 0,05$, $p < 0,01$) был вклад генотипа в общей вариабельности урожайности соломы (54,8%) и семян (61,2%) в среде E2, условия среды оказывали влияние на формирование урожайности семян в обоих экологических точках (36,1–29,8%). Выявлено, что в структуре генотип-средового взаимодействия первые две главные компоненты (ИРСА) обуславливали 69,9% вариации урожайности соломы, 81,8% урожайности тресты, 81,5% урожайности волокна, 86,8% урожайности семян в данных средовых условиях. С использованием индекса отбора (GSI) выделены наиболее стабильные генотипы по урожайности соломы (E1 – G1, G3; E2 – G1, G2), тресты (E1 – G1, G3; E2 – G1, G3), волокна (E1 – G1; E2 – G3), семян (E1 – G4, G6; E2 – G1, G6). Генотипы, проявившие высокую урожайность и стабильность по комплексному анализу, можно рекомендовать для использования в адаптивной селекции, а также для выращивания в изученных агроэкологических пунктах Тюменской области.

Ключевые слова: лен-долгунец, сорт, среда, дисперсионный анализ, AMMI-biplot, урожайность, стабильность

Diagnostics of adaptive and productive properties of *Linum usitatissimum* L. in various agroecological zones of the Tyumen region

✉ Korolev K.P.

Tyumen State University, School of Natural Sciences
Tyumen, Russia

✉ e-mail: korolevkonstantin799@gmail.com

The article presents the results of testing the fiber flax varieties (G1, Tomsy-16), (G2, Grant), (G3, Alizee), (G4, Betertelsdorf 6884/60), (G5, Dukat), (G6, Mayak) for four traits (yield of straw, flax straw, fiber, seeds) and adaptability. The agroecological study of fiber flax varieties was carried out in two environmental conditions of the Tyumen region (E1 – northern forest-steppe, Omutinsky district, 56°45' N, 67°70' E, E2 – taiga, Tobolsk district, 58°11' N 68°15' E). Reliable differences ($p < 0.05$; $p < 0.01$) in productivity were established between the varieties. The maximum straw yield ($563.3 \pm 8.45 - 466.9 \pm 10.30$ g/m²) was revealed in genotypes G1, G3 under E2 conditions, the yield of flax straw – G3, G1 ($504.2 \pm 15.32 - 391.2 \pm 10.44$ g/m²) in E2, the yield of fiber – G3 ($300.4, \pm 4.61$ g/m²) in E2, the yield of seeds – G1, G6 ($88.1 \pm 3.60 - 87.5 \pm 1.18$ g/m²) in the E2 environment, while in two points high yield of straw and flax straw was noted in G1 and G3. According to the analysis of variance, the contribution of the genotype to the overall variability of straw (54.8%) and seed (61.2%) yields in the E2 environment was reliably significant ($p < 0.05$; $p < 0.01$); environmental conditions influenced the

formation of seed yields in both ecological points (36.1–29.8%). It was revealed that in the structure of genotype-environment interaction, the first two principal components (IPCA) determined 69.9% of the variation in straw yield, 81.8% of the flax straw yield, 81.5% of the fiber yield, 86.8% of the seeds yield in these environmental conditions. Using the selection index (GSI), the most stable genotypes were identified in terms of straw yield (E1 – G1, G3; E2 – G1, G2), flax straw (E1 – G1, G3; E2 – G1, G3), fiber (E1 – G1; E2 – G3), and seeds (E1 – G4, G6; E2 – G1, G6). The genotypes that showed high yield and stability according to the complex analysis can be recommended for use in adaptive selection, as well as for cultivation in the studied agroecological points of the Tyumen region.

Keywords: fiber flax, variety, environment, dispersion analysis, AMMI-biplot, yield, stability

Для цитирования: Королёв К.П. Диагностика адаптивных и продуктивных свойств *Linum usitatissimum* L. в различных агроэкологических зонах Тюменской области // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2024. Т. 54. № 11. С. 61–70. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-11-6>

For citation: Korolev K.P. Diagnostics of adaptive and productive properties of *Linum usitatissimum* L. in various agroecological zones of the Tyumen region. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2024, vol. 54, no. 11, pp. 61–70. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-11-6>

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Лен-долгунец является растением комплексного использования [1–3], перспективность интродукции и выращивания которого обуславливается наличием новых, продуктивных генотипов с высокими показателями качества, наряду с широким адаптивным потенциалом [4–6]. На основе комплексных исследований выявлены сорта [7–9], гибридные комбинации [10] льна-долгунца с относительно высоким уровнем урожайности, адаптивности и стабильности при различных условиях выращивания. Для реализации максимального потенциала фенотипических признаков необходима оценка реакций сортов на средовые условия [11, 12]. Комплексная оценка сортов при этом также должна включать в себя установление эффектов генотип-средового взаимодействия [13–15]. Сложный характер этих взаимодействий приводит к формированию различного уровня биологических признаков и свойств [16, 17]. Для диагностики генотип-средового фактора используются различные модели, в основу которых в ряде случаев положено выявление фактических показателей признаков и моделируемых с учетом эффектов как генотипа, так и среды [18, 19]. Селекционную значимость имеют сорта, характеризующиеся стабильностью проявления признака.

Широкое распространение для тестирования генотип-средовых взаимодействий у культурных растений в числе первых получил метод АММИ, позволяющий комплексно произвести анализ с учетом вариантов генотипа, среды и главных компонент (РСА) с использованием их значений на основе расчета ASV [20–22].

Для контрастных почвенно-климатических условий Северного Зауралья важным является выявление реакций сортов на действие экологического фактора, отбор наиболее приспособленных из них при интродукции, селекционно-генетической работе и непосредственного выращивания в конкретных пунктах, для получения высокой продуктивности. Отсутствие полноценной информации по сортам льна-долгунца в северной лесостепной и таежной зонах области обусловило необходимость проведения данных исследований.

Цель исследования – определение уровня урожайности и адаптивности сортов льна-долгунца в двух различных средовых условиях при агроэкологическом изучении в Тюменской области.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использованы сорта льна-долгунца из коллекцион-

ного фонда зародышевой плазмы Тюменского государственного университета: G1 (Томский-16, Россия), G2 (Грант, Беларусь), G3 (Alizee, Франция), G4 (Betertelsdorf 6884/60, Германия), G5 (Дукат, Беларусь), G6 (Маяк, Беларусь). Полевые опыты выполняли в Омутинском (среда E1, Омутинский ГСУ) и Тобольском (среда E2, Тобольская комплексная станция УрО РАН) районах.

Учетная площадь делянки – 3,0 м², повторность опытов трехкратная, размещение – рендомизированное. Учеты и наблюдения за сортами льна-долгунца осуществляли согласно методических указаний¹.

Условия в период проведения исследований различались по среднесуточной температуре и количеству выпавших осадков от среднемноголетних значений. Согласно гидро-термическому коэффициенту Селянинова, они были от слабозасушливых до влажных (среда E1, ГТК = 1,2–1,5 – среда E2, ГТК = 1,1–1,4).

Статистическую обработку экспериментальных данных выполняли в программе Statistica 6.0 (Statsoft Inc., США). Нормальность

распределения проверяли с использованием критерия Шапиро – Уилка. Достоверность различий между средами устанавливали на основании *t*-критерия Стьюдента. Полученные результаты экологического испытания подвергали математической обработке с использованием анализа аддитивных главных эффектов и мультипликативного взаимодействия (АММИ)². Индекс отбора генотипа (GSI) рассчитывали по методу³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения основных эффектов изменчивости и их взаимодействия на урожайность сортов льна-долгунца проводили дисперсионный анализ, согласно которому была доказана значимость ($p < 0,05$, $p < 0,01$) генотипа (G), среды (E) и их взаимодействий ($G \times E$) (см. табл. 1). Используя АММИ-метод, определяли мультипликативные эффекты для $G \times E$ на основе анализа главных компонент (РСА). В общей фенотипической изменчивости урожайности соломы и тресты наибольший вклад вносили генотип (E1, 22,8–34,5%,

Табл. 1. Результаты дисперсионного анализа вариант и главных компонент у сортов льна-долгунца при экологическом тестировании в Тюменской области

Table 1. Results of variant and principal component analysis of variance in fiber flax varieties under ecological testing in the Tyumen region

Источник вариации	df	mS			
		А	Б	В	Г
Генотип (G)	5	45,565*	22,06*	46,90*	111,26*
Среда (E)	1	123,99**	49,39*	42,17*	147,17**
Взаимодействие $G \times E$	10	155,35*	119,02**	190,8*	53,70*
IPCA1	7	35,58*	93,40*	41,325	128,205**
IPCA2	5	43,58*	116,16*	94,16*	97,91
IPCA3	3	98,43**	129,72*	52,00*	76,61*
IPCA4	1	30,40	75,99*	45,27*	129,10*

Примечание. df – число степеней свободы, mS – средний квадрат. Различия между генотипами достоверны: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; IPCA1 – IPCA4 – первая – четвертая оси главных компонент генотип-средового взаимодействия. Урожайность: солома (А), треста (Б), волокно (В), семена (Г).

¹Методические указания по изучению коллекции льна (*Linum usitatissimum* L.); под общ. ред. В.З. Богдана / Устье: РНДУП «Ин-т льна», 2011. 12 с.

²Purchase J.L., Hatting H., van Deventer C.S. Genotype $\times$ environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: II. Stability analysis of yield performance // South African Journal of Plant and Soil. 2013. Vol. 17. P. 101–107. DOI: 10.1080/02571862.2000.10634878.

³Farshadfar E., Sutka J. Locating QTLs controlling adaptation in wheat using AMMI model // Cereal Research Communication. 2003. Vol. 31. P. 249–256.

E2, 19,5–44,6%), урожайность волокна (E1, 38,9–53,6%, E2, 45,5–51,9%), урожайность семян (E1, 18,7–26,9%, E2, 11,1–36,9%).

Анализ главных компонент $G \times E$ позволил установить первые две (IPCA1–IPCA2), которые занимали наибольший процент в генотип-средовом взаимодействии по продуктивности соломы (66,6–73,3%), тресты (79,7–84,0%), волокна (79,2–83,8%), семян (84,4–89,3%) (см. рис. 1).

Выявление структуры сложного генотип-средового взаимодействия позволяет наиболее однозначно оценить сорта, выявить их реакционные способности на факторы окружающей среды, отобрать лучшие из них как по продуктивности, так и по экологической устойчивости [19–22]. Исходя из АММИ-модели, к стабильным с низким генотип-средовым взаимодействием относят сорта со значением $IPCA1 = 0$, адаптивные при

$IPCA1 > 0$ и наибольшим уровнем проявления признака [20, 21].

На основании полученных данных строили графики, отражающие компонентный состав (IPCA) эффекта «генотип – среда» (см. рис. 2). По урожайности соломы определены стабильные генотипы в среде E1 – G1, G2, G4, в среде E2 – G1, урожайности тресты – G1, G3 (среда E1), G2 (среда E2); урожайности волокна – G2 (среда E1), G1, G3, G4 (среда E2), урожайности семян – G1, G2, G5 (среда E2). Выявленные закономерности являются важными в теоретической интерпретации сложного генотип-средового эффекта, что особенно важно при интродукции. Данная информация крайне необходима при разработке региональной адаптивной стратегии создания и выращивания льна, определении экологического потенциала сортов в данном регионе. Известно [9, 10], что генотипы с высоким уровнем продуктивности,

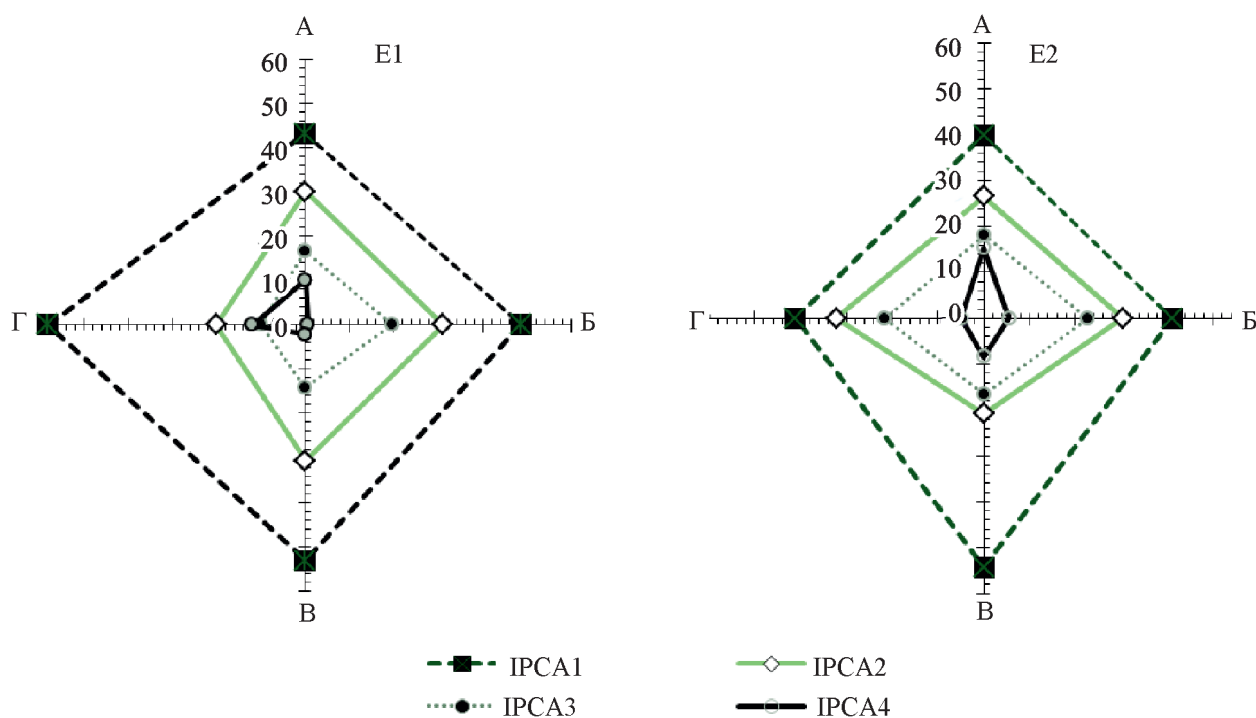


Рис. 1. Распределение главных компонент (IPCA) в продуктивности у сортов льна-долгунца при выращивании в двух средовых условиях, среднее, %. Различия достоверны: $p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$. Среда: E1 – Омутинский район, E2 – Тобольский район; урожайность: А – соломы, Б – тресты, В – волокна, Г – семена; первая – IPCA1, вторая – IPCA2, третья – IPCA3, четвертая – IPCA4 компоненты генотип-средового взаимодействия ($G \times E$)

Fig. 1. Distribution of the principal components (IPCA) in productivity in fiber flax varieties grown in two environmental conditions, average, %. The differences are reliable: $p < 0.05^*$; $p < 0.01^{**}$.

Environment E1 – Omutinsky district, E2 – Tobolsk district; A – straw yield, Б – flax straw yield, В – fiber yield, Г – seed yield; the first – IPCA1, the second – IPCA2, the third – IPCA3, the fourth – IPCA4 components of the genotyp-environment interaction ($G \times E$)

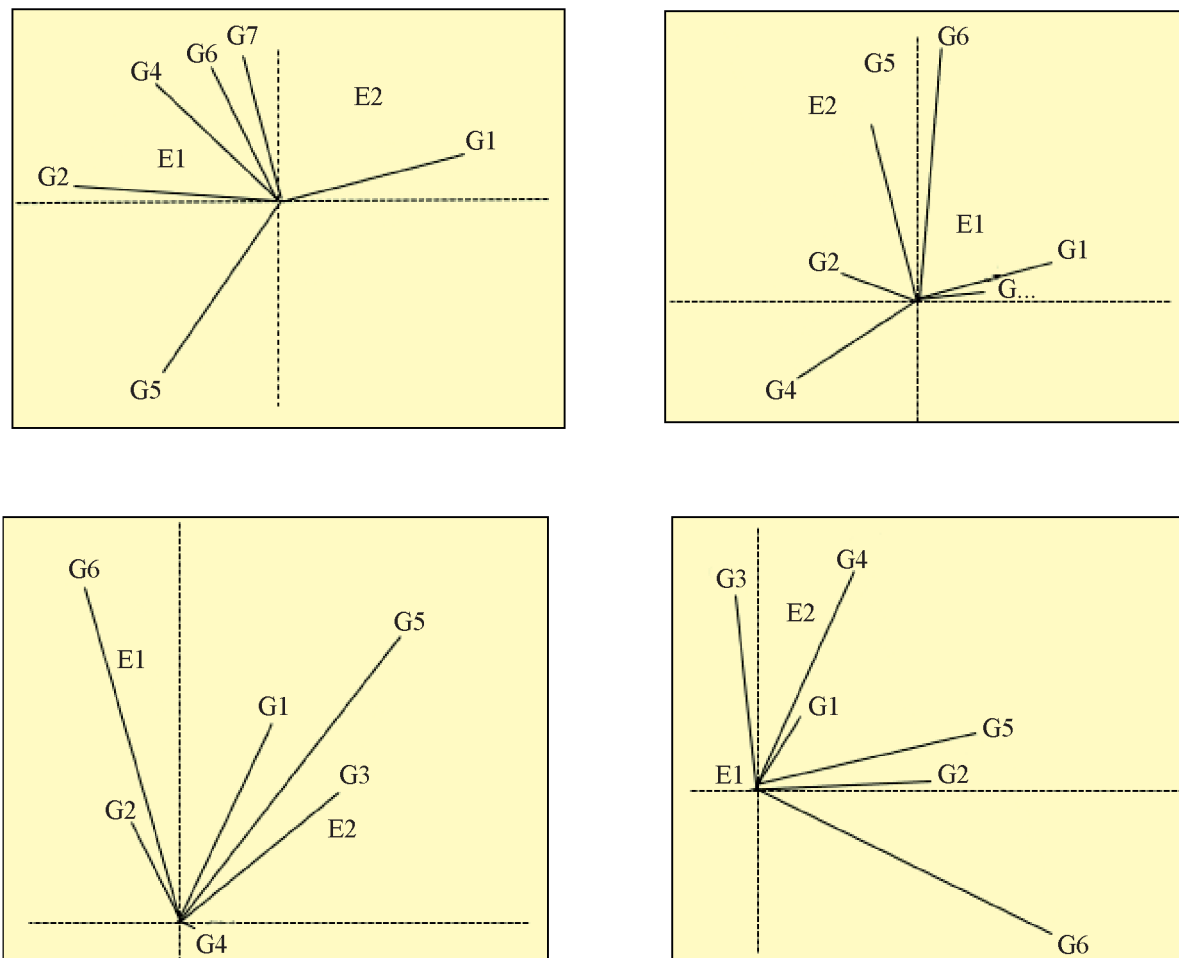


Рис. 2. График $G \times E$, отражающий эффекты первой и второй компоненты (IPCA) сортов льна-долгунца в двух средах (E1, E2) по урожайности

Fig. 2. $G \times E$ plot showing the effects of the first and second component (IPCA) of fiber flax varieties in two environments (E1, E2) by yield

стабильности могут быть использованы как источники при дальнейшей селекционно-генетической работе [11], при этом необходим учет генотип-средового взаимодействия [12].

Сорта различались по продуктивности и параметрам стабильности при экологическом изучении в условиях Омутинского и Тобольского районов (см. табл. 2). Наибольшей достоверной урожайностью соломы, тресты характеризовались G1, G3 в среде E1 по сравнению со средой E2, волокна – G3 (среда E2), семян – G1, G3, G4 (среда E1) и G1, G2, G6 (среда E2). При этом в двух средовых условиях выделены генотипы G1, G3, обладающие высокой продуктивностью. Результаты экологического тестинга позволяют говорить о возможности получения в данных пунктах как высокой урожайности соломы, тресты,

волокна, так и обеспечения льно-производителей хорошей семенной продуктивностью при их выращивании. Сорта льна-долгунца с комплексной продуктивностью и параметрами экологической стабильности являются наиболее ценными [4, 5], при этом высокий вклад генотип-средового взаимодействия ограничивает полную реализацию биологического потенциала сортов [7, 8, 10], что вызывает необходимость проведения дальнейшего более широкого экологического тестинга в условиях Тюменской области.

Культивирование данных генотипов с высоким уровнем адаптивных свойств позволяет повысить потенциал биологической продуктивности агрофитоценозов льна, они могут выступать в качестве нового исходного материала для селекции. На основании рас-

Табл. 2. Среднее значение урожайности, стабильности по модели АММИ, индекса отбора генотипа в двух средовых условиях

Table 2. Average yield, stability according to the AMMI model, genotype selection index in two environmental conditions

Признак	Урожайность, г/м ²			ASV	GSI
	min	max	M ± SEM		
Среда E1					
A	240,5 ± 2,17	400,2 ± 12,40	307,8 ± 8,20	0,52–0,71	26–101
Б	213,6 ± 9,03	345,8 ± 9,23	259,8 ± 9,81	0,14–0,73	45–63
В	111,8 ± 12,4	225,2 ± 10,1	159,2 ± 3,24	0,66–0,89	18–75
Г	20,7 ± 5,66	42,0 ± 2,34	33,7 ± 3,75	0,13–0,62	10–36
Среда E2					
A	403,3 ± 6,03*	563,3 ± 8,45**	444,9 ± 8,03*	0,26–0,95	15–66
Б	288,0 ± 9,19*	504,2 ± 15,32**	376,1 ± 11,4*	0,35–0,72	25–99
В	202,3 ± 12,4*	300,4 ± 4,61*	218,7 ± 1,63*	0,18–0,61	32–115
Г	79,1 ± 9,51**	88,1 ± 3,60**	53,5 ± 6,01*	0,32–0,94	25–64

Примечание. А (урожайность соломы, г/м²), Б (урожайность тресты, г/м²), В (урожайность волокна, г/м²), Г (урожайность семян, г/м²); IPCA1 (первая компонента), IPCA2 (вторая компонента), различия между средой E1 и E2 достоверны: $p < 0,05^*$; $p < 0,01^{**}$. Средние значения (M) и стандартные ошибки среднего значения ($\pm$ SEM), ASV (критерий стабильности АММИ), GSI (индекс отбора генотипа).

чета критерия стабильности АММИ по урожайности соломы льна-долгунца отмечены генотипы G1 (ASV = 0,52), G3 (ASV = 0,64), урожайности тресты – G1 (ASV = 0,14), G2 (ASV = 0,28), урожайности волокна – G1 (ASV = 0,66), G3 (ASV = 0,71), урожайности семян – G4 (ASV = 0,13) в среде E1 и генотипы G1 (ASV = 0,26), G2 (ASV = 0,38); G3 (ASV = 0,35), G1 (ASV = 0,44), G5 (ASV = 0,52); G1 (ASV = 0,18); G1 (ASV = 0,32), G4 (ASV = 0,46) соответственно в среде E2. Использование его как критерия для отбора может внести определенный вклад в совершенствование селекционного процесса льна-долгунца, наряду с другими подходами (морфологический, физиологический биохимический тестинги), так как на льне данный показатель не использовался, но полученная информация является необходимой в связи с контрастностью климатических условий данных экологических пунктов и целесообразностью выращивания более адаптивных и продуктивных сортов льна-долгунца в Тюменской области. Доказанная эффективность его применения в качестве диагностического

показателя на других культурных растениях [14–16] позволяет говорить о возможности тестирования с его помощью и различных сортов льна.

Рассчитывали индекс отбора генотипа (GSI), который включает в себя как критерии продуктивности, так и стабильности. К сортам с его наибольшим значением отнесены G1 (GSI = 101), G3 (GSI = 85), G2 (GSI = 70) в средовых условиях E1 по урожайности соломы, тресты – G1 (GSI = 63), G3 (GSI = 51), волокна – G1 (GSI = 75), семян – G4 (GSI = 62), G6 (GSI = 49). В среде E2 по соломе отмечены G1 (GSI = 66), G2 (GSI = 51), тресте – G1 (GSI = 99), G3 (GSI = 81), волокну – G3 (GSI = 115), семенам – G1 (GSI = 64), G6 (GSI = 48) соответственно, представляющие интерес для приоритетных направлений в адаптивной селекции льна-долгунца для условий региона. Как указывают Farshadfar E., Sutka J., использование данного параметра позволяет выделить ценные сорта для селекции. Это особенно важно с учетом того, что в данных пунктах уровень проявления фенотипических признаков оказался различным и крайне варьирующим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлены различия между сортами и средами по продуктивности. Генотипические особенности оказывали влияние на формирование соломы и тресты ($G = 34,5\text{--}44,6\%$), средовые условия – на урожайность волокна ($E = 51,9\text{--}53,6\%$) и семян ($E = 26,9\text{--}36,9\%$).

Сложное взаимодействие генотипа со средой ($G \times E$) определялось тремя главными компонентами, из которых наибольшее значение имела первая (IPCA1) для формирования урожайности соломы ($40,0\text{--}43,2\%$), тресты ($48,6\text{--}53,8\%$), волокна ($40,4\text{--}53,2\%$), семян ($51,2\text{--}58,1\%$).

На основании индекса (GSI) отобраны стабильные высокопродуктивные сорта для средовых условий E1 ($G1, G3$ – по трем, $G1, G3$ – по одному признакам), E2 ($G1, G3$ – по трем, $G2$ – по двум признакам), представляющие дальнейшее селекционное и практическое значение в Тюменской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ansari R., Zarshenas M.M., Dadbakhsh A.H. A Review on Pharmacological and Clinical Aspects of *Linum usitatissimum* L. // Current Drug Discovery Technologies. 2019. Vol. 16 (2). P. 148–158. DOI: 10.2174/1570163815666180521101136.
2. Пороховинова Е.А. Генетический контроль восстановления фертильности пыльцы у линий льна (*Linum usitatissimum* L.) с цитоплазматической мужской стерильностью // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2017. № 178 (1). С. 68–81. DOI: 10.30901/2227-8834-2017-1-68-81.
3. Кутузова С.Н., Пороховинова Е.А., Брач Н.Б., Павлов А.В. Мировой генофонд льна-долгунца ВИР и селекция устойчивых к ржавчине сортов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2020. № 181 (2). С. 57–64. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-2-57-64.
4. Рожмина Т.А., Рыжов А.И., Куземкин И.А., Киселева Т.С. Внутривидовое разнообразие льна культурного (*Linum usitatissimum* L.) и его роль в решении проблемы создания отечественной сырьевой базы // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 12. С. 17–20.
5. Sertse D., You F. M., Ravichandran S., Cloutier S. The genetic makeup of flax illustrates the ecological and anthropogenic selection that has led to its ecogeographic adaptation // Molecular Phylogenetics Evolution. 2019. Vol. 137. P. 22–32. DOI: 10.1016/j.ympev.2019.04.010.
6. 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.
7. Степин А.Д., Рысев М.Н., Рысева Т.А., Уткина С.В., Романова Н.В. Скрининг сортообразцов льна-долгунца коллекции ВИР по урожайности льноволокна и параметрам адаптивности в условиях Северо-Западного региона // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. № 21 (2). С. 141–151. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.2.141-151.
8. 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.
9. Богдан В.З., Богдан Т.М., Литарная М.А., Иванов С.А. Агроэкологическая адаптивность образцов льна-долгунца // Биотехнология и селекция растений. 2023. № 6 (3). С. 5–13. DOI: 10.30901/2658-6266-2023-3-02.
10. 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. № 52 (3). С. 615–621. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.3.615rus.
11. Hoque A., Fiedler J.D., Rahman M. Genetic diversity analysis of a flax (*Linum usitatissimum* L.) global collection // BMC Genomics. 2020. Vol. 21. P. 557–559. DOI: 10.1186/s12864-020-06922-2.
12. Valdés-Florido A., Tan L., Maguilla E., Simón-Porcar V.I., Zhou Y.H., Arroyo J., Escudero M. Drivers of diversification in *Linum* (Linaceae) by means of chromosome evolution: correlations with biogeography, breeding system and habit // Annals of Botany. 2023. Vol. 132 (5). P. 949–962. DOI: 10.1093/aob/mcad139.

13. Bocianowski J., Liersch A. Multidimensional analysis of diversity in genotypes of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) // *Agronomy*. 2022. Vol. 12 (3). P. 633. DOI: 10.3390/agronomy12030633.
14. Kumar A., Sharma N., Kumar A., Kumar D., Jnanesha A.C., Gupta A.K., Chanotiya C.S., Bisht D., Lal R.K. Differential responses of genotype × environment interaction on agronomic interventions affect the yield and quality of essential oil of interspecific basil hybrid of *Ocimum basilicum* L. × *Ocimum kilimandscharicum*. *Ecological Genetics Genomics*. 2024. Vol. 3. Article. 100217. DOI: 10.1016/j.egg.2024.100217.
15. Oladosu Y., Rafii M.Y., Abdullah N., Magaji U., Miah G., Hussin G., Ramli A. Genotype × Environment interaction and stability analyses of yield and yield components of established and mutant rice genotypes tested in multiple locations in Malaysia // *Acta Agriculturae Scandinavica*. 2017. Vol. 67 (7). P. 590–606. DOI: 10.1080/09064710.
16. Pour-Aboughadareh A., Barati A., Gholi-poor A., Zali H., Marzoooghian A., Koohkan S.A., Shahbazi-Homonloo K., Houseinpour A. Deciphering genotype-by-environment interaction in barley genotypes using different adaptability and stability methods // *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2023. Vol. 26. P. 547–562. DOI: 10.1007/s12892-023-00199-z.
17. Nowosad K., Tratwal A., Bocianowski J. Genotype by environment interaction for grain yield in spring barley using additive main effects and multiplicative interaction model // *Cereal Research Communications*. 2018. Vol. 46 (4). P. 729–738. DOI: 10.1556/0806.46.2018.046.
18. Gerrano A., van Rensburg W., Mathew I., Shayanowako A., Bairu M., Venter S., Swart W., Mofokeng A., Mellem J., Labuschagne M. Effects of genotype and genotype × environment interactions on grain yield of cowpea genotypes in a dryland farming system in South Africa // *Euphytica*. 2020. Vol. 216. P. 1–11. DOI: 10.1007/s10681-020-02611-z.
19. Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Mehraban A., Hossein-Pour T., Koohkan E., Ghasemi S., Moradkhani H., Siddique K.H.M. Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and Journal of Applied Genetics high-yielding barley genotypes // *Euphytica*. 2019. Vol. 215. Article. 63. DOI: 10.1007/s10681-019-2386-5.
20. Abdala L.J., Otegui M.E., Mauro G.D. On-farm soybean genetic progress and yield stability during the early 21st century: a case study of a commercial breeding program in Argentina and Brazil // *Field Crops Research*. 2024. Vol. 308. P. 109277. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109277.
21. Amelework A.B., Bairu M.W., Marx R., Laing M., Venter S.L. Genotype × environment interaction and stability analysis of selected cassava Cultivars in South Africa // *Plants*. 2023. Vol. 12 (13). Article 2490. DOI: 10.3390/plant12132490.
22. Abrha G.V., Kebede S.A., Bedada L.T., Berecha Y.G., Adugna G.A. Genotype by environment interaction and yield stability of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes evaluated in western Ethiopia // *Plant Production Science*. 2022. Vol. 25 (4). P. 467–483. DOI: 10.1080/1343943X.2022.2136722.

REFERENCES

1. Ansari R., Zarshenas M.M., Dadbakhsh A.H. A Review on Pharmacological and Clinical Aspects of *Linum usitatissimum* L. *Current Drug Discovery Technologies*. 2019, vol. 16 (2), pp. 148–158. DOI: 10.2174/1570163815666180521101136.
2. Porokhovinova E.A. Genetic control of fertility restoration in CMS lines of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selekcii = Proceedings on applied botany, genetics and breeding*, 2017, no. 178 (1), pp. 68–81. (In Russian). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-1-68-81.
3. Kutuzova S.N., Porokhovinova E.A., Brach N.B., Pavlov A.V. Worldwide gene pool of fiber flax at VIR, and breeding of rust-resistant varieties. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selekcii = Proceedings on applied botany, genetics and breeding*, 2020, no. 181 (2), pp. 57–64. (In Russian). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-2-57-64.
4. Rozhmina T.A., Ryzhov A.I., Kuzemkin I.A., Kiseleva T.S. Intraspecific diversity of *Linum usitatissimum* L. and its role in the decision of a problem of raw maintenance of a country. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK. = Achievements of Science and Technology of AIC*, 2017, vol. 31, no. 12, pp. 17–20. (In Russian).

5. Sertse D., You F.M., Ravichandran S., Cloutier S. The genetic makeup of flax illustrates the ecological and anthropogenic selection that has led to its ecogeographic adaptation. *Molecular Phylogenetics Evolution*, 2019. Vol. 137. P. 22–32. DOI: 10.1016/j.ympev.2019.04.010.
6. Popova G.A., Rogalskaya N.B., Trofimova V.M. World's genetic resources of the VIR flax collection in the creation of Tomsk selection varieties. *Sibirskij vestnik sel'skhozjajstvennoj nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2023, vol. 53, no. 4. pp. 34–47. (In Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2023-4-4.
7. Stepin A.D., Rysev M.N., Ryseva T.A., Utkina S.V., Romanova N.V. Screening of fiber flax varieties from the VIR collection according to flax fiber yield and adaptability parameters in the conditions of the Northwestern region. *Agrarnaja nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*, 2020, no. 21 (2). pp. 141–151. (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.2.141–151.
8. Kuzemkin I.A., Rozhmina T.A. Screening of accessions from fiber flax collection by productivity and their adaptability to the conditions of the North-West region of Russia. *Agrarnaja nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*, 2022, no. 23 (5), pp. 666–674. (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.666-674.
9. Bogdan V.Z., Bogdan T.M., Litarnaya M.A., Ivanov S.A. Agroecological adaptedness of fiber flax specimens. *Biotehnologija i selekcija rastenij = Plant Biotechnology and Breeding*, 2023, no. 6 (3), pp. 5–13. (In Russian). DOI: 10.30901/2658-6266-2023-3-o2.
10. Korolev K.P., Bome N.A. Evaluation of flax (*Linum usitatissimum* L.) genotypes on environmental adaptability and stability in north-eastern Belarus. *Sel'skhozjajstvennaja biologija = Agricultural biology*, 2017, no. 52 (3), pp. 615–621. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiologiya.2017.3.615rus.
11. Hoque A., Fiedler J.D., Rahman M. Genetic diversity analysis of a flax (*Linum usitatissimum* L.) global collection. *BMC Genomics*, 2020, vol. 21, pp. 557–559. DOI: 10.1186/s12864-020-06922-2.
12. Valdés-Florido A., Tan L., Maguilla E., Simón-Porcar V.I., Zhou Y.H., Arroyo J., Escudero M. Drivers of diversification in *Linum* (Linaceae) by means of chromosome evolution: correlations with biogeography, breeding system and habit. *Annals of Botany*, 2023, vol. 132 (5), pp. 949–962. DOI: 10.1093/aob/mcad139.
13. Bocianowski J., Liersch A. Multidimensional analysis of diversity in genotypes of winter oil-seed rape (*Brassica napus* L.). *Agronomy*, 2022, vol. 12 (3). p. 633. DOI: 10.3390/agronomy12030633.
14. Kumar A., Sharma N., Kumar A., Kumar D., Jnanesha A.C., Gupta A.K., Chanotiya C.S., Bisht D., Lal R.K. Differential responses of genotype × environment interaction on agronomic interventions affect the yield and quality of essential oil of interspecific basil hybrid of *Ocimum basilicum* L. × *Ocimum kilimandscharicum*. *Ecological Genetics Genomics*, 2024, vol. 3, Article. 100217. DOI: 10.1016/j.egg.2024.100217.
15. Oladosu Y., Rafii M.Y., Abdullah N., Magaji U., Miah G., Hussin G., Ramli A. Genotype × Environment interaction and stability analyses of yield and yield components of established and mutant rice genotypes tested in multiple locations in Malaysia. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2017, vol. 67 (7), pp. 590–606. DOI: 10.1080/09064710.
16. Pour-Aboughadareh A., Barati A., Gholipour A., Zali H., Marzooghian A., Koohkan S.A., Shahbazi-Homonloo K., Houseinpour A. Deciphering genotype-by-environment interaction in barley genotypes using different adaptability and stability methods. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2023, vol. 26. pp. 547–562. DOI: 10.1007/s12892-023-00199-z.
17. Nowosad K., Tratwal A., Bocianowski J. Genotype by environment interaction for grain yield in spring barley using additive main effects and multiplicative interaction model. *Cereal Research Communications*, 2018, vol. 46 (4), pp. 729–738. DOI: 10.1556/0806.46.2018.046.
18. Gerrano A., van Rensburg W., Mathew I., Shayanowako A., Bairu M., Venter S., Swart W., Mofokeng A., Mellem J., Labuschagne M. Effects of genotype and genotype × environment interactions on grain yield of cowpea genotypes in a dryland farming system in South Africa. *Euphytica*, 2020. vol. 216, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s10681-020-02611-z.
19. Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Mehraban A., Hossein-Pour T., Kooh-

- kan E., Ghasemi S., Moradkhani H., Siddique KHM. Integrating different stability models to investigate genotype $\times$ environment interactions and identify stable and Journal of Applied Genetics high-yielding barley genotypes *Euphytica*, 2019, vol. 215, Article 63. DOI: 10. 1007/s10681- 019- 2386-5.
20. Abdala L.J., Otegui M.E., Mauro G.D. On-farm soybean genetic progress and yield stability during the early 21st century: a case study of a commercial breeding program in Argentina and Brazil. *Field Crops Research*, 2024, vol. 308, p. 109277. DOI: 10. 1016/j. fcr. 2024. 109277.
21. Amelework A.B., Bairu M.W., Marx R., Laing M., Venter S.L. Genotype $\times$ environment interaction and stability analysis of selected cassava Cultivars in South Africa. *Plants*, 2023, vol. 12 (13), Article. 2490. DOI: 10. 3390/ plant s1213 2490.
22. Abrha G.V., Kebede S.A., Bedada L.T., Berecha Y.G., Adugna G.A. Genotype by environment interaction and yield stability of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes evaluated in western Ethiopia. *Plant Production Science*, 2022, vol. 25 (4). pp. 467–483. DOI: 10.1080/1343943X.2022.2136722.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

✉ **Королёв К.П.**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; **адрес для переписки:** Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; e-mail: korolevkonstantin799@gmail.com. <http://orcid.org/0001-0001-9595-3493>.

AUTHOR INFORMATION

✉ **Konstantin P. Korolev**, Candidate of Science in Agriculture, Associate Professor; **address:** 6, Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia; e-mail: korolevkonstantin799@gmail.com. <http://orcid.org/0001-0001-9595-3493>.

Дата поступления статьи / Received by the editors 22.09.2024
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 24.10.2024
Дата публикации / Published 13.12.2024