

УДК 633.521:631.52(571.12)

DOI 10.55934/2587-8824-2024-31-5-663-668

ФЕНОТИПИЧЕСКИЙ ТЕСТИНГ *LINUM USITATISSIMUM* L. В УСЛОВИЯХ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО АДАПТИВНЫМ СВОЙСТВАМ

К. П. Королёв, А. Н. Якубенко, Э. Н. Якубенко

В представленной статье отражена диагностика гибридных комбинаций льна-долгунца ($n = 12$) по морфологическим, биологическим и адаптивным параметрам. Исследования проводились в 2020–2022 гг. на опытном полигоне для изучения генетического разнообразия культурных растений в северной лесостепной агроэкологической зоне (Биостанция ТюмГУ «Озеро Кучак», Нижнетавдинский р-н Тюменская область). С использованием дисперсионного анализа (ANOVA) были выявлены достоверные ($p < 0,05$, $p < 0,01$) различия между 12 комбинациями по изучаемым признакам и установлен вклад генотипа (фактор А, 37,8–57,9%) средовых условий (фактор Б, 35,7–62,3%) генотип-средового взаимодействия (фактор А×Б, 26,0–56,9%), доля случайного фактора была незначительной (1,5–8,5%) в формирование тест-показателей объектов изучения. По результатам индивидуального отбора в третьем поколении (F3) выделены раннеспелые ($67,0 \pm 1,33$ – $74,0 \pm 1,88$ суток, $n = 4$), высокорослые ($102,4 \pm 2,19$ – $105,8 \pm 3,02$ см, $n = 4$), с максимальным количеством коробочек ($5,5 \pm 0,35$ – $6,2 \pm 0,15$ шт., $n = 4$) и числа семян в них ($8,8 \pm 0,12$ – $9,3 \pm 0,12$ шт., $n = 7$), содержанием волокна в стебле ($36,9 \pm 1,15$ – $38,1 \pm 0,99$ %, $n = 4$), мыкlostью ($662,2 \pm 1,15$ – $712,4 \pm 2,13$ ед., $n = 3$), сбежистостью ($0,7 \pm 0,08$ – $1,0 \pm 0,12$ ед., $n = 3$), растрескиваемостью коробочки ($3,2 \pm 0,15$ – $4,5 \pm 0,11$ мм) комбинации. Из группы высоко отзывчивых ($b_i < 1$, $S^2 d_i = 0$) генотипов следует отметить G1, G7 по периоду вегетации, G7, G9, G12 – высоте растений, G2, G7, G9, G11 – массе стебля, G1, G7, G8 – массе волокна, G1, G7, G11 – числу коробочек, G7, G9 – числу семян в 1 коробочке, G1, G5, G10 – мыкlostи, G2, G11 – сбежистости. Гибридные комбинации льна-долгунца с высокими показателями стабильных свойств (G1, G3, G9, G10, G11), критериев, определяющих продуктивность растений льна (G1, G2, G4, G7, G8, G9, G11, G12) могут иметь ценность в дальнейшей селекционной работе.

Ключевые слова: лен-долгунец, генотип, факторы среды, гибридные популяции, дисперсионный анализ, стабильность, адаптивность.

Лен – это важное культурное растение многостороннего использования [1–3]. Дальнейшее повышение биологической продуктивности может быть обусловлено не только использованием селекционных методов, но и их высокими адаптивными свойствами в различных условиях выращивания [1, 2, 4]. При этом, как указывает N. Powell et. al. [5], необходим поиск генотипов, обладающих перспективным маркетинговым потенциалом и значимостью для разработки стратегии смягчения негативных последствий изменений климата.

Важным является применение наиболее оптимальных и информативных способов

оценки селекционного материала, особенно на ранних этапах. Для определения стабильности генотипов в разных средах необходимо знать норму реакции генотипа, используя различные модели, отражающие ковариабельность (качество) среды. Разработана методология, обеспечивающая получение ценной информации для прогнозирования ответных реакций растений, которая сочетает гребневую регрессию (BRG), гауссовское распределение случайных факторов, при отсутствии конкретных QTLs [6–8].

На основании различных диагностических подходов были выявлены адаптивные генотипы

культурных растений (бобовых, зерновых, масличных) [9–11], в общей фенотипической изменчивости признаков у некоторых изученных видов установлено достоверное влияние генотип-средовых взаимодействий [13–15], на льне исследования в данном направлении немногочисленны [1–3], что и вызвало необходимость проведения данной работы. **Цель исследования** – выявить различия между генотипами льна, полученные методом межсортовой гибридизации, и выделить наиболее ценные из них для дальнейшей селекционной работы.

Материал и методика проведения исследований

В качестве объектов исследования использованы генотипы льна-долгунца: G1 (♀Ярок × ♂Грант), G2 (♀Ярок × ♂Alizee), G3 (♀Ярок × ♂Betertelsdorf 6884/60), G4 (♀Alizee × ♂Грант), G5 (♀Alizee × ♂Ярок), G6 (♀Alizee × ♂Betertelsdorf 6884/60), G7 (♀Грант × ♂Ярок), G8 (♀Грант × ♂Alizee), G9 (♀Грант × ♂Betertelsdorf 6884/60), G10 (♀Betertelsdorf 6884/60 × ♂Ярок), G11 (♀Betertelsdorf 6884/60 × ♂Ярок), G12 (♀Betertelsdorf 6884/60 × ♂Ярок). Гибридизацию выполняли по схеме 4×4 на Биологической станции ТюмГУ «Озеро Кучак» (Нижегородский р-н, Тюменская обл., 57°21' с.ш. и 66°04' в.д.) по общепринятой методике А.Г. Рогаша и Г.В. Дунаевой [16]. Почва экспериментального участка – дерново-подзолистая, супесчаная с содержанием гумуса 3,6%, (P₂O₅) – 433,3 мг/кг почвы, (K₂O) – 234,0 мг/кг почвы. Генотипы высевали на делянках с шириной 1 м и длиной яруса от 12 до 15 м. Повторность трехкратная. Размещение рандоми-

зированное. Закладку опытов, проведение сопутствующих учетов и наблюдений выполняли по Методическим рекомендациям [17].

Годы проведения полевых исследований (2020–2022 гг.) различались как по среднесуточной температуре, так и по количеству выпавших осадков (ГТК 1,2–1,6). В период прорастания и появления всходов отмечали недостаток влаги (2020 г.), условия, складывающиеся в фазу «елочки», были близки к норме по увлажнению и температуре в 2021-м и 2022 гг., засушливые условия складывались в период цветения в 2020-м и 2021 гг., в «зеленую спелость» растений льна метеосостояния были близки к норме, формирование семян проходило при недостатке влаги и высокой температуре в 2021 г. и при ее избытке в 2022 г. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа (ANOVA) по методике Б.А. Доспехова [18] в программе Statistica 6.0 (Statsoft Inc., США). Достоверность различий между генотипами определяли с помощью t-критерия Стьюдента. Экологические параметры растений диагностировали с использованием одномерного параметрического метода S.A. Eberhart, W.A. Russel [19].

Результаты исследований

Сочетание биологических и статистических исследований способствовало более полному раскрытию основ взаимодействия генотипа со средой и разработке новых диагностических методов. Выявленные случаи положительной специфической адаптации растений в разнообразных средовых условиях могут быть частью разработанной системы отбора [20].

Таблица 1 – Результаты многофакторного дисперсионного анализа количественных признаков у льна-долгунца

Источник варьирования	Степень свободы	Средний квадрат							
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
Общее	27	–	–	–	–	–	–	–	–
Генотип (фактор А)	11	25,68**	31,15**	21,32**	9,85**	21,67**	26,57**	1,05	6,55**
Среда (фактор Б)	2	88,15**	69,55**	102,57**	11,39	55,19*	31,15*	8,12	13,33
Взаимодействие факторов (А×Б)	5	61,14**	88,15**	113,66**	10,15**	88,16**	45,55**	3,04	9,10*
Случайное	10	13,63	21,17	10,04	5,10	11,39	10,87	0,89	1,11

Примечание: *различия достоверны при $p < 0,05$; ** $p < 0,01$. Признаки: период вегетации (А), длина соцветия (Б), высота растений (В), содержание волокна (Г), число коробочек на 1 растении (Д), растрескиваемость коробочки (Е), мыклость (Ж), сбежистость (З).



По данным многофакторного дисперсионного анализа, различия между гибридными комбинациями в 87,5% случаев были достоверны ($p < 0,05$, $p < 0,01$). Доказана значимость влияния средовых условий (62,5%, фактор Б) и взаимодействия генотипа со средой (87,5%, А×Б). (табл. 1).

В общей фенотипической изменчивости вклад генотипа был максимальным в признаки высота растения (37,8–41,1%), число семян

в 1 коробочке (53,6–57,9), среда оказывала влияние на формирование длины периода вегетации (43,5–61,2%), массы стебля (35,7–54,8%), числа коробочек (43,6–62,3%) и их размеров (25,2–49,9%), мыклости (25,2–49,9%), генотип-средовое взаимодействие обуславливало содержание волокна в стебле (35,7–56,9%), растрескиваемости коробочки (26,0–58,2%), сбежистости (32,2–50,0%). (рис. 1).

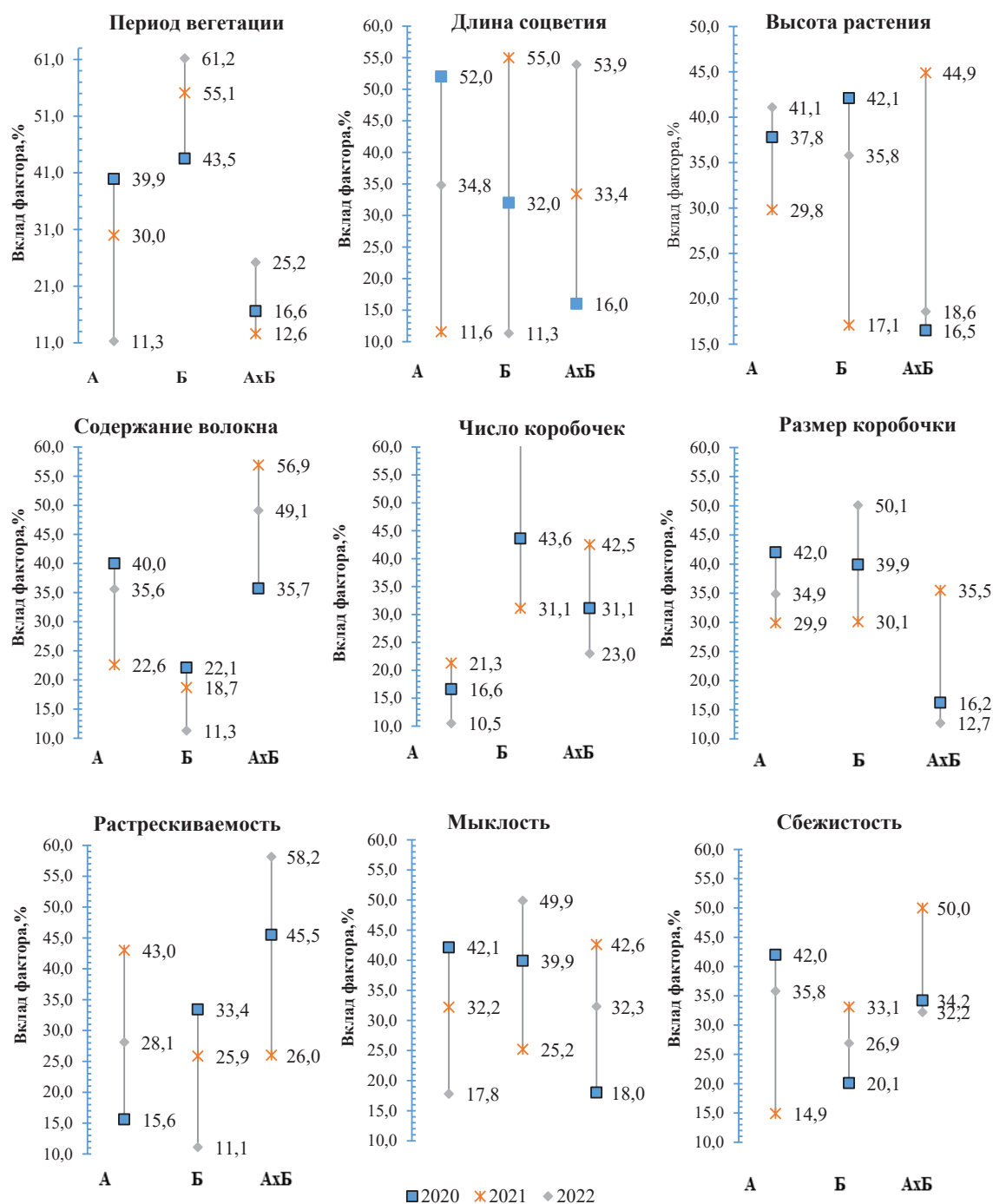


Рис. 1. Вклад факторов в формирование морфо-биологических признаков и свойств у гибридных популяций льна-долгунца, %, биостанция ТюмГУ «Озеро Кучак»

Сложное генотип-средовое взаимодействие не всегда позволяет достаточно полно оценить потенциал исходного материала, выявить адаптивные сорта с максимальным уровнем реализации признака в конкретной среде выращивания. Например, высокая достоверная значимость ($p < 0,01$) дисперсий генотипа, среды и их взаимодействий при комбинированном анализе льна в 18 средах Эфиопии указывает на дифференциальность реакций генотипов и необходимость анализа их стабильности [4].

Полученные комбинации были обработаны методом, предложенным Eberhart, Russell, согласно которому оценочные критерии (коэффициент регрессии, b_i и среднее квадратичное отклонение, S^2d_i) используются для оценки адаптивных и стабильных параметров растений. Для выявления «идеального» сорта, наряду с высоким уровнем признака он должен иметь коэффициент регрессии равный или близкий к 1, а отклонения от регрессии, не отличающиеся от 0 [19]. Были выделены три группы генотипов по отзывчивости на изменение условий выращивания. К первой, отзывчивым ($b_i < 1$, $S^2d_i = 0$) было отнесено 75,0% по периоду вегетации, сбежистости, массе волокна; 66,6% – высоте растений, числу коробочек и числу семян в 1 коробочке; 58,3% – мыклости; 50,0% – массе стебля; 41,6% – содержанию волокна.

В группу стабильных ($b_i = 1,0$, $S^2d_i = 0$) вошло 16,6% по высоте растений и сбежистости, 8,3% – содержанию волокна. Слабой отзывчивостью ($b_i > 1$, $S^2d_i = 0$) по мыклости характеризовалось 58,3%; массе стебля и числу семян в 1 коробочке – 50,0%; содержанию волокна и числу коробочек – 41,6%; высоте растений – 33,3%; периоду вегетации 25,0% и массе волокна – 25,0%; сбежистости – 16,6% (табл. 2).

Оценка фенотипических признаков в нескольких средах может способствовать выбору дальнейшей тактики использования конкретного генотипа, т. к. известно, что модель нормы реакции, взаимодействия генотипа со средой являются функцией многомерных наборов различных маркеров и ковариантной среды [6–8].

Выводы

1. На основании проведенных исследований достоверно ($p < 0,05$; 0,01) установлено влияние генотипа, средовых условий и взаимодействия генотипа с окружающей средой. Наибольший вклад генотипа отмечен по всем признакам (исключение мыклость), средовые условия оказывали воздействие на период вегетации, высоту растений, длину соцветия, число коробочек и их растрескиваемость, генотип-средовое взаимодействие обуславливало формирование всех показателей (исключение мыклость).

Таблица 2 – Распределение гибридных комбинаций льна по отзывчивости на изменчивость условий выращивания, среднее, 2020–2022 гг.

Признаки	Отзывчивые $b_i < 1$, $S^2d_i = 0$	Стабильные $b_i = 1,0$, $S^2d_i = 0$	Неотзывчивые $b_i > 1$, $S^2d_i = 0$
Период вегетации	G1, G2, G3, G4, G7, G8, G10, G11, G12	–	G5, G6, G9
Высота растений	G3, G4, G5, G7, G9, G12	G10, G11	G1, G2, G6, G8
Масса стебля	G2, G4, G6, G7, G9, G11	–	G1, G3, G5, G8, G10, G12
Масса волокна	G1, G3, G4, G5, G6, G7, G8, G10, G12	–	G2, G9, G11
Содержание волокна	G2, G3, G5, G7, G9	G1	G4, G6, G8, G10, G12
Число коробочек	G1, G2, G3, G4, G7, G8, G10, G12	–	G1, G5, G6, G9, G11
Число семян в 1 коробочке	G2, G4, G6, G9, G11, G12	–	G1, G3, G5, G7, G8, G10
Размер коробочки	G5, G6, G11	–	G1, G2, G3, G4, G7, G8, G9, G10, G12
Мыклость	G1, G4, G5, G6, G10, G11, G12	–	G1, G2, G3, G7, G8, G9, G10
Сбежистость	G1, G2, G4, G5, G6, G7, G10, G11, G12	G3, G9	G8, G9



2. К отзывчивым генотипам по периоду вегетации было отнесено 9 комбинаций, по высоте растений – 8 шт., по массе стебля – 6 шт., по массе волокна – 9 шт., содержанию волокна – 7 шт., по числу коробочек – 9 шт., числу семян в 1 коробочке – 6 шт., по мыклости и сбежистости – 7 шт. В группу стабильных вошли 5 комбинаций по признакам высоты растений, содержанию волокна, сбежистости. Остальные генотипы были отнесены к слабоотзывчивым.

3. К гибридным комбинациям, имеющим практическую ценность для дальнейшего индивидуального отбора, можно отнести комбинации ♀Ярок × ♂Грант (G1), ♀Ярок × ♂Alizee (G2), ♀Alizee × ♂Грант (G4), ♀Грант × ♂Ярок (G7), ♀Грант × ♂Alizee (G8), ♀Грант × ♂Beterfeldsdorf 6884/60 (G9), ♀Beterfeldsdorf 6884/60 × ♂Ярок (G11), ♀Beterfeldsdorf 6884/60 × ♂Ярок (G12). Перспективными комбинациям, сочетающие проявление высокого содержания волокна и стабильности являются ♀Ярок × ♂Грант (G1), мыклости и сбежистости ♀Beterfeldsdorf 6884/60 × ♂Ярок (G11), ♀Грант × ♂Beterfeldsdorf 6884/60 (G9).

Список литературы

1. Полонецкая, Л. М. Потенциал генетической изменчивости у сортов масличного льна (*Linum usitatissimum* L.) / Л. М. Полонецкая // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2004. – № 1. С. 58–63.
2. Королёв, К. П. Оценка генотипов льна-долгунца (*Linum usitatissimum* L.) по экологической адаптивности и стабильности в условиях северо-восточной части Беларуси / К. П. Королёв // Сельскохозяйственная биология. – 2017. – Т. 52. – № 3. – С. 615–621. – DOI 10.15389/agrobiology.2017.3.615rus.
3. Скрининг сортообразцов льна-долгунца коллекции ВИР по урожайности льноволокна и параметрам адаптивности в условиях Северо-Западного региона / А. Д. Степин, М. Н. Рысев, Т. А. Рысева [и др.] // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2020. – № 21(2). – 141–15. – DOI 10.30766/2072-9081.2020.21.2.141-151.
4. Adugna, W. Parametric and nonparametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.) / W. Adugna, M. Labuschagne // Euphytica. – 2003. – № 129. – P. 211–218. – DOI 10.1023/A:1021979303319.
5. Yield stability for cereals in a changing climate / N. Powell, X. Ji, R. Ravash [et al.] // Functional Plant Biology. – 2012. – № 39(7). – 539–552. – DOI 10.1071/FP12078.
6. Linkage disequilibrium mapping of yield and yield stability in modern spring barley cultivars / A. T. W. Kraakman, R. E. Niks, P. M. M. [et al.] // Genetics. – 2004. – № 168(1). – P. 435–446. – DOI 10.1534/genetics.104.026831.
7. Distinct genetic architectures for phenotype means and plasticities in *Zea mays* / A. Kusmec, S. Srinivasan, D. Nettleton, P. S. Schnable // Nature Plants. – 2017. – № 3(9). – P. 715–723. – DOI 10.1038/s41477-017-0007-7.
8. Genetic architecture of phenotypic means and plasticities of kernel size and weight in maize / C. Li, X. Li, Wu, Y. Shi [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. – 2019. – № 132(12). – P. 3309–3320. – DOI 10.1007/s00122-019-03426-w.
9. Unraveling complex traits in wheat: approaches for analyzing genotype × environment interactions in a multi-environment study of falling numbers / S. M. Sjöberg, A. H. Carter, C. M. Steber, K. A. Garland-Campbell // Crop Science. – 2020. – № 60(6). – P. 3013–3026. – DOI 10.1002/csc2.20133.
10. Mohebodini, M. Stability of performance in lentil (*Lens culinaris* Medic.) Genotypes in Iran / M. Mohebodini, H. Dehghani, S. H. Sabaghpour // Euphytica. – 2006. – № 149. – P. 343–352. – DOI 10.1007/s10681-006-9086-7.
11. Evaluation of potato tubers of Nevsky variety and selection hybrids by amino acid composition / A. A. Mushinskiy, E. V. Aminova, L. S. Fedotova, T. T. Dergileva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 624(1). – 012155. – DOI 10.1088/1755-1315/624/1/012155.
12. Abdulahi, A. Stability analysis of seed yield in safflower genotypes in Iran / A. Abdulahi // Acta Agronomica Hungarica. – 2009. – № 57(2). – P. 189–195. – DOI 10.1556/AAgr.57.2009.2.10.
13. Abdulhamid, M. Genetic variability, correlation and path analyses for yield and yield components of some bread wheat genotypes / M. Abdulhamid, N. Qabil, F. El-Saadony // Journal of Plant Production. – 2017. – № 8. – P. 845–852. – DOI 10.21608/JPP.2017.40877.
14. Analysis of genotype × environment interactions for agronomic traits of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) using association mapping / R. Rani, G. Raza, H. Ashfaq [et al.] // Frontiers in Genetics. – 2023. – P. 13. – DOI 10.3389/fgene.2022.1090994.
15. Genotype × environment interaction and selection of maize (*Zea mays* L.) hybrids across

moisture regimes / A. Singamsetti, J. P. Shahi, P. H. Zaidi [et al.] // *Field Crops Research*. – 2021. – № 270. – 108224. – DOI 10.1016/j.fcr.2021.108224.

16. Рогаш, А. Р. К вопросу о методике гибридизации льна / А. Р. Рогаш, Г. В. Дунаева // *Лен и конопля*. – 1969. – № 6. – С. 32–33.

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

18. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки

результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – Москва : Альянс. – 2014. – 351 с.

19. Eberhart, S. A. Stability parameters for comparing varieties / S. A. Eberhart, W. A. Russel // *Crop Science*. – 1966. – № 6. – P. 36–40. – DOI 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x.

20. Basford, K. E. Genotype x environmental interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia / K. E. Basford, M. Cooper // *Australian Journal Agricultural Research*. – 1998. – № 49(2). – 153–174. DOI 10.1071/A97035.

Королёв Константин Петрович, канд. с.-х. наук, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

E-mail: korolevkonstantin799@gmail.com.

Якубенко Алина Николаевна, студент бакалавриата, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

Якубенко Элина Николаевна, студент бакалавриата, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет».

* * *