Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 47–56
Agrarian Scientific Journal. 2025;(11):47–56

АГРОНОМИЯ
4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений

Научная статья
УДК 631.234:633.111/633.19
https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp47-56

Оценка популяций F2 озимой пшеницы и тритикале по морфологическим признакам побега и элементам продуктивности колоса в условиях фитотронно-тепличного комплекса

Оксана Викторовна Ткаченко, Анна Анатольевна Беляева, Наталья Викторовна Степанова, Екатерина Евгеньевна Костина, Алена Юрьевна Денисова
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия
e-mail: oktkachenko@yandex.ru

Аннотация: Использование вегетационных помещений, в том числе фитотронно-тепличных комплексов, позволяет ускорить селекцию за счет большего количества поколений, получаемых за год, но неизбежно накладывает ограничения по количеству одновременно выращиваемых растений. Численность растений в популяции F2 оказывает решающее влияние на широту выявляемых рекомбинаций и эффективность отбора комбинаций генов, формирующих ценные фенотипы. Целью данного исследования является оценка эффективного размера популяции F2 озимых злаковых культур (пшеницы мягкой и тритикале) для обеспечения необходимого уровня разнообразия гибридов на основе оценки варьирования фенотипических признаков у растений: длина побега, общая и продуктивная кустистость, длина колоса, количество колосков в колосе, количество зерен с главного колоса и растения, масса зерна с колоса и растения, масса 1000 зерен. Изучали 3 популяции F2 озимой мягкой пшеницы и 5 популяций F2 озимой тритикале. Растения F2 были получены в культуре *in vitro* из незрелых зародышей, вычлененных из зерновок и помещенных на питательную среду, затем яровизированных и высаженных в гидропонную установку. После окончания вегетации растения оценивали по комплексу фенотипических признаков и элементов структуры продуктивности. Данные подвергали дисперсионному анализу и ранжированию по тесту Тьюки, а также вычисляли коэффициенты вариации Cv и оценивали зависимость Cv от количества анализируемых растений (Cv/*n*). Проведенное исследование показало, что, несмотря на высокие значения стандартных отклонений, гибридные популяции достоверно различались по ряду признаков. Для поддержания необходимого уровня варьирования признаков в гибридной популяции F2 озимой мягкой пшеницы и тритикале в случае проведения фенотипической оценки морфологических признаков побега и продуктивности колоса требуется в среднем не менее 25 растений. Достаточным объемом выборки следует считать 50 растений. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы при планировании селекционного процесса у озимых злаковых культур с использованием фитотронно-тепличных условий.

Ключевые слова: пшеница мягкая озимая, тритикале озимая, фитотронно-тепличный комплекс, гибридная популяция, селекция

Для цитирования: Ткаченко О. В., Беляева А. А., Степанова Н. В., Костина Е. Е., Денисова А. Ю. Оценка популяций F2 озимой пшеницы и тритикале по морфологическим признакам побега и элементам продуктивности колоса в условиях фитотронно-тепличного комплекса // Аграрный научный журнал. 2025. № 11. С. 47–56. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp47-56.

AGRONOMY

Original article

Evaluation of F2 populations of winter wheat and triticale by morphological characteristics of shoots and elements of ear productivity in conditions of a phytotron-greenhouse complex

Oksana V. Tkachenko, Anna A. Belyaeva, Natalya V. Stepanova, Ekaterina E. Kostina, Alena Yu. Denisova
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: oktkachenko@yandex.ru

Abstract: The use of vegetation rooms, including phytotron-greenhouse complexes, allows accelerating selection due to a greater number of generations obtained per year, but inevitably imposes restrictions on the

number of simultaneously grown plants. The number of plants in the F2 population has a decisive impact on the breadth of recombination and the efficiency of selection of gene combinations that form valuable phenotypes. The objective of this study is to estimate the effective size of the F2 population of winter cereal crops (soft wheat and triticale) to ensure the required level of hybrid diversity based on the assessment of variation in phenotypic traits in plants: shoot length, total and productive tilling capacity, ear length, number of spikelets in an ear, number of grains from the main ear and plant, grain weight from an ear and plant, weight of 1000 grains. Three F2 populations of winter wheat and five F2 populations of winter triticale were studied. F2 plants were obtained *in vitro* from immature embryos isolated from caryopses and placed on a nutrient medium, then vernalized and planted in a hydroponic unit. After the end of the growing season, the plants were assessed by a set of phenotypic traits and productivity structure elements. The data were subjected to dispersion analysis and ranking by the Tukey test, and the coefficients of variation Cv were calculated, then the dependence of Cv on the number of analyzed plants (Cv/*n*) was estimated. The study showed that, despite the high values of standard deviations, the hybrid populations differed significantly in some traits. To maintain the required level of trait variation in the F2 hybrid population of winter wheat and triticale in the case of phenotypic assessment of morphological characteristics of the shoot and productivity of the ear, an average of at least 25 plants is required. 50 plants should be considered a sufficient sample size. The results obtained will be further used in planning the selection process for winter grain crops using phytotron-greenhouse conditions.

Keywords: soft winter wheat, winter triticale, phytotron-greenhouse complex, hybrid population, selection

For citation: Tkachenko O. V., Belyaeva A. A., Stepanova N. V., Kostina E. E., Denisova A. Yu. Evaluation of F2 populations of winter wheat and triticale by morphological characteristics of shoots and elements of ear productivity in conditions of a phytotron-greenhouse complex. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(11):47–56. https://doi.org/10.28983/asj.y2025i11pp47-56.

***Введение*:** Селекция новых сортов растений обеспечивает развитие и рентабельность отрасли растениеводства. Постоянно меняющиеся климатические условия и конъюнктура рынка требуют ускорения селекционного процесса. Несмотря на развитие новых революционных направлений селекции, таких как генетическая инженерия и геномное редактирование, эффективность селекции по-прежнему в первую очередь зависит от генетического потенциала родительских пар, вовлеченных в скрещивание, и рекомбинации генов, приводящей к появлению ценных фенотипов. Отбор перспективных комбинаций на уровне фенотипа или с помощью маркер-опосредованных и геномных методов селекции возможен только в популяциях с достаточным уровнем гетерогенности. Необходимость сокращения селекционного процесса требует провести оценоки в самых ранних звеньях, начиная с популяции F2.

Численность растений в популяции F2 оказывает решающее влияние на широту рекомбинации и эффективность отбора комбинаций генов, формирующих ценные фенотипы. Уменьшение количества растений в популяции F2 может существенно повлиять на снижение генетического разнообразия, что уменьшает вероятность проявления признаков и снижает общую адаптивность получаемых генотипов. Небольшие популяции F2 демонстрируют меньшую генетическую изменчивость из-за ограниченного количества комбинаций аллелей, что может сократить диапазон фенотипических признаков, выраженных в гибридах [6]. Признаки с высокой наследуемостью могут проявлять изменчивость, но вероятность общей фенотипической изменчивости при этом снижается [8]. При изучении межвидовых гибридов небольшие популяции могут давать меньше ценных генотипов, что влияет на результаты селекции и потенциальные возможности получения генетически ценных линий [10]. И наоборот, хотя небольшие популяции могут ограничивать генетическое разнообразие, они также могут облегчить отбор определенных признаков, что может привести к созданию генотипов с желаемыми характеристиками.

Эта двойственность подчеркивает сложность стратегий селекции в зависимости от размера популяции. В то время как большие размеры выборки повышают надежность обнаружения генетических вариаций, практические ограничения, такие как доступность ресурсов и цели селекции, могут потребовать сокращения популяций. Таким образом, необходимо соблюдать баланс между размером выборки в гибридной популяции и эффективностью использования ресурсов, что остается важнейшим фактором успеха селекционных программ.

Одним из направлений повышения эффективности и скорости создания сортов является сокращение продолжительности и увеличение количества поколений выращивания растений с использованием фитотронно-тепличных комплексов. Технология спидбридинга (англ. speed breeding) позволяет быстрее получать гомозиготные линии из расщепляющихся популяций

и проводить отбор по ряду важных признаков [5]. При этом использование закрытых сооружений неизбежно накладывает ограничения по количеству одновременно выращиваемых растений. Для озимых злаков проблема усиливается в связи с необходимостью проведения яровизации в специализированных условиях климатических камер [1] или с применением метода яровизации *in vitro* [3, 4].

Целью данного исследования является определение эффективного размера популяции F2 озимых злаковых культур (пшеницы мягкой и тритикале) для обеспечения необходимого уровня разнообразия гибридов на основе оценки варьирования фенотипических признаков растений, влияющих на элементы продуктивности колоса.

Материалы и методы. Исследования проводили на базе фитотронно-тепличного комплекса ФГБОУ ВО Вавиловский университет (г. Саратов). Изучали 3 популяции F2 озимой мягкой пшеницы и 5 популяций F2 озимой тритикале (таблица 1).

Таблица 1 – Изучаемые гибридные комбинации F2 озимой мягкой пшеницы и тритикале

Table 1 – Studied F2 hybrid combinations of winter soft wheat and triticale

№ популяции	Гибридная комбинация	Количество растений, шт.
Пшеница мягкая озимая (*Triticum aestivum* L.)		
19	Новоершовская × Московская 40	112
20	Губернатор Дона × Московская 40	99
21	Скипетр × Московская 40	97
Тритикале озимая (× *Triticosecale* Wittm. ex A. Camus)		
13	Зубр × Валентин 90	54
14	Л14 × Валентин 90	76
15	Л11 × Валентин 90	103
17	Л16 × Георг	49
18	Л61 × Георг	11

Характеристика исходных родительских сортов и линий, полученных при выращивании в фитотронно-тепличном комплексе в аналогичных условиях, приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Морфологические признаки побега и элементы продуктивности родительских форм

Table 2 – Morphological features of the shoot and productivity elements of parental forms

Сорт, линия	Длина побега, см	Общая кустистость, шт.	Продуктивная кустистость, шт.	Длина колоса, см	Количество колосков в колосе, шт.	Количество зерен с главного колоса, шт.	Количество зерен с растения, шт.	Масса зерна с колоса, г	Масса зерна с растения, г	Масса 1000 зерен, г
Пшеница мягкая озимая (*Triticum aestivum* L.)										
Новоершовская	73,8	5,0	3,8	7,1	16,3	23,8	89,4	1,2	4,7	50,4
Губернатор Дона	54,1	7,4	5,3	7,0	15,2	29,1	146,2	1,2	5,4	41,2
Московская 40	91,8	6,2	5,8	11,8	20,3	26,4	152,1	1,2	7,3	46,2
Скипетр	74,3	4,5	3,5	9,9	19,2	41,7	143,9	1,8	6,6	43,2
Тритикале озимая (×*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus)										
Зубр	112,6	11,0	4,2	9,8	25,8	40,0	165,9	0,8	3,4	20,0
Валентин 90	87,7	4,9	3,0	10,8	26,8	48,9	148,6	2,6	8,3	53,2
Георг	78,4	6,4	3,0	10,2	27,1	33,0	100,2	0,9	6,3	27,3

Окончание таблицы 1

Сорт, линия	Длина побега, см	Общая кустистость, шт.	Продуктивная кустистость, шт.	Длина колоса, см	Количество колосков в колосе, шт.	Количество зерен с главного колоса, шт.	Количество зерен с растения, шт.	Масса зерна с колоса, г	Масса зерна с растения, г	Масса 1000 зерен, г
Л11	86,7	6,7	3,0	10,0	29,3	61,8	176,8	2,6	6,8	42,0
Л14	96,5	5,5	2,8	10,3	25,0	59,0	163,8	2,5	8,5	42,4
Л16	89,4	7,0	2,6	10,1	26,2	48,0	125,0	1,6	6,0	33,3
Л61	116,6	5,0	3,9	8,6	23,7	63,1	223,5	1,8	6,8	28,5

Растения F2 были получены в культуре *in vitro* из незрелых зародышей, вычлененных из зерновок, полученных в результате самоопыления растений F1, на 18-е сутки после начала цветения и помещенных на питательную среду Мурасиге-Скуга без гормонов. Нормально сформированные растения в пробирках яровизировали при температуре 4 °С в течение 60 суток и высаживали во второй декаде февраля в кубики из минеральной ваты для выращивания в гидропонной установке капельного типа. Поддерживали следующие условия выращивания растений: температура 20–25 °С; комбинированное освещение продолжительностью 22 ч/сут – естественное, дополненное светодиодными светильниками ECOLED-BIO-195W-D120 F-MATRIX (ROSE) с суммарным фотосинтетическим фотонным потоком $F_{фар}$ 315 мкмоль/с; питательный раствор оригинального состава, содержащий необходимый набор макро- и микроэлементов.

В процессе вегетации и при достижении полной спелости растения оценивали по комплексу фенотипических признаков, включающих морфометрические характеристики побегов и колосьев и элементы структуры продуктивности: длина побега, см; общая и продуктивная кустистость, шт.; длина колоса, см; количество колосков в колосе, шт.; количество зерен с главного колоса, шт., и растения, шт.; масса зерна с колоса, г, и растения, г; масса 1000 зерен, г.

Полученные данные подвергали дисперсионному анализу и ранжированию по тесту Тьюки ($P \leq 0,05$) в программе STATISTICA 10 (StatSoft, США). Для оценки варьирования признаков в популяциях вычисляли коэффициенты вариации Cv. Для трех гибридных популяций пшеницы и двух тритикале (более 75 растений) также оценивали зависимость Cv от количества анализируемых растений (Cv/*n*), для чего искусственно отбирали данные из общей популяции методом случайных чисел при помощи [2].

Результаты исследования. Сравнение трех популяций F2 мягкой пшеницы показало, что, несмотря на высокие значения стандартных отклонений, они достоверно отличались по некоторым морфометрическим признакам, а именно по длине побегов и колосьев, а также по общей кустистости (таблица 3) и по большинству признаков, относящихся к элементам структуры продуктивности, кроме массы зерна с 1 растения (таблица 4). Каждая из популяций пшеницы включала около 100 растений, коэффициенты вариаций по большинству признаков оказались выше 30 % (таблицы 3, 4), что означает наличие очень высокой вариабельности у растений по изучаемым признакам. Меньшую величину Cv отмечали для признаков «длина колоса» и «количество колосков в колосе» (см. таблицу 3), а увеличение варьирования наблюдали по признакам элементов структуры продуктивности (см. таблицу 4). Оценка относительной зависимости коэффициентов варьирования для всех признаков от количества особей при случайном выборе данных показала резкий рост показателя при снижении значения *n* с 50 до 25 особей (см. рисунки 1, 2).

У тритикале проводили сравнение 5 популяций с численностью от 50 до 100 растений каждая, кроме малочисленной популяции гибрида № 18 (см. таблицу 1). Популяции достоверно различались по признакам общей и продуктивной кустистости и длины колосьев (таблица 5), а также по всем признакам элементов структуры продуктивности, за исключением массы 1000 зерен (таблица 6). Коэффициенты вариации по всем признакам были высокие, но по признакам кустистости и элементам структуры продуктивности значительно выше, чем по морфометрическим признакам побегов. Несмотря на меньший размер выборок у тритикале по сравнению с пшеницей, установили аналогичные закономерности роста отношения коэффициента вариации с уменьшением числа особей (рисунки 3, 4).

Таблица 3 – Морфологические признаки у растений в популяциях F2 озимой мягкой пшеницы

Table 3 – Morphological characteristics of plants in F2 populations of winter soft wheat

№ популяции	Длина побега, см			Общая кустистость, шт.			Продуктивная кустистость, шт.			Длина колоса, см			Количество колосков в колосе, шт.		
	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv
19	63,9±18,0 *b*	25–89	28,2	6,0±1,9 *ab*	3–13	31,6	4,7±1,6	2–10	33,9	8,0±1,8 *a*	2–17	22,3	17,8±3,2	11–32	17,9
20	58,0±19,2 *a*	30–83	33,0	6,4±1,8 *b*	3–13	27,8	4,8±1,7	1–11	35,5	8,2±2,0 *a*	5–19	24,6	18,2±3,7	1–28	20,6
20	69,6±20,3 *c*	32–87	29,1	5,7±2,0 *a*	2–12	35,9	4,5±2,0	1–13	43,1	9,0±1,7 *b*	4–14	18,9	18,5±5,0	8–38	27,0

Примечание: здесь и далее в таблицах 3–5 гибридные популяции обозначены номерами в соответствии с таблицей 1; $\bar{x} \pm \sigma$ – средние значения признаков ± стандартные отклонения; $x_{min} - x_{max}$ – минимальные и максимальные значения признака; Cv – коэффициент вариации; буквами *a*, *b* и *c* обозначено ранжирование средних значений по тесту Тьюки, отсутствие ранжирования указывает на отсутствие достоверных различий между вариантами.

Таблица 4 – Элементы структуры продуктивности у растений в популяциях F2 озимой мягкой пшеницы

Table 4 – Elements of productivity structure of plants in F2 populations of winter soft wheat

№ популяции	Количество зерен с главного колоса, шт.			Количество зерен с растения, шт.			Масса зерна с колоса, г			Масса зерна с растения, г			Масса 1000 зерен, г		
	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv
19	24,1±8,3 *a*	1–44	34,4	65,1±30,7 *a*	11–156	47,1	0,6±0,4 *b*	0,1–2,0	62,1	1,7±0,8	0,2–4,0	48,3	27,1±10,2 *b*	2,6–85,2	37,6
20	27,4±12,1 *b*	3–72	44,3	78,6±39,9 *b*	2–183	50,7	0,6±0,9 *ab*	0,4–1,9	145,2	0,4±0,9	0,1–3,8	217,2	25,4±9,9 *ab*	6,6–66,7	38,9
20	26,4±9,1 *ab*	3–56	34,7	84,3±43,9 *b*	18–245	52,0	0,5±0,3 *a*	0,1–1,4	57,9	1,9±2,2	0,1–2,2	117,5	22,5±17,5 *a*	1,0–80,3	77,7

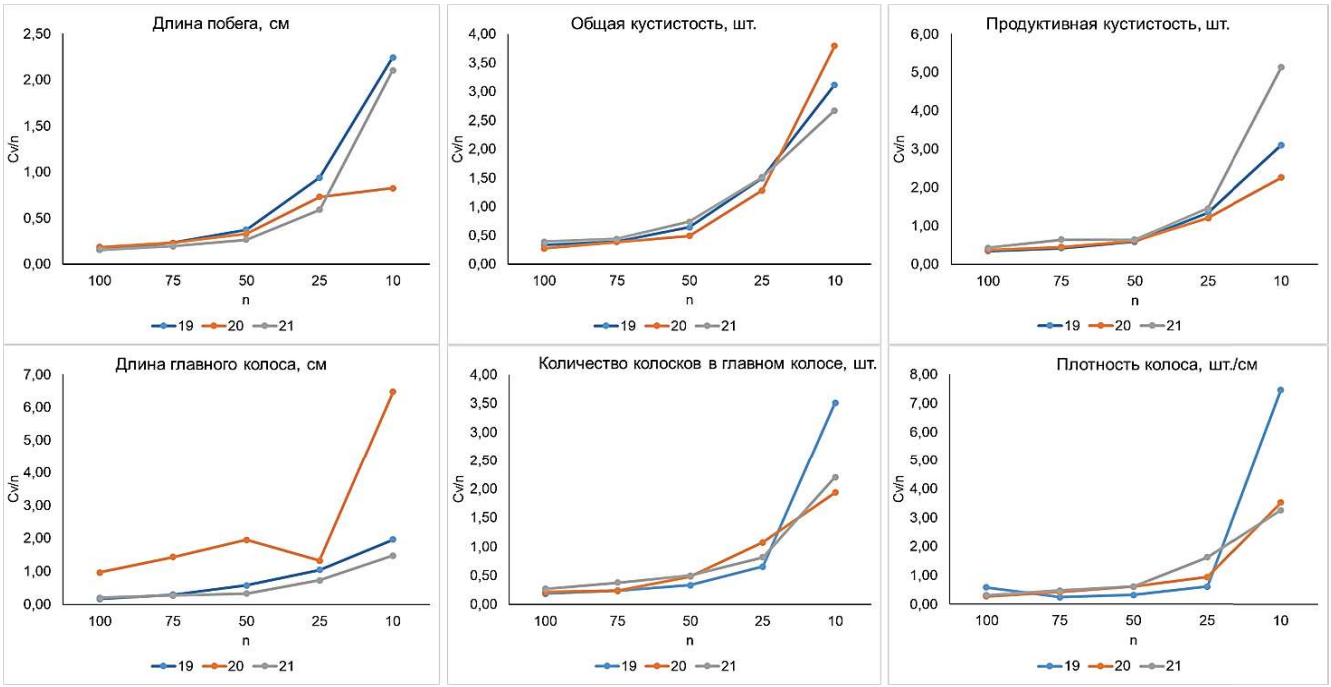

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента вариации Cv от количества растений n в выборке Cv/n по морфологическим признакам растений в популяциях F2 озимой мягкой пшеницы (здесь и далее популяции обозначены номерами в соответствии с таблицей 1)

Figure 1 – Dependence of the variation coefficient Cv on the number of plants n in the sample Cv/n for morphological characteristics of plants in F2 populations of winter soft wheat (hereinafter, populations are designated by numbers in accordance with Table 1)

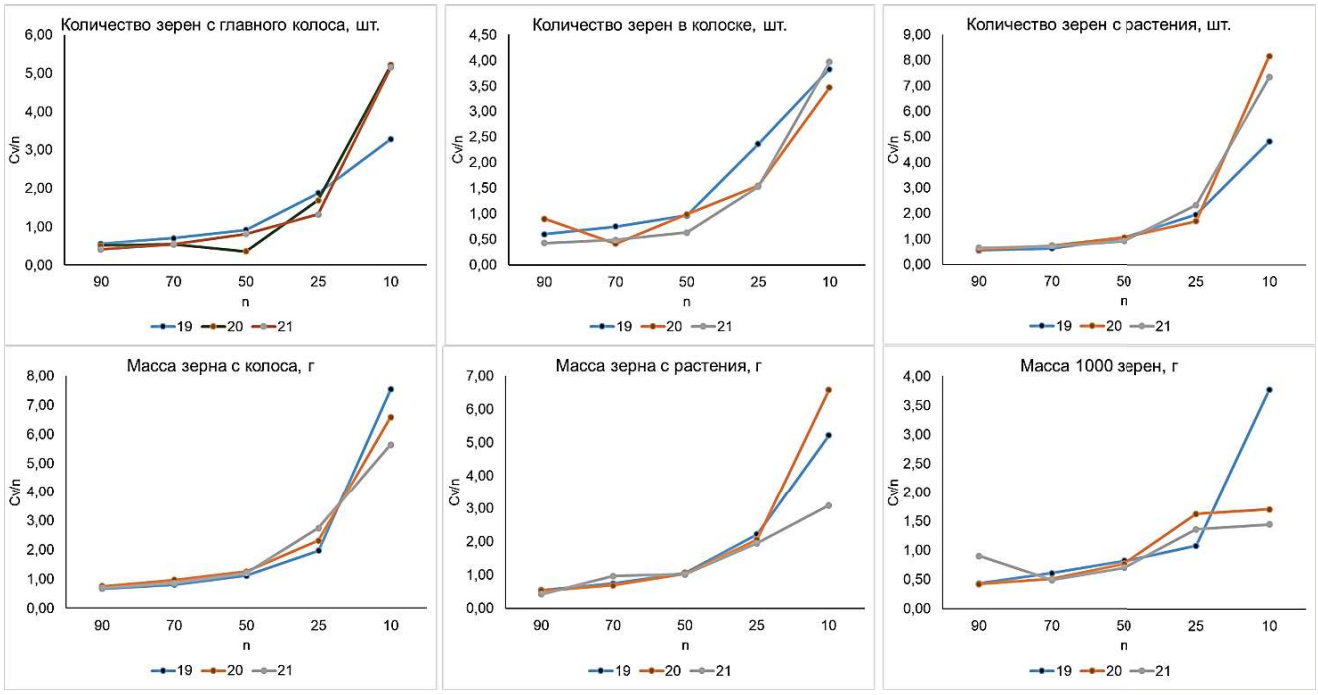

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента вариации Cv от количества растений n в выборке Cv/n по элементам структуры продуктивности растений в популяциях F2 озимой мягкой пшеницы

Figure 2 – Dependence of the variation coefficient (Cv) on the number of plants n in the sample Cv/n for elements of the plant productivity structure in F2 populations of winter soft wheat

Таблица 5 – Морфологические признаки у растений в популяциях F2 озимой тритикале

Table 5 – Morphological characteristics of plants in F2 populations of winter triticale

№ популяции	Длина побега, см			Общая кустистость, шт.			Продуктивная кустистость, шт.			Длина колоса, см			Количество колосков в колосе, шт.		
	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv
13	76,1±18,0	24–114	23,6	4,4±2,1ab	1–11	47,4	2,8±1,3a	1–6	47,9	8,9±1,6ab	5–12	17,9	21,1±3,9	11–30	18,4
14	75,7±19,2	35–120	25,3	5,4±2,1b	2–13	38,1	2,9±1,2a	1–6	42,4	9,8±2,4b	1–16	24,7	21,2±5,7	8–32	26,7
15	72,5±20,3	20–135	28,0	5,3±2,4b	1–14	45,8	3,7±2,1b	1–11	56,7	8,9±2,1a	3–15	23,6	20,4±5,0	6–34	24,5
17	74,9±11,1	47–101	14,8	4,1±2,2a	2–13	54,0	2,5±1,4a	1–7	58,7	8,3±1,9a	4–12	22,6	19,8±5,8	7–32	29,4
18	67,7±15,6	44–91	23,1	2,8±1,3a	1–5	44,3	1,7±0,9a	1–4	52,6	9,8±1,4ab	7–12	14,7	20,6±4,1	15–29	19,9

Таблица 6 – Элементы структуры продуктивности у растений в популяциях F2 озимой тритикале

Table 6 – Elements of productivity structure of plants in F2 populations of winter triticale

№ популяции	Количество зерен с главного колоса, шт.			Количество зерен с растения, шт.			Масса зерна с колоса, г			Масса зерна с растения, г			Масса 1000 зерен, г		
	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv	$\bar{x} \pm \sigma$	$x_{min} - x_{max}$	Cv
13	11,8±11,4a	0–36	96,5	25,9±23,5a	2–106	90,7	0,3±0,3a	0–1,4	111,1	0,6±0,5ab	0–2,4	92,6	29,3±55,0	5,3–86,0	187,6
14	19,6±12,5ab	2–36	63,6	50,6±36,2b	2–136	71,5	0,5±0,3ab	0,1–0,9	65,5	5,1±8,9b	0,1–30,0	173,6	24,2±11,9	8,7–43,8	49,1
15	21,5±14,2b	2–59	66,4	47,0±38,0ab	3–180	80,8	0,6±0,5b	0–2,2	78,8	1,5±1,4ab	0,1–6,7	94,2	28,8±17,1	0–129,4	59,5
17	23,1±13,3b	3–53	57,6	48,8±41,0ab	3–184	84,0	0,6±0,5b	0,1–2,0	73,4	1,4±1,3ab	0,1–5,7	94,4	29,7±15,3	6,9–100,0	51,4
18	17,0±2,8ab	15–19	16,6	17,0±2,8a	15–19	16,6	0,4±0,2ab	0,2–0,6	66,0	0,4±0,2a	0,2–0,6	66,0	21,1±11,0	13,3–28,9	52,2

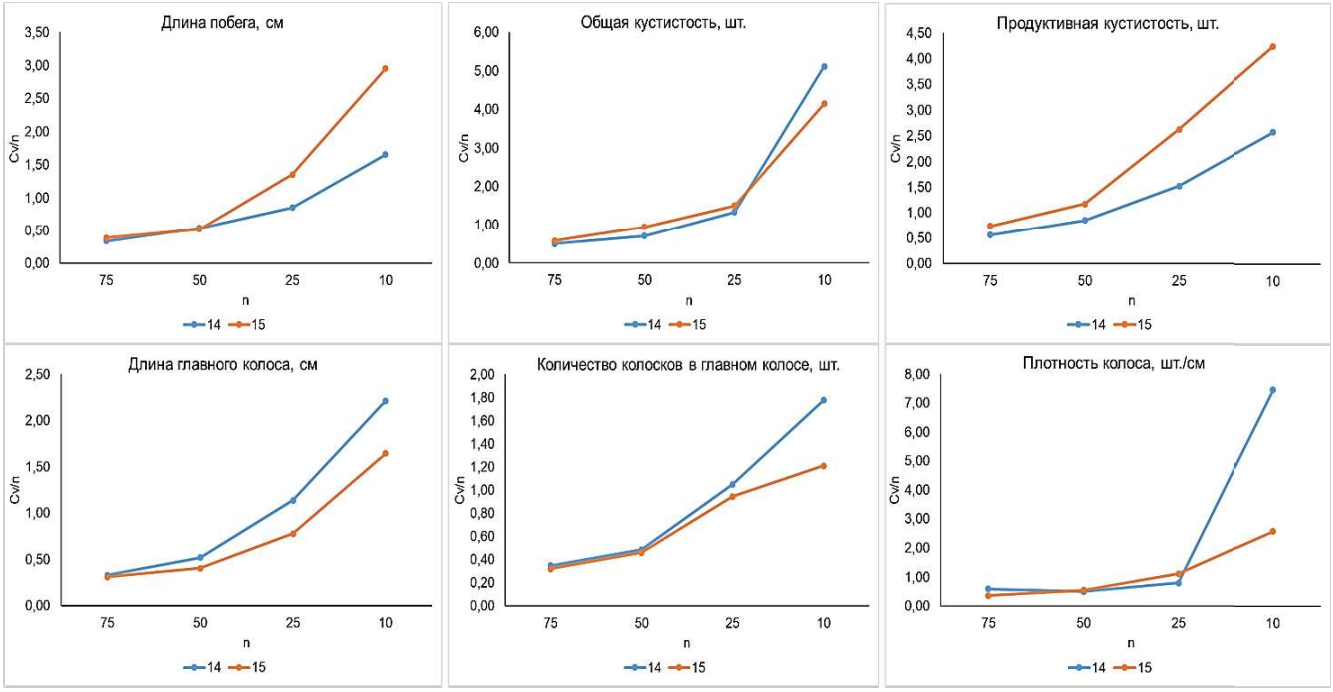

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента вариации Cv от количества растений n в выборке Cv/n по морфологическим признакам растений в популяциях F2 озимой тритикале

Figure 3 – Dependence of the variation coefficient Cv on the number of plants n in the sample Cv/n for morphological charasteristics of plants in F2 populations of winter triticale

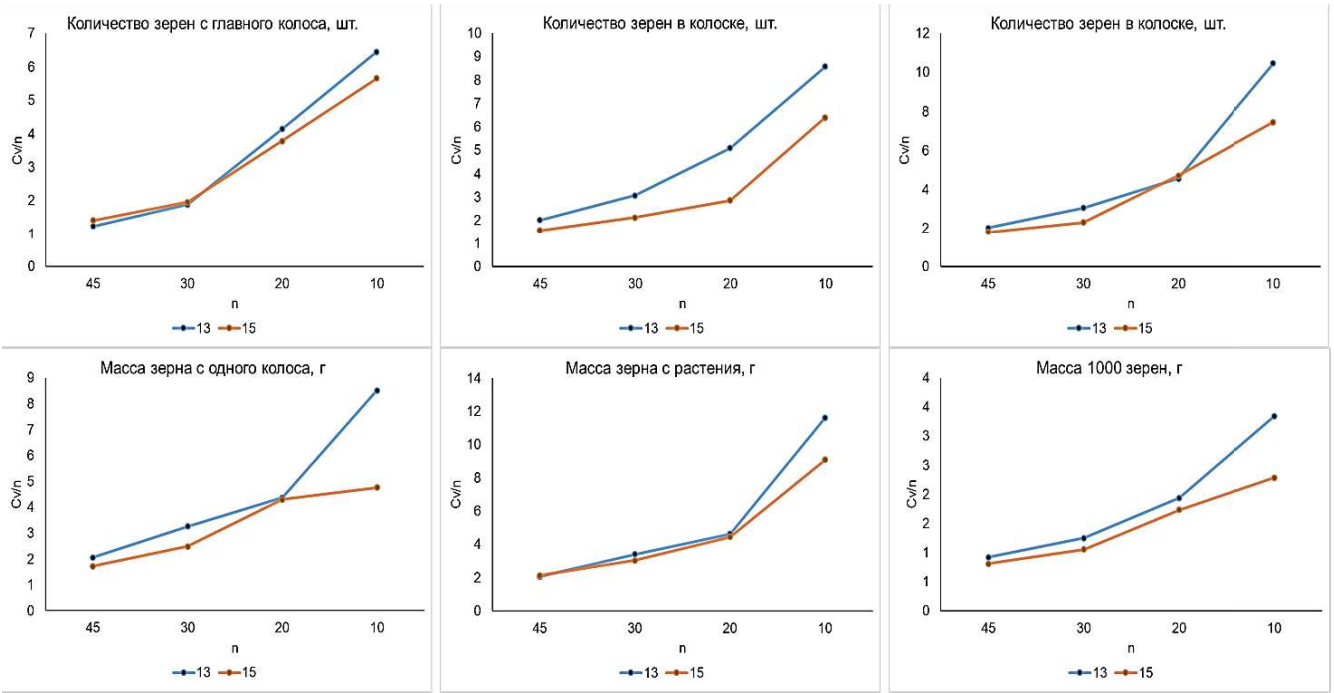

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента вариации Cv от количества растений n в выборке Cv/n по элементам структуры продуктивности растений в популяциях F2 озимой тритикале

Figure 4 – Dependence of the variation coefficient Cv on the number of plants n in the sample Cv/n for elements of the plant productivity structure in F2 populations of winter triticale

Анализ полученных данных показал наличие значительного варьирования величин по изучаемым признакам у растений в относительно небольших популяциях F2 пшеницы и тритикале. Это позволяет рассчитывать на возможность отбора в более поздних поколениях линий с ценными комбинациями признаков. По данным других исследователей, для эффективного отбора рекомбинаций объем выборки должен быть значительно выше, особенно

при поиске целевых сочетаний аллелей генов и использовании методов геномной селекции. По данным [7], при создании генетических банков размер выборки примерно из 172 растений был достаточен для сохранения почти всех полиморфных генов в популяции практически любых видов растений при условии, что частота генов была не ниже 0,05. Однако для геномной селекции и картирования QTL требуется еще больший размер выборки. Campbell A.W. и соавт. [11] при оценке генетических вариаций растений F2 зерновых культур путем получения из популяций гибридов линий удвоенных гаплоидов установили, что уменьшение выборки может привести к потере генетических вариаций в результате генетического дрейфа при отборе маркеров. В другом исследовании было показано, что для геномной селекции в популяциях F2 популяция злаков должна состоять из более чем 600 особей для достижения максимальной точности прогнозирования, которая необходима для надежного выявления генетических вариаций [3].

Исследования на злаках, таких как пшеница и тритикале, осложняются полиплоидным характером этих растений. В гибридных популяциях этих видов достаточный размер популяции необходим для поддержания аллельного разнообразия генов [12].

В селекционной практике исследователями ежегодно создается несколько десятков и даже сотен гибридных комбинаций между родительскими парами для создания ценного исходного материала. При использовании защищенного грунта, в том числе фитотронно-тепличных комплексов, приходится учитывать технические ограничения, приводящие к сокращению числа растений в изучаемых гибридных комбинациях. В конечном итоге их эффективность определяется получением константных линий с ценным сочетанием признаков.

Заключение. Проведенное нами исследование показало, что для поддержания необходимого уровня варьирования признаков в гибридной популяции F2 озимой мягкой пшеницы и тритикале для изучаемых комбинаций скрещиваний в случае проведения фенотипической оценки количественных признаков требуется в среднем не менее 25 растений, достаточным объемом выборки можно считать 50 растений. Выращивание большего количества растений в каждой из популяций приведет к неэффективному использованию площади фитотрона. Снижение количества растений в выборке ниже указанного предела не позволит обеспечить требуемый уровень варьирования признаков в популяции.

Полученные результаты в дальнейшем будут использованы при планировании селекционного процесса у озимых злаковых культур с использованием фитотронно-тепличных условий.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме «Разработка комбинированной технологии спидбридинга и метода эмбриокультуры для ускорения селекционного процесса озимых зерновых и подсолнечника» FRES-2025-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мединский А. В., Стёпочкин П. И. Яровизация озимых сортов тритикале // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2013. № 4. С. 27–30.

2. Онлайн-калькуляторы. Режим доступа: https://calcus.ru/list-random.

3. Сайфетдинов Е. А., Ткаченко О. В., Рязанцев Н. В. Влияние сроков яровизации *in vitro* на вегетацию озимой пшеницы и тритикале в условиях фитотронно-тепличного комплекса // Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии: Материалы XXIV конф. молодых ученых с Междунар. участием, Москва, 23–27 сентября 2024 года. М.: ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии. 2024. С. 116–117. DOI: 10.48397/w4265-2672-9751-v.

4. Эмбриогенез и регенерация растений в культуре пыльников гексаплоидной тритикале (× *Triticosecale* Wittmack) под влиянием цитокинина зеатина. / Р. С. Ержебаева [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2019. № 54(5). С. 934945. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.934rus.

5. Acceleration of wheat breeding: enhancing efficiency and practical application of the speed breeding system / J. K. Cha et al // Plant Methods. 2023. No. 19. P. 118. DOI: 10.1186/s13007-023-01083-1.

6. Koshy M. P., Namkoong G., Roberds J. H. Genetic variance in the F2 generation of divergently selected parents // Theoretical and Applied Genetics. 1998. No. 97(5). P. 990–993. DOI: 10.1007/S001220050982.

7. Lawrence M. J., Marshall D., Davies P. R. Genetics of genetic conservation. I. Sample size when collecting germplasm // Euphytica. 1995. No. 84(2). P. 89–99. DOI: 10.1007/BF01677945.

8. Mehboob S. F. Variability, heritability and genetic advance in F2 population of cross between cultivated and wild tomato // Food Science and Quality Management. 2016. No. 5. P. 68–71.

9. Peixoto L. de A., Bhering L. L., Cruz C. D. Determination of the optimal number of markers and individuals in a training population necessary for maximum prediction accuracy in F2 populations by using genomic selection models // Genetics and Molecular Research. 2016. No. 15(4):15048874. DOI: 10.4238/GMR15048874.

10. Phenotypic and genotypic variability of F2 plants derived from *Jatropha curcas* × *integerrima* hybrid / K. T. One et al. // Biomass & Bioenergy. 2014. No. 67. P. 137–144. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.04.036.

11. Prediction of sample size to maintain genetic variation in doubled-haploid populations following marker selection / A. W. Campbell et al. // Theoretical and Applied Genetics. 2001. No. 103(6). P. 1028–1036. DOI: 10.1007/S001220100639.

12. Sample size for collecting germplasms – a polyploid model with mixed mating system / R. L. Sapra et al. // Journal of Biosciences. 2003. No. 28(2). P. 155–161. DOI: 10.1007/BF02706214.

REFERENCES

1. Medinsky A. V. Winter triticale varieties vernilization. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2013;(4):27–30. (in Russ.)

2. Online-calculators. Режим доступа: https://calcus.ru/list-random. (in Russ.)

3. Saifetdinov E. A., Tkachenko O. V., Ryazantsev N. V. Effect of *in vitro* vernalization timing on the vegetation of winter wheat and triticale in a phytotron-greenhouse complex. *Biotechnology in Plant Growing, Animal Husbandry and Agricultural Microbiology: Proceedings of the XXIV Conference of Young Scientists with International Participation*, Moscow, September 23–27, 2024. Moscow: All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology. 2024:116–117. DOI: 10.48397/w4265-2672-9751-v. (in Russ.)

4. Effect of zeatin on *in vitro* embryogenesis and plant regeneration from another culture of hexaploid triticale (× *Triticosecale* Wittmack) / R. S. Yerzhebayeva, M. A. Abdurakhmanova, Sh. O. Bastaubayeva, D. Tadjibayev. *Agricultural Biology*. 2019;54(5):934–945. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.934rus. (in Russ.)

5. Acceleration of wheat breeding: enhancing efficiency and practical application of the speed breeding system / J. K. Cha, H. Park, C. Choi, Y. Kwon, S. M. Lee, K. W. Oh, J. M. Ko, S. W. Kwon, J. H. Lee. *Plant Methods*. 2023;(19):118. DOI: 10.1186/s13007-023-01083-1.

6. Koshy M. P., Namkoong G., Roberds J. H. Genetic Variance in the F2 Generation of Divergently Selected Parents. *Theoretical and Applied Genetics*. 1998;97(5):990–993. DOI: 10.1007/S001220050982.

7. Lawrence M. J., Marshall D., Davies P. R. Genetics of genetic conservation. I. Sample size when collecting germplasm. *Euphytica*. 1995;84(2):89–99. DOI: 10.1007/BF01677945.

8. Mehboob S. F. Variability, Heritability and genetic advance in F2 population of CROSS between cultivated and wild tomato. *Food Science and Quality Management*. 2016;(5):68–71.

9. Peixoto L. de A., Bhering L. L., Cruz C. D. Determination of the optimal number of markers and individuals in a training population necessary for maximum prediction accuracy in F2 populations by using genomic selection models. *Genetics and Molecular Research*. 2016;15(4):15048874. DOI: 10.4238/GMR15048874.

10. Phenotypic and genotypic variability of F2 plants derived from *Jatropha curcas* × *integerrima* hybrid / K. T. One, P. Tanya, N. Muakrong, K. Laosatit, P. Srinives. *Biomass & Bioenergy*. 2014;(67):137–144. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.04.036.

11. Prediction of sample size to maintain genetic variation in doubled-haploid populations following marker selection / A. W. Campbell, P. J. Campbell, W. B. Griffin, D. J. Burritt, A. J. Conner. *Theoretical and Applied Genetics*. 2001;103(6):1028–1036. DOI: 10.1007/S001220100639.

12. Sample size for collecting germplasms – a polyploid model with mixed mating system / R. L. Sapra, P. Narain, S. V. S. Chauhan, S. K. Lal, B. Singh. *Journal of Biosciences*. 2003;28(2):155–161. DOI: 10.1007/BF02706214.

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена после рецензирования 23.01.2025; принята к публикации 01.02.2025.
The article was submitted 24.12.2024; approved after reviewing 23.01.2025; accepted for publication 01.02.2025.