

# Тестирование генотипов *Linum usitatissimum* L. по адаптивности и стабильности в условиях Северного Зауралья

Королёв К.П.<sup>✉</sup>, Якубенко А.Н., Якубенко Э.Н.

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Тюменская область, Россия

<sup>✉</sup>corolev.konstantin2016@yandex.ru

**Аннотация.** При подборе сортов, создании нового исходного материала для селекции наряду с хозяйственно ценными признаками и свойствами необходимо учитывать адаптивность и стабильность генотипов. Цель исследования – выявить фенотипическую изменчивость хозяйственно ценных признаков растений льна в различных условиях среды и определить генотипы, характеризующиеся адаптивностью к изменению климатических условий. В качестве объекта исследования использовали 12 гибридных популяций льна (G1–G12). Полевое изучение проводили на Биологической станции Тюменского государственного университета «Озеро Кучак» (Нижегородский р-н, Тюменская обл.). Согласно дисперсионному анализу (ANOVA) выявлены достоверные различия ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ) между гибридными комбинациями льна по шести тест-признакам. Установлен вклад генотипа (19,9–40,0 %), среды (16,9–47,3 %) и их взаимодействия (17,7–48,5 %) в общую фенотипическую изменчивость показателей. Выделены группы высоко ( $b_i < 1$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G1, G2, G3, G5, G7, G9, G12) и слабо отзывчивых ( $b_i > 1$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G1, G2, G3, G5, G6, G7, G8, G9, G11), стабильных ( $b_i = 1,0$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G2, G4, G6, G11, G12) генотипов (по S.A. Eberhart, W.A. Russel). С использованием ASV выявлены стабильные ( $ASV = > 0 < 1$ ; G1, G2, G3, G5, G6, G7, G8, G9, G11) комбинации, высокоустойчивые ( $SI = 61,0–80,0$  %; G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9, G11, G12). С помощью индекса отбора генотипа определены наиболее стабильные из них ( $GSI = > 0$ , G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G12), по геометрическому индексу адаптивности (GAI) – G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G12. По критерию сумма рангов RS к группе стабильных по высоте растений и размеру коробочки отнесен 41,6 %, числу коробочек и числу семян в 1 коробочке – 33,3 %, длине соцветия и растрескиваемости – 25,0 %. Перспективными генотипами, которые обладали свойствами стабильности и наибольшим уровнем признака, были G1, G2, G3, G5, G6, G7, G11.

**Ключевые слова:** лен масличный; гибриды; факторы среды; ANOVA; адаптивность; стабильность; индекс.

**Для цитирования:** Королёв К.П., Якубенко А.Н., Якубенко Э.Н. Тестирование генотипов *Linum usitatissimum* L. по адаптивности и стабильности в условиях Северного Зауралья // «Магарач». Виноградарство и виноделие. 2024;26(4):329-335. EDN BIBJWL.

## ORIGINAL RESEARCH

# Testing of *Linum usitatissimum* L. genotypes for adaptability and stability in the conditions of Northern Trans-Urals

Korolev K.P.<sup>✉</sup>, Yakubenko A.N., Yakubenko E.N.

State University of Tyumen, Tyumen, Tyumen region, Russia

<sup>✉</sup>corolev.konstantin2016@yandex.ru

**Abstract.** When selecting varieties and creating new source material for breeding, it is necessary to take into account not only economically valuable traits and properties, but also the adaptability and stability of genotypes. The goal of the study was to identify phenotypic variability of economically valuable traits of flax plants in various environmental conditions, and to determine genotypes characterized by adaptability to changing climatic conditions. The object of the study was 12 hybrid populations of oil flax (G1–G12). The field study was conducted at the Biological Station of Tyumen State University “Lake Kuchak” (Nizhnetavdinsky District, Tyumen Region). According to the analysis of variance (ANOVA), reliable differences ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ) were revealed between hybrid combinations of oil flax for six test traits. The contribution of genotype (19.9–40.0%), environment (16.9–47.3%) and their interaction (17.7–48.5%) to the overall phenotypic variability of the parameters was established. Groups of highly ( $b_i < 1$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G1, G2, G3, G5, G7, G9, G12) and weakly responsive ( $b_i > 1$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G1, G2, G3, G5, G6, G7, G8, G9, G11), stable ( $b_i = 1,0$ ,  $S^2_{di} = 0$ ; G2, G4, G6, G11, G12) genotypes (according to S.A. Eberhart, W.A. Russel) were identified. Using ASV, stable ( $ASV = > 0 < 1$ ; G1, G2, G3, G5, G6, G7, G8, G9, G11), highly resistant ( $SI = 61,0–80,0$ %; G1, G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9, G11, G12) combinations were identified. Using the genotype selection index, the most stable of them were determined ( $GSI = > 0$ , G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G12), in accordance with the geometric adaptability index (GAI) – G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G12. According to the RS rank sum criterion, 41.6% were assigned to the group of plants stable in height and boll size, 33.3% - in the number of bolls and seeds per 1 boll, 25.0% - in the length of inflorescence and cracking ability. The promising genotypes that had the properties of stability and the highest level of the trait were G1, G2, G3, G5, G6, G7 and G11.

**Key words:** oil flax; hybrids; environmental factors; ANOVA; adaptability; stability; index.

**For citation:** Korolev K.P., Yakubenko A.N., Yakubenko E.N. Testing of *Linum usitatissimum* L. genotypes for adaptability and stability in the conditions of Northern Trans-Urals. Magarach. Viticulture and Winemaking. 2024;26(4):329-335. EDN BIBJWL (in Russian).

## Введение

Лён масличный – ценное сельскохозяйственное растение, которое используется в пищевых, технических, фармацевтических целях. Питательную значимость обуславливает наличие в его семенах 30–45 % масла, 28,0 % углеводов, 21,0 % белка, 7,4 % воды и

до 3,4 % других минеральных компонентов. В общей структуре производства льна масличного в мире ведущими странами являются Канада (43,8 %), Китай (15,0 %), США (8,89 %), Индия (7,9 %), Эфиопия (7,1 %) [1–3].

Для формирования высокой продуктивности агрофитоценозов льна необходимо выращивать сорта, характеризующиеся не только хозяйственно ценными признаками, но и показателями адаптивности и

стабильности [4–7], при этом целесообразно учитывать сложный характер взаимодействия генотипа и среды, используя при его скрининге разнообразный статистический инструментарий. Важно выявить сорта, сочетающие в себе как высокие свойства стабильности, так и урожайности, показатели качества продукции в различных средовых условиях.

Для анализа генотипов по адаптивности и стабильности применяют ряд методов (параметрические и непараметрические) [8–10], позволяющих получить комплексную информацию о признаках и сформировать в дальнейшем «идеотип» сорта [11, 12].

В связи с контрастностью климатических условий в последние годы, а также разнообразием почвенных ресурсов Тюменской области необходим поиск генотипов, имеющих высокий морфо-биологический потенциал и стабильность его реализации при неоднородных условиях выращивания. Отсутствие полноценной информации о взаимодействии генотипа и среды у новых гибридных популяций льна по селекционно ценным признакам и свойствам послужило основой для проведения данной работы.

**Цель исследования** – выявить фенотипическую изменчивость хозяйственно ценных признаков растений льна в различных условиях среды и определить генотипы, характеризующиеся адаптивностью к изменению климатических условий.

#### Объекты и методы исследования

В качестве материала исследования использованы гибридные популяции льна масличного (F1–F4): ♀ Северный × ♂ Antares (G1), ♀ Северный × ♂ Бирюза (G2), ♀ Северный × ♂ Нилин (G3), ♀ Antares × ♂ Северный (G4), ♀ Antares × ♂ Бирюза (G5), ♀ Antares × ♂ Нилин (G6), ♀ Бирюза × ♂ Северный (G7), ♀ Бирюза × ♂ Antares (G8), ♀ Бирюза × ♂ Нилин (G9), ♀ Нилин × ♂ Северный (G10), ♀ Нилин × ♂ Бирюза (G11), ♀ Нилин × ♂ Antares (G12).

Полевые опыты проводили в 2018–2022 гг. на Биологической станции Тюменского государственного университета «Озеро Кучак» (Нижнетавдинский р-н, Тюменская обл., 57°21' с. ш., 66°04' в. д.). Гибридизацию выполняли по методике Рогаша А.Г. и Дунаевой Г.В. [13]. Почва – дерново-подзолистая, супесчаная, содержание гумуса – 3,6 %, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 433,3 мг/кг почвы, K<sub>2</sub>O – 234,0 мг/кг почвы. Закладку полевых опытов, все необходимые учеты и наблюдения осуществляли в соответствии с Методическими указаниями [14].

Климатические условия в годы исследований различались по температуре и количеству выпавших осадков при сравнении со среднепогодными показателями (нормой). По гидротермическому коэффициенту Селянинова,

вегетационные периоды были от слабо засушливых (ГТК=1,2) до влажных (ГТК=1,6). Статистическую обработку полученных данных проводили методом дисперсионного анализа (ANOVA) по Доспехову Б.А. [15] с использованием программы Statistica 6.0 (Statsoft Inc., США). Ранжирование образцов – по показателю RS [16]. Достоверность различий устанавливали на основании t-критерия Стьюдента. Определяли S<sup>2</sup>d<sub>i</sub> и b<sub>i</sub> генотипов по методу Eberhart S.A., Russel W.A. [17], а также индексы: стабильности ASV [18], отбора генотипа (GSI) [19], устойчивости (SI) [20–22], адаптивности (GAI) [23, 24].

#### Результаты и их обсуждение

С использованием многофакторного дисперсионного анализа доказаны достоверные различия (p<0,05, p<0,01) между генотипами (фактор А), средами (фактор Б) и их взаимодействием (А × Б) по фенотипическим критериям (табл. 1).

Высокая значимость основных источников вариации предполагает возможность отбора наиболее экологически устойчивых генотипов. В связи с тем, что достоверность влияния фактора взаимодействия генотипа и среды (А × Б) была доказана, можем проводить оценку представленных комбинаций по стабильности [25, 26].

Вклад генотипа в общей структуре вариабельности признаков составил 19,9–40,0 %, средовых условий – 16,9–47,3 %, фактора взаимодействия генотипа и среды – 17,7–48,5 %, случайный фактор был незначительным и составил 2,0–8,2 %. Формирование высоты растений, числа коробочек на 1 растении зависело от среды на 45,8–47,3 %, длина соцветия, число семян в 1 коробочке, ее растрескиваемость – от взаимодействия генотипа и среды на 42,2–48,5 %, генотипические особенности обуславливали размер коробочки на 40,0 % (рис. 1).

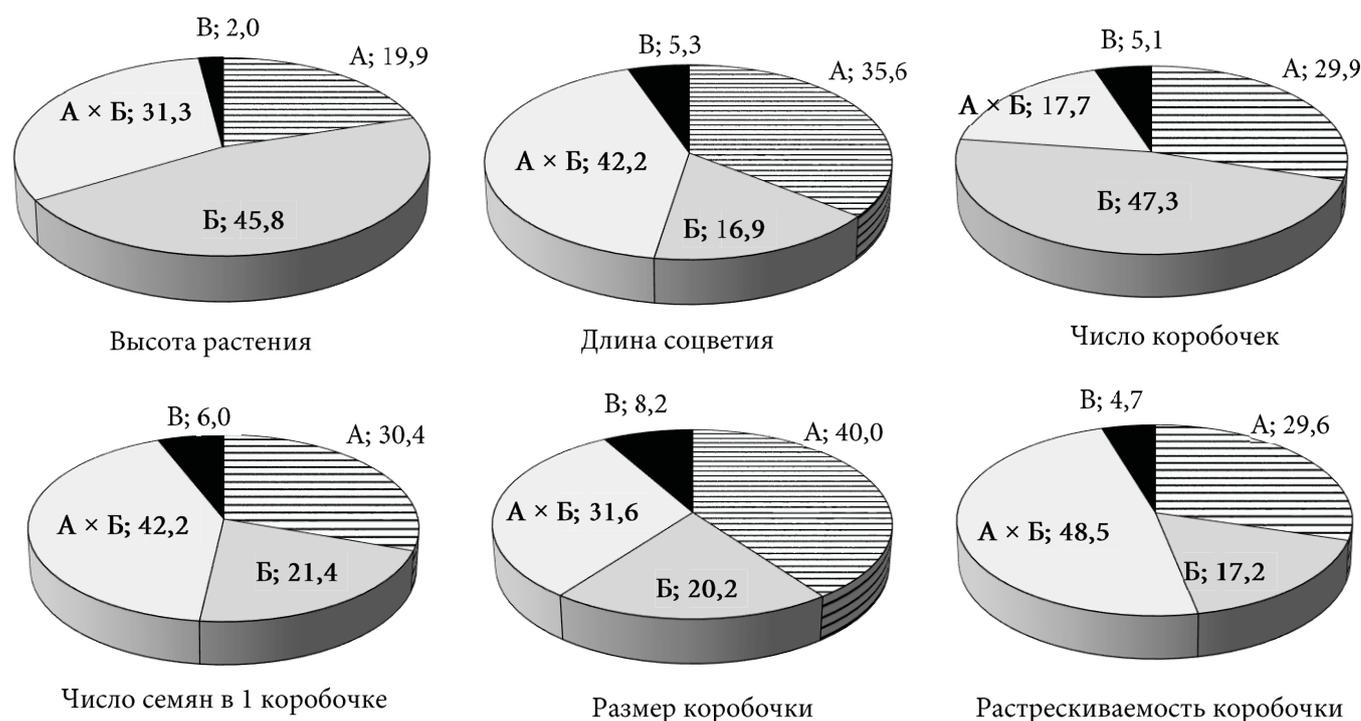
Для более комплексной оценки гибридных комбинаций льна масличного с учетом экологических критериев, полученную информацию по изученным генотипам анализировали с использованием различных методических подходов (табл. 2). По Eberhart S.A., Russel W.A. [17] выделены несколько

**Таблица 1.** Результаты многофакторного дисперсионного анализа гибридных комбинаций льна масличного по изученным признакам, 2019–2022 гг.

**Table 1.** Results of multivariate analysis of variance of hybrid combinations of oil flax according to the studied characteristics, 2019–2022

Источник вариации	Число степеней свободы (df)	Средний квадрат (mS)					
		высота растений	длина соцветия	число коробочек	число семян в 1 коробочке	размер коробочки	растрескиваемость коробочки
Фактор А (генотип)	11	65,15*	33,18**	12,58*	43,18*	33,26**	25,41*
Фактор Б (среда)	3	125,13**	89,43**	45,32**	155,18**	66,28**	34,21**
Фактор взаимодействия генотипа и среды (А × Б)	11	89,77**	138,19**	56,22**	77,25**	33,15*	56,33**
Случайное (В)	15	24,22	16,04	10,08	13,89	9,46	12,03

Примечание: \* – различия между генотипами достоверны при p<0,05; \*\* – p<0,01



**Рис. 1.** Вклад различных факторов (А - генотип; В - среда; А × В - взаимодействие генотипа и среды; В - случайное) в формирование показателей у гибридных растений льна масличного, F1-F4

**Fig. 1.** Contribution of various factors (A - genotype; B - environment; A × B - interaction of genotype and environment; C - random) to the formation of indicators in hybrid oil flax plants, F1-F4

**Таблица 2.** Оценка гибридных комбинаций льна масличного по адаптивности и стабильности признаков с использованием различных методик, F1-F4

**Table 2.** Evaluation of hybrid combinations of oil flax for adaptability and stability of characteristics using various methods, F1-F4

Группа	Высота растений	Длина соцветия	Число коробочек	Число семян в 1 коробочке	Размер коробочки	Растрескиваемость коробочки
<i>S.A. Eberhart, W.A. Russel</i>						
Отзывчивые $b_1 < 1, S^2 di = 0$	G9	G1, G3, G7	G1, G2, G3, G4, G6, G7, G10, G11	G2	G9	G12, G5
Стабильные $b_1 = 1, 0, S^2 di = 0$	G2	G6, G11	G5, G8, G9	-	G6, G7, G12	G2, G6
Слабоотзывчивые $b_1 > 1, S^2 di = 0$	G1, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10, G11, G12	G2, G3, G4, G5, G8, G9, G10, G12	G12	G1, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10, G11, G12	G1, G2, G3, G4, G5, G8, G10, G11	G1, G3, G4, G7, G8, G9, G10, G11, G12
<i>ASV</i>						
Стабильные ( $ASV = > 0 < 1$ )	G1, G3, G5	G5, G7, G11	G1, G2	G1, G2, G6, G9	G1, G2, G7	G5, G8, G9
<i>SI</i>						
Устойчивость: очень низкая ( $SI = < 20,0\%$ )	-	G1	-	G5	G4, G6, G5	-
низкая ( $SI = < 21,0 - 40,0\%$ )	G1, G3	G4, G5, G6	G1, G2, G10	G3, G4, G6	G7, G9, G11	G5, G7, G12
средняя ( $SI = 41,0 - 60,0\%$ )	G5, G6, G7, G11, G12	G7, G8, G10, G11, G12	G3, G4, G5, G6	G7, G8, G10, G12	G1, G2, G3, G8, G10	G4, G6, G8, G10
высокая ( $SI = 61,0 - 80,0\%$ )	G2, G4, G8, G9, G11	G9	G7, G8, G10, G11, G12	G9, G11	G12	G9, G11, G12
очень высокая ( $SI = > 80,0\%$ )	-	G3	G9	G1, G2	-	G1
<i>GAI</i>						
Стабильные	G1, G3, G5, G12	G1, G7, G9	G2, G5, G10, G11	G1, G3, G5, G12	G9, G11	G1, G5
<i>GSI</i>						
Стабильные ( $GSI = > 0$ )	G1, G5, G7	G2, G8	G3, G5, G8, G12	G1, G7, G8	G1, G5	G1, G4, G5, G7

Примечание: Генотипы: ♀ Северный × ♂ Antares (G1), ♀ Северный × ♂ Бирюза (G2), ♀ Северный × ♂ Нилин (G3), ♀ Antares × ♂ Северный (G4), ♀ Antares × ♂ Бирюза (G5), ♀ Antares × ♂ Нилин (G6), ♀ Бирюза × ♂ Северный (G7), ♀ Бирюза × ♂ Antares (G8), ♀ Бирюза × ♂ Нилин (G9), ♀ Нилин × ♂ Северный (G10), ♀ Нилин × ♂ Бирюза (G11), ♀ Нилин × ♂ Antares (G12)

групп гибридных популяций по отзывчивости на изменения условий выращивания. К отзывчивым (группа 1,  $b_i < 1$ ,  $S^2 d_i = 0$ ) по высоте растений и числу семян в 1 коробочке отнесено 8,3 % комбинаций, при максимуме 66,6 % по числу семян в 1 коробочке. Сочетанием нескольких адаптивных признаков характеризовались 58,3 % комбинаций. Стабильность параметров (группа 2,  $b_i = 1,0$ ,  $S^2 d_i = 0$ ) отмечена у 8,3 % генотипов по высоте растений, 16,6 % – по длине соцветия, растрескиваемости коробочки, 25,0 % – по числу коробочек на 1 растении, числу семян в коробочке, размеру коробочки. К слабоотзывчивым (группа 3,  $b_i > 1$ ,  $S^2 d_i = 0$ ) были отнесены 83,3 % комбинаций по высоте растений, 58,3 % – по длине соцветия, 75,0 % – по размеру коробочки, 83,3 % – по растрескиваемости коробочки, 8,3 % – по числу коробочек на 1 растении.

К высокорослым ( $73,3 \pm 1,45$  –  $76,4 \pm 2,14$  см) и слабоотзывчивым ( $b_i > 1$ ,  $S^2 d_i = 0$ ) генотипам были отнесены G11, G12; по длине соцветия ( $9,5 \pm 0,45$  –  $11,3 \pm 0,18$  см) – G8, G9; по формированию большего количества коробочек на 1 растении ( $8,4 \pm 0,44$  –  $11,5 \pm 0,19$  шт.) – G2, G3, G9; числу семян в 1 коробочке ( $8,4 \pm 0,14$  –  $10,0 \pm 0,23$  шт.) – G5, G6; размеру коробочки – G1, G5 и ее меньшей растрескиваемости – G1, G7.

Для оценки стабильности показателей у растений был предложен оценочный критерий ASV [18]. Согласно нашим расчетам, выявлены различия между изученными комбинациями по данному показателю. Наиболее стабильными ( $ASV = > 0 < 1$ ) по высоте растений характеризовались 25,0 % гибридных популяций, длине соцветия – 25,0 %, числу семян в 1 коробочке – 25,0 %, размеру коробочки – 33,3 %, растрескиваемости и числу коробочек на 1 растении – 25,0 %. Отмечены комбинации, сочетающие в одном генотипе стабильность и высоту растений (G3), длину соцветия (G5, G7), размер коробочки (G2), число семян в 1 коробочке (G2), слабую растрескиваемость коробочки (G1).

Индекс отбора генотипа (GSI) используется для идентификации форм, сочетающих максимальное значение тестируемого признака с его стабильностью [19]. Более ценными считаются генотипы с наименьшим значением GSI. В нашем случае таких генотипов было незначительное количество. При этом лишь по признаку число семян в 1 коробочке и число коробочек на 1 растении выявлено 33,3 % таких генотипов, остальные 66,6 % оказались нестабильными. Отмечены комбинации с наибольшей длиной соцветия (G8), размером коробочки

(G1) и их стабильностью.

К экологическому показателю диагностики растений также относят индекс устойчивости (SI) [20–22]. В среднем данный критерий был на уровне от 13,6 до 85,7 %. Установлено, что у 9 гибридных комбинаций была выявлена высокая и очень высокая устойчивость. К генотипам, сочетающим стабильность и высоту растений, отнесены G2, длину соцветия – G3, размер коробочки – G9, число семян в 1 коробочке – G8, число коробочек на 1 растении – G9.

С целью выявления адаптивных генотипов был предложен геометрический индекс адаптивности (GAI) [19], согласно которому лучшие из них будут характеризоваться максимальным его значением. К перспективным гибридным комбинациям льна масличного были определены G3, G5 (высота растений), G1 (длина соцветия), G2, G5 (число семян в 1 коробочке), G1 (размер коробочки), G1 (число коробочек на 1 растении), G1, G5 (растрескиваемость коробочки).

Из непараметрических показателей стабильности рассчитывали индекс (I) [23–24], включающий производительность генотипа по признаку, среднее значение популяции и дисперсию стабильности. По высоте растений были отобраны G1, G2; по длине соцветия – G5, G7; по числу семян в 1 коробочке – G1, G2; по размеру коробочки – G2, G4; по числу коробочек на 1 растении – G2, G5; меньшей растрескиваемости коробочки – G1, G2.

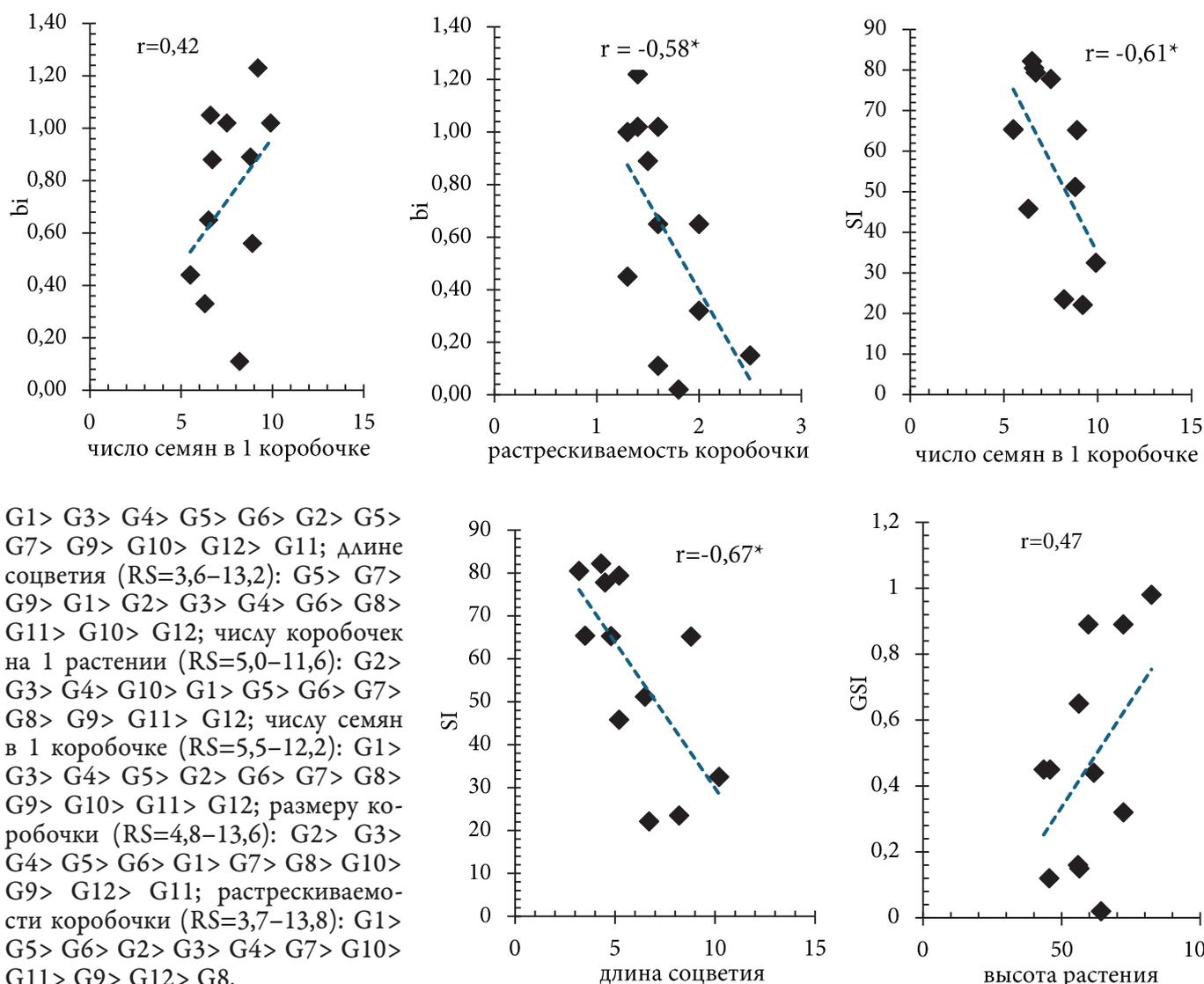
В дальнейшем на основании расчета индекса стабильности (I) генотипы были распределены по критерию сумма рангов RS. Исходя из методики, каждой гибридной комбинации присваивали ранг в порядке возрастания с учетом того, что у наиболее стабильных генотипов индекс был меньше и они имели ранг № 1. Таким образом, по высоте растений ( $RS = 5,5 - 12,2$ ) их очередность была следующей:

**Таблица 3.** Распределение генотипов льна масличного согласно ранговой сумме Канга (RS) с учетом индекса стабильности, F1–F4

**Table 3.** Distribution of oil flax genotypes according to Kang's rank sum (RS), considering the stability index, F1–F4

Признаки	Стабильные	Нестабильные
Высота растений, см	n=5; G1, G3, G4, G5, G6	n=7; G2, G7, G8, G9, G10, G11, G12
Длина соцветия, см	n=3; G5, G7, G9	n=9; G1, G2, G3, G4, G6, G8, G10, G12
Число семян в 1 коробочке, шт.	n=4; G1, G3, G4, G5	n=8; G2, G6, G7, G8, G9, G10, G11, G12
Размер коробочки, мм	n=5; G2, G3, G4, G5, G6	n=7; G1, G7, G8, G9, G10, G11, G12
Число коробочек на 1 растении, шт.	n=4; G2, G3, G4, G10	n=8; G1, G5, G6, G7, G8, G9, G11, G12
Растрескиваемость коробочки, мм	n=3; G1, G5, G6	n=9; G2, G3, G4, G7, G8, G9, G10, G11; G12

Примечание: Генотипы: ♀ Северный × ♂ Antares (G1), ♀ Северный × ♂ Бирюза (G2), ♀ Северный × ♂ Нилин (G3), ♀ Antares × ♂ Северный (G4), ♀ Antares × ♂ Бирюза (G5), ♀ Antares × ♂ Нилин (G6), ♀ Бирюза × ♂ Северный (G7), ♀ Бирюза × ♂ Antares (G8), ♀ Бирюза × ♂ Нилин (G9), ♀ Нилин × ♂ Северный (G10), ♀ Нилин × ♂ Бирюза (G11), ♀ Нилин × ♂ Antares (G12)



G1> G3> G4> G5> G6> G2> G5> G7> G9> G10> G12> G11; длине соцветия (RS=3,6–13,2): G5> G7> G9> G1> G2> G3> G4> G6> G8> G11> G10> G12; числу коробочек на 1 растении (RS=5,0–11,6): G2> G3> G4> G10> G1> G5> G6> G7> G8> G9> G11> G12; числу семян в 1 коробочке (RS=5,5–12,2): G1> G3> G4> G5> G2> G6> G7> G8> G9> G10> G11> G12; размеру коробочки (RS=4,8–13,6): G2> G3> G4> G5> G6> G1> G7> G8> G10> G9> G12> G11; растрескиваемости коробочки (RS=3,7–13,8): G1> G5> G6> G2> G3> G4> G7> G10> G11> G9> G12> G8.

На основании результатов ранжирования гибридных комбинаций были выделены две группы по изученным показателям (табл. 3). Следует отметить, что из всего представленного набора стабильностью по одному признаку характеризовались 8,3 %, по трем – 25,0 %, по четырем – 33,3 % генотипов. К перспективным для дальнейшего индивидуального отбора можно отнести комбинации G1, G3, G5 (высота растений); G5, G7 (длина соцветия); G2, G3, G4 (число коробочек на 1 растении); G1, G3 (число семян в 1 коробочке); G2, G4 (размер коробочки); G1, G5, G6, (растрескиваемость коробочки).

Информацию по гибридным комбинациям льна масличного обрабатывали методом корреляционного анализа, результаты которого представлены на рис. 2. Были установлены достоверные и недостоверные связи различной силы и направленности.

Прямой положительной связью слабой и средней силы характеризовались признаки длина соцветия, число семян в 1 коробочке и коэффициент регрессии, вариация стабильности ( $r=0,42-0,53$ ). Растрескиваемость коробочки с данными параметрами была сопряжена обратной силой средней степени ( $r=-0,53-$

**Рис. 2.** Результаты корреляционного анализа гибридных комбинаций льна масличного по некоторым признакам, F1–F4 (\* - достоверно  $p<0,05$ )

**Fig. 2.** Results of correlation analysis of hybrid combinations of oil flax according to some characteristics, F1–F4 (\* - reliable  $p<0,05$ )

$0,58$ ,  $p<0,05$ ). Также была выявлена обратная связь между индексом устойчивости и длиной соцветия, числом семян в 1 коробочке ( $r=-0,67-0,61$ ,  $p<0,05$ ), слабая – высотой растений и индексом отбора генотипа ( $r=0,47$ ), показателями ASV и GSI ( $r=0,30$ ).

#### Выводы

В результате проведенных исследований были доказаны достоверные различия ( $p<0,05$ ,  $p<0,01$ ) среди гибридных комбинаций льна масличного по изученным признакам. Выявлен максимальный вклад генотипа (40,0 %) в размер коробочки, среды (47,3 %) в число коробочек на 1 растении, взаимодействия факторов генотипа и среды (48,5 %) в растрескиваемость коробочки.

Согласно экологическому тестингу определены группы отзывчивых на изменчивость условий выращивания (6 шт.) и стабильных (5,0 шт.) гибридных комбинации. Расчет критерия (ASV) позволил выделить 7 ценных популяций. По индексу устойчивости (SI) и индексу отбора генотипа (GSI) – 9,0 шт., гео-

метрическому индексу адаптивности (GAI) – 8,0 шт.

На основании полученной информации о гибридных комбинациях льна масличного для дальнейшего отбора наиболее стабильных генотипов можно рекомендовать показатели ASV, I, GAI, S2di не связанные напрямую, либо имеющие слабую корреляционную сопряженность ( $b$ , GSI) с селекционно-ценными показателями.

По результатам многосторонней оценки гибридных комбинаций к перспективным, сочетающим стабильность с хорошим уровнем проявления морфобиологических признаков, отнесены G1, G2, G3, G5, G6, G7, G11, которые можно использовать в качестве исходного материала для селекции льна масличного в условиях Тюменской области.

#### Источник финансирования

Не указан.

#### Financing source

Not specified.

#### Конфликт интересов

Не заявлен.

#### Conflict of interests

Not declared.

#### Список литературы / References

1. Silska G. Genetic resources of flax (*Linum usitatissimum* L.) as very rich sources of  $\alpha$ -linolenic acid. *Herba Polonica*. 2017;63(4):26-33. DOI 10.1515/hero-2017-0022.
2. Almagro L., Garcia-Perez P., Belchi-Navarro S., Sanchez-Pujante P.J., Pedreno M.A. New strategies for the use of *Linum usitatissimum* cell factories for the production of bioactive compounds. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2016;99:73-78. DOI 10.1016/j.plaphy.2015.12.009.
3. You F.M., Jia G., Cloutier S., Booker H.M., Duguid S.D., Rashid K.Y. A method of estimating broad-sense heritability for quantitative traits in the type 2 modified augmented design. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2016;8(11):257-272. DOI 10.5897/JPBCS2016.0614.
4. Shekhara N.R., Anurag A.P., Prakruthi M., Mahesh M.S. Flax seeds (*Linum usitatissimum* L.): nutritional composition and health benefits. *IP Journal of Nutrition Metabolism and Health Science*. 2020;3(2):35-40. DOI 10.18231/j.ijnmhs.2020.008.
5. Богдан В.З., Королев К.П., Богдан Т.М. Сравнительная оценка параметров экологической стабильности образцов льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) в коллекционном питомнике изучения, различающихся по происхождению // Аграрный вестник Верхневолжья. 2015;4(12):18-21. Bogdan V.Z., Korolev K.P., Bogdan T.M. Comparative assessment of parameters of ecological stability of flax samples (*Linum usitatissimum* L.) in a collection nursery of study, differing in origin. *Agrarian Bulletin of the Upper Volga*. 2015;4(12):18-21 (in Russian).
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;52(3):615-621. DOI 10.15389/agrobiol.2017.3.615rus. Korolev K.P., Bome N.A. Evaluation of flax (*Linum usitatissimum* L.) genotypes on environmental adaptability and stability in the North-Eastern Belarus. *Agricultural Biology*. 2017;52(3):615-621. DOI 10.15389/agrobiol.2017.3.615rus (in Russian).
7. Singh A., Rai P.K., Kumar A., Marker S., Yadav P.K. Study on variability, heritability and correlation coefficient among linseed (*Linum usitatissimum* L.) genotypes. *Pelagia Research Library. Advances in Applied Science Research*. 2015;6(10):14-17.
8. Banjare A.K., Marker S., Verma R.K., Tiwari A. Genetic variability analysis for plant selection in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2019;8:555-558.
9. Kumar A., Sharma N.K., Kumar R., Chandel D., Yadav M.K. Genetic divergence studies in mungbean germplasm under arid environment. *The Pharma Innovation Journal*. 2022;11(2):2415-2417.
10. Ruswandi D., Azizah E., Maulana H., Ariyanti M., Nuraini A., Indriani N.P., Yuwariah Y. Selection of high-yield maize hybrid under different cropping systems based on stability and adaptability parameters. *Open Agriculture*. 2022;7(1):161-170. DOI 10.1515/opag-2022-0073.
11. Renu S., Adriaan W., Kumar R., Richard G.F.V. Genetic variation and correlation studies between micronutrient (Fe and Zn), protein content and yield attributing traits in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Legume Research*. 2016;41(2):167-174. DOI 10.18805/lr.v0i0.7843.
12. Yan W. Analysis and handling of  $G \times E$  in a practical breeding program. *Crop Science*. 2016;56(5):2081-2869. DOI 10.2135/cropsci2015.06.0336.
13. Рогаш А.Р., Дунаева Г.В. К вопросу о методике гибридизации льна // Лен и конопля. 1969;6:32-33. Rogash A.R., Dunaeva G.V. On the method of flax hybridization. *Flax and Hemp*. 1969;6:32-33 (in Russian).
14. Методические указания по изучению коллекции льна (*Linum usitatissimum* L.) / под общ. ред. В.З. Богдана. Устье: РНДУП «Институт льна». 2011:1-12. Methodological guidelines for studying the flax collection (*Linum usitatissimum* L.). Edited by V. Z. Bogdan. Ustye: RNDUP Institute of Flax. 2011; 1-12 (in Russian).
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Альянс. 2014:1-352. Dospekhov B.A. Methodology of field experience with the basics of statistical processing of research results. M.: Alliance. 2014:1-352 (in Russian).
16. Kang M.S. A rank-sum method for selecting high-yielding, stable corn genotypes. *Cereal Research Communication*. 1988;16:113-115.
17. Eberhart S.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6:36-40.
18. Anastasi U., Corinzia S.A., Cosentino S.L., Scordia D. Performances of durum wheat varieties under conventional and no-chemical input management systems in a semiarid Mediterranean environment. *Agronomy*. 2019;9(12):788. DOI 10.3390/agronomy9120788.
19. Banas K., Osiecka A., Lenartowicz T., Lacka A., Bujak H., Przystalski M. Assessment of early, mid-early, and mid-late soybean (*Glycine max*) varieties in Northern Poland. *Agronomy*. 2023;13(12):2879. DOI 10.3390/agronomy13122879.
20. Ahmed M., Morad Kh.A., Attia M.A., Zeinab G. Study the seed and oil yield stability of sunflower hybrids across environments. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*. 2020;13(2):28-42. DOI 10.9734/ajarr/2020/v13i230305.
21. Sandhya Koli N.R., Kumar M. Studies on sustainability index for selecting stable genotypes of linseed (*Linum usitatissimum* L.) in South-Eastern plain zone of Rajasthan. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2019;8(4):249-251.
22. Sreelakshmi Ch., Ramesh Babu P. Sustainability index as an aid for determination of genotypic stability in rice in Southern

- zone of Andhra Pradesh. The Journal of Research Angra. 2019;47(3):59-62.
23. Aghogho C.I., Eleblu S.J.Y., Bakare M.A., Kayondo I.S., Asante I., Parkes E.Y., Kulakow P., Offei S.K., Rabbi I. Genetic variability and genotype by environment interaction of two major cassava processed products in multi-environments. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:974795. DOI 10.3389/fpls.2022.974795.
24. Olivoto T., Lucio A.D. Metan: an R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*. 2020;11(6):783-789. DOI 10.1111/2041-210X.13384.
25. Cargnelutti Filho A., Perecin D., Malheiros E.B., Guadagnin J.P. Comparação de métodos de adaptabilidade e estabilidade relacionados á produtividade de grãos de cultivares de milho. *Bragantia*. 2007;66:571-578. DOI 10.1590/S0006-87052007000400006.
26. Al-Naggar A.M.M., Abd El-Salam R.M., Asran M.R., Yaseen W.Y.S. Yield adaptability and stability of grain sorghum genotypes across different environments in Egypt using AMMI and GGE-biplot models. *Annual Research and Review in Biology*. 2018;23(31):1-16. DOI 0.9734/ARRB/2018/39491.

---

### Информация об авторах

**Константин Петрович Королёв**, канд. с-х. наук, науч. сотр. кафедры ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры; e-мейл: corolev.konstantin2016@yandex.ru; <http://orcid.org/0001-0001-9595-3493>;

**Алина Николаевна Якубенко**, студент бакалавриата кафедры ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры;

**Элина Николаевна Якубенко**, студент бакалавриата кафедры ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры.

### Information about authors

**Konstantin P. Korolev**, Cand. Agric. Sci., Staff Scientist, Departments of Botany, Biotechnology and Landscape Architecture; e-mail: corolev.konstantin2016@yandex.ru; <http://orcid.org/0001-0001-9595-3493>;

**Alina N. Yakubenko**, Undergraduate Student, Department of Botany, Biotechnology and Landscape Architecture;

**Elina N. Yakubenko**, Undergraduate Student, Department of Botany, Biotechnology and Landscape Architecture.

Статья поступила в редакцию 25.07.2024, одобрена после рецензии 07.10.2024, принята к публикации 20.11.2024.