

ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ УСЛОВИЙ СРЕДЫ И ОЦЕНКА СОРТОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ТВЕРДОЙ ПО ЧИСЛУ ПАДЕНИЯ

П. Н. Мальчиков^{1,2}, доктор сельскохозяйственных наук, руководитель лаборатории селекции яровой твердой пшеницы, sagrs-mal@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-2141-6836

М. Г. Мясникова¹, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции яровой твердой пшеницы, marina.myasnikova-61@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7224-0308;

Е. Н. Шаболкина¹, кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель лаборатории технологического сервиса, elenashabolkina@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1090-4399;

Л. В. Пронович¹, научный сотрудник лаборатории селекции перспективного генетического материала и молекулярно-биологических и физиологических исследований, Lpronovitch@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7481-1258

¹Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н. М. Тулайкова, 446254, Самарская обл., п. Безенчук, ул. Карла Маркса, д. 41; e-mail: samniish@mail.ru;

²ФИЦ Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 10; e-mail: sagrs-mal@mail.ru

Цель исследований – определить дифференцирующую способность условий среды и оценить сорта пшеницы твердой яровой селекции Самарского НИИСХ по числу падения (ЧП). Изучено 19 сортов и три селекционные линии, представлявшие 3–6-й этапы селекции. Селекционные линии по хронологии создания относятся к 6 этапу. В качестве стандарта были использованы данные по сорту Безенчукская 139. Изучение проведено в степной зоне на тяжелосуглинистых черноземах экспериментального поля Самарского НИИСХ в 2018–2023 годах. ЧП определяли на пробах зерна, взятых с двух повторений на приборе «Falling Number» Хагберга – Пертена. Рассчитывали варианты генотипа, среды, их взаимодействия, параметры общей (OAC_i), специфической (CAC_i), относительной адаптивности (S_{gi}), селекционной ценности генотипа ($СЦГ_i$), коэффициенты нелинейности (L_{gi}), компенсации генотипа (K_{gi}), параметры дифференцирующей способности среды (DCC_i) и ее относительной величины (S_{ek}), коэффициенты типичности (tt_k), предсказуемости среды (P_k). Установлено влияние на ЧП эффектов генотипа – 6,01 %, среды – 72,24 % и взаимодействия «генотип–среда» – 16,86 %. В группу лучших по $СЦГ_i$, с учетом параметров OAC_i , включены следующие генотипы: Марина ($OAC_i = 10,3$, $СЦГ_i = 228,7$), 2084Д-6 ($OAC_i = 41,8$, $СЦГ_i = 217,5$), Безенчукская юбилейная ($OAC_i = 25,8$, $СЦГ_i = 211,8$), Безенчукская золотистая ($OAC_i = 11,7$, $СЦГ_i = 221,7$). У стандарта эти параметры составили: $OAC_i = -27,0$; $СЦГ_i = 205,6$. Среди 6 изученных фонов по DCC_k (182–241), коэффициенту S_{ek} (42–90), коэффициенту K_{ek} (3,26–5,71) выделены 5 анализирующих фонов и один стабилизирующий, выделившийся высокими оценками типичности ($tt_k = 0,83$) и предсказуемости ($P_k = 0,32$), что позволяет прогнозировать реакцию сортов в системе сред. В целом условия среды экспериментального поля Самарского НИИСХ, складывающиеся в течение нескольких лет, формируют достаточно эффективную систему фонов для отбора и стабилизации признака «число падения» пшеницы твердой яровой.

Ключевые слова: пшеница твердая, сорт, число падения, адаптивность, стабильность, селекция.

Для цитирования: Мальчиков П. Н., Мясникова М. Г., Шаболкина Е. Н., Пронович Л. В. Дифференцирующая способность условий среды и оценка сортов яровой пшеницы твердой по числу падения // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16, № 4. С. 67–74. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-93-4-67-74.



DIFFERENTIATING ABILITY OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND ESTIMATION OF SPRING DURUM WHEAT VARIETIES ACCORDING TO FALLING NUMBER

P. N. Malchikov^{1,2}, Doctor of Agricultural Sciences, head of the laboratory for spring durum wheat breeding, sagrs-mal@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2141-6836;

M. G. Myasnikova¹, Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher of the laboratory for spring durum wheat breeding, marina.myasnikova-61@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7224-0308;

E. N. Shabolkina¹, Candidate of Agricultural Sciences, head of the laboratory for technical and analytical service, elenashabolkina@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-1090-4399;

L. V. Pronovich¹, researcher of the laboratory for promising genetic material breeding and molecular biology and physiology study, Lpronovitch@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7481-1258

¹Samarsky Federal Research Center RAS, Samarsky Research Institute of Agriculture named after N. M. Tulaykov, 446254, Samara region, v. of Bezenchuk, Karl Marks Str., 41; e-mail: samniish@mail.ru;

²The Federal Research Center "Institute of Cytology and Genetics", Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 630090, Novosibirsk, Prospekt Lavrentyeva, 10; e-mail: sagrs-mal@mail.ru

The purpose of the current study was to identify the differentiating ability of environmental conditions and estimate spring durum wheat varieties developed by the Samarsky RIA according to a falling number (FN). There were studied 19 varieties and 3 breeding lines, representing 3–6 breeding stages. According to the chronology of development, breeding lines belong to the 6th stage. Data on the Bezenchukskaya 139 variety were used as a standard. The study was carried out in the steppe zone, on heavy loamy chernozems of the experimental plot of the Samarsky RIA in 2018–2023. FN was determined on grain samples taken from 2 repetitions on the Hagberg-Perten device "Falling Number". In 2023, the factor 'environment' was represented by four backgrounds: 1) grain samples 1 month after harvesting at full maturity; 2) grain samples a month after harvesting with a dead-ripe stage of 7 days; 3) grain of the first option after 6 months of storage; 4) grain harvested at the moment of maturing and moistened after 6 months of storage. There were calculated genotype variances, environment, their correlation, parameters of general (GAC_i), specific (CAC_i), relative adaptability (S_{gi}), breeding value of a genotype (GBV_i), linearity coefficients (L_{gi}), genotype compensation (K_{gi}), parameters of the environment differentiating ability (EDA_k) and its relative value (S_{ek}), typicality coefficients (tt_k), environment predictability (P_k). There was established that FN was affected by a genotype with a share of 6,01 %, by environment with a share of 72,24 % and by a genotype-environment correlation with a share of 16,86 %. The best genotypes in terms of SVG, taking into account the GAC_i parameters, include the following: Marina ($GAC_i = 10,3$, $SVG_i = 228,7$), 2084D-6 ($GAC_i = 41,8$, $SVG_i = 208,6$), Bezenchukskaya Yubileinaya ($GAC_i = 25,8$, $SVG_i = 211,8$), Bezenchukskaya Zolotistaya ($GAC_i = 11,7$, $SVG_i = 221,7$). For the standard, these parameters were $GAC_i = -27,0$, $SVG_i = 205,6$. Among the 6 studied backgrounds by DCE_k (182–241), S_{ek} coefficient (42–90), K_{ek} coefficient (3,26–5,71), 5 analyzing backgrounds and one stabilizing one were identified, distinguished by high estimates of typicality ($tt_k = 0,83$) and predictability ($P_k = 0,32$), which allows predicting the response of varieties in the system of environments. In general, the environmental conditions of the experimental field of the Samara Research Institute of Agriculture, which have been developing over several years, form a fairly effective system of backgrounds for the selection and stabilization of the "falling number" trait of spring wheat durum.

Keywords: durum wheat, variety, falling number, adaptability, stability, selection.

Введение. Зерно пшеницы твердой – уникальное сырье для производства высококачественных макаронных и крупяных изделий, что объясняется особенностями строения белка, крахмала и процессов накопления и сохранения в процессе изготовления конечных продуктов желтых пигментов. Качество макаронных изделий, определяемых при варке (разваримость, прочность, цвет, содержание сухих веществ в варочной воде), в определенной степени зависят от вышеперечисленных качественных характеристик зерна и клейковины (Beres et al., 2020). Фенотипическое проявление всех признаков в той или иной степени зависит от условий среды и генотипа. Значительное снижение качества зерна и конечных продуктов из него вызывают процессы прорастания зерна на корню. Проросшее зерно теряет цвет, стекловидность, натуру, уменьшается содержание желтых пигментов, выход муки, крупки, снижается качество клейковины.

Известно, что краснозерные генотипы проявляют более высокую устойчивость к прорастанию, чем белозерные, к которым относятся все коммерческие сорта пшеницы твердой, что обостряет проблему создания устойчивых сортов. В большинстве случаев провокационные для прорастания зерна фоны формируются после окончания стадии покоя при благоприятных условиях увлажнения (осадки, росы, туман, низкие температуры). Воздействие этих факторов активизирует фермент α -амилаза, разрушающий крахмал эндосперма.

Склонность сортов к прорастанию также связана с наличием мутантных генов, которые активизируются в середине процесса созревания, что приводит к повышению уровня late maturity α -amylase – LMA – поздней амилазы (Cannon et al., 2022; Piri et al., 2023). Таким образом, двумя основными причинами повышенного уровня α -амилазы в зерне пшеницы являются прорастание после стадии покоя со-

зревшего в колосе зерна перед уборкой и активация α -амилазы позднего созревания (LMA) в период мягкого зерна (конец молочно-восковой – восковая спелость) под воздействием низких температур, приводящая к эффекту либо прорастания еще не созревшего зерна, либо его быстрого прорастания после созревания.

Устойчивость к предуборочному прорастанию зерна пшеницы определяется четырьмя способами: 1) определение индекса прорастания при проращивании семян в лабораторных условиях; 2) определение степени и динамики прорастания зерна при увлажнении колосьев в лабораторных условиях; 3) определение числа падения (ЧП) по Хатбергу – Пертену (Perten, 1964); 4) определение активности α -амилазы. Информативность и производительность метода определения ЧП являются его основными достоинствами для широкого применения в селекционной практике. Метод основан на биохимических закономерностях, протекающих в крахмале эндосперма при прорастании зерна, вызываемых гидролитической активностью альфа-амилазы, снижающей количество крахмала и изменяющей его свойства. Чем больше степень гидролиза крахмала, тем выше скорость опускания шток-мешалки в пробирке прибора. Скорость опускания измеряется в секундах, время опускания называется «число падения». В соответствии с ГОСТ 9353-2016 зерно первого и второго класса пшеницы в России ограничено 200 с. В некоторых зарубежных странах введены более жесткие ограничения по ЧП. В частности, в Австралии оно составляет 350 с, в Канаде – 400 с. В селекционной практике применяют следующую шкалу по ЧП: 150–200 с и ниже – низкое, 200–250 с – среднее, выше 300 с – высокое (Чухеева, 2020).

В последние годы в основных регионах возделывания яровой пшеницы твердой произошло увеличение частоты лет с провока-

ционными для прорастания зерна условия среды (Чахеева, 2020; Гапонов и др., 2024). Актуальность этой селекционной тематики будет возрастать с расширением ареала возделывания пшеницы твердой в регионе Северного Поволжья с повышенным уровнем осадков в период налива и созревания зерна (Ложкин и др., 2024). В связи с этим цель исследований – определить дифференцирующую способность условий среды и оценить сорта твердой пшеницы яровой селекции Самарского НИИСХ по числу падения.

Материалы и методы исследований.

Объектами исследований были сорта конкурсного сортоиспытания и селекционные линии пшеницы твердой Самарского НИИСХ. Всего было изучено 19 сортов, из них один (Харьковская 46) относится к 3-му, стандартный сорт Безенчукская 139 к 4-му, Безенчукская 182 и Безенчукская степная к 5-му, все остальные сорта – к шестому этапу селекции. Три селекционные линии по времени создания также отнесены к 6-му этапу. Посев опытных делянок проводили в оптимальные сроки на делянках 20,0 м² в 4-кратной повторности с рендомизированным размещением в блоках. В течение 2018–2023 гг. на образцах зерна, полученных при уборке урожая в оптимальные сроки и взятых с двух несмежных повторений, отбирали

пробы по 50,0 г. Отобранные образцы размалывали на лабораторной мельнице, ЧП определяли в водной суспензии муки на приборе «Falling Number» Хагберга – Пертена.

Полученные по ЧП цифровые данные были обработаны методом двухфакторного дисперсионного анализа с определением вкладов в дисперсию признака эффектов среды, генотипа и их взаимодействия. Адаптивность и стабильность признака у генотипов и дифференцирующую способность среды определяли по методике А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой (1997). В качестве стандарта были использованы данные по сорту Безенчукская 139. Рассчитывались варианты генотипа, среды, их взаимодействия, параметры общей (OAC_i), специфической (SAC_i), относительной адаптивности (S_{gi}), селекционной ценности генотипа (CЦГ_i), коэффициенты нелинейности (L_{gi}), компенсации генотипа (K_{gi}), параметры дифференцирующей (DCC_k), относительной способности среды (S_{ek}), коэффициенты типичности (tt_k) и предсказуемости среды (P_k). В дополнение к этой методике рассчитывали коэффициент регрессии генотипа на среду (b_i) по S. F. Eberhart, W. A. Russel в изложении А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой (1997). Условия среды за годы изучения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Метеорологические условия по периодам вегетации пшеницы твердой (по сорту-стандарту Безенчукская 139) в годы исследований (2018–2023 гг.)
Table 1. Meteorological conditions for the vegetation periods of wheat durum (according to the standard variety Bezenchukskaya 139) during the research years (2018–2023)

Год	Метео параметр	Период вегетации					
		всходы– кущение	кущение– трубкавание	трубкавание– колошение	колошение– восковая спелость	восковая спелость– уборка урожая	за вегетацию в целом
2018	Осадки, мм	13,6	3,7	0,7	47,1	2,0	67,1
	Сумма температур	348,7	142,3	350,0	603,8	333,3	1369,4
	ГТК	0,39	0,26	0,02	0,78	0,06	0,49
2019	Осадки, мм	5,5	2,8	1,5	58,5	35,6	103,9
	Сумма температур	366,7	200,0	300,0	501,0	374,7	1624,4
	ГТК	0,15	0,14	0,05	1,17	0,95	0,64
2020	Осадки, мм	19,1	30,9	8,3	0,0	7,9	66,2
	Сумма температур	406,4	386,3	169,4	502,9	232,4	1697,4
	ГТК	0,47	0,80	0,49	0,0	0,34	0,39
2021	Осадки, мм	15,3	15,4	15,4	25,1	5,9	77,1
	Сумма температур	242,9	334,8	190,1	482,7	281,0	1511,8
	ГТК	0,63	0,46	0,81	0,52	0,21	0,51
2022	Осадки, мм	42,1	45,5	18,1	48,8	18,3	142,8
	Сумма температур	447,9	395,7	192,6	420,7	234,6	1700,0
	ГТК	0,94	1,15	0,94	1,16	0,78	0,84
2023	Осадки, мм	8,9	19,1	25,8	22,7	12,8	89,3
	Сумма температур	387,0	353,7	192,5	428,3	237,0	1623,6
	ГТК	0,23	0,54	1,34	0,53	0,54	0,55

В целом они отличались достаточным разнообразием как по количеству осадков, так и по динамике их выпадения в течение вегетации в годы проведения исследований. Самый низкий уровень по ЧП по всем сортам (221,8 с) отмечен в 2019 г., когда основное количество осадков за вегетацию пшеницы твердой – 81,8 % (95,1 мм) – совпало с периодом

«колошение – созревание». Во время созревания зерна (восковая – полная спелость зерна) выпало 35,6 мм. Благоприятные условия для формирования зерна с высокими значениями ЧП имели место в 2021, 2022 и 2023 гг. – 490,7 с, 443,7 с, 427,1 с соответственно. Близкие к средним по опыту (396,4 с) значения ЧП отмечены в 2018 (377,6 с) и 2020 (403,5 с) годах.

Коэффициент вариации средних значений ЧП по годам составил 23,3 %, что соответствует значительному уровню вариабельности этого параметра по шкале изменчивости количественных признаков (Кильчевский, Хотылева, 1997). Таким образом, правомерно предположение, что условия среды в годы изучения были бла-

гоприятными для оценки устойчивости сортов по ЧП и поиска провокационных фонов.

Результаты и их обсуждение. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа определены вклады в общую дисперсию генотипической, средовой изменчивости и их взаимодействия (табл. 2).

Таблица 2. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа числа падения пшеницы твердой в зависимости от генотипа и условий среды (2018–2023 гг.)
Table 2. Results of two-way analysis of variance of the falling number of wheat durum depending on the genotype and environmental conditions (2018–2023)

Факторы дисперсионного анализа	Параметры дисперсионного анализа			
	Величина вариации		MS	Ff
	Сумма квадратов	% от общей вариации		
Общее	2514532	100,0	–	–
Сорт (G)	151123	6,01	6729	7,8*
Среда (E)	1816498	72,24	265236	417,8*
Взаимодействие GE	424030	16,86	4038	4,6*
Остаточное	123012	4,89	–	–

Примечание. * – значимо на 5 % уровне.

Эффекты генотипа, среды и их взаимодействия по критерию Фишера были значимы. Определяющим было влияние среды – 72,62 %, доля генотипа составила 6,01 %, взаимодействие генотип–среда – 16,86 % от общей дисперсии признака. Эти результаты позволяют предположить, что устойчивость к прорастанию зерна большинства изученных сортов из данного набора генотипов проявляется в определенных условиях и отличается нестабильностью. Но, тем не менее, вклад эффектов генотипа с величиной 6,01 % позволяет надеяться, что среди изученных генотипов можно идентифицировать сорта с достаточным уровнем и стабильностью ЧП в диапазоне изменчивости условий среды данного исследования.

По результатам изучения сортов в шести средах с учетом величины наименьшей существенной разницы выделены две группы контрастных по ЧП сортов. В первую включены 3 лучших генотипа с уровнем ЧП

от 422,2 до 438,2 с – 2084Д-6, Безенчукская 210, Безенчукская юбилейная. Во вторую группу с минимальными значениями ЧП и их варьированием от 345 до 384,7 с включены 5 генотипов – 1922Д-14, Безенчукская 182, Безенчукская 139, Безенчукская степная, Харьковская 46.

Лучшим генотипом является селекционная линия 2084Д-6 со средней величиной ЧП 438,2 с, что на 68,8 с больше, чем у стандарта. Эта линия в пяти средах входила в группу лучших генотипов. Сорта Безенчукская 210 и Безенчукская юбилейная превысили уровень стандарта на 53,4 и 52,8 с и входили в группу лучших в пяти и шести средах соответственно. Все сорта 3, 4, и 5-го этапов селекции (Харьковская 46, Безенчукская 139, Безенчукская 182, Безенчукская степная) вошли во вторую группу с минимальными значениями ЧП. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что на 6-м этапе эффективность селекции по ЧП увеличилась (табл. 3).

Таблица 3. Число падения сортов пшеницы твердой (2018–2023 гг.)
Table 3. Falling number of wheat durum varieties (2018–2023)

Сорт	Число падения по средам, секунд						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	средняя
Харьковская 46	353	270	381	440	444	420	373
Безенчукская 139, st	358	257	404	487	346	365	356
Безенчукская 182	333	256	374	497	421	354	350
Безенчукская степная	353	225	376	542	430	370	371
Памяти Чеховича	427	227	369	553	465	435	398
Марина	398	277	421	469	428	447	406
Безенчукская 205	325	273	409	428	367	467	383
Безенчукская 209	364	187	429	464	458	472	407
Безенчукская нива	367	247	385	428	510	410	393
Безенчукская 210	438	182	418	481	501	517	428
Безенчукская золотистая	380	268	395	513	503	390	403
Безенчукская крепость	395	227	357	532	530	428	416
Золотая	376	225	390	484	404	449	396
Безенчукская юбилейная	411	241	433	519	487	442	420
Триада	405	158	424	433	439	512	414
Таганрог	391	221	433	477	437	408	399

Продолжение табл. 3

Сорт	Число падения по средам, секунд						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	средняя
Безенчукский подарок	357	234	367	498	393	350	350
1922Д-14	350	95	378	441	443	363	332
Безенчукский вектор	390	172	410	586	428	504	427
Безенчукская параллель	391	231	515	570	432	354	405
2034Д-41	430	196	467	497	359	471	413
2084Д-6	440	250	482	500	519	438	437
НСР _{0,05}	35,9	29,3	33,2	44,2	42,5	45,1	38,4

Для более точной идентификации генотипов с высоким уровнем и стабильностью показателей ЧП первичные данные (ЧП по генотипам, вариантам и повторениям) были исследованы по методикам А. В. Кильчевского, Л. В. Хотылевой с определением коэффициента регрессии генотипа на среду по Eberhard, W. A. Russel (А. В. Кильчевский, Л. В. Хотылева, 1997). Помимо характеристики сортов и ли-

ний, получены данные по дифференцирующей способности изученных сред как фонов для отбора.

Общая (ОАС_г) и специфическая (σСАС_г) адаптивность генотипов и другие параметры, характеризующие отзывчивость, стабильность и селекционную ценность генотипов, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры адаптивной способности и стабильности генотипов по ЧП (2018–2023 гг.)
Table 4. Parameters of adaptive capacity and stability of genotypes by FN (2018–2023)

Генотип	V _i	σ ²	σ	I _{gi}	S _{gi}	СЦГ _г	K _{gi}	b _i
	(ОАС _г)	(G*E) _{gi}	САС _г					
Харьковская 46	-11,7	5879,4	183,8	0,26	47,8	228,7	1,02	0,94
Безенчукская 139, st	-27,0	10587,2	193,2	0,37	52,2	205,6	1,14	0,90
Безенчукская 182	-23,8	7051,7	182,5	0,21	49,0	217,7	1,01	0,88
Безенчукская степная	-13,7	6620,8	232,6	0,12	60,8	185,3	1,65	0,95
Памяти Чеховича	16,3	6184,6	262,4	0,09	63,6	189,9	2,10	1,02
Марина	10,3	3773,7	172,7	0,13	42,4	260,2	0,91	1,02
Безенчукская 205	-18,3	15459,3	159,5	0,61	42,2	242,8	0,78	0,96
Безенчукская 209	-0,7	5280,4	251,3	0,08	63,5	182,4	1,92	1,04
Безенчукская нива	-5,2	10185,3	197,9	0,26	50,6	223,2	1,19	0,99
Безенчукская 210	26,4	12404,6	302,3	0,14	71,5	166,2	2,78	1,09
Безезенчукская золотистая	11,7	6685,0	219,6	0,14	53,8	221,7	1,47	1,02
Безенчукская крепость	15,1	10692,6	273,6	0,14	66,5	179,2	2,28	1,06
Золотая	-8,4	2149,3	203,1	0,05	52,3	215,7	1,26	1,00
Безенчукская юбилейная	25,8	487,7	247,8	0,01	58,7	211,8	1,87	1,05
Триада	-1,2	16028,4	277,8	0,21	70,3	159,4	2,35	1,05
Таганрог	-1,9	1147,3	207,6	0,03	52,6	218,3	1,31	1,01
Безенчукский подарок	-30,0	5560,3	190,2	0,15	51,9	205,0	1,10	0,89
1922д-14	-51,5	9435,9	295,8	0,11	85,8	93,8	2,67	0,86
Безенчукский вектор	18,6	15652,5	327,9	0,15	79,0	136,7	3,28	1,09
Безенчукская параллель	19,2	20131,9	288,4	0,24	69,4	170,7	2,53	1,03
2034д-41	6,9	14991,5	261,7	0,22	64,9	181,2	2,09	1,05
2084д-6	41,8	4599,1	259,9	0,06	59,3	217,5	2,22	1,10
Средняя	0,0	8681,3	233,8	0,17	59,5	197,9	1,74	1,0

Примечание. ОАС_г – общая адаптивная способность; σ²(G*E)_{gi} – вариация взаимодействия «генотип–среда»; σСАС_г – параметр специфической адаптивной способности; I_{gi} – коэффициент нелинейности ответа генотипа на среду; S_{gi} – параметр относительной стабильности признака; СЦГ_г – селекционная ценность генотипа; K_{gi} – коэффициент компенсации; b_i – коэффициент регрессии генотипа на среду.

Анализ этих данных показывает, что ранжирование сортов по эффектам ОАС_г соответствует их рангам по средним значениям ЧП, полученным в эксперименте. Не обнаружено тесной взаимосвязи между ОАС_г и стабильностью описываемой параметром S_{gi} – коэффициент корреляции между этими признаками составил 0,19. В то же время взаимосвязь ОАС_г и σСАС_г была значимой – на уровне 5 % (r = 0,46), что наводит на мысль о доминирующем влия-

нии на величину ОАС_г лучших сортов значений признака в отдельные годы. Коэффициент компенсации у большинства сортов превышал единицу и варьировал от 0,69 у сорта Харьковская 46 до 3,28 у Безенчукского вектора, что предполагает преобладание в данном наборе генотипов эффектов дестабилизации. Линейный характер реакции всех сортов на среду подтверждается коэффициентами нелинейности I_{gi}, которые изменялись от 0,01 до 0,61, то есть

не превышали единицу. Если судить по коэффициенту регрессии b_i , наибольшей отзывчивостью на среду отличались линия 2084Д-6, сорта Безенчукский вектор и Безенчукская 210, наименьшей – линия 1922Д-14, сорта Безенчукская 182, Безенчукский подарок и Безенчукская 139.

Таким образом, если вести отбор генотипов с максимальным значением ЧП во всей совокупности сред, то необходимо в качестве критерия отбора использовать показатель OAC_i и в данном наборе генотипов в группу лучших включить селекционную линию 2084Д-6 и сорта Безенчукская 210, Безенчукская крепость, Безенчукская юбилейная, Безенчукская параллель, Безенчукский вектор, Памяти Чеховича, Безенчукская золотистая, Марина. В то же время в группу с наибольшей стабильностью по параметру относительной стабильности (S_{gi}) из генотипов с высокими значениями OAC_i включены только три – Безенчукская золотистая, 2084Д-6 и Безенчукская юбилейная. Низкая стабильность по параметрам S_{gi} и σSAC_i среди генотипов с высокой OAC_i установлена у следующих генотипов – Памяти Чеховича, Безенчукский вектор, Безенчукская 210. Интегральный признак – CCG_i – в данном эксперименте формировался при доминировании параметров стабильности. В связи с этим в группу лучших генотипов вошли сорта с низкой OAC_i – Харьковская 46, Безенчукская 139, Безенчукская 182, Безенчукская 205, Безенчукская нива. В группу лучших по CCG_i

с учетом параметров OAC_i включены следующие генотипы: Марина, 2084Д-6, Безенчукская юбилейная, Безенчукская золотистая с варьированием CCG_i от 208,8 до 260,2 и OAC_i – от 10 до 41,8. У стандарта эти параметры составили: $OAC_i = -27,0$; $CCG_i = 205,6$. Коэффициент корреляции между параметрами OAC_i и b_i , составивший 0,93, наводит на мысль о том, что величина OAC_i и среднее значение ЧП по всем средам детерминируются при доминирующем влиянии отзывчивости генотипа на благоприятные для формирования высоких значений ЧП условия среды. Это связано с тем, что провокационный фон в данном эксперименте имел место только в одном случае из шести – в 2019 году. Эффекты этого фона слабо повлияли на среднюю величину ЧП и OAC_i .

Таким образом, отбор устойчивых к прорастанию сортов по параметру ЧП целесообразно вести по показателям OAC_i , σSAC_i и S_{gi} в многолетнем эксперименте, включающем провокационные фоны. По этим показателям выделены следующие генотипы – Марина, Безенчукская юбилейная, 2084Д-6, Безенчукская золотистая.

Очевидно, что эффективность отбора увеличивается при размещении экспериментальных посевов на фонах с высокой дифференцирующей способностью, типичностью и предсказуемостью отбора.

Результаты оценки дифференцирующей способности фонов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Параметры дифференцирующей способности среды в качестве фона для отбора (2018–2023 гг.)
Table 5. Parameters of the differentiating capacity of the environment as a background for selection (2018–2023)

Среда	$u+d_k$	d_k	$\sigma^2(G^*E)_{ek}$	σDCC_k	I_{ek}	S_{ek}	K_{ek}	t_k	P_k	Фон
2018	383	-13	371	151	0,02	39	2,2	0,81	0,32	Стабилизирующий
2019	224	-173	2043	202	0,05	90	4,0	0,18	0,17	Анализирующий
2020	410	14	1123	182	0,03	44	3,3	0,53	0,23	Анализирующий
2021	493	96	1579	207	0,04	42	4,2	0,46	0,19	Анализирующий
2022	443	47	1830	234	0,03	53	5,4	0,56	0,29	Анализирующий
2023	426	30	2044	241	0,04	57	5,7	0,51	0,29	Анализирующий
средняя	376	0,0	1498	203	0,03	54	4,1	0,51	0,25	

Примечание. u – среднее значение ЧП по опыту; d_k – эффекты среды; $\sigma^2(G^*E)_{ek}$ – взаимодействие «среда–генотип»; σDCC_k – стандартное отклонение дисперсии дифференцирующей способности среды; I_{ek} – коэффициент нелинейности ответа генотипов на конкретную среду; S_{ek} – относительная дифференцирующая способность среды; K_{ek} – коэффициент компенсации среды; t_k – коэффициент типичности среды; P_k – коэффициент предсказуемости эффективности отбора.

Во всех средах изменчивость носила линейный характер ($I_{ek} \approx 0$), что предполагает эффективный отбор по OAC_i с учетом параметров стабильности. Коэффициент компенсации K_{ek} во всех средах больше единицы, что указывает на совпадение знаков эффектов взаимодействия и среды с преобладанием дестабилизации и хорошими перспективами для отбора. Но все же различия по дифференцирующей способности между шестью изученными средами имели место.

Максимальное значение ЧП и взаимодействия среды с генотипами наблюдалось в 2021 году. Дифференцирующая способность

среды по S_{ek} этого фона была ниже средних значений по опыту, но высокий дестабилизирующий эффект (K_{ek} больше среднего значения по опыту) позволяет отнести его к анализирующим фонам. Среда 2019 г. с минимальным средним по сортовой популяции значением ЧП выделилась по относительной дифференцирующей способности среды (S_{ek}), но абсолютные значения σDCC_k и особенно типичности (t_k) и предсказуемости (P_k) среды, значительно уступали средним по эксперименту. Тем не менее этот фон можно отнести к анализирующим. Однако необходимо учитывать, что вероятность реализации отобранных в подобной

среде генотипов по величине OAC_i в условиях среды, отличающихся от 2019 г., может быть невысокой. В то же время в средах, аналогичных 2019 г., предполагается эффективная идентификация генотипов с высокими значениями SAC_i . По комплексу признаков критериям анализирующего фона соответствовали среды 2020, 2021 и 2023 годов. Среда 2018 г., несмотря на наличие дестабилизирующего эффекта (K_{ek} больше единицы), значительно уступает всем остальным фонам по эффектам взаимодействия среды с генотипами ($\sigma^2(G \times E)_{ek}$) и дифференцирующей способности среды (DSS_{ek} , S_{ek}), что позволяет отнести ее в данном наборе сред к стабилизирующим фонам. Эффект стабилизирующего отбора на этом фоне подтверждается высокими оценками типичности ($tt_k = 0,83$) и предсказуемости ($P_k = 0,32$), что позволяет использовать параметры ЧП сортов на этом фоне для прогнозирования их реакции в системе сред.

Таким образом, условия среды экспериментального поля Самарского НИИСХ, складывающиеся в течение нескольких лет, формируют достаточно эффективную систему фонов для отбора и стабилизации признака «число падения» пшеницы твердой яровой.

Выводы. В результате изучения признака ЧП в многолетнем (2018–2023 гг.) эксперименте установлено влияние на варьирование признака эффектов генотипа с долей 6,01 %, среды – 72,24 % и взаимодействия «генотип–среда» – 16,86 %. В среднем по эксперименту эффекты OAC_i на величину ЧП сортов последнего, 6-го, этапа селекции (2084Д-6, Безенчукская 210, Безенчукский вектор, Безенчукская юбилейная, Безенчукская крепость, Безенчукская параллель, Памяти Чеховича, Безенчукская крепость, Безенчукская золотистая) варьировали от 10,3 до 41,8 единицы, что значительно пре-

вышает соответствующие эффекты стандарта Безенчукская 139 (-27,0) и сортов предыдущих этапов селекции – Харьковская 46 (-11,7), Безенчукская 182 (-23,8), Безенчукская степная (-13,7). По комплексному параметру SCG_i , характеризующему в одной цифре отзывчивость и стабильность, среди сортов с положительными эффектами OAC_i выделены следующие: Марина ($OAC_i = 10,3$, $SCG_i = 228,7$), 2084Д-6 ($OAC_i = 41,8$, $SCG_i = 208,6$), Безенчукская юбилейная ($OAC_i = 25,8$, $SCG_i = 211,8$), Безенчукская золотистая ($OAC_i = 11,7$, $SCG_i = 221,7$). Соответствующие значения стандарта составили: $OAC_i = -27,0$; $SCG_i = 205,6$. Перечисленные выше сорта рекомендуются использовать в качестве исходного материала в селекции по параметру «число падения».

Пять исследованных фонов по DSS_k (182–241), коэффициенту S_{ek} (42–90), коэффициенту K_{ek} (3,26–5,71) отнесены к анализирующим фонам и один к стабилизирующему, который характеризуется высокой типичностью и предсказуемостью, что позволяет прогнозировать реакцию сортов в системе сред и отбирать генотипы, выделившиеся по параметрам адаптивности и стабильности. По результатам данного эксперимента с этой точки зрения целесообразно выделить перспективные в селекции по ЧП генотипы – 2084Д-6 и Безенчукскую юбилейную. Таким образом, эффекты среды экспериментального поля Самарского НИИСХ, за ряд лет образуют систему фонов для постепенного улучшения и стабилизации числа падения в процессе селекции пшеницы твердой яровой.

Финансирование. Исследование было поддержано грантом Российского научного фонда № 23-16-00041 (<https://rscf.ru/project/23-16-00041/>).

Библиографические ссылки

1. Кильчевский А. В., Хотылева Л. В. Экологическая селекция растений. Минск: Тэхналогія, 1997. 372 с.
2. Чахеева, Т. В. Устойчивость к предуборочному прорастанию зерна сортов твердой пшеницы по параметру «число падения» // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. Т. 52, № 4. С. 114–120. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-4-114-120
3. Гапонов С. Н., Шутарева Г. И., Цетва Н. М., Цетва И. С., Милованов И. В., Бурмистров Н. А., Жиганова Е. С., Соловова Н. С. Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185, № 1. С. 184–190. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190
4. Ложкин А. Г., Димитриев В. Л., Мальчиков А. П. Влияние норм высева семян на продуктивность яровой твердой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16, № 1. С. 83–88. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-83-88.
5. Beres B. L., Rahmani E., Clarke J. M., Grassini P., Pozniak C. J., Geddes C. M., Porker K. D., May W. E., Ransom J. K. A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by Exploring Genotype, Environment, and Management ($G \times E \times M$) Synergies // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11, Article number: 568657. DOI: 10.3389/fpls.2020.568657
6. Cannon A. E., Marston E. J., Kiszonas A. M., Hauvermale A. L., See1 D. R. Late-maturity α -amylase (LMA): exploring the underlying mechanisms and end-use quality effects in wheat // Planta. 2022. Vol. 255, № 2. DOI: 10.1007/s00425-021-03749-3
7. Perten, H. Application of the falling number method for evaluating alpha-amylase active // Cereal Chem. 1964. Vol. 41(3), P. 127–139.
8. Peery P. S., Carle S. U., Wysock M., Pumphery M. O., Steber C. M. LMA or vivipary? Wheat grain can germinate precociously during grain maturation under the cool conditions used to induce late maturity alpha-amylase (LMA) // Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14, Article number: 1156784. DOI: 10.3389/fpls.2023.1156784

References

1. Kil'chevskii A. V., Khotyleva L. V. *Ekologicheskaya selektsiya rastenii* [Ecological plant breeding]. Minsk: Tekhnologiya, 1997. 372 s.
2. Chakheeva, T. V. Ustoichivost' k preduborochnomu prorastaniyu zerna sortov tverdoi pshenitsy po parametru «chislo padeniya» [Resistance to pre-harvest grain germination of durum wheat varieties according to the parameter 'a falling number'] // *Vestnik Ul'yanovskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2020. T. 52, № 4. S. 114–120. DOI: 10.18286/1816-4501-2020-4-114-120
3. Gaponov S.N., Shutareva G. I., Tsetva N. M., Tsetva I. S., Milovanov I. V., Burmistrov N. A., Zhiganova E. S., Solovova N. S. *Ekologicheskaya adaptivnost' sortov yarovoy tverдой pshenitsy (Triticum durum Desf.) saratovskoy selektsii* [Environmental adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars developed in Saratov] // *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii*. 2024. T. 185, № 1. S. 184–190. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190
4. Lozhkin A. G., Dimitriev V. L., Mal'chikov P.N. *Vliyaniye norm vyseva semyan na produktivnost' yarovoy tverдой pshenitsy* [Influence of seeding rates on the productivity of spring durum wheat] // *Zernovoye khozyaystvo Rossii*. 2024. T. 16, № 1. S. 83–88. DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-83-88
5. Beres B. L., Rahmani E., Clarke J. M., Grassini P., Pozniak C. J., Geddes C. M., Porker K. D., May W. E., Ransom J. K. A Systematic Review of Durum Wheat: Enhancing Production Systems by Exploring Genotype, Environment, and Management (G × E × M) Synergies // *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11, Article number: 568657. DOI: 10.3389/fpls.2020.568657
6. Cannon A. E., Marston E. J., Kiszona A. M., Hauvermale A. L., See1 D. R. Late-maturity α-amylase (LMA): exploring the underlying mechanisms and end-use quality effects in wheat // *Planta*. 2022. Vol. 255, № 2. DOI: 10.1007/s00425-021-03749-3
7. Perten, H. Application of the falling number method for evaluating alpha-amylase active // *Cereal Chem*. 1964. Vol. 41(3), P. 127–139.
8. Peery P. S., Carle S. U., Wysock M., Pumphery M. O., Steber C. M. LMA or vivipary? Wheat grain can germinate precociously during grain maturation under the cool conditions used to induce late maturity alpha-amylase (LMA) // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14, Article number: 1156784. DOI: 10.3389/fpls.2023.1156784

Поступила: 11.06.24; доработана после рецензирования: 29.07.24; принята к публикации: 29.07.24.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Мальчиков П. Н. – концептуализация исследования, подготовка опыта, выполнение полевых опытов, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Шаболкина Е. Н. – проведение лабораторных опытов, сбор данных, подготовка рукописи; Мясникова М. Г. – выполнение полевых опытов, сбор данных; Пронович Л. В. – проведение лабораторных опытов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.