

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ
НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья

УДК 633.111

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-157-165

Зависимость урожайности линий поздних поколений
от продуктивности колоса исходных гибридных популяций
яровой мягкой пшеницы

С. Б. Лепехов

*Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия**Автор, ответственный за переписку:* Сергей Борисович Лепехов, sergei.lepehov@yandex.ru

Актуальность. Обоснование возможности браковки гибридных популяций на основе оценки их урожайности или массы зерна колоса как признака, тесно коррелирующего с урожайностью, может повысить эффективность селекционной работы с яровой мягкой пшеницей.

Материалы и методы. Шестнадцать гибридных популяций F_2 – F_4 яровой мягкой пшеницы были оценены по массе зерна колоса, среднему значению у 10% растений с максимальной массой зерна колоса, коэффициенту вариации массы зерна колоса, а также урожайности. При помощи метода педигри в каждой гибридной популяции были отобраны 2–3 линии F_7 . Полученные линии испытывались по урожайности в F_8 и F_9 . При обработке результатов ретроспективно учитывали данные по массе зерна главного колоса родительских сортов, от скрещивания которых были получены рассматриваемые гибридные популяции.

Результаты. Гибридные популяции стабильно дифференцировались по среднему значению массы зерна колоса и его коэффициенту вариации в различные годы исследования. Ни одна из 36 линий поздних поколений достоверно не превзошла стандартный сорт по урожайности. Все рассматриваемые показатели гибридных популяций не были достоверно связаны с урожайностью линий поздних поколений. Среднее значение массы зерна главного колоса родительских сортов, лучшего родителя, а также разность средних значений родителей по массе зерна главного колоса имели тенденцию к отрицательной взаимосвязи с урожайностью линий поздних поколений (r до $-0,58$).

Заключение. Браковка гибридных популяций исключительно по урожайности или массе зерна колоса сопряжена с риском утраты высокоурожайных генотипов. Высокоурожайные линии поздних поколений формируются в комбинациях, в которых у одного родителя или в среднем по родителям масса зерна главного колоса не выражена в наибольшей степени или оба родителя слабо отличаются друг от друга по данному признаку.

Ключевые слова: масса зерна колоса, изменчивость, косвенный отбор, подбор пар для скрещивания

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий № 0534-2021-0003 «Использование молекулярно-генетических и биотехнологических методов исследований в селекции растений».

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лепехов С.Б. Зависимость урожайности линий поздних поколений от продуктивности колоса исходных гибридных популяций яровой мягкой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(3):157-165. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-157-165

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-157-165

Dependence of the yield in late-generation lines on the spike productivity in original segregating populations of spring bread wheat

Sergey B. Lepekhov

Federal Altai Scientific Centre of Agro-Biotechnologies, Barnaul, Russia

Corresponding author: Sergey B. Lepekhov, sergei.lepehov@yandex.ru

Background. An ascertained possibility of culling segregating populations on the basis on their yield or grain weight per spike as a character closely correlated with yield can increase the efficiency of breeding practice with spring bread wheat.

Materials and methods. Sixteen F_2 – F_4 segregating populations of spring bread wheat were assessed for their grain weight per spike, average grain weight per spike among the top 10%, coefficient of variation for grain weight per spike, and yield. The pedigree method was applied to select 2 to 3 F_7 lines from each population. The obtained lines were tested for their yield in F_8 and F_9 . The data of grain weight per main spike in the parents that had been crossed to produce the studied segregating populations were retrospectively taken into account while the results were processed.

Results Segregating populations persistently differed in their average grain weight per spike and the coefficient of its variation in different years of research. None of the 36 late-generation lines significantly surpassed the reference cultivar in yield. All the considered indicators of segregating populations had no significant correlations with the yield of late-generation lines. Average values of grain weight per main spike in the parent genotypes and the best parent as well as the differences between the parents in the average grain weight per main spike tended to have a negative correlation with the yield of late-generation lines (r up to -0.58).

Conclusion. The culling of segregating populations based solely on the yield or grain weight per spike is associated with a risk of losing high-yielding genotypes. Late-generation lines with high yields occur in combinations where the grain weight per main spike in one parent or on average among the parents is not expressed to its highest level or when both parents differ only slightly from each other in the expression of this character.

Keywords: grain weight per spike, variability, indirect selection, selection of pairs for crossing

Acknowledgements: this work was implemented within the framework of the state task delegated to the Federal Altai Scientific Centre of Agro-Biotechnologies: No. 0534-2021-0003 “The use of molecular genetics and biotechnological research methods in plant breeding”.

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Lepekhov S.B. Dependence of the yield in late-generation lines on the spike productivity in original segregating populations of spring bread wheat. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(3):157-165. DOI:10.30901/2227-8834-2024-3-157-165

Введение

Селекция яровой мягкой пшеницы на урожайность осложнена ненадежностью оценки селекционного материала ранних поколений по данному признаку из-за дефицита семян, малого размера делянки, генетической неоднородности (Kramer et al., 1982). В связи с этим исследователи используют косвенные критерии оценки и отбора. В качестве таких критериев предлагались физиологические критерии (Fischer, Rebetzke, 2018), отдельные элементы структуры урожая (Saadalla, 1994), их сочетания или индексы (Fellahi et al., 2018, Mahdy et al., 2022). Однако ведущим признаком отбора из гибридных популяций в российской селекции мягкой пшеницы по ряду причин была и остается масса зерна колоса (Boiko et al., 2019). Данный признак тесно сопряжен с урожайностью (Demina, 2021) и легко измеряется, поэтому он выбран в качестве селекционного критерия (Parlevliet, Van Ommereen, 1988).

В ряде исследований сообщается о низкой доле гено-типа (от 3,1 до 13,0%) в общей фенотипической изменчивости массы зерна главного колоса (Nikitina, 2006; Bome et al., 2015; Boiko et al., 2019). Как следствие, реализованная наследуемость и эффективность индивидуального отбора по массе зерна колоса низки (Volkova, 2014). В широком статистическом смысле потенциальная ценность комбинации – это функция среднего и изменчивости в гибридной популяции (Smith et al., 2018). Поскольку оценка отдельных растений в гибридной популяции по массе зерна колоса для последующего отбора малоинформативна, возможно ли использовать этот признак для характеристики гибридных популяций с целью прогноза их перспектив в дальнейшей селекции?

N. W. Simmonds (1996) предположил, что по результатам оценки урожайности гибридных популяций ранних поколений можно забраковать значительную их часть. Это утверждение кажется интуитивно верным, поскольку представляется, что различия между растениями в пределах гибридной популяции меньше, чем различия между популяциями. Этот факт действительно зафиксирован для линий F_4 , полученных при отборе из гибридных популяций F_2 у ячменя (Lu et al., 2001). В реальном селекционном процессе продемонстрировано, что гибридные популяции ячменя с самой низкой продуктивностью колоса, массой 1000 зерен за трехлетний период могут быть забракованы без существенного риска утраты ценных генотипов (Mihkelman et al., 2018).

Цель исследования: оценить возможность прогнозирования урожайности линий яровой мягкой пшеницы поздних поколений на основе оценки массы зерна колоса и ее изменчивости в гибридных популяциях.

Материалы и методы

Исследование проведено на одном и том же опытном поле Алтайского научно-исследовательского института сельского хозяйства – отдела Федерального Алтайского научного центра агробιοтехнологий в 2016–2023 гг. Шестнадцать гибридных популяций яровой мягкой пшеницы от скрещивания сортообразцов преимущественно степного экологического типа Сибири и Казахстана – ‘Алтайская 105’ (Алт105), ‘Алтайская Жница’ (Алт жн), ‘Дуэт’, ‘Карабалыкская 98’ (Кар98), ‘Лютесценс 453/2’ (Л453), ‘Лютесценс 827/01-42’ (Л827), ‘Лютесценс 899’ (Л899), ‘Саратовская 70’ (Сар70), ‘Саратовская 71’ (Сар71), ‘Саратовская 72’ (Сар72), ‘Тобольская Степная’ (Тоб ст), ‘Туле-

евская’ (Тул), ‘Целинная 3/с’ (Цел3/с), ‘Эритроспермум 78’ (Эр78) – были последовательно посеяны в 2016 (F_2), 2017 (F_3) и 2018 г. (F_4) по паровому предшественнику на делянках площадью 10 м² сеялкой ССФК-7. Срок сева – II декада мая, норма высева – 500 зерен/м². Опыт заложен в одной повторности.

В фазу полной спелости ежегодно проводили отбор 100 колосьев с одной гибридной популяцией. Критерием отбора служила визуальная крупность колоса, высокое количество продуктивных колосков в нем и хорошая озерненность колоска. Каждый колос обмолачивали отдельно и измеряли его массу зерна. Затем для данного признака вычисляли среднее значение, среднее значение у 10% растений с максимальной массой зерна колоса, коэффициент вариации.

В 2016 и 2017 г., помимо массы зерна колоса, определяли урожайность гибридных популяций путем пересчета урожайности делянки с г/м² на т/га. После проведения процедуры измерения массы зерна колосьев осуществили их селекционную браковку. Учитывали крупность, выполненность, стекловидность зерна, озерненность колоса, визуальное наличие болезней на зерновках. Дальнейшая селекционная работа с потомствами отобранных колосьев осуществлялась методом педигри (посев потомства каждого отобранного колоса на отдельном рядке с последующим индивидуальным отбором лучших колосьев случших рядков). Был проведен 3–5-кратный индивидуальный отбор по комплексу агрономически важных для селекции признаков (визуальный размер колоса, густота продуктивного стеблестоя, отсутствие болезней, группа спелости, высота растений, визуальные характеристики зерна после обмолота).

Размножение и окончательный отбор однородных по фенотипу потомств F_7 провели в 2021 г. В 2022 и 2023 г. 36 линий F_8 и F_9 (2–3 линии с каждой гибридной популяцией) были испытаны по урожайности с делянки. Предшественник – пар, срок сева – II декада мая, норма высева – 500 зерен/м². Площадь делянки – 0,9 м², повторность трехкратная с рандомизацией. Посев осуществлен сеялкой СР-1М, уборка – вручную с последующим обмолотом на пучково-сноповой молотилке. Комбинации сравнивали по урожайности лучшей линии и по средней урожайности ее линий. В качестве стандарта, как в опыте с гибридными популяциями, так и в опыте с линиями поздних поколений, использован сорт ‘Алтайская 105’.

Дополнительно в анализ включены ретроспективные данные за 2010–2012 гг. по массе зерна главного колоса родителей сортов, при скрещивании которых были получены рассматриваемые гибридные популяции. Предшественник – пар, норма высева – 500 зерен на 1 м², площадь делянки – 2 м², в трехкратной повторности, количество растений в выборке – 10 штук. Рассчитывали следующие параметры: среднеродительское значение массы зерна главного колоса, масса зерна главного колоса лучшего родителя, разность значений массы зерна главного колоса родителей. Вышеназванные параметры рассчитывали в среднем за 3 года (2010–2012 гг.).

Статистическая обработка проведена методом дисперсионного анализа в программе Microsoft Excel 2016. Коэффициенты корреляции Спирмена рассчитаны в программе Statistica 12.

В 2010 г. наблюдалась весенняя засуха. В 2011 г. небольшой дефицит осадков затронул весь период времени с мая по август. Для 2012 г. была характерна аномальная засуха, приведшая к значительному падению урожайности. Условия вегетации 2016–2018 гг. в целом мож-

но охарактеризовать как благоприятные для роста и развития растений. Во все три года количество осадков в июле значительно превышало среднегодовую норму, что способствовало развитию листостебельных болезней и полеганию растений. 2019 г. характеризовался дефицитом осадков в период «выход в трубку – колошение», а также высокими температурами в период налива зерна. Дефицит осадков в вегетацию 2020 г. совпал с периодом до колошения. Налив зерна протекал в благоприятных условиях. В 2021 и 2022 г. наблюдался дефицит осадков в мае и августе. В июне – июле сложились благоприятные условия для роста и развития растений. Отличительной особенностью 2023 г. от двух предыдущих лет стало аномально высокое количество осадков в августе, что привело к прорастанию зерна на корню.

Результаты

В рассматриваемом наборе гибридных популяций ежегодно существовали достоверные различия по массе зерна колоса. Ранжирование гибридных популяций по данному признаку было довольно стабильным на протя-

жении всего периода испытаний. В двух гибридных популяциях (Л453 × Алт жн и Л899 × Сар72) отмечена существенная смена ранга по массе зерна колоса. Пять гибридных популяций (Л827 × Сар71, Л827 × Сар70, Тул × Сар71, Цел3/с × Эр78, Эр78 × Алт105) характеризовались наибольшим значением рассматриваемого показателя, пять других гибридных популяций (Л453 × Л827, Л453 × Тул, Тоб ст × Сар72, Цел3/с × Алт105, Цел3/с × Кар98) – наименьшим как в отдельные годы, так и в среднем за 3 года. Три гибридные популяции (Дуэт × Алт105, Тул × Алт105 и Цел3/с × Л827) занимали среднее положение в ранжированном ряду, хотя в каждый год имели достоверные отличия от некоторых других гибридных популяций (табл. 1). Около половины гибридных популяций достоверно превосходили стандартный сорт 'Алтайская 105' по массе зерна колоса ежегодно.

Коэффициент вариации массы зерна колоса гибридных популяций был наибольшим в F_2 и немного снижался в последующих поколениях. Следует обратить внимание на его относительно стабильное проявление для каждой гибридной популяции. Только у 6 из 16 гибридных популяций коэффициент вариации массы зерна ко-

Таблица 1. Величина, изменчивость массы зерна колоса и урожайность гибридных популяций F_2 – F_4 яровой мягкой пшеницы (2016–2018 гг., Барнаул)

Table 1. Values and coefficients of variation for grain weight per spike and yield in the F_2 – F_4 segregating populations of spring bread wheat (2016–2018, Barnaul)

Комбинация / Combination	Масса зерна колоса, г / Grain weight per spike, g				Коэффициент вариации / Coefficient of variation			Урожайность, т/га / Yield, t/ha		
	2016	2017	2018	Хср	2016	2017	2018	2016	2017	Хср
Л827 × Сар71	1,22	1,15	1,31	1,23	20,8	17,2	19,2	1,84	2,72	2,28
Л827 × Сар70	1,08	1,13	1,37	1,19	20,8	17,4	17,4	2,43	2,40	2,42
Тул × Сар 71	1,10	1,12	1,32	1,18	22,0	17,8	19,4	2,51	2,56	2,54
Цел3/с × Эр78	1,07	1,08	1,33	1,16	23,7	17,1	18,5	2,28	2,55	2,42
Эр78 × Алт105	1,13	1,07	1,25	1,15	30,4	20,1	20,5	2,83	2,39	2,61
Дуэт × Алт105	1,05	1,12	1,27	1,15	23,1	17,6	23,7	2,94	2,15	2,55
Л453 × Алт жн	1,15	0,90	1,19	1,08	19,9	15,7	18,8	2,41	2,07	2,24
Л453 × Эр78	1,07	1,00	1,14	1,07	24,0	17,0	18,0	2,40	2,35	2,38
Тул × Алт105	0,99	0,98	1,14	1,04	26,3	23,8	22,9	2,81	2,04	2,43
Л899 × Сар72	0,89	0,93	1,25	1,03	23,6	18,2	16,7	2,47	1,59	2,03
Цел3/с × Л827	0,90	0,96	1,12	1,00	25,7	19,7	23,0	2,36	1,92	2,14
Л453 × Л827	0,90	0,80	1,16	0,95	26,9	21,7	21,2	2,38	2,02	2,20
Л453 × Тул	0,87	0,81	1,08	0,92	30,0	18,2	21,9	2,45	1,94	2,20
Тоб ст × Сар72	0,90	0,74	1,07	0,90	23,5	20,7	21,4	2,69	1,84	2,27
Цел3/с × Алт105	0,89	0,78	1,01	0,89	30,4	19,2	26,7	2,20	1,60	1,90
Цел3/с × Кар98	0,75	0,65	1,08	0,83	33,9	22,2	24,6	1,62	1,22	1,42
'Алтайская 105' 'Altaiskaya 105'	1,00	0,65	1,05	0,90	26,9	21,6	21,2	2,70	1,55	2,13
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,07	0,05	0,07	0,12	–	–	–	–	–	F < F _т

Примечание: Хср – среднее значение; F < F_т – фактическое значение F-критерия меньше табличного значения F-критерия

Note: Xcp – mean value; F < F_т – the experimental value of Fischer's criterion is less than the tabulated value of Fischer's criterion

лоса был выше, чем у 'Алтайской 105'. Однако эти различия не были статистически значимы. Величина массы зерна колоса и ее изменчивость были отрицательно взаимосвязаны (r от $-0,55$ до $-0,67$).

По урожайности в среднем за два года лидировали гибридные популяции Эр78 × Алт105 (2,61 т/га) и Дуэт × Алт105 (2,55 т/га). Наименьшую урожайность сформировали популяции Цел3/с × Алт105 (1,90 т/га) и Цел3/с × Кар98 (1,42 т/га).

В 2022 г. урожайность с делянки у линий поздних поколений (F_8 и F_9) варьировала от 315 до 475 г/м² при уровне урожайности у стандарта 421 г/м². В 2023 г. данные показатели составили 282, 426 и 383 г/м² соответственно. Ни одна полученная линия достоверно не превзошла стандарт 'Алтайская 105' по урожайности (402 г/м²) в оба года испытания, хотя некоторые линии в среднем за два года обладали урожайностью на уровне стандарта. К такому следует отнести линии, полученные из комбинаций Л827 × Сар71 (404 г/м²), Дуэт × Алт105 (404 г/м²), Л827 × Сар70 (405 г/м²), Л453 × Эр78 (409 г/м²), Цел3/с × Кар98 (414 г/м²), Л453 × Тул (421 г/м²). Однако в отдельные годы лучшие линии одних комбинаций досто-

верно отличались от лучших линий других комбинаций (табл. 2). Некоторые комбинации достоверно различались по средней урожайности полученных из них линий. Отмечено существенное генотип-средовое взаимодействие для урожайности испытываемых линий, о чем свидетельствует низкий коэффициент корреляции между годами ($r = 0,20$ для урожайности лучших линий и $r = 0,11$ для средней урожайности линий). Стабильно низкой урожайностью характеризовались линии, полученные из комбинации Л453 × Алт жн (334 г/м² в среднем за 2 года).

В опыте не было выявлено ни одного статистически значимого коэффициента корреляции между параметрами гибридных популяций и урожайностью выделенных из них линий (табл. 3). Значительное количество коэффициентов корреляции было слабым и нестабильным, то есть в разные годы отличалось разным знаком. Ни средняя масса зерна колоса в гибридной популяции, ни таковое значение у 10% растений с наибольшими значениями не были сильно или стабильно связаны с урожайностью лучшей линии или средней урожайностью линий. Отмечена положительная слабая, но стабильная

Таблица 2. Урожайность линий F_8 и F_9 яровой мягкой пшеницы (2022–2023 гг., Барнаул)

Table 2. Yield of the F_8 and F_9 lines of spring bread wheat (2016–2018, Barnaul)

Происхождение линий / Pedigrees of the lines	Урожайность лучшей линии, г/м ² / Yield of the best line per combination, g/m ²			Средняя урожайность линий, г/м ² / Average yield of the lines per combination, g/m ²		
	2022	2023	Среднее / Mean	2022	2023	Среднее / Mean
Л827 × Сар71	408	401	404	405	371	388
Л827 × Сар70	475	381	405	452	332	392
Тул × Сар 71	374	384	379	351	344	347
Цел3/с × Эр78	401	378	376	387	336	362
Эр78 × Алт105	442	337	390	411	331	371
Дуэт × Алт105	431	379	404	377	378	378
Л453 × Алт жн	366	303	334	366	303	334
Л453 × Эр78	423	409	409	394	389	391
Тул × Алт105	419	358	388	373	322	348
Л899 × Сар72	341	383	358	337	367	352
Цел3/с × Л827	424	397	396	375	387	381
Л453 × Л827	401	364	383	389	341	365
Л453 × Тул	415	426	421	403	410	407
Тоб ст × Сар72	405	342	372	396	341	368
Цел3/с × Алт105	394	316	344	377	305	341
Цел3/с × Кар98	449	379	414	426	346	386
'Алтайская 105' / 'Altaiskaya 105'	421	383	402	–	–	–
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	68	74	$F < F_T$	47	42	$F < F_T$

Примечание: $F < F_T$ – фактическое значение F-критерия меньше табличного значения F-критерия

Note: $F < F_T$ – the experimental value of Fischer's criterion is less than the tabulated value of Fischer's criterion

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между различными параметрами гибридных популяций, родительских сортов и урожайностью линий поздних поколений яровой мягкой пшеницы**Table 3.** Correlations between various parameters in segregating populations or their parents, and the yield of late-generation lines of spring bread wheat

Параметр / Parameter	Урожайность лучшей линии в комбинации / Yield of the best line per combination			Средняя урожайность линий в комбинации / Average yield of the lines per combination		
	2022	2023	Среднее / Mean	2022	2023	Среднее / Mean
Средняя масса зерна колоса в гибридной популяции / Average grain weight per spike in a segregating population						
2016	-0,00	-0,06	-0,12	0,01	-0,25	-0,09
2017	0,22	0,35	0,23	0,04	0,11	0,22
2018	-0,02	0,20	0,00	-0,04	-0,04	0,03
среднее / mean	0,06	0,21	0,06	0,00	-0,05	0,07
Среднее значение у 10% растений с максимальной массой зерна колоса в гибридной популяции / Average grain weight per spike among the top 10% of plants in a segregating population						
2016	0,02	-0,23	-0,11	0,13	-0,40	-0,13
2017	0,24	0,27	0,18	0,01	0,05	0,16
2018	0,10	0,01	0,04	-0,04	-0,12	-0,08
среднее / mean	0,16	0,05	0,06	-0,00	-0,12	0,00
Коэффициент вариации массы зерна колоса в гибридной популяции / Coefficient of variation for the grain weight per spike in a segregating population						
2016	0,24	-0,11	0,22	0,23	0,04	0,08
2017	0,23	-0,26	0,05	0,11	-0,11	-0,06
2018	0,26	-0,23	0,14	0,04	0,02	-0,05
Урожайность гибридной популяции / Yield of a segregating population						
2016	0,07	-0,16	-0,09	-0,23	-0,07	-0,13
2017	0,08	0,20	0,13	0,13	-0,05	0,11
среднее / mean	0,25	-0,07	0,08	0,04	-0,15	-0,00
Масса зерна главного колоса родительских сортов / Grain weight per main spike in the parent genotypes						
средняя по родителям / average among the parents	0,06	-0,58	-0,31	-0,07	-0,33	-0,25
лучшего родителя / the best parent	-0,10	-0,58	-0,45	-0,23	-0,38	-0,41
разность значений родителей / differences between the parents	-0,33	-0,47	-0,48	-0,31	-0,39	-0,54

Примечание: критическое значение коэффициента корреляции $r = 0,50$ Note: the critical value of the correlation coefficient $r = 0.50$

взаимосвязь между размахом изменчивости в гибридных популяциях с 2016 по 2018 г. и урожайностью лучших линий в 2022 г. (r от 0,23 до 0,26). Взаимосвязь этих же показателей в 2023 г. снизилась или поменяла знак на противоположный (r от -0,11 до -0,26). Значения урожайности гибридных популяций не обнаружили статистически значимых корреляционных связей с урожайностью линий, полученных на основе этих гибридных популяций ($r < 0,30$).

Более высокие коэффициенты корреляции отмечены между параметрами массы зерна главного колоса родительских сортов и урожайностью линий поздних поколений (F_8 и F_9), полученных от их скрещивания. Средняя по родителям масса зерна главного колоса, масса зерна главного колоса лучшего родителя, разность значений массы зерна главного колоса родителей практически во всех случаях отрицательно коррелировали с урожайностью линий поздних поколений. Урожайность лучшей

линии, полученной из комбинации, в 2023 г. характеризовалась достоверной отрицательной корреляцией с массой зерна главного колоса лучшего родителя и средним значением обеих родительских форм. Аналогичная связь отмечена между среднегодовой урожайностью линий в комбинации и разностью значений ее родительских форм по массе зерна главного колоса.

Обсуждение результатов

Поиск косвенных критериев оценки урожайности в ранних поколениях гибридных популяций ведется в основном для разреженного посева (Fischer, Rebetzke, 2018). Однако в России гибридные популяции в реальном селекционном процессе по ряду организационных причин высевают с нормой, близкой к производственной. В таких условиях различная конкурентная способность растений «смазывает» их оценку по массе зерна колоса (Nass, 1983). Вероятно, невозможность в условиях эксперимента полной реализации генетического потенциала растений F_2 – F_4 привела к тому, что у гибридных популяций значение коэффициента вариации признака масса зерна с колоса было на уровне стандартного сорта.

При производственной норме посева гибридные популяции достаточно стабильны как по вариации, так и по массе зерна с колоса в разные годы исследования, однако эти параметры никак не связаны с урожайностью линий поздних поколений. Существенное превосходство над стандартом по средней продуктивности колоса в гибридной популяции не гарантирует последующего выщепления из нее высокоурожайных линий. Вероятно, это происходит из-за компенсации одних элементов структуры урожайности другими. Так, масса зерна колоса гибридных популяций была тесно сопряжена с их урожайностью в 2017 г. ($r = 0,87$), но слабо – в 2016 г. ($r = 0,17$). Детальный анализ выявил отрицательную параболическую зависимость между продуктивностью колоса в гибридной популяции и ее урожайностью в 2016 г. Данный факт, вероятно, связан с различиями в густоте продуктивного стеблестоя. Именно по этой причине взамен однокомпонентного отбора современные исследователи рассматривают индексный отбор, базирующийся на нескольких критериях (Fellahi et al., 2018).

Идея оценки гибридных популяций по урожайности при производственной норме посева для того, чтобы забраковать неперспективный материал, кажется привлекательной. Однако данную точку зрения критикуют R. A. Fischer и G. J. Rebetzke (2018), так как имеются сомнения в том, что высокоурожайные гибридные популяции, которые по сути являются смесью конкурирующих сублиний, дадут линии с большей урожайностью, чем низкоурожайные гибридные популяции, даже если не принимать во внимание неточность измерения урожайности на делянках малого размера. Результат проведенного эксперимента согласуется с данной точкой зрения. Две линии с наибольшей средней за два года урожайностью были отобраны из гибридных популяций с низким значением массы зерна колоса и урожайностью ниже средней. Более того, высокоурожайный стандартный сорт 'Алтайская 105' в 2017 г., при испытании гибридных популяций F_3 , находился на предпоследнем месте по урожайности и на последнем – по продуктивности колоса.

Следующим важным фактором, влияющим на качество создаваемых линий поздних поколений, выступает этап работы методом педигри, когда осуществляется визуальный отбор. Хотя визуальный отбор эффективен

(Nass, 1987) и является неотъемлемой частью практической селекции, но его результативность неодинакова в разных гибридных популяциях (Nass, 1983). В конце концов, представление селекционера об идеальном типе может расходиться с фактической урожайностью линий (Yuan et al., 2011). Неизбежным является взаимодействие «генотип – среда», вызванное различной нормой высева и погодными условиями в годы работы с F_5 – F_7 при рядковом посеве и F_8 – F_9 на многорядковых делянках с производственной нормой высева. Однако именно на данном этапе происходило сокращение прорабатываемого материала с 300 отобранных колосьев до 2–3 линий F_8 . При этом отбор велся уже не по массе зерна колоса, а по совокупности признаков, важных при создании сорта степного экологического типа для Алтайского края, среди которых высокая урожайность не единственный признак. Не исключено, что в процессе сокращения селекционного материала в 100 и более раз происходит утрата ценных высокоурожайных генотипов. Однако этот важный вопрос практически не обсуждается в современных работах российских селекционеров.

Предполагается, что эффективность селекции может быть увеличена через прогнозирование перспективных комбинаций по результатам анализа родительских форм. Одним из таких параметров, по крайней мере для прогноза в гибридной популяции, может выступать среднее значение признака по родителям (Utz et al., 2001). В нашем исследовании корреляция между средним по родителям значением массы зерна с колоса и урожайностью линий поздних поколений была несущественной.

Необычной является обнаруженная в исследовании отрицательная корреляция между массой зерна главного колоса лучшего родителя и урожайностью линий поздних поколений, полученных от таких комбинаций. Подразумевается, что включение в скрещивания сортов с высокопродуктивным колосом приведет к росту урожайности из-за корреляции данных признаков (Voiko et al., 2019). В некоторой степени объяснить этот факт может то, что в комбинациях со слишком большими различиями между родителями по массе зерна колоса обнаружена тенденция к снижению урожайности полученных линий. Данные результаты укладываются в общеизвестные представления о природе трансгрессий. Гены с положительными эффектами для улучшения количественного признака должны быть распределены между двумя родителями, а не сосредоточены у одного из родителей (Cazzola et al., 2020). В последнем случае родительские фенотипы будут сильно отличаться. Родители сочень близким фенотипом при скрещивании дают потомство с широкой трансгрессивной изменчивостью, если их фенотипы определяются разными генами (Koide et al., 2019; Basanagouda et al., 2024).

Заключение

Урожайность лучших линий поздних поколений и средняя урожайность линий поздних поколений, полученных на основе различных комбинаций, были незначительно сопряжены с такими признаками, как средняя масса зерна колоса в гибридных популяциях (r от $-0,25$ до $0,35$), среднее значение 10% растений с максимальной массой зерна колоса в гибридных популяциях (r от $0,27$ до $-0,40$), коэффициентом вариации массы зерна колоса в гибридных популяциях (r от $-0,26$ до $0,26$), урожайностью гибридных популяций (r от $-0,23$ до $0,25$). Корреляционный анализ выявил слабую и среднюю

связь между урожайностью лучших линий поздних поколений, средней урожайностью линий поздних поколений различных комбинаций и средней по родителям массой зерна главного колоса (r от 0,06 до -0,58), массой зерна главного колоса лучшего родителя (r от -0,10 до -0,58), разностью значений массы зерна главного колоса родителей (r от -0,31 до -0,54). Браковка гибридных популяций исключительно по урожайности или массе зерна колоса сопряжена с риском утраты высокоурожайных генотипов.

References / Литература

- Basanagouda G., Ramesh S., Chandana B.R., Sathish H., Siddu C.B., Kalpana M.P. et al. Predicting the frequency of transgressive RILs and minimum population size required to recover them in dolichos bean [*Lablab purpureus* (L.) Sweet]. *Legume Research*. 2024;47(5):751-755. DOI: 10.18805/LR-5035
- Boiko N.I., Parkina O.V., Piskarev V.V. Formation of grain weight per ear in varieties of common spring wheat (*Triticum aestivum* L.) under contrasting weather conditions of the forest-steppe area of the Cis-Ob' region. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019;33(12):43-47. [in Russian] (Бойко Н.И., Паркина О.В., Пискарев В.В. Формирование массы зерна с колоса у сортообразцов пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) в контрастных метеоусловиях лесостепи Приобья. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(12):43-47). DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11208
- Bome N.A., Ripberger E.I., Trautz D. Variability of characteristics of productivity of the spike of the hybrid forms *Triticum aestivum* L. as the way of adaptation in various ecological and geographical conditions. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*. 2015;1(1):98-107. [in Russian] (Боме Н.А., Рипбергер Е.И., Дитер Т. Изменчивость признаков продуктивности колоса гибридных форм *Triticum aestivum* L. как способ адаптации в различных эколого-географических условиях. *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2015;1(1):98-107).
- Cazzola F., Bermejo C.J., Cointy Peix E.L. Transgressive segregations in two pea F₂ populations and their respective F₂:3 families. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2020;55:01623. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01623
- Demina I.F. Conjugacy of yield and its structural elements in spring soft wheat samples. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(4):477-484. [in Russian] (Дёмина И.Ф. Сопряженность урожайности и элементов ее структуры у образцов яровой мягкой пшеницы. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(4):477-484). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.4.477-484
- Fellahi Z.E.A., Hannachi A., Bouzerzour H. Analysis of direct and indirect selection and indices in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) segregating progeny. *International Journal of Agronomy*. 2018;2018(1):1-11. DOI: 10.1155/2018/8312857
- Fischer R.A., Rebetzke G.J. Indirect selection for potential yield in early-generation, spaced plantings of wheat and other small-grain cereals: a review. *Crop and Pasture Science*. 2018;69(5):439-459. DOI: 10.1071/CP17409
- Koide Y., Sakaguchi S., Uchiyama T., Ota Y., Tezuka A., Nagano A.J. et al. Genetic properties responsible for the transgressive segregation of days to heading in rice. *G3: Genes, Genomes, Genetics*. 2019;9(5):1655-1662. DOI: 10.1534/g3.119.201011
- Kramer Th., Van Ooijen J.W., Spitters C.J.T. Selection for yield in small plots of spring wheat. *Euphytica*. 1982;31(3):549-564. DOI: 10.1007/BF00039193
- Lu M.Q., O'Brien L., Stuart I.M. Variation within and between F₂-derived families for grain yield and barley malting quality. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2001;52(1):85-92. DOI: 10.1071/AR00041
- Mahdy R.E., Althagafi Z.M.A., Al-Zahrani R.M., Aloufi H.H.K., Alsalmi R.A., Abeed A.H.A., et al. Comparison of desired-genetic-gain selection indices in late generations as an insight on superior-family formation in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*. 2022;12(8):1738. DOI: 10.3390/agronomy12081738
- Mihkelman V.A., Kadikov R.K., Melnikov A.V. Improved selection methods of spring barley in Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2018;(6):26-47. [in Russian] (Михельман В.А., Кадиков Р.К., Мельников А.В. Совершенствование методов селекции ярового ячменя в РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2018;(6):26-47).
- Nass H.G. Effectiveness of several selection methods for grain yield in two F₂ populations of spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science*. 1983;63(1):61-66. DOI: 10.4141/cjps83-006
- Nass H.G. Selection for grain yield of spring wheat utilizing seed size and other selection criteria. *Canadian Journal of Plant Science*. 1987;67(3):605-610. DOI: 10.4141/cjps87-086
- Nikitina V.I. Variability and inheritance of grain weight per spike in spring bread wheat under the forest-steppe conditions of Eastern Siberia (Izmenchivost i nasledovaniye massy zerna s kolosa u myagkoy yarovooy pshenitsy v usloviyakh lesostepi Vostochnoy Sibiri). *The Bulletin of KrasGAU*. 2006;(11):53-59. [in Russian] (Никитина В.И. Изменчивость и наследование массы зерна с колоса у мягкой яровой пшеницы в условиях лесостепи Восточной Сибири. *Вестник КрасГАУ*. 2006;(11):53-59).
- Parlevliet J.E., van Ommereen A. Recurrent selection for grain yield in early generations of two barley populations. *Euphytica*. 1988;38(2):175-184. DOI: 10.1007/BF00040189
- Saadalla M.M. Response to early-generation selection for yield and yield components in wheat. *Cereal Research Communications*. 1994;22(3):187-193.
- Simmonds N.W. Family selection in plant breeding. *Euphytica*. 1996;90:201-208. DOI: 10.1007/BF00023859
- Smith K.P., Thomas W., Gutierrez L., Bull H. Genomics-based barley breeding. In: N. Stein, G. Muehlbauer (eds). *The Barley Genome (Compendium of Plant Genomes)*. 1st ed. Cham: Springer; 2018. p.287-315. DOI: 10.1007/978-3-319-92528-8_16
- Utz H.F., Bohn M., Melchinger A.E. Predicting progeny means and variances of winter wheat crosses from phenotypic values of their parents. *Crop Science*. 2001;41(5):1470-1478. DOI: 10.2135/cropsci2001.4151470x
- Volkova L.V. Inheritance of grain mass per spike in soft spring wheat intraspecies hybrids. *Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University)*. 2014;3(32):13-17. [in Russian] (Волкова Л.В. Наследование массы зерна с колоса у внутривидовых гибридов яровой мягкой пшеницы. *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2014;3(32):13-17).
- Yuan W., Peng S., Cao C., Virk P., Xing D., Zhang Y. et al. Agrogenomic performance of rice breeding lines selected based on plant traits or grain yield. *Field Crops Research*. 2011;121(1):168-174. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.12.014

Информация об авторе

Сергей Борисович Лепехов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агrobiотехнологий, 656910 Россия, Барнаул, Научный городок, 35, sergei.lepehov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1561-6345>

Information about the authors

Sergey B Lepekhov, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, sergei.lepehov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1561-6345>

Статья поступила в редакцию 05.03.2024; одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 04.09.2024.
The article was submitted on 05.03.2024; approved after reviewing on 28.05.2024; accepted for publication on 04.09.2024.