DOI

УДК 633.111 «321»:631.527

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ АДАПТИВНОСТИ ГЕНОТИПОВ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ ВДОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВЕКТОРА

СЮКОВ Валерий Владимирович, *Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН*

ЗАХАРОВ Владимир Григорьевич, *Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства– филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН*

МАЛЬЧИКОВ Петр Николаевич, *Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН*

КРИВОБОЧЕК Виталий Григорьевич, *Пензенский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ Федерального научного центра лубяных культур*

НИКОНОВ Владимир Иванович, *Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского Федерального исследовательского центра РАН*

ВАСИЛОВА Нурания Зуфаровна, *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»*

ГАНЕЕВ Вадим Анварович, *ТОО «Научно-производственная фирма «Фитон»*

ГУЛАЕВА Надежда Васильевна, *Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН*

МЕНИБАЕВ Асхат Исмаилович, *Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН*

Подбор эффективных методов оценки таких сложных свойств генотипа, как «адаптивность» и «стабильность» в каждой конкретной экологической ситуации – актуальная исследовательская задача. Существование различных методов и методических подходов к решению этих проблем объясняется историей развития исследований количественных признаков и феномена генотип-средовых взаимодействий. Целью исследований было сравнение эффективности различных методов определения онтогенетической адаптивности формирования урожайности сортов яровой мягкой пшеницы программы «Экада». Объектом исследований была модельная популяция, сформированная из сортов яровой мягкой пшеницы, различавшихся по генеалогии, месту создания и адаптивности к комплексам абиотических и биотических факторов среды: Башкирская 26, Дуэт, Землячка, Казанская юбилейная, Любава, Любава 5, Маргарита, Нива 2, Омская 35, Пирамида, Тулайковская 105, Экада 6, Экада 70. Посев осуществлялся в 6 экологических точках в течение трех лет (2009–2011 гг.). Изучали 16 параметров, которые основаны на методах регрессионного, дисперсионного анализа, характеризующих линейную и нелинейную реакцию генотипов на среду и модели AMMI (аддитивные основные эффекты и мультипликативное взаимодействие). Показано, что не существует универсального параметра, способного адекватно оценить биологическую сущность понятий «экологическая пластичность», «гомеостатичность», «стабильность» и т.д. Основной причиной сложности является то, что реакция генотипов на среду многомерна, но параметрический подход пытается превратить ее в одномерную проблему через единый индекс устойчивости [27].

Определена целесообразность использования для оценки селекционного материала нескольких статистических параметров: σCACi, Sgi – для оценки фенотипической стабильности; b_i, OAC_i – для оценки отзывчивости на благоприятный комплекс среды и предсказания ответа генотипа на среду; СЦГi, ASV, YSV – для комплексной оценки селекционной ценности генотипа. Методами главных компонент и кластерного анализа определена обособленность трёх не наследуемых параметров (Sd^2, λ_i, Wi), что подтверждает данные, полученные C.S. Lin, M.R. Bins [26] об их бесполезности в селекции на адаптивность и стабильность признака. На основе совокупности изученных параметров для использования в селекции сортов широкого ареала предложены сорта: Экада 70, Экада 6, Землячка, Дуэт, Омская 35. Сорт Маргарита заметно выделялся эффективным использованием ресурсов в благоприятных условиях среды (OACi, b_i), что предполагает использование его в соответствующих селекционных программах.

Введение. Центральным звеном экологической селекции, по нашему мнению, является отбор фенотипов вдоль сформированного эколого-гического вектора. В связи с этим очень важным моментом являются подходы к отбору и методология оценки признаков варьирующих по точкам

вектора. Это определяется тем, что генетические системы, детерминирующие количественные признаки (в том числе урожайность) экспрессируются в фенотипе в зависимости от лимитирующих факторов среды [3, 14], а эффективность их идентификации по фенотипу зависит от методов оценки, позволяющих отчетливо определить эффекты генетических систем и генотип-средовых взаимодействий. Таким образом, отбор флуктуирующего эпигенотипа (представляющего собой спектр фенотипов, который инициируется амплитудой градиента среды) можно определить как выбор меры выражения исследуемого признака в форме параметров, адекватно (наиболее точно) описывающих эту динамическую систему (эпигенотип) по константам (фенотипам), формируемым генотипической реакцией в наборе конкретных условий среды, в нашем случае вдоль экологического вектора.

Многочисленные исследования, направленные на поиск наиболее информативных методов оценки генотипов в сериях многосредовых испытаний показали, что не существует универсального параметра, способного адекватно оценить биологическую сущность понятий «экологическая пластичность», «гомеостатичность», «стабильность» и т.д. [7, 9, 10, 11, 20, 21, 23, 27]. Основной причиной сложности является то, что реакция генотипов на среду многомерна, но параметрический подход пытается превратить ее в одномерную проблему через индекс устойчивости [27]. Тем не менее, достаточно эффективным для идентификации фенотипического проявления у генотипов свойств как широкой адаптации, так и локального значения является использование комплекса статистических параметров на основе множества экологических экспериментов [18, 28]. Статистические методы (вся совокупность), позволяющие разложить дисперсию изучаемого количественного признака на эффекты среды, генотипа, генотип-средовые взаимодействия и исследовать характер взаимодействия каждого генотипа со средой, основаны на дисперсионном, линейном и нелинейном регрессионном анализе, многомерном анализе и непараметрической статистике [8, 10].

При помощи дисперсионного анализа (ANOVA) сумма квадратов варьирования урожайности в целом по эксперименту аддитивно распределяется на эффекты среды, генотипов и их взаимодействие. При этом содержание генотип-средовых взаимодействий не анализируется. Регрессионный метод дает информацию о реакции генотипов на индексы (градиент) среды, рассчитываемые по среднепопуляционному значению признака в каждой среде с интерпретациями линейного и нелинейного отклика генотипа на среду. По мнению А.В. Кильчевского и Л.В. Хотылевой, параметры общей адаптивной способности (OACi) и специфической адаптивной способности (CACi), используемые для вычисления относительной стабильности генотипа (Sgi) и селекционной ценности генотипа (СЦГi), учитывают линейную и нелинейную реакцию генотипа на условия среды [10]. Все статистические параметры, вычисляемые на основе методологии дисперсионного и регрессионного анализов, C.S. Lin, M.R. Bins по результатам диаллельных скрещиваний костра безостого, распределили на наследуемые и ненаследуемые [26]. К наследуемым отнесли группу параметров, рассчитанных на основе средовой вариансы, и параметр стабильности Pi (мера превосходства сорта), предложенного C.S. Lin, M.R. Bins. В этих же исследованиях выяснилось, что эковаленса Wricke [32] и параметр Sd^2 не наследуются. В значительной степени неудача в селекции на стабильность объясняется использованием для оценок стабильности ненаследуемых статистических характеристик C.S. Lin, M.R. Bins [26].

Методы многомерного шкалирования позволяют более глубоко проанализировать комплексы данных [6, 15]. В США и Канаде эти методы широко используется с применением Biplot analysis на основе первых двух главных компонент – principal component analysis – PCA [24, 31]. Более того, по мнению ряда исследователей [17, 19], биплот-анализ дает наиболее адекватную информацию о генотип-средовых взаимодействиях, позволяя визуализировать на графике взаимное расположение генотипов и сред. В то же время метод главных компонент относится к мультипликативным моделям, позволяющим исследовать генотип-средовые взаимодействия, но при этом аддитивные основные эффекты ни генотипов, ни окружающей среды не исследуются. Объединение дисперсионного анализа (ANOVA) и метода PCA в модели AMMI (аддитивные основные эффекты и мультипликативное взаимодействие) позволяет более эффективно использовать для оценки адаптивности генотипов [33, 25].

В связи с этим целью настоящих исследований было сравнение эффективности различных методов определения онтогенетической адаптивности формирования урожайности сортов яровой мягкой пшеницы программы «Экада», обоснование системы оценок для отбора вдоль экологического вектора и характеристика сортов в этих координатах.

Методика исследований. Объектом исследований была модельная популяция, сформированная из сортов яровой мягкой пшеницы, различавшихся по генеалогии, месту создания и адаптивности к комплексам абиотических и биотических факторов среды: Башкирская 26, Дуэт, Землячка, Казанская юбилейная, Любава, Любава 5, Маргарита, Нива 2, Омская 35, Пирамида, Тулайковская 105, Экада 6, Экада 70. Все сорта относятся к среднеспелой группе и незначительно различаются по продолжительности этапов развития. Посев осуществлялся в 6 экологических точках сеялками ССФК-7 и

СН-10Ц в трехкратной повторности (методом рендомизированных блоков), на площади делянки в 10 м^2. Опыт закладывался в течение трех лет (2009–2011 гг.). Характеристика условий среды экологических пунктов представлена в табл. 1. Географически пункты располагаются по долготе с запада от 45°13´ (Пенза) до 62°04´ (Фитон) на востоке, варьируя по широте от 52°59´ (Безенчук) до 56°35´ (Чишмы). Наиболее суровые условия для возделывания яровой пшеницы обычно складываются в Безенчуке, где два года из трех бывает засуха. Высокий продукционный потенциал среды имеют фоны в экопунктах «Казань» и «Ульяновск», средний в «Чишмы» и «Фитоне». Экопункт «Пенза» по продукционным возможностям значительно варьируя по годам от уровня Безенчука до уровня Казани. В годы исследований в среднем за 2009–2011 гг. исследуемые среды расположились в следующем порядке по возрастанию средней урожайности: 1 – Безенчук; 2 – Пенза; 3 – Чишмы; 4 – Фитон; 5 – Ульяновск; 6 – Казань. Во всех пунктах по годам исследований наблюдались значительные колебания гидротермических коэффициентов (ГТК).

В качестве возможных критериев оценки гомеоадаптивности изучали:

1) b_i – пластичность (коэффициент регрессии сорта на индекс среды) [22];

2) Sd^{2-} Экорегрессия (варианса отклонений от линии регрессии) [22];

3) a_i – коэффициент мультипликативности [4];

4) Hom – коэффициент гомеостатичности [16];

5)St^2 – коэффициент стабильности [13];

6) W_i – эковалентность [32];

7) P_i – мера превосходства сорта [26];

8) ОАС – общая адаптивная способность [10];

9) σ^2 CAC_i^2 – варианса специфической адаптивной способности [10];

10) Sgi – относительная стабильность генотипа [10];

11) СЦГ – селекционная ценность генотипа [10];

12) Cm – коэффициент стабильности Мартынова [12];

13) α_i – параметр линейного отклика генотипа на среду [30];

14) λ_i – параметр отклонения от линейного отклика генотипа на среду [30];

15) ASV (AMMI stability value) – показатель фенотипической стабильности генотипов, рассчитанный на основе модели AMMI, объединяющей дисперсионный анализ (ANOVA) и мультипликативную модель взаимодействия на основе метода главных компонент;

16) YSI – индекс стабильности урожайности, рассчитанный на основе рангов сортов по ASV и урожайности.

Параметры 1–14 основаны на дисперсионном и регрессионном анализах генотипов и среды.

Параметры 15–16 рассчитаны с применением методологии модели AMMI (аддитивные основные эффекты и мультипликативное взаимодействие) по формулам, предложенным Purchase et al [29]: ASV= = $\{SSIPC1/SSIPC2(IPC1score)^2\}^{1/2}$ + (IPC2score), где SSIPC1 и SSIPC2 – сумма квадратов первых двух главных компонент, полученных на основе дисперсии взаимодействия «генотип-среда», IPC1score и IPC2score – величины, характеризующие взаимодействия генотипа на основе первых двух главных компонент; YSV = RASV + RY, где RASV – ранг генотипа по уровню ASV, RY – ранг по урожайности.

Экспериментальными данными, включенными в исследовательский процесс, были данные по урожайности зерна сортов в экологических точках (год – пункт). Расчеты всех параметров выполнены в соответствии с оригинальными формулами и с использованием программы Агрос 2.13. Всю совокупность предполагаемых параметров гомеоадаптивности подвергли корреляционному анализу [2]. Факторный анализ данных по урожайности и параметров гомеоадаптивности с выделением главных компонент проведен на основе матрицы коэффициентов корреляции [1]. Матрица коэффициентов корреляции анализировалась с помощью кластерного анализа [5].

Результаты исследований. Необходимый для реализации поставленных целей уровень генотипической вариабельности обеспечивали сорта, включенные в эксперимент, различавшиеся по генеалогии, месту создания и адаптивности к действию спектра абиотических и биотических факторов среды. Полученные экспериментальные данные – интегральный показатель «урожай зерна» и параметры гомеоадаптивности представлены в табл. 1. Средняя урожайность во всех средах по сортам варьировала от 22,1 ц/га (Тулайковская 105) до 27,5 ц/га (Маргарита). По критерию Дункана, вычисленного на основе дисперсион-

Таблица 1

Характеристика условий среды в экопунктах проведения исследований

Экопункт	Средняя урожайность, 2009–2011 гг., т/га	Варьирование ГТК, 2009–2011 гг. minimum-maximum	Координаты	
			широта	долгота
Безенчук	1,44	0,3–0,8	52°59´	49°26´
Ульяновск	3,01	0,35–1,3	54°31´	48°16´
Пенза	1,88	0,13–1,2	53°35´	45°13´
Чишмы	2,34	0,5–0,9	54°35	55°22´
Казань	3,36	0,23–1,3	55°32´	49°28´
Фитон	2,71	0,2–1,5	53°44´	62°04´

ного анализа данных по урожаю зерна, все сорта можно распределить на три группы. В группу наиболее продуктивных по результатам изучения во всех средах вошли сорта: Маргарита, Экада 70, Казанская юбилейная, Омская 35. К низкопродуктивным сортам отнесены Тулайковская 105, Башкирская 26, Любава 5, Любава и Пирамида, остальные три сорта Землячка, Дуэт, Экада 6 показали средний уровень продуктивности. Значительно более «рельефно» распределение или дифференциацию сортов представляет система параметров гомеоадаптивности, учитывающая реакцию сортов на условия и характеризующая их стабильность и отзывчивость по градиенту среды. При этом отчетливо при сравнении результатов, характеризующих особенности сортов, полученных на основе различных показателей, просматривается степень их информационной адекватности, по которой они образуют группы или кластеры. Это подтверждается визуализацией взаимосвязей параметров гомеоадаптивности в биплоте двух главных компонент, охватывающих 72,6 % вариации и результатами кластерного анализа (выполненного с применением варианта Q – техники) матрицы коэффициентов корреляции этих же параметров (табл. 2, рис. 1).

Параметры, полученные на основе регрессионного анализа и на основе средовой вариансы (последние отнесены по классификации C.S. Lin, M.R. Bins к наследуемым – I тип), образовали три кластера. Первая корреляционная плеяда из этих групп объединила пять параметров (b_i, α_i, σ^2CAC_i, ai, Sgi), вторая три (Hom, St^2, $СЦГ_i$), третья два (OAC_i, Cm) с пределами варьирования коэффициентов корреляции 0,643–1,0; 0,865–0,980; 0,955; соответственно. Наследуемый параметр Pi (IV тип) статистически не связанный с регрессионным анализом, вошел в один кластер с параметрами рассчитанными на основе модели AMMI, ASV и YSV с коэффициентами корреляции – 0,867–0,948. Не наследуемый по классификации C.S. Lin, M.R. Bins параметр Sd^2 (II тип) статистически (коэффициент корреляции –1,0) был идентичен параметру λ_i. Вне кластера оказался не наследуемый параметр Wricke (Wi) (III тип).

Почти аналогичный результат получен с применением метода главных компонент и биплот-анализа (см. рис. 1). Несоответствие данным кластерного анализа отмечено только для параметра специфической адаптивной способности (σCAC_i), точка, отображающая расположение этого параметра на графике, значительно отклонилась от параметров, образовавших первую группу по результатам кластерного анализа. Это связано с отклонением σCAC_i по второй компоненте.

Таким образом, полученные результаты отчетливо показывают обособленность трех не наследуемых параметров от кластеров, включающих наследуемые параметры, что подтверждает данные, полученные C.S. Lin, M.R. Bins [26]. Поскольку не наследуемые параметры характеризуют не реализуемые в процессе отбора особенности генотипов, их дальнейшее обсуждение в нашем эксперименте не проводилось.

Информативность параметров, вошедших в одни кластеры с наследуемыми в нашем эксперименте, оказалась, не смотря на статистическую общность, различной. По величинам коэффициента регрессии (bi) и параметра линейного отклика генотипа на среду (α_i), характеризующих отзывчивость генотипов, среди исследуемых сортов

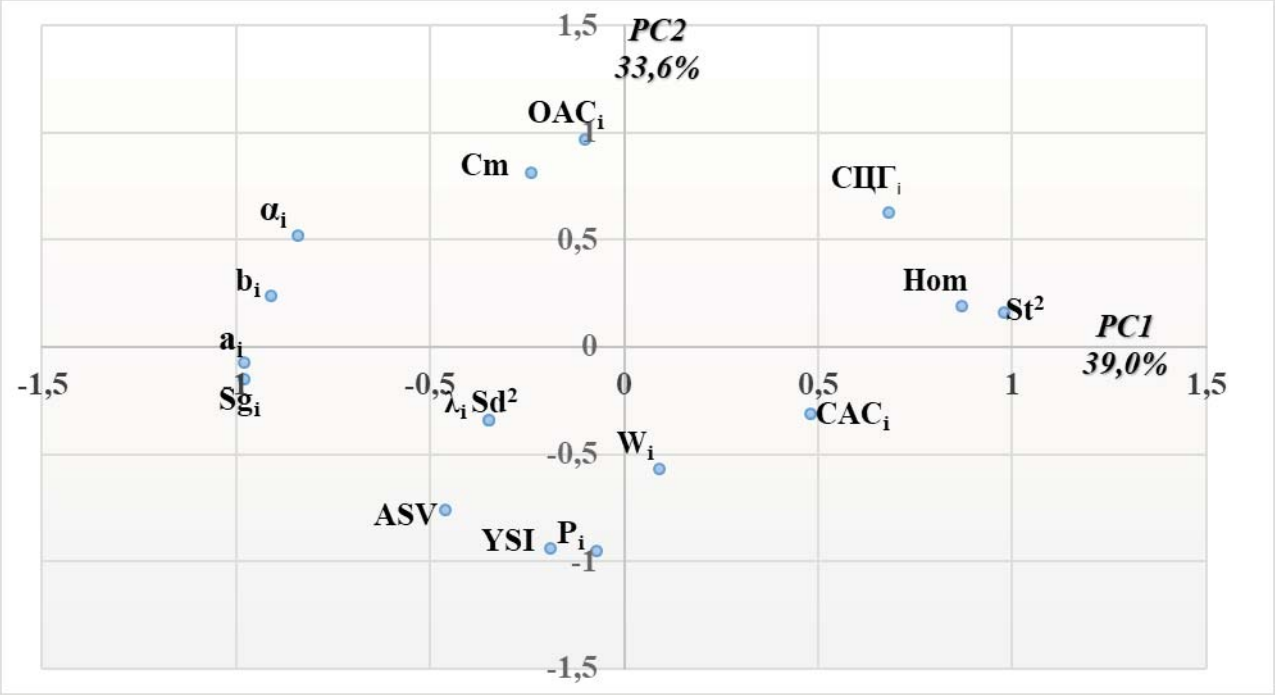

Рис. 1. Биплот распределение параметров гомеоадаптивности в системе двух главных компонент, учитывающих 72,6 % их взаимосвязи при параллельной оценке исследуемого набора генотипов

Таблица 2

Урожайность и параметры гомеоадаптивности сортов яровой мягкой пшеницы 2009–2011 гг.

Сорт	Урожайность, ц/га	St^2	Hom	bi	S_{d_2}	Wi	Cm	Ai	Pi	γi	ai	OAC_i	σCAC_i	Sgi	$СЦГ_i$	ASV	YSI
Башкирская 26	23,7 b	0,76	1,07	0,97	8,80	10,3	-8,1	-0,03	18,7	2,49	2,03	-1,5	47,6	200,6	11,6	1,1794	22
Дуэт	25,7 e-h	0,81	1,41	0,91	16,00	8,6	-10,4	-0,09	9,0	4,53	1,89	0,5	45,8	177,8	14,0	1,0812	13
Землячка	25,4 ef	0,81	1,34	0,94	6,80	7,6	7,4	-0,06	7,3	1,92	1,92	0,7	46,4	179,1	14,1	1,0797	9
Казанская юбилейная	26,8 g-i	0,75	0,96	1,12	10,20	10,2	5,1	0,12	7,9	2,89	2,06	1,6	55,3	206,6	12,6	1,1322	12
Любава	24,0 bcd	0,68	0,93	1,13	14,90	7,7	1,0	0,13	18,0	4,22	2,19	-1,2	55,9	232,7	9,7	1,1805	21
Любава 5	23,9 bcd	0,77	1,16	0,94	11,80	12,2	-4,8	-0,06	17,4	3,34	2,00	-1,3	46,9	196,3	11,9	1,2166	24
Маргарита	27,5 i	0,74	0,93	1,16	15,90	11,6	11,0	0,16	6,5	4,50	2,07	2,3	57,5	209,3	12,8	1,1214	9
Нива 2	25,3 c-f	0,80	1,27	0,94	9,10	12,0	9,3	-0,06	12,3	2,58	1,94	0,1	45,3	179,3	13,7	1,0807	13
Омская 35	26,4 f-i	0,78	1,19	1,04	6,20	8,8	-1,6	0,04	5,2	1,75	1,99	1,2	50,7	191,9	13,5	1,0865	11
Пирамида	24,2 bcd	0,80	1,42	0,89	11,80	10,3	-6,5	-0,11	12,4	3,34	1,93	-1,0	44,4	184,0	12,8	1,0448	11
Тулайковская 105	22,1 a	0,77	1,05	0,87	11,20	12,2	-18,7	-0,13	31,8	3,17	1,99	-3,1	43,3	195,9	11,0	1,1933	25
Экада 6	25,8 f-h	0,78	1,15	1,00	11,00	9,6	8,1	0,00	9,0	3,11	1,98	0,6	49,5	191,8	13,2	1,0363	7
Экада 70	26,8hi	0,77	1,22	1,08	6,10	7,1	8,6	0,08	3,8	1,73	2,02	1,6	52,7	196,3	13,4	1,0609	5

Примечание: цифры сопровождаемые одинаковыми буквами по критерию Дункана различаются недостоверно.

лучшими были: Маргарита, Любава, Казанская юбилейная, Экада 70, Омская 35. В эту группу отзывчивых сортов на благоприятный комплекс среды вошли все сорта, отнесенные по среднему урожаю в эксперименте к высокопродуктивным и один (Любава) из группы низкопродуктивных. Низкая отзывчивость (bi = 0,87–0,94) отмечена у сортов Тулайковская 105, Пирамида, Дуэт. Из них первые два относятся к группе низкопродуктивных, Дуэт показал среднюю продуктивность в эксперименте. Очевидно, что эти результаты определяются генотипическими особенностями продуктивных сортов в условиях обеспеченных фонов. Тем не менее, при использовании параметра bi необходимо учитывать мнение C.S. Lin, M.R. Bins о том, что наследуются только значения bi < 1,0 [26]. Видимо подобные ограничения могут распространяться и на параметр α_i

По вариансе специфической адаптивной способности (σCAC_i), являющейся мерой стабильности, сорта расположились в следующем порядке: Тулайковская 105, Пирамида, Нива 2, Дуэт, Землячка, Любава 5, Башкирская 26, Экада 6, Омская 35, Экада 70, Казанская юбилейная, Любава, Маргарита. При этом отчетливо проявилось противоречие между величинами среднего урожая и стабильностью. Низкопродуктивный сорт Тулайковская 105 оказался самым стабильным, наиболее продуктивный сорт Маргарита по стабильности оказался на последнем месте. Тем не менее, ряд сортов (Дуэт, Экада 6) при урожайности выше среднепопуляционной (25,3 ц/га) по величинам σCACi были в числе лучших – 45,8 и 49,5 соответственно. Среди продуктивных сортов наиболее стабильными были Экада 70 и Омская 35.

Параметры Sgi, ai, Hom, St^2 по статистическим подходам к их вычислению учитывают среднюю величину признака в различных средах и стабильность его формирования, являясь, таким образом, интегральными показателями, оценивающими потенциальные возможности сорта и его устойчивость. Ранги сортов, вычисленные на их основе, в нашем эксперименте были практически идентичны. Лучшими были: Дуэт, Землячка, Нива 2, Пирамида, Экада 6. Негативно оценивались Любава, Маргарита, Казанская юбилейная, Башкирская 26. Близкие к этим результаты получены на основе *СЦГi* – интегрального параметра, при вычислении которого используется среднее значение Sgi по всем генотипам в эксперименте. Отбор по этому параметру при низких среднепопуляционных значениях Sgi будет формировать стабильные генотипы, при высоких значениях – продуктивные.

Оценка сортов по OACi практически повторяет их характеристику по средней урожайности в эксперименте: чем выше урожайность, тем выше оценка по OACi. Коэффициент стабильности Мартынова (Cm), вошедший в один кластер с OACi, характеризует сорта со значительным смещением баланса в соотношении продуктивность/стабильность в сторону продуктивности и может эффективно использоваться в селекции сортов для интенсивных технологических комплексов.

Показатели ASV и YSV, рассчитанные с применением методологии модели AMMI, включающей принципиальные компоненты (PCAI и PCAII), отображают большую часть дисперсии генотип-средового взаимодействия. В связи с этим ранг генотипа по ASV достоверно оценивает его фенотипическую стабильность. Комплексную оценку сортов по стабильности и урожайности дает индекс стабильности урожайности (YSV), получаемый по сумме рангов RASV и урожайности (RY). Генотип с наименьшим значением YSV характеризуется как стабильный и урожайный. Наиболее отчетливо эти свойства сортов представляет визуализация их распределения на графике в системе декартовых координат, где на оси абсцисс отображены значения рангов сортов по RASV, а на оси ординат значения YSV (рис. 2). Точки на графике, отображающие свойства сортов, расположены в первой четверти координат. Ее разделение на четыре области линиями, проходящими через координатные оси по среднепопуляционным значениям (6,5 – ось абсцисс, 12,5 – ось ординат), четко выделяет 3 группы сортов. В области, прилегающей к началу координат, расположены сорта Экада 6, Экада 70, Пирамида, Землячка, удачно сочетающие фенотипическую стабильность и индекс стабильности урожайных свойств. Противоположные качества наблюдаются у сортов Башкирская 26, Любава, Тулайковская 105 и Любава 5, расположенных в верхней правой области. Средний уровень фено-

Таблица 3

Распределение сортов мягкой пшеницы по кластерам на основе матрицы коэффициентов корреляции параметров гомеоадаптивности

Кластер	Параметры, вошедшие в кластер	Пределы варьирования коэффициента корреляции в кластере	Тип параметров по классификации C.S. Lin, M.R. Bins [26]
1	αi, b_i, $\sigma^2 CAC_i$, ai, Sgi	0,643–1,0	Тип I
2	Hom, St^2, $СЦГ_i$	0,865–0,980	Тип I
3	P_i, ASV, YSV	0,867–0,949	Тип IV (Pi – мера превосходства C.S. Lin, M.R. Bins)
4	OAC_i, Cm	0,955	Тип I
5	Sd^2, λ_i	1,0	Тип III
6	W_i,	Вне кластера	Тип II

типической стабильности и индекса стабильности свойств урожайности определяются у сортов Нива 2, Дуэт, Омская 35, Маргарита, Казанская юбилейная, расположенных в центре графика.

Показатель Pi, предложенный Lin, Bins [26], как мера превосходства над лучшим генотипом в исследуемой популяции, наследуется – IV тип и наряду с I типом (включает параметры, основанные на средовой варианс или тесно коррелирующие с таковыми) может эффективно использоваться в селекционном процессе. Поскольку показатели ASV и YSV вошли в один кластер с Pi они могут наследоваться и, следовательно, эффективно применяться в селекции. Особенно перспективна селекционная работа с сортами, сочетающими низкие значения ASV с высокой урожайностью.

Заключение. Таким образом, результаты оценки стабильности, отзывчивости и определяющих их генотип-средовых взаимодействий по урожайности зерна сортов яровой пшеницы, при применении различных статистических методов, оказались неоднозначными. Это можно объяснить тем, что не существует универсального параметра, способного адекватно оценить биологическую сущность понятий «экологическая пластичность», «гомеостатичность», «стабильность» и ряда других, в отношении таких сложных признаков, как урожайность или ее компоненты, формирующихся в онтогенезе на фоне трудно контролируемого «потока» лимитирующих факторов среды. В связи с этим для оценки гомеоадаптивности селекционного материала и формирования критерия для отбора вдоль экологического вектора целесообразно использовать несколько статистических параметров, дающих представление о стабильности, отзывчивости и комплексно в одной «цифре» описывающих эти свойства сортов по исследуемому (селекционируемому) признаку. Для этого предлагается применять следующие группы статистических параметров: σCACi, Sgi – для оценки фенотипической стабильности; b_i, OAC_i – для оценки отзывчивости на благоприятный комплекс среды и предсказания ответа генотипа на среду; СЦГi, ASV, YSV – для комплексной оценки селекционной ценности генотипа.

Ценность параметров σCACi, Sgi, OAC_i, СЦГi, предложенных А.В. Кильчевским, Л.В. Хотылевой [10], заключается в информативности, основанной на объединении линейной и нелинейной части реакции генотипа на среду, биологической обоснованности и наследственной обусловленности. Ценность относительной стабильности генотипа (Sgi) усиливается независимостью от реакции других генотипов и от размерности признака и его среднего значения. Кроме того, все эти параметры вычисляются по единому алгоритму и не требуют сложных вычислений.

Непараметрические показатели (ASV, YSV), основанные на модели AMMI, учитывают главные компоненты факторного анализа (PCAI и PCAII), включающие основную часть дисперсии мультипликативного взаимодействия, служат достоверным критерием стабильности и усиливают объективность информации, получаемой на основе блока параметров А.В. Кильчевского, Л.В. Хотылевой [10].

На основе совокупности изученных параметров по свойствам гомеоадаптивности выделяются: Экада 70, Экада 6, Землячка, Дуэт, Омская 35. Эти сорта целесообразно использовать в качестве исходного материала в селекции сортов широкого ареала,– с высокой и стабильной урожайностью. Сорт Маргарита является лучшим по общей адап-

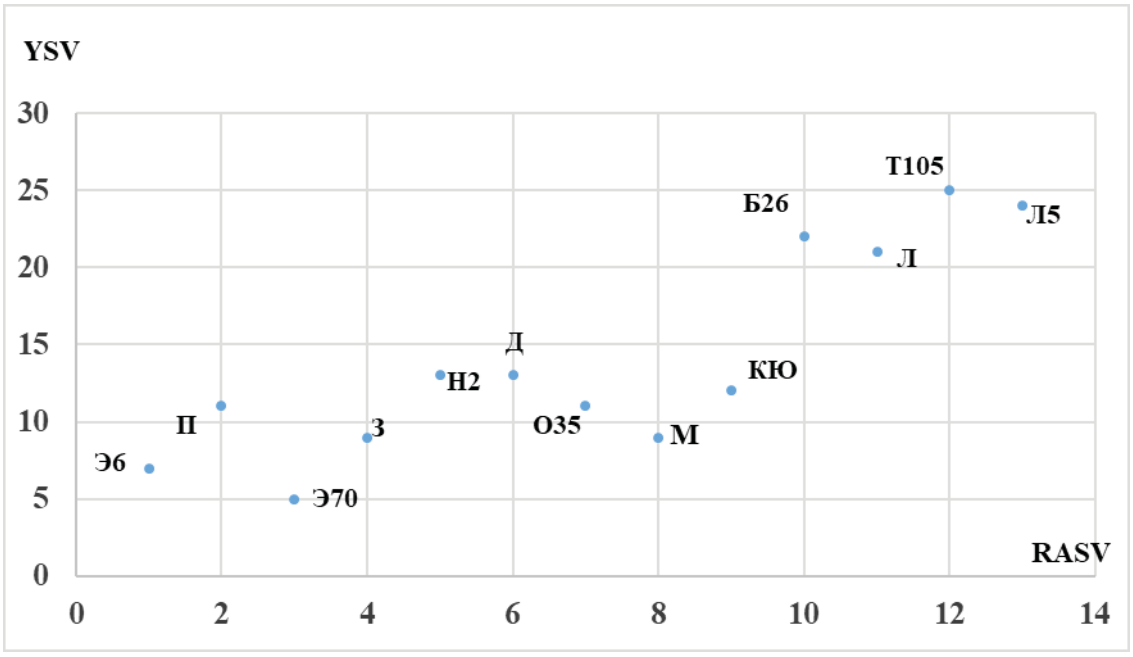

Рис. 2. Визуальное отображение фенотипической стабильности (ASV) и индекса стабильности (YSV) урожайности зерна генотипов; сокращения: Э –Экада, П –Пирамида, З – Землячка, Н – Нива, Д – Дуэт, О – Омская 35, М – Маргарита, КЮ – Казанская юбилейная, Б – Башкирская, Л – Любава, Т – Тулайковская

тивности (OACi), которая обусловлена у этого генотипа исключительно эффективным использованием ресурсов в благоприятных условиях среды (b_i). Эти свойства также целесообразно использовать в соответствующих селекционных программах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрукович П.Ф.* Применение метода главных компонент в практических исследованиях. – М., 1973. – 122 с.

2. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М., 1983. – 416 с.

3. *Драгавцев В.А., Аверьянова А.Ф.* Переопределение генетических формул количественных признаков в разных условиях среды // Генетика. – 1983. – Т. 19 (11). – С. 1806–1810.

4. *Драгавцев В.А., Цильке Р.А., Рейтер Б.Г.* Генетика признаков продуктивности яровых пшениц в Западной Сибири. – Новосибирск, 1984. – 230 с.

5. *Дюран Б., Оделл П.* Кластерный анализ. – М., 1977. – 128 с.

6. *Зиновьев А.Ю.* Визуализация многомерных данных. – Красноярск, 2000. – 180 с.

7. *Зыкин В.А., Белан И.А., Россеев В.М.* Селекция яровой пшеницы на адаптивность: результаты и перспективы // Доклады РАСХН. – 2000. – № 2. – С. 5–7.

8. *Зыкин В.А., Белан И.А., Юсов В.С., Кираев Р.С., Чанышев И.О.* Экологическая пластичность сельскохозяйственных растений (методика и оценка). – Уфа, 2011. – 97с.

9. *Идрис А.А.* Оценка методов определения стабильности урожайности и сопутствующих показателей сортов яровой пшеницы в Центральном регионе: дис. ... канд. с.-х. наук. – М., 2003. – 127 с.

10. *Кильчевский А.В., Хотылева Л.В.* Экологическая селекция растений. – Минск, 1997. – 372 с.

11. *Лыу Нгок Чинь.* Количественные методы оценки пластичности генотипов растений: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Харьков, 1984. –151 с.

12. *Мартынов С.П., Мусин Н.Н., Кулагина Т.В.* Пакет программ, селекционно-ориентированных и биометрико-генетических методов «Agros». – Тверь, 1993. – Режим доступа:socionet. ru>.

13. *Соболев Н.А.* Методика оценки экологической стабильности сортов и генотипов // Проблемы отбора и оценки селекционного материала. – Киев, 1980. – С. 100–106.

14. *Сюков В.В., Мадякин Е.В., Кочетков Д.В.* Вклад генотип-средовых эффектов в формирование количественных признаков у инбредных и аутбредных растений // Информационный вестник ВОГиС. – 2010. – № 14(1). – С. 141–147.

15. *Терёхина А.Ю.* Анализ данных методом многомерного шкалирования. – М., 1986. – 168 с.

16. *Хангильдин В.В., Шаяхметов И.Ф., Мардамшин А.Г.* Гомеостаз компонентов урожая и предпосылки к созданию модели сорта яровой пшеницы // Генетический анализ количественных признаков растений. – Уфа, 1979. – С. 5–39.

17. *Affleck I., Sulivan J.A., Tarn R., Falk D.E.* Genotype by environment interaction of yield and quality of potatoes // Canad.J.Plant Sci., 2008; 88(6): 1099–1107.

18. *Basford K.E., Cooper M.* Genotype x environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia // Aust. J. Agric. Res., 1998; 49(1): 153–154.

19. *Bach S.* Genotype by environment interaction effects on starch, fibre and agronomic traits in potato (Solanum tuberosum L.) // An M.Sc.Thesis. Guelph, Ontario, Canada, 2011: 208.

20. *Cooper M, De Lacy I.H.* Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype-by-environment interaction in plant breeding multi-environment experiments // Theor. Appl. Genet., 1994; 88(3): 561–572.

21. *Cooper M., Byth D.E., De Lacy I.H.* A procedure to assess the relative merit of classification strategies for grouping environments to assist selection in plant breeding regional evaluation trials // Field Crops Res., 1993; 35(1): 63–74.

22. *Eberhart S.A., Russell W.A.* Stability parameters for comparing varieties // Crop Sci., 1966; 6(1): 36–40.

23. *Eeuwijk F.A.* Linear and bilinear models for the analysis of multi-environment trials: I. An inventory of models // Euphytica, 1995; 84(1): 1–7.

24. *Gabriel K.R.* The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis // Biometrika, 1971; 38(3): 453–467.

25. *Gauch H.G. Zobel R.W.* AMMI analysis of yield trials. Chap. 4. // *Kang M.S.; Gauch, H.G.*, (Eds) Genotype by environment interaction, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1996: 85–122.

26. *Lin C.S., Binns M.R.* A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data // Canad. J. Plant Sci., 1988; 68(1): 193–198.

27. *Lin C.S., Binns M.R., Lefkovitch L.P.* Stability analysis: where do we stand? // Crop Sci. 1986;26(5):894–900.

28. *Martynov S.P.* A Method for the Estimation of Crop Varieties Stability // Biom. J., 1990; 7: 887–893.

29. *Purchase J.L., Hatting H., van Deventer C.S.* Genotyp×environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) // South Africa: Stability analysis of yield performance. South Afric.J.PlantSoil., 2000; 17: 101–107.

30. *Tai G.C.C.* Genotyp stability analysis and its application to potato regional traits // Crop Sci., 1971; 11(1): 184–190.

31. *Yan W., Tinker N.A.* Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications // Canad.J.Plant Sci., 2006; 86(3): 623–645.

32. *Wricke G.* Die Erfassung der Wechselwirkung zwischen Genotyp und Umwelt bei quantitativen Eigenschaften // Z.Pflanzenzűchtung, 1965, B. 53, H. 1, S. 3–4.

33. *Zobel R.W., Wright A.J., Gauch H.G.* Statistical analysis of a yield trial // Agron. J., 1988; 80: 388–393.

Сюков Валерий Владимирович, *д-р биол. наук, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

Захаров Владимир Григорьевич, *д-р с.-х. наук, зав. отделом селекции, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

433315, Ульяновская обл., п. Тимирязевский, ул. Институтская, 19.

Тел.: (8422) 41-81-55; e-mail: ulniish@mail.ru.

Мальчиков Петр Николаевич, *д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова – филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

446254, Самарская обл., п. Безенчук, ул. Карла Маркса, 41.

Тел.: (8467)62-11-40; e-mail: samniish@mail.ru.

Кривобочек Виталий Григорьевич, *д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник, Пензенский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ Федерального научного центра лубяных культур. Россия.*

442730, Пензенской обл., п/о Лунино-1, ул. Саратовская, 21.

Тел.: 89042668573; e-mail: penzniish-szk@mail.ru.

Никонов Владимир Иванович, *канд. с.-х. наук, зав. лабораторией селекции яровой пшеницы, Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

452170, Республика Башкортостан, п. Чишмы, ул. Опытная, 33А-2.

Тел.: 83472230708.

Василова Нурания Зуфаровна, *канд. с.-х. наук, зав. лабораторией селекции яровой пшеницы, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН». Россия.*

420059, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Г. Кайбицкой, 5-35.

Тел.: 83472230708.

Ганеев Вадим Анварович, *канд. с.-х. наук, директор, ТОО «Научно-производственная фирма «Фитон». Республика Казахстан.*

110908, Костанайская обл., Карабалыкский р-н, с. Научное, ул. Новая, 5-51.

Тел.: 87771914527.

Гулаева Надежда Васильевна, *младший научный сотрудник лаборатории генетики и селекции яровой мягкой пшеницы, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова– филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

Менибаев Асхат Исмаилович, *младший научный сотрудник лаборатории генетики и селекции яровой мягкой пшеницы, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова– филиал ФГБУН Самарского Федерального исследовательского центра РАН. Россия.*

446254, Самарская обл., пос. Безенчук, ул. Карла Маркса, 41.

Тел.: (8467)62-11-40.

Ключевые слова: *яровая пшеница; экологическая селекция; отбор на пластичность; параметры гомеоадаптивности; модель AMMI.*

EFFECTIVENESS OF STATISTICAL METHODS OF ASSESSING THE ADAPTABILITY OF THE SOFT SPRING WHEAT GENOTYPES ALONG THE ECOLOGICAL VECTOR

Syukov Valeriy Vladimirovich, *Doctor of Biological Sciences, Samara Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Zakharov Vladimir Grigorievich, *Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Breeding, Ulyanovsk Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Malchikov Peter Nikolayevich, *Doctor of Agricultural Science, Head of the Laboratory of Breeding of Spring Hard Wheat, Samara Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Krivobochek Vitaliy Grigorievich, *Doctor of Agricultural Science, Head of the Department of Crop Breeding, Penza Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Vasilova Nurania Zufarovna, *PhD, Head of Laboratory of Breeding of Wheat, FSUUBSI Tatar Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Nikonov Vladimir Ivanovich, *Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Breeding of Spring Wheat, Bashkirian Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Ganeev Vadim Anvarovich, *Candidate of Agricultural Sciences, Director, Scientific Industrial Firm "Fiton", Kazakhstan.*

Gulyaeva Nadezhda Vasilyevna, *Junior Researcher of the Laboratory of Breeding, Samara Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Minibayev Askhat Ismagilovich, *Junior Researcher of the Laboratory of Breeding,, Samara Scientific Research Institute of Agriculture, Russia.*

Keywords: *spring wheat; ecological selection; selection for plasticity; parameters of homeo-adaptability; AMMI model.*

Breeding of the effective methods for assessing such complex features of the genotype as "adaptability" and "stability" in relation to each specific ecological situation is an actual research task. The existence of various methods and methodological approaches to the solution of these problems is explained by the history of the development of surveys of quantitative features and the phenomenon of genotype-environment interactions. The purpose of the present research is to compare the effectiveness of various methods for determining the ontogenetic adaptability of the formation of productivity of soft spring wheat cultivars of the Ekada program. The object of the research is a sample population formed from the cultivars of soft spring wheat, different in genealogy, place of creation and adaptability to the complexes of abiotic and biotic factors of the environment: Bashkirskaya 26, Duet, Zemlyachka, KazanskayaYubileynaya, Lyubava, Lyubava 5, Margarita, Niva 2, Omskaya 35, Piramida, Tulaykovskaya 105, Ekada 6, Ekada 70. The crop was implemented at 6 ecological points. The trial has been held for three years (2009-2011). We studied 16 parameters, which were based on the methods of regression, dispersion analysis characterizing the linear and nonlinear reaction of genotypes to the environment and the AMMI model (Additive Main-effects and Multiplicative Interaction). The experiment has shown that there is no universal parameter capable to adequately assess the biological essence of such concepts as "ecological plasticity", "homeostaticity", "stability", etc. The basic reason for the difficulty is that a genotypes response to environments is multivariate, yet the parametric approach triers to transform it to a univariate problem via a stability index. The expediency of applying of several widely used statistical parameters for assessment of the selection material was determined: σCACi, Sgi – for assessing the phenotypic stability; b_i, OAS_i – to assess responsiveness to a favorable environment and predict the response of the genotype to the environment; SCGi, ASV, YSV – for a complex assessment of the breeding value of the genotype. Methods Principal Components and the cluster analysis, the isolation of three non-inherited parameters (Sd^2, λ_i, W_i) was determined, which confirms the data received by Lin, Bins (1988) about their use lessness in selection for adaptability and stability of the feature. Based on the complex of studied parameters of homeo-adaptability the cultivars that have been proposed for selection of the cultivars of a wide areal are: Ekada 70, Ekada 6, Zemlyachka, Duet, Omskaya 35. Margarita was not edly distinguished by efficient use of the resources in favorable environmental conditions (OAS_i, b_i), which implies the expediency of using it in appropriate breeding programs.