AMMI и GGE biplot анализ взаимодействия генотип–среда линий ячменя ярового

П.Н. Солонечный

Институт растениеводства им. В.Я. Юрьева Национальной академии аграрных наук Украины, Харьков, Украина

Стабильность урожайности зависит от устойчивости сортов и гибридов к стрессовым факторам окружающей среды. Оценка степени взаимодействия генотип–среда помогает селекционерам выбрать лучшие генотипы для передачи в Государственное сортоиспытание. В статье представлены результаты AMMI (additive main effect and multiplicative interaction) и GGE (genotype plus genotype-environment interaction) biplot анализа урожайности восьми перспективных линий ячменя ярового селекции Института растениеводства им. В.Я. Юрьева НААН Украины и двух сортов-стандартов в 2012–2015 гг. Целью исследований было определить степень влияния генотипа, среды и их взаимодействия на урожайность и выделить стабильные и продуктивные генотипы. Опыт был заложен рандомизированно в четырех повторениях. Дисперсионный анализ данных урожайности позволил оценить влияние эффектов среды (85.8 %), генотипа (8.1 %) и взаимодействия генотип–среда (6.1 %) на вариабельность урожайности. Для оценки влияния эффекта генотип-средового взаимодействия на уровень урожайности данные были проанализированы с помощью AMMI и GGE biplot анализа. Модель AMMI оказалась более эффективной, сохраняя большую часть вариации в первых двух главных компонентах – 95.7 %, в то время как GGE biplot – 82.9 %. Обе модели указали на линии 09-837 (G8) и 08-1385 (G9) как наиболее урожайные и стабильные. Эти линии переданы в Государственное испытание под названием «Авгур» и «Велес». Результаты исследований показали информативность использования методов AMMI и GGE biplot для оценки стабильности и адаптивности генотипов в практической селекции и рекомендации сортов для Государственного сортоиспытания.

Ключевые слова: AMMI; GGE biplot; ячмень; урожайность; адаптивность; стабильность; метод главных компонент.

AMMI and GGE biplot analyses of genotype-environment interaction in spring barley lines

P.N. Solonechnyi

Plant Production Institute nd. a V.Ya. Yuryev, NAAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine

Yield stability depends on the resistance of varieties and hybrids to stressful environmental factors. Assessment of genotype-environment interaction helps breeders select the best genotypes for submission to the state variety trials. The article presents results of AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction) and GGE (Genotype plus Genotype-Environment interaction) biplot analyses of the grain yield data in eight promising spring barley lines bred at the Plant Production Institute nd. a V.Ya. Yuryev of NAAS and two standard varieties in 2012–2015. The objective of this study was to determine the effect of genotype, environment and their interaction for grain yield and identify stable and performance genotypes. The experimental layout was randomized complete block design with four replications. The analysis of variance on grain yield data showed that the mean squares of environments, genotypes and genotype-environment interaction (GEI) accounted for 85.8, 8.1 and 6.1 % of treatment combination sum of squares, respectively. To find out the effects of GEI on grain yield, the data were subjected to AMMI and GGE biplot analysis. The AMMI model presented greater efficiency by retaining most of the variation in the first two main components, 95.7 %, followed by the GGE biplot model, 82.9 %. Lines 09-837 (G8) and 08-1385 (G9) presented an elevated grain yield and stability as determined by the AMMI and GGE biplot methodologies. These lines named as "Avgur" and "Veles" were submitted to the state variety trial. The results finally indicated that AMMI and GGE biplot are informative methods to explore stability and adaptation pattern of genotypes in practical plant breeding and in subsequent variety recommendations.

Key words: AMMI; GGE biplot; barley; yield; adaptability; stability; principal component analysis.

КАК ЦИТИРОВАТЬ ЭТУ СТАТЬЮ:
Солонечный П.Н. AMMI и GGE biplot анализ взаимодействия генотип–среда линий ячменя ярового. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017;21(6):657-662. DOI 10.18699/VJ17.283

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Solonechnyi P.N. AMMI and GGE biplot analyses of genotype-environment interaction in spring barley lines. Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017;21(6):657-662. DOI 10.18699/VJ17.283 (in Russian)

Received 05.02.2017
Accepted for publication 16.08.2017
© AUTHOR, 2017

e-mail: pashabarley86@gmail.com

Наличие стабильной урожайности и экономической рентабельности – это важнейшая проблема для селекционеров и фермеров. Успешные сорта должны быть адаптированы к широкому диапазону условий окружающей среды для стабильной реализации своего генетического потенциала и эффективного использования технологий выращивания. Разница в реакции сортов на изменение почвенно-климатических условий обусловлена взаимодействием генотипа и среды. Взаимодействие генотип–среда (genotype-environment interaction – GEI) усложняет процесс отбора лучших генотипов, поэтому селекционерам важно постоянно вести скрининг исходного и селекционного материала для выделения и внедрения в производство сортов, адаптированных к различным условиям среды. Следовательно, информация о генотип-средовом взаимодействии перспективного селекционного материала имеет первостепенное значение для селекционеров.

Существует несколько статистических методов, с помощью которых определяют степень влияния GEI на урожайность и выделяют генотипы, в которых это влияние минимально и возможно прогнозировать их фенотипическую реакцию на изменение условий окружающей среды. К наиболее распространенным методам относятся линейный регрессионный анализ, нелинейный регрессионный анализ, многомерный анализ и непараметрическая статистика (Cornelius et al., 1996; Annicchiarico, 1997; Moreno-González et al., 2004). Одним из наиболее эффективных методов квантификации GEI и оценки стабильности урожайности являются модели AMMI и GGE biplot, базирующиеся на методе главных компонент (Kiliç, 2014; Mirosavljević et al., 2014; Mortazavian et al., 2014; Solonechnyi et al., 2015).

Дисперсионный анализ (ANOVA) – аддитивная модель, в которой GEI служит источником вариации, но его внутренние эффекты не анализируются. В отличие от него, метод главных компонент (principal component analysis – PCA) является мультипликативной моделью и, следовательно, не представляет аддитивные основные эффекты ни окружающей среды, ни генотипа (Oliveira et al., 2014). Модель AMMI (аддитивные основные эффекты и мультипликативное взаимодействие), объединяющая ANOVA и PCA в едином подходе, может применяться для оценки адаптивности генотипов (Zobel et al., 1988; Crossa et al., 1990; Gauch, Zobel, 1996). AMMI использует ANOVA для проверки основных эффектов генотипа и среды, а PCA – для анализа остаточного мультипликативного взаимодействия между генотипами и окружающей средой с целью определения суммы квадратов GEI с минимальным количеством степеней свободы. Поскольку ANOVA и PCA являются компонентами модели AMMI, она наиболее эффективна для характеристики GEI (Zobel et al., 1988).

W. Yan с коллегами (2000) предложили модификацию обычного анализа AMMI под названием GGE biplot (генотип (G) плюс генотип-средовое (GE) взаимодействие), которая была рекомендована для анализа GEI. GGE biplot была признана инновационной методологией графического анализа данных и стала активно применяться в селекции растений (Balestre et al., 2009). В отличие от модели AMMI, GGE biplot помогает в определении относительной продуктивности генотипов в конкретных экологических условиях (специфическая адаптивность генотипа), а также идентификации генотипов, подходящих для группы сред (широкая адаптивность). Для построения графиков GGE biplot можно воспользоваться специализированными функциями многих статистических пакетов или специально созданными для этого программами (Yan, 2001; Yan, Kang, 2003).

Целью данного исследования была оценка генотип-средового взаимодействия линий ячменя ярового с использованием AMMI и GGE biplot анализа и вспомогательных непараметрических статистик для отбора генотипов с высокой урожайностью и фенотипической стабильностью.

Материалы и методы

Исследования проведены в 2012–2015 гг. в лаборатории селекции и генетики ячменя Института растениеводства им. В.Я. Юрьева НААН Украины. Исходным материалом для исследований служили восемь перспективных линий ячменя ярового и два сорта-стандарта Взирец и Командор. Площадь учетной делянки 10 м^2, повторность четырехкратная. Предшественник – горох на зерно. Результаты экологического испытания были проанализированы с помощью GGE biplot и AMMI анализа.

Базовая модель GGE biplot:

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = \lambda_1 \xi_{i1} \eta_{j1} + \lambda_2 \xi_{i2} \eta_{j2} + \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

где Y_{ij} – средняя урожайность генотипа i в окружающей среде j; μ – общее среднее; β_j – средняя урожайность всех генотипов в окружающей среде j; λ_1 и λ_2 – сингулярные значения (singular value (SV) первых двух главных компонент – PC1 и PC2); ξ_{i1} и ξ_{i2} – собственные скаляры генотипа i для PCl и PC2 соответственно; η_{j1} и η_{j2} – собственные скаляры окружающей среды j для PCl и PC2 соответственно; ε_{ij} – остаток, связанный с генотипом i в окружающей среде j.

Для построения биплота вышеприведенная формула (1) должна быть представлена как

$$Y_{ij} - \mu - \beta_j = g_{i1} e_{1j} + g_{i2} e_{2j} + \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где $g_{i1}e_{1j}$ и $g_{i2}e_{2j}$ – индексы PCl и PC2 для генотипа i и окружающей среды j соответственно.

На биплоте генотип i изображается как точка, определенная всеми значениями g_i, а окружающая среда j – как точка, определенная всеми значениями e_j.

AMMI анализ проводили по (Zobel et al., 1988), используя следующую статистическую модель:

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{k=1}^{n} \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

где Y_{ij} – средний эффект генотипа i в среде j; μ – общее среднее значение; g_i – эффект генотипа i; e_j – эффект среды j; λ_k – сингулярное значение k-й оси главного компонента взаимодействия (IPCA); α_{ik} – сингулярное значение для i генотипа k IPCA; γ_{jk} – сингулярное значение j среды k IPCA; ε_{ij} – средняя ошибка эксперимента.

Уровень фенотипической стабильности генотипов определяли по показателю ASV (AMMI stability value), рассчитанному по формуле из (Purchase et al., 2000):

$$\mathrm{ASV} = \sqrt{\left[\frac{SSIPC1}{SSIPC2}(IPC1score)^2\right] + (IPC2score)^2}, \quad (4)$$

где *SSIPC*1 и *SSIPC*2 – сумма квадратов первых двух главных компонент взаимодействия; *IPC*1*score* и *IPC*2*score* – значения первых двух главных компонент взаимодействия генотипа.

Индекс стабильности урожайности (YSI) рассчитан по формуле

$$YSI = RASV + RY, \quad (5)$$

где *RASV* – ранг генотипа по уровню ASV; *RY* – ранг по урожайности (Y).

Математическую обработку данных урожайности и построение графиков GGE biplot осуществляли с использованием программы Genstat 12.

Результаты и обсуждение

Контрастные гидротермические условия лет исследований позволили достоверно оценить генотипы по стабильности и адаптивности. Средняя урожайность изученных сортов и линий колебалась от 2.79 т/га в 2013 г. до 6.55 т/га в 2014 г. (табл. 1). Для оценки влияния генотип-средового взаимодействия на урожай зерна, данные были подвергнуты AMMI и GGE biplot анализу.

GGE biplot является комплексной системой анализа, согласно которой большинство аспектов взаимодействия генотип–среда, представленные в виде таблицы, могут быть отображены графически (Yan et al., 2000; Yan, 2001; Yan, Kang, 2003; Yan, Tinker, 2006). При этом результаты экологического испытания отображаются таким образом, что визуальная оценка генотипов и идентификация «мега-сред» значительно упрощаются (Yan, 2002, 2014; Yan et al., 2007). GGE biplot анализ показал, что первые две главные компоненты объясняют 82.9 % от общей изменчивости, вызванной GEI. В модели сохраняются только две главные компоненты (PC1 и PC2), потому что такая модель является лучшей для выделения закономерностей и нивелирует ненужные данные. Кроме того, PC1 и PC2 можно легко изобразить на двухмерном графике, так что взаимодействие между каждым генотипом и определенной окружающей средой будет визуализировано.

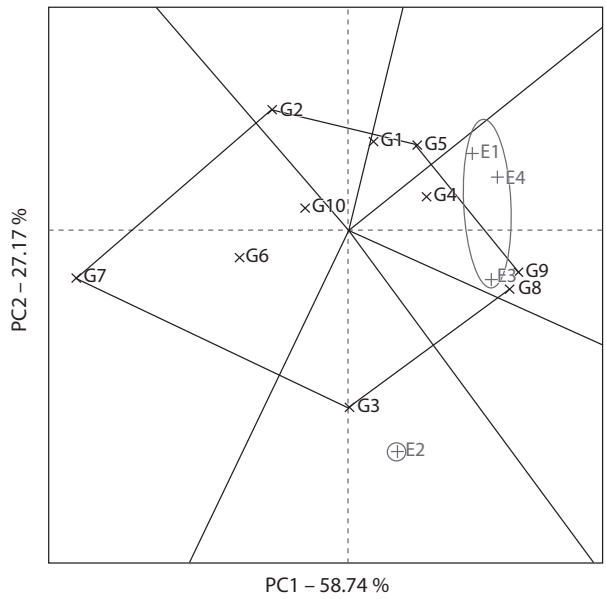

Fig. 1. Polygon views of the GGE biplot for the "which-won where" pattern and their related "mega-environments".

GGE biplot в виде многоугольника «which-won-where» (какой генотип где выигрывает) – это лучший способ визуализации закономерностей взаимодействия между генотипом и окружающей средой и эффективной интерпретации биплота (рис. 1).

Вершинами многоугольника являются маркеры генотипов, максимально удаленных от центра биплота так, что маркеры всех остальных генотипов попадают в многоугольник. Линии, делящие биплот на сектора, представляют собой набор гипотетических сред. Генотип, образующий угол многоугольника для каждого сектора, разделяющего биплот, – это тот, который дает максимальную урожайность в окружающих средах, попадающих в этот сектор. Вершинами углов многоугольника в наших исследованиях были генотипы G3, G7, G2, G5 и G9 (G8).

Table 1. Grain yield (metric tons/ha) from spring barley in 2012–2015

Genotype	Variety, line	2012	2013	2014	2015	Averaged over genotype
		E1	E2	E3	E4	
G1	Vzirets	4.60	2.23	6.71	4.73	4.57
G2	Komandor	4.60	2.10	6.24	4.42	4.34
G3	05-393	4.31	3.81	6.58	4.36	4.77
G4	06-652	4.48	2.65	6.73	5.20	4.77
G5	08-2455	5.12	2.59	6.40	5.06	4.79
G6	09-791a	3.43	2.60	6.52	4.47	4.26
G7	09-2162	3.69	2.78	5.89	3.43	3.95
G8	09-837	4.75	3.16	7.16	5.04	5.03
G9	08-1385	5.08	3.27	6.90	5.18	5.11
G10	09-409	4.63	2.70	6.34	4.37	4.37
Averaged over environment		4.47	2.79	6.55	4.63	4.61

Table 2. AMMI analysis of grain yield in spring wheat genotypes

Source of variation	df	SS	ms	Contribution to variability, %	
				yield	interaction
Overall	159	331.20	2.083		
Genotype (G)	9	24.87	2.763	8.1	
Environment (E)	3	263.10	87.701	85.8	
Interaction (GE)	27	18.66	0.691	6.1	
IPCA1	11	11.98	1.090		64.2
IPCA2	9	5.87	0.652		31.5
IPCA3	7	0.81	0.116		4.3
IPCA4	5	0.00	0.000		0.0
Error	108	16.95	0.157		

Table 3. Grain yield and statistical indices of the stability of spring barley genotypes

Genotype	Variety, line	Y, tons/ha	Rank	IPCA1	IPCA2	ASV	Rank	YSI
G1	Vzirets	4.57	5	0.424	0.114	0.378	6	11
G2	Komandor	4.34	7	0.382	–0.199	0.338	5	12
G3	05-393	4.77	4	–0.741	0.224	1.170	9	13
G4	06-652	4.77	4	0.316	0.238	0.260	4	8
G5	08-2455	4.79	3	0.395	–0.519	0.587	8	11
G6	09-791a	4.26	8	–0.065	0.661	0.446	7	15
G7	09-2162	3.95	9	–0.765	–0.432	1.381	10	19
G8	09-837	5.03	2	0.079	0.246	0.074	2	4
G9	08-1385	5.11	1	0.029	–0.019	0.002	1	2
G10	09-409	4.37	6	–0.056	–0.311	0.103	3	9
HCP_{05}		0.28						

Y, mean grain yield; IPCA1 and IPCA2, axes of the first and second principal components of the interaction; ASV, AMMI stability; YSI, yield stability index.

Соответственно генотипы G8 и G9 были лучшими в средах E1, E3 и E4 (образующих «мега-среду»), а генотип G3 – в низкопродуктивной (стрессовой) среде E2.

С помощью дисперсионного анализа сумма квадратов урожайности была разделена на эффекты генотипа, окружающей среды и взаимодействия генотип–среда (табл. 2). Самый высокий вклад в изменчивость урожайности вносил эффект окружающей среды (85.8 %), значительно меньший вносили генотип (8.1 %) и взаимодействие генотип–среда (6.1 %). Большой вклад фактора «среда» в общую дисперсию урожайности связан со значительной изменчивостью гидротермических условий в годы проведения исследований. Взаимодействие GE было дополнительно разделено с использованием метода главных компонент. Первые две оси IPCA объясняют 95.7 % вариабельности взаимодействия, что делает достоверной оценку стабильности генотипов по этим двум компонентам.

Модель AMMI не предусматривает количественной оценки степени стабильности, поэтому для количественной оценки и ранжирования генотипов по стабильности урожайности в работе (Purchase et al., 2000) предложено использовать показатель ASV (AMMI stability value). ASV представляет собой расстояние от центра (нуля) в двухмерной скаттерограмме с IPCA1 (осью первого главного компонента взаимодействия) и IPCA2 (осью второго главного компонента взаимодействия). Поскольку показатель IPCA1 вносит больший вклад в сумму квадратов взаимодействия генотип–среда (см. табл. 2), он должен иметь пропорционально больший вклад по сравнению с IPCA2, чтобы компенсировать часть относительного вклада IPCA1 и IPCA2 в общее взаимодействие GE. В модели ASV генотипы с наименьшим уровнем ASV являются наиболее стабильными. Соответственно, среди изучаемых генотипов линии G9, G8 и G10 были наиболее стабильными, а линии G3 и G7 характеризовались значительным варьированием урожайности (табл. 3).

GGE biplot дает возможность визуально ранжировать генотипы по их продуктивности и стабильности в ряде сред. На рис. 2 ось *x*, или линия продуктивности, средней тестерной координаты (average tester coordinate – ATC) проходит через начало координат биплота со стрелкой, обозначающей положительный конец оси. Ось *y* ATC (ось стабильности) проходит через начало координат биплота перпендикулярно оси *x*. Таким образом, средняя урожайность генотипов оценивается по проекции их маркеров на ось *x*, а стабильность – по проекции на ось *y*.

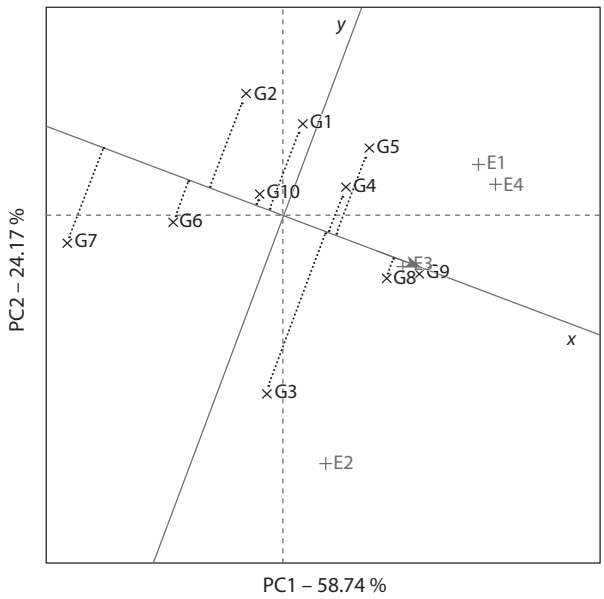

Fig. 2. GGE biplot for the mean performance and stability of genotypes.

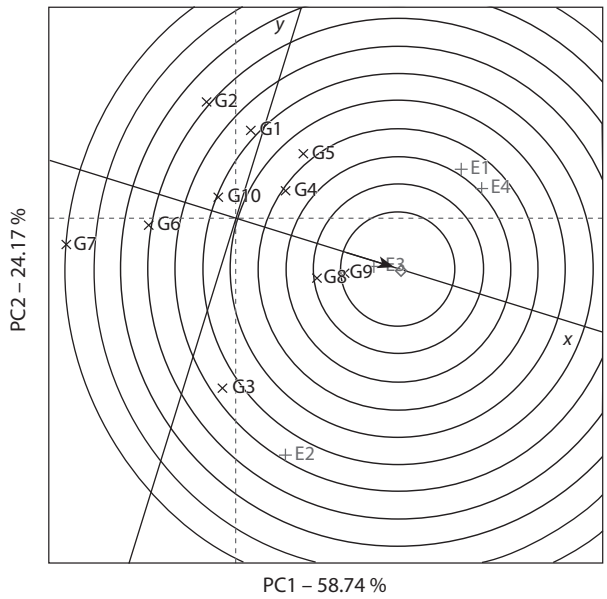

Fig. 3. GGE biplot based on genotype-focused scaling for comparing the genotypes with the "ideal" genotype.

Линии 08-1385 (G9) и 09-837 (G8) имели самую высокую среднюю урожайность, а линия 09-2162 (G7) – самую низкую. Урожайность генотипов 05-393 (G3), Командор (G2) и 09-2162 (G7) была наиболее вариабельной, тогда как линии 08-1385 (G9), 09-837 (G8) и 09-409 (G10) отличались высокой стабильностью.

Стабильность, однако, не единственный параметр при оценке генотипов, так как стабильные генотипы нередко бывают низкопродуктивны (Mohammadi et al., 2007; Mohammadi, Amri, 2008). Таким образом, необходимы подходы, включающие интегральную оценку по средней урожайности и стабильности в единый индекс, что побудило разных исследователей предложить различные критерии для одновременного отбора по урожайности и стабильности (Eskridge, 1990; Kang, 1993; Dashiell et al., 1994; Bajpai, Prabhakaran, 2000; Rao, Prabhakaran, 2005; Farshadfar, 2008). Поскольку ASV учитывает IPCA1 и IPCA2, которые включают большую часть вариации GEI, ранг ASV служит достоверной оценкой стабильности генотипов. Сумма рангов ASV и урожайности (Y) дает комплексную оценку генотипов по стабильности и урожайности – так называемый индекс стабильности урожайности (yield stability index – YSI). Генотип с наименьшим YSI считается наиболее стабильным и урожайным (см. табл. 3). В наших исследованиях такими генотипами были линии 08-1385 (G9) и 09-837 (G8).

Путем графического анализа GGE biplot позволяет также выделить генотипы, объединяющие высокую урожайность и стабильность. Центр концентрических кругов (рис. 3) представляет положение «идеального» генотипа, который определяется проекцией на ось среднеокружающей среды, равной самому длинному вектору генотипов с урожайностью выше среднего, и по нулевой проекции на перпендикулярную линию (нулевая вариабельность во всех окружающих средах). Генотип более желателен, если он ближе к «идеальному» генотипу. Хотя такой идеальный генотип может и не существовать в реальности, его можно использовать в качестве эталона для оценки генотипов. Следовательно, в нашем случае линии 09-837 (G8) и 08-1385 (G9), максимально приближенные к центру концентрических кругов, были идеальными генотипами с точки зрения величины и вариабельности урожайности по сравнению с остальными генотипами, что подтверждают результаты, полученные с помощью AMMI анализа.

По результатам исследований с помощью GGE biplot и AMMI анализа были выделены линии 08-1385 (G9) и 09-837 (G8) как наиболее перспективный селекционный материал. Эти линии переданы в Государственное сортоиспытание Украины под названием «Велес» и «Авгур». Проведенные исследования показали, что AMMI и GGE biplot анализ являются информативными методами оценки адаптивных особенностей перспективного селекционного материала на завершающем этапе селекционного процесса.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

References

Annicchiarico P. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. Euphytica. 1997;94:53-62. DOI 10.1023/A:1002954824178.

Bajpai P.K., Prabhakaran V.T. A new procedure of simultaneous selection for high yielding and stable crop genotypes. Indian J. Genet. Pl. Br. 2000;60:141-146.

Balestre M., Von Pinho R.G., Souza J.C., Oliveira R.L. Genotypic stability and adaptability in tropical maize based on AMMI and GGE biplot analysis. Genet. Mol. Res. 2009;8(4):1311-1322. DOI 10.4238/vol8-4gmr658.

Cornelius P.L., Crossa J., Seyedsadr M.S. Statistical tests and estimators of multiplicative models for genotype-by-environment interaction. In: M.S. Kang, H.G. Gauch (Eds.). Genotype-by-Environment Interaction. FL, USA: CRC Press, Boca Raton, 1996;199-234.

Crossa J., Gauch H.G., Zobel R.W. Additive main effects and multiplicative analysis of two international maize cultivar trials. Crop Sci. 1990;30:493-500.

Dashiell K.E., Ariyo O.J., Bello L. Genotype × environment interaction and simultaneous selection for high yield and stability in soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.). Ann. Appl. Biol. 1994;124:133-139.

Eskridge K.M. Selection of stable cultivars using a safety-first rule. Crop Sci. 1990;30:369-374.

Farshadfar E. Incorporation of AMMI stability value and grain yield in a single non-parametric index (GSI) in bread wheat. Pak. J. Biol. Sci. 2008;11(14):1791-1796.

Gauch H.G., Zobel R.W. AMMI analysis of yield trials. Ch. 4. In: M.S. Kang, H.G. Gauch (Eds.). Genotype-by-Environment Interaction. FL, USA: CRC Press, Boca Raton, 1996:85-122.

Kang M.S. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: Consequences for growers. Agron. J. 1993;85:754-757. DOI 10.2134/agronj1993.00021962008500030042x.

Kiliç H. Additive main effects and multiplicative interactions (AMMI) analysis of grain yield in barley genotypes across environments. Tarım Bilimleri Dergisi = J. Agric. Sci. 2014;20:337-344.

Mirosavljević M., Pržulj N., Čanak P. Analysis of new experimental barley genotype performance for grain yield using AMMI biplots. Selekcija i Semenarstvo. 2014;XX(1):27-36.

Mohammadi R., Abdulahi A., Haghparast R., Armion M. Interpreting genotype-environment interactions for durum wheat grain yields using non-parametric methods. Euphytica. 2007;57:239-251. DOI 10.1007/s10681-007-9417-3.

Mohammadi R., Amri A. Comparison of parametric and non-parametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in variable environments. Euphytica. 2008;159:419-432. DOI 10.1007/s10681-007-9600-6.

Moreno-González J., Crossa J., Cornelius P.L. Genotype × environment interaction in multi-environment trials using shrinkage factors for AMMI models. Euphytica. 2004;137:119-127.

Mortazavian S.M.M., Nikkhah H.R., Hassani F.A., Sharif-al-Hosseini M., Taheri M., Mahlooji M. GGE biplot and AMMI analysis of yield performance of barley genotypes across different environments in Iran. J. Agr. Sci. Tech. 2014;16:609-622.

Oliveira E.J., Freitas J.P.X., Jesus O.N. AMMI analysis of the adaptability and yield stability of yellow passion fruit varieties. Sci. Agric. 2014;71(2):139-145.

Purchase J.L., Hatting H., van Deventer C.S. Genotype × environment interaction of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in South Africa: Stability analysis of yield performance. South Afric. J. Plant Soil. 2000;17:101-107. DOI 10.1080/02571862.2000.10634878.

Rao A.R., Prabhakaran V.T. Use of AMMI in simultaneous selection of genotypes for yield and stability. Ind. Soc. Agric. Statist. 2005; 59(1):76-82.

Solonechnyi P., Vasko N., Naumov O., Solonechnaya O., Vazhenina O., Bondareva O., Logvinenko Yu. GGE biplot analysis of genotype by environment interaction of spring barley varieties. Zemdirbyste-Agriculture. 2015;102(4):431-436. DOI 10.13080/z-a.2015.102.055.

Yan W. GGEbiplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. Agron. J. 2001;93:1111-1118. DOI 10.2134/agronj2001.9351111x.

Yan W. Singular-value partitioning in biplot analysis of multi-environment trial data. Agron. J. 2002;94:990-996. DOI 10.2134/agronj 2002.9900.

Yan W. Crop Variety Trials: Data Management and Analysis. John Wiley and Sons, 2014. DOI 10.1002/9781118688571.

Yan W., Hunt L.A., Sheny Q., Szlavnics Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Sci. 2000;40:597-605. DOI: 10.2135/cropsci2000.403597x.

Yan W., Kang M.S. GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists and Agronomists. Boca Raton, USA: CRC Press, 2003.

Yan W., Kang M.S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. Crop Sci. 2007; 47:643-655. DOI 10.2135/cropsci2006.06.0374.

Yan W., Tinker N.A. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and applications. Can. J. Plant Sci. 2006;86:623-645. DOI 10.4141/P05-169.

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