

WIESŁAW MĄDRY
MARZENA IWAŃSKA

Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki, SGGW w Warszawie

Przydatność metod oraz miar statystycznych do oceny stabilności i adaptacji odmian: przegląd literatury*

Usefulness of statistical methods and measures for evaluating cultivar stability and adaptation: an overview of research

W pracy przedstawiono przegląd najnowszego dorobku naukowego, publikowanego głównie w prestiżowych czasopismach, w zakresie zastosowań i badań przydatności wielu metod statystycznych do charakterystyki interakcji genotypowo-środowiskowej (interakcji GE) dla plonu i innych cech rolniczych odmian testowanych w doświadczeniach oraz analizy i interpretacji tej interakcji w kategoriach oceny odmian pod względem ich stabilności i adaptacji dla rozpatrywanych cech. Wśród rosnącego bogactwa klasycznych i oryginalnych metod, stosowanych w wymienionych badaniach nad oceną wartości gospodarczej odmian, dominują metody wielowymiarowe oparte na analizie składowych głównych, takie, jak analiza AMMI (ang. the additive main effects and multiplicative interaction model-based analysis), analiza GGE (ang. the genotype main effects and genotype \times environment interaction effects model-based analysis) oraz łączna analiza skupień i AMMI lub GGE. Stosowane są także dość szeroko metody oparte na relatywnie prostych miarach stabilności i szerokiej adaptacji odmian pod względem badanych cech. To wyjątkowo bogate spektrum metod, przeznaczonych do wielostronnej oceny odmian z uwzględnieniem średnich genotypowych i efektów interakcji GE, stanowi wartościową ofertę metodyki statystycznej, z której szerzej powinni korzystać hodowcy i badacze wartości gospodarczej odmian roślin uprawnych w Polsce.

Słowa kluczowe: adaptacja odmian, analiza AMMI, analiza GGE, analiza skupień

In the paper results of the newest studies on using statistical methods to analysis and interpretation of genotype \times environment interaction (GEI) on the basis of multi-environment trials (MET) are presented. The methods presented here facilitate to evaluate stability and adaptability of tested cultivars for yield and other quantitative traits. Both univariate and multivariate methods are considered. The set of the discussed multivariate methods includes mostly those which are based on singular value decomposition of respective GE data matrix, e.g. the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model-based analysis, the genotype main effects and genotype \times environment interaction effects (GGE) model-based analysis as well as combined cluster and AMMI or GGE analyses called

* Publikacja została wykonana w ramach projektu badawczego No. N N310 091136 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009–2011 w Katedrze Agronomii i Katedrze Doświadczalnictwa i Bioinformatyki SGGW w Warszawie

usually pattern analyses. Also, methods involving simple measures of cultivar stability and wide adaptability are overviewed. The all considered methods are addressed to plant breeders and cultivar evaluators who could and should use them in wider scale to improve reliability of testing new germplasm in order to implement effectively genetic gain to agricultural practice in Poland.

Key words: AMMI analysis, cluster analysis, cultivar adaptation, GGE analysis

PODSTAWOWE POJĘCIA UŻYWANE W PRACY

- **Odmiana** jest to zbiorowość roślin w obrębie botanicznej jednostki systematycznej najniższego znanego stopnia, która niezależnie od tego, czy w pełni odpowiada warunkom przyznania wyłącznego prawa:
 - jest określona na podstawie przejawianych właściwości wynikających z określonego genotypu lub kombinacji genotypów, jest odróżnialna od każdej innej zbiorowości roślin na podstawie co najmniej jednej z przejawianych właściwości,
 - pozostaje niezmienną po rozmnożeniu (Ustawa z dnia 26 czerwca 2003 roku o nasiennictwie).
- **Środowisko (warunki środowiskowe) w produkcji roślinnej** jest to określony rodzaj czynników otoczenia w przestrzeni rolniczej (agroekosystemach i systemach uprawy) oraz czasie, które wpływają na wzrost i rozwój roślin uprawnych. Należą do nich: czynniki abiotyczne, obejmujące warunki glebowe oraz pogodowe (promieniowanie słoneczne, temperaturę, ilość opadów i inne), czynniki biotyczne, obejmujące natężenie chorób i szkodników, a także czynniki uprawowe i technologiczne (ang. post-harvest practices), np. suszenie tytoniu, przechowywanie plonu. Zatem, w doświadczeniach odmianowych wyróżnia się trzy rodzaje środowisk, tj. miejscowości (stacje oceny odmian, ang. locations lub testing stations), lata, czyli sezony wegetacyjne (ang. years lub seasons) oraz systemy uprawy roślin (ang. cropping systems) obejmujące głównie zmianowanie (ang. crop rotation) oraz zabiegi uprawowe (ang. crop managements), takie, jak dawka nawożenia N, uprawa gleby, ochrona roślin itp.). W naukowej nomenklaturze z zakresu hodowli roślin i oceny odmian, zwykle terminem środowisko określane są zwykle miejscowości, czyli stacje oceny odmian, tzn. środowiska rolnicze zwane też agroekosystemami.
- **System (układ) odmianowo-środowiskowy lub genetyczno-środowiskowy danego gatunku roślin** jest współlistnieniem zarówno danej puli genowej odmian tego gatunku (tkwiącej w populacji istniejących i potencjalnych odmian oraz obiektów genetycznych, stanowiących źródło materiałów do tworzenia odmian w danym programie hodowlanym), jak i rozpatrywanego (docelowego) rejonu uprawy tego gatunku, rozumianego jako populacja pól uprawnych (miejscowości), z których składa się ten rejon uprawy. Dana seria wielokrotna lub wielokrotna i wieloletnia doświadczeń odmianowych powinna możliwie dobrze reprezentować interesujący system genetyczno-środowiskowy.
- **Seria wielokrotna doświadczeń odmianowych** jest wykonywaniem doświadczeń z tymi samymi odmianami (zwykle wybranymi celowo) w wielu miejscowościach,

wybranych reprezentatywnie lub celowo w rozpatrywanym rejonie uprawy (tzw. rejonie docelowym — ang. target region), w jednym sezonie wegetacyjnym (roku).

- **Seria wielokrotna i wieloletnia doświadczeń odmianowych** jest wykonywaniem doświadczeń z tymi samymi odmianami (zwykle wybranymi celowo) w wielu miejscowościach, wybranych reprezentatywnie lub celowo w rozpatrywanym rejonie uprawy oraz powtórzonych w wielu sezonach wegetacyjnych (latach).
- **Interakcja genotypowo-środowiskowa** jest zjawiskiem, polegającym na różnej (nierównoległej) reakcji danej cechy (np. plonu, składowych plonu, cech jakości plonu, cech fenologicznych, porażenia roślin chorobami itp.) badanych odmian na zmienne warunki środowiskowe. Ta interakcja wyraża się jednocześnie odmiennym zróżnicowaniem (i zwykle różnym rankingiem) odmian pod względem danej cechy w poszczególnych środowiskach. Wobec podanej definicji, w badaniach hodowlanych i ocenie odmian oceniana jest zawsze interakcja genotypowo-środowiskowa dla danej cechy.
- **Średnia genotypowa plonu** danej odmiany jest średnią tej cechy w populacji lub małym zbiorze środowisk (miejscowości w rejonie uprawy, lat, systemów lub czynników uprawowych), w których odmiana jest badana. To pojęcie dotyczy także każdej innej cechy ilościowej roślin.
- **Średnia środowiskowa plonu** w danym środowisku jest średnią tej cechy ze wszystkich badanych odmian w serii doświadczeń.
- **Reakcja plonu danej odmiany na zmienne warunki środowiskowe (środowiskowa reakcja plonu odmiany)** jest funkcją empiryczną (łamaną) w układzie dwóch osi prostokątnych, powstałą z przyporządkowania środowiskom (podanych na osi OX symbolicznie lub w postaci średnich środowiskowych), odpowiednio obliczonych średnich dla plonu (tylko z powtórzeń, powtórzeń i lat, albo też powtórzeń, miejscowości i lat — zależnie od konstrukcji serii doświadczeń odmianowych i rozpatrywanego rodzaju środowisk) odmiany w tych środowiskach
- **Średnia reakcja plonu badanych odmian na zmienne warunki środowiskowe (środowiskowa średnia reakcja plonu badanych odmian)** jest funkcją w układzie dwóch osi prostokątnych, powstałą z przyporządkowania środowiskom (podanych na osi OX symbolicznie lub w postaci średnich środowiskowych), średnich środowiskowych plonu. Jest to tzw. łamana funkcja empiryczna albo funkcja tożsamościowa, odpowiednio w przypadku pierwszego lub drugiego sposobu przedstawiania środowisk na wykresie.
- **Plon maksymalny w badanych środowiskach** jest najwyższym średnim plonem, uzyskanym przez jedną lub różne testowane odmiany w tych środowiskach.
- Reakcja plonu maksymalnego na zmienne warunki środowiskowe (środowiskowa reakcja plonu maksymalnego) nazywamy przyporządkowanie środowiskom plonu maksymalnego.
- **Stabilnością plonowania odmiany w sensie rolniczym lub dynamicznym** (zwaną w pracy stabilnością plonowania odmiany) nazywamy podobieństwo kształtu reakcji plonu rozpatrywanej odmiany do środowiskowej średniej reakcji plonu badanych odmian. Stabilność plonowania odmiany jest jej własnością relatywną, określającą

kształt reakcji plonu na środowiska w stosunku do innych badanych odmian, może być ona odmienna, zależnie od zbioru badanych odmian, w którym uczestniczy. W ten sam sposób definiuje się i analizuje stabilność innych ilościowych cech odmian.

- **Analizą stabilności plonowania odmian** nazywamy badanie, polegające na statystycznej ocenie stopnia stabilności plonowania testowanych odmian za pomocą podobieństwa kształtu reakcji plonu każdej odmiany do środowiskowej średniej reakcji plonu, a także na identyfikacji odmian plonujących stabilnie.
- **Odmianą plonującą stabilnie** nazywamy taką odmianę, która wykazuje bardzo duże podobieństwo kształtu reakcji plonu do środowiskowej średniej reakcji plonu badanych odmian, tzn., że jej reakcja plonu na zmienne warunki środowiskowe jest równoległa (w praktyce doświadczalnej prawie równoległa) do środowiskowej średniej reakcji plonu badanych odmian, czyli plon takiej odmiany jest ściśle skorelowany dodatnio ze średnimi środowiskowymi. Taką odmianę nazywa się także odmianą wiernie plonującą.
- **Miary lub wskaźniki stabilności plonowania odmiany są** takimi wskaźnikami statystycznymi (wielkościami liczbowymi zdefiniowanymi matematycznie i przyjmującymi konkretne wartości dla każdej badanej odmiany), które charakteryzują ilościowo stopień stabilności plonowania odmiany (miary ilościowe) lub tylko pozwalają uporządkować badane odmiany pod względem stopnia stabilności plonowania, dość zgodnie z porządkiem dokonany na podstawie miary ilościowej (miary porządkujące). Stosuje się zwykle dwie równoważne ilościowe miary stabilności odmiany, tj. wariację stabilności Shukli i ekowalencję Wricke'go. oraz różne porządkujące miarami stabilności, opracowane głównie przez Hühna.
- **Szeroką adaptacją (nazywaną też szeroką lub ogólną zdolnością adaptacyjną) odmiany** określamy zdolność odmiany do relatywnie wysokiej produktywności, wyrażonej zdolnością do tworzenia plonu na relatywnie wysokim poziomie (w porównaniu do innych wartościowych odmian) w zmiennych warunkach środowiskowych rejonu uprawy, lat lub systemów uprawy. Jednakże, prawie zawsze szeroką adaptację odmiany odnosi się do jej wiernie, czyli stabilnie wysokiej produktywności w docelowym rejonie uprawy.
- **Wąską (lokalną, specyficzną) adaptacją odmiany** nazywamy zdolność odmiany do tworzenia plonu na relatywnie wysokim poziomie w pewnych rodzajach warunków środowiskowych (np. w podrejonach lub tylko w nisko- albo tylko wysoko-nakładowych systemach uprawy). Szeroka i wąska adaptacja odmiany są jej własnościami relatywnymi, określającymi szczególnie pożądane reakcje plonowania na środowiska w stosunku do innych badanych odmian. Mogą być one odmienna dla danej odmiany, zależnie od zbioru badanych odmian, w którym ona uczestniczy.
- **Analiza adaptacji odmian** jest badaniem, polegającym na wyróżnieniu i opisie odrębnych rodzajów reakcji plonu tych odmian na badane warunki środowiskowe oraz na wskazaniu odmian o szerokiej lub wąskiej adaptacji, a także na wyróżnieniu odmian nie przystosowanych (nisko plonujących) we wszystkich lub większości środowisk.
- **Analiza szerokiej adaptacji odmian** jest badaniem, polegającym na ocenie stopnia szerokiej adaptacji odmian.

- **Stopniem szerokiej adaptacji odmiany** nazywamy podobieństwo reakcji plonu tej odmiany na zmienne warunki środowiskowe do normatywnej reakcji plonu badanych odmian na te warunki środowiskowe na realnie możliwym (stwierdzonym empirycznie) odpowiednio wysokim poziomie. Rozsądne jest przyjęcie trzech normatywnych reakcji plonu na środowiska. Są nimi reakcja plonu maksymalnego na zmienne warunki środowiskowe, średnia reakcja plonu badanych odmian na zmienne warunki środowiskowe oraz taka, która jest równoległa do średniej reakcji, ale podniesiona o pewną racjonalnie wybraną wartość. Zależnie od przyjętej jednej z trzech podanych normatywnych reakcji plonu, definiujemy w tej pracy stopień szerokiej adaptacji odmiany odpowiednio w sensie I, II lub III.
- **Miary lub wskaźniki stopnia szerokiej adaptacji odmiany** są wskaźnikami statystycznymi, które charakteryzują ilościowo (miary ilościowe) stopień szerokiej adaptacji tej odmiany w sensie I, II lub III, albo pozwalają uporządkować odmiany (miary porządkujące) względem stopnia szerokiej adaptacji, zgodnie z porządkiem dokonany na podstawie danej miary ilościowej. Niektóre z tych miar są oparte na teorii statystyki matematycznej, czyli wywodzą się z modelu statystycznego i są oparte na zasadach wnioskowania statystycznego. Inne zaś miary są oparte na teorii statystyki opisowej, czyli są zdefiniowane na gruncie ogólnej filozofii statystycznej lub nawet modelu statystycznego, ale ich analiza ogranicza się tylko do oszacowania z danych eksperymentalnych.
- **Miary parametryczne stopnia szerokiej adaptacji odmiany** są wskaźnikami statystycznymi, zdefiniowanymi na podstawie parametrów modelu mieszanego Shukli lub ich estymatorów.
- **Miary nieparametryczne stopnia szerokiej adaptacji odmiany** są wskaźnikami statystycznymi, zdefiniowanymi na podstawie rang estymatorów dla parametrów modelu mieszanego Shukli lub rang średnich w tabeli o postaci odmiany \times środowiska.

WSTĘP

Większość ważnych cech rolniczych roślin uprawnych, takich jak plon, jego składowe lub cechy jakości plonu są zmiennymi ilościowymi (zwykle ciągłymi) i podlegają one zjawisku interakcji genotypowo-środowiskowej, którą określa się krótko interakcją GE dla danej cechy. Interakcja genotypowo-środowiskowa jest powszechnym zjawiskiem, polegającym na różnej, tj. nierównoległej reakcji danej cechy badanych odmian na zmienne warunki środowiskowe w miejscowościach (stacjach oceny odmian), latach (sezonach vegetacyjnych) i systemach lub czynnikach uprawy roślin (Allard i Bradshaw, 1964; Caliński i in., 1980, 1983; Crossa, 1990; Basford i Cooper, 1998; Hill i in., 1997; Kang, 1998; Annicchiarico, 2002 a, b; Yan i Kang, 2003; Przystalski i in., 2008; Murphy i in., 2009; Romay in., 2010; Scapim i in., 2010). Ta interakcja wyraża się także w odmiennym zróżnicowaniu średnich odmianowych dla badanej cechy (i zwykle zróżnicowaniu rankingu tych średnich odmianowych — interakcja GE typu crossover lub interakcja jakościowa) w poszczególnych środowiskach (Gauch i Zobel, 1997; Yan i Kang, 2003; Ceccarelli i Grando, 2007; Carena i in., 2009; Mohammadi i in., 2010). Zatem, z powodu

interakcji GE w różnych środowiskach nie te same odmiany mogą relatywnie wysoko plonować.

Interakcja GE w miejscowościach [nazywana zwykle interakcją odmiany (genotypy) × miejscowości i oznaczana symbolem GL], dotycząca plonowania i innych ważnych cech rolniczych odmian ma poważne konsekwencje dla hodowli i uprawy roślin (Crossa 1990; Cooper i in., 1996; Gauch i Zobel, 1997; Hill i in., 1997; Basford i Cooper, 1998; Annicchiarico, 2002 a, b; Annicchiarico i in., 2005, 2006). Interakcję GE w miejscowościach dla plonowania i innych cech, stwierdzoną w swoim systemie odmianowo-środowiskowym, hodowca może:

- 1) pominąć, co jest nierozsądne (Kang, 1998; Atlin i in., 2000 a b; Sivapalan i in., 2003; Roozeboom i in., 2008; Blanche i in., 2009),
- 2) wykorzystać poprzez wytworzenie odmian o wąskiej (lokalnej) adaptacji (Cooper i in., 1996; Gauch i Zobel, 1997; Cooper 1999; Annicchiarico 2002 a,b; Chapman i de la Vega, 2002; Annicchiarico i in., 2005, 2006; Samonte i in., 2005; de la Vega i Chapman, 2006; Kaya i in., 2006; Ceccarelli i Grando, 2007; Gauch i in., 2008; Przystalski i in., 2008; Drzazga i in., 2009), albo
- 3) usunąć poprzez wytworzenie odmian o szerokiej adaptacji (Allard i Bradshaw, 1964; Eberhart i Russell, 1966; Ceccarelli, 1989; Kang i Pham, 1991, 1993, 1998; Braun i in., 1996, 1998; Cooper i in., 1996; Cooper 1999; Annicchiarico, 2002 b; Lillemo i in., 2005; Ceccarelli i Grando, 2007; Joshi i in., 2007 b; Gauch i in., 2008; Przystalski i in., 2008; Drzazga i in., 2009; Mohammadi i in., 2010; Scapim i in., 2010).

Szeroką adaptacją odmiany nazywamy zdolność do relatywnie wysokiej produktywności, wyrażonej poprzez tworzenie plonu na relatywnie wysokim poziomie (w porównaniu do innych badanych odmian) w przestrzennie zmiennych warunkach środowiskowych, czyli w populacji miejscowości w obrębie rozpatrywanego rejonu uprawy, zwanego rejonem docelowym (ang. target region) i w danym sezonie wegetacyjnym, czyli roku, albo średnio w latach (Barah i in., 1981; Ceccarelli, 1989; Eskridge i Johnson, 1991; Annicchiarico i Perenzin, 1994; Braun i in., 1996, 1998; Hill i in. 1997; Cooper, 1999; de la Vega i in., 2001; Annicchiarico, 2002 a,b; Yan i Kang, 2003; Chloupek i Hrstkova, 2005; Lillemo i in., 2005; Yan i Tinker, 2005; Kaya i in., 2006; Joshi i in., 2007 b; Gauch i in., 2008). Szeroką adaptację odmian można wykrywać na podstawie środowiskowej reakcji plonu odmian w seriach doświadczeń odmianowych, wykonywanych w badaniach przedrejestrowych, rejestrowych i porejestrowym doświadczalnictwie odmianowym (PDO).

W pojęciu szerokiej adaptacji odmiany przyjmuje się, że rozpatrywany rejon uprawy ma odpowiednio duży zakres zmienności czynników biotycznych i abiotycznych (Brennan i Byth, 1979; Hill i in., 1997; Basford i Cooper, 1998; Atlin i in. 2000 a, b; Annicchiarico, 2002 a, b; Trethowan i in., 2002; Sharma i in., 2007; Singh i in., 2007; Roozeboom i in., 2008; Williams i in., 2008).

W praktyce rolniczej różnych krajów, także w Polsce, preferowane są odmiany najważniejszych roślin uprawnych o szerokiej adaptacji (Finlay i Wilkinson, 1963; Allard i Bradshaw, 1964; Brennan i Byth, 1979; Barah i in., 1981; Kang i Pham, 1991, 1993, 1998;

Braun i in., 1996, 1998; Link i in. 1996; Cooper, 1999; Mądry 2002; Dopierała i in., 2003; Yan i Kang, 2003; Lillemo i in., 2005; Kang i in., 2006; Weber i Zalewski, 2006; Fan i in., 2007; Joshi i in., 2007 b; Singh i in., 2007; Adugna, 2008; Paderewski i in., 2008; Williams i in., 2008; Blanche i in., 2009; Drzazga i in., 2009; Hernandez-Segundo i in., 2010; Mohammadi i in., 2010; Sharma i in., 2010; Stefanova i Buirchell, 2010).

Większość odmian o szerokiej adaptacji w przestrzennie zmiennych warunkach środowiskowych określonego rejonu uprawy odznacza się jednocześnie lub kompromisowo dwiema własnościami. Odmiany wykazujące taką zdolność, plonują średnio względnie wysoko w stosunku do innych odmian (wykazują względnie wysokie średnie genotypowe dla plonu) oraz ich plonowanie jest w dużym stopniu stabilne (Eberhart i Russell, 1966; Brennan i Byth, 1979; Barah i in., 1981; Lin i in., 1986; Kang 1988, 1993, 1998; Crossa, 1990; Eskridge, 1990; Eskridge i Johnson, 1991; Eskridge i in., 1991; Kang i Pham, 1991; Helms, 1993; Yue i in., 1997, Rajfura i Mądry, 2001; Mądry, 2002; Mekbib, 2002, 2003; Tollenaar i Lee, 2002; Yan i Kang, 2003; Yan i Rajcan, 2003; Lillemo i in., 2005; Gauch i in., 2008; Mohammadi i in., 2008; Roozeboom i in., 2008; Blanche i in., 2007, 2009; Shah i in., 2009; Scapim i in., 2010; Sharma i in., 2010). Wysokie i stabilne plonowanie odmian, najczęściej zapewniające im szeroką adaptację, jest zjawiskiem skomplikowanym. Atrybuty te są wynikiem głównie znaczącej tolerancji odmian na stresy biotyczne i abiotyczne (Link i in., 1996; Hill i in., 1997; Robinson i Jalli, 1999; Tollenaar i Lee, 2002; Trethowan i in., 2002; Mulema i in., 2004; Howe i Brunner, 2005; Joshi i in., 2007 a,b; Sharma i in., 2007; Singh i in., 2007; Annicchiarico i Iannucci, 2008; Rodriguez i in., 2008; Ulukan, 2008; Albrizio i in., 2010).

INTERAKCJA GE, JEJ MODELOWANIE, ANALIZA ORAZ WYKORZYSTANIE W HODOWLI I UPRAWIE ROŚLIN

Interakcja genotypowo-środowiskowa, jako zjawisko polegające na nierównoległej reakcji danej cechy badanych odmian na zmienne warunki środowiskowe w miejscowościach, latach albo systemach uprawy, może przyjmować dwie formy (kategorie), wyróżniane w hodowli roślin i ocenie odmian. Pierwsza z tych form współdziałania GE, nazywana interakcją jakościową lub przemienną (ang. crossover genotype \times environment interaction, crossover GEI albo w skrócie COI) występuje wtedy, gdy uporządkowanie odmian pod względem średnich rozpatrywanej cechy nie jest identyczne w badanych środowiskach. Taką interakcję można nazwać przemienną lub przestawną interakcją genotypowo-środowiskową. Natomiast, jeżeli wspomniane uporządkowanie odmian jest identyczne w środowiskach, zaś odmianowe różnice średnich danej cechy są tylko ilościowo odmienne w środowiskach, choć mają ten sam znak, to występuje druga forma interakcji GE, nazywana ilościową interakcją GE (ang. noncrossover genotype \times environment interaction, noncrossover GEI) — (Gauch Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b; Yan i Kang, 2003; Annicchiarico i in., 2006, 2008; Gauch, 2006; Yan i in., 2007; Yang 2007; Burgueno i in., 2008; Gauch i in., 2008). Ceccarelli i Grando (2007) wskazują, że interakcja jakościowa występuje bardzo często dla różnych gatunków roślin w różnych rejonach uprawy. Większe znaczenie dla środowiskowej reakcji odmian pod względem

danej cechy ma interakcja jakościowa. Ten rodzaj interakcji GE decyduje najbardziej o znaczącej niestabilności większości odmian w zbiorze badanych obiektów i zmniejsza szansę znalezienia odmian o dużym stopniu szerokiej adaptacji (Hühn, 1990 a, b, 1996; Braun i in., 1996, 1998; Gauch Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b; Yan i Kang, 2003; Dehghani, 2008).

W literaturze hodowlanej i uprawowej stosowany jest powszechnie termin „analiza i interpretacja interakcji GE”. Analiza i interpretacja interakcji GE w danym układzie odmianowo-środowiskowym polega na badaniu wpływu (efektów) odmian, środowisk oraz interakcji GE na rozpatrywaną cechę. Może być ona wykonywana za pomocą różnych podejść filozoficzno-metodycznych i metod statystycznych do opracowania danych eksperymentalnych z serii doświadczeń odmianowych. Najważniejszymi podejściami do analizy i interpretacji interakcji GE są analiza stabilności plonu lub innych cech odmian oraz analiza adaptacji odmian dla plonu (Lin i in., 1986; Becker i Leon, 1988; Crossa, 1990; Cooper i DeLacy, 1994; Cooper i Byth, 1996; Cooper i in., 1996; Kang, 1998; Annicchiarico, 2002 b; Yan i Kang, 2003).

Stabilność odmiany pod względem pewnej cechy (głównie plonu) jest zdefiniowana na dwa główne sposoby, wynikające z dwóch koncepcji, tj. koncepcji stabilności statycznej (zwanej też stabilnością statyczną lub biologiczną) oraz koncepcji stabilności dynamicznej (zwanej też stabilnością dynamiczną lub rolniczą) — (Becker, 1981; Becker i Leon, 1988; Lin i in., 1986; Annicchiarico, 2002 b). Stabilność statyczna odmiany określona jest jako bliskość jej rzeczywistej reakcji pod względem danej cechy na zmienne warunki środowiskowe w rejonie uprawy do reakcji stałej (równoległej do osi 0X). Natomiast, stabilność rolnicza odmiany jest bliskością jej rzeczywistej reakcji pod względem danej cechy na wymienione warunki środowiskowe do średniej reakcji środowiskowej wszystkich badanych odmian, którą można wyrazić także za pomocą korelacji średnich tej cechy odmiany w środowiskach ze średnimi środowiskowymi. Odmiana stabilna w sensie rolniczym dla danej cechy odznacza się taką reakcją na środowiska (kształtem reakcji), która jest prawie równoległa do średniej reakcji wszystkich badanych odmian, a więc jej cecha jest ściśle skorelowana ze średnimi środowiskowymi. Zatem, stabilność rolnicza danej odmiany pod względem określonej cechy jest jej własnością względną, tzn. zależy ona od zbioru odmian na tle którego jest badana. Z tego wynika, że ocena stabilności odmiany w danej populacji środowisk może być różna, jeżeli byłaby ona badana w różnych zbiorach odmian.

Istnienia odmian o stabilności statycznej dla plonu, a także innych cech rolniczych nie potwierdza obszerna literatura naukowa, oparta na badaniach doświadczalnych. Jest to zrozumiałe w obliczu wiedzy o uwarunkowaniu genetycznym i środowiskowym zmienności cech organizmów żywych i mechanizmach adaptacyjnych do środowiska (Basford i Cooper, 1998; Chloupek i Hrstkova, 2005; Howe i Brunner, 2005; Ulukan, 2008; Tollenaar i Lee, 2002). Zatem, koncepcja stabilności statycznej odmian jest raczej dość abstrakcyjna, nie mająca odzwierciedlenia w rzeczywistości. Z drugiej strony, gdyby nawet wyhodowano odmiany o stabilności statycznej dla plonu lub innych cech rolniczych, to nie byłyby one konkurencyjne dla odmian stabilnych w sensie rolniczym.

Hodowla roślin najważniejszych gatunków nastawiona jest na wytwarzanie odmian o wysokim stopniu stabilności w sensie rolniczym dla plonu i innych cech, ponieważ takie odmiany reagują (zachowują się) wiernie pod względem tych cech w różnych środowiskach, tzn. relatywnie do średniej odmianowej ekspresji cechy w środowisku i dlatego ich reakcja jest przewidywalna (Eberhart i Russell, 1966; Barah i in., 1981; Kang, 1998; Crossa, 1990; Eskridge 1990; Eskridge i Johnson, 1991; Eskridge i in., 1991; Kang, i Pham, 1991; Helms, 1993; Yue i in., 1997; Basford i Cooper, 1998; Rajfura i Mądry 2001; Mądry, 2002; Tollenaar i Lee, 2002, Yan i Kang, 2003; Yan i Rajcan, 2003; Lillemo i in., 2005; Gauch i in., 2008; Mohammadi i in., 2008; Roozeboom i in., 2008; Blanche i in., 2007, 2009; Shah i in., 2009; Scapim i in., 2010; Sharma i in., 2010). Odmiany w dużym stopniu stabilne w sensie rolniczym są przewidywalne w zmiennych warunkach środowiskowych w rejonie uprawy, co wspólnie z wysoką średnią plonu stanowi o ich szerokiej adaptacji. Zatem, w tej pracy, podobnie jak jest to powszechnie przyjęte, będziemy zajmowali się tylko rolniczą stabilnością odmian, nazywając ją krótko stabilnością odmian.

Szeroką adaptacją (nazywaną też szeroką lub ogólną zdolnością adaptacyjną albo adaptacyjnością) odmiany (ang. wide adaptation lub general adaptability) określamy zdolność odmiany do relatywnie wysokiej produktywności, wyrażonej zdolnością do tworzenia plonu na relatywnie wysokim poziomie (w porównaniu do innych wartościowych odmian) w zmiennych warunkach środowiskowych (Finlay i Wilkinson, 1963; Annicchiarico, 2002 b; Abidin i in., 2005; Chloupek i Hrstkova, 2005; Paderewski, 2008). Najczęściej szeroką adaptację odmian rozpatruje się w odniesieniu do populacji miejscowości w obrębie dużego i zmiennego rejonu uprawy, który może być określony w obrębie jednego kraju lub dużego rejonu geograficznego w wielu krajach (Braun i in., 1996; Link i in., 1996; Gauch i Zobel, 1997; Basford i Cooper, 1998; Hausmann i in., 2000; Sivapalan i in., 2000, 2003; Yan i in., 2000; Annicchiarico, 2002 a; Lillemo i in., 2005; Dreccer i in., 2007; Gomez-Becerra i in., 2007; Joshi i in., 2007 a, b; Sharma i in., 2007; Roozeboom i in., 2008; Drzazga i in., 2009; Annicchiarico i in., 2010). Można odnosić ją także do różnorodnych systemów lub poziomów czynników uprawowych (Singh i in., 2007; Annicchiarico i Iannucci, 2008; Przystalski i in., 2008; Carena i in., 2009; Kaut i in., 2009; Albrizio i in., 2010; Annicchiarico i in., 2010).

Wąską (lokalną, specyficzną) adaptacją odmiany (ang. local lub specific adaptation) nazywamy zdolność odmiany do tworzenia plonu na relatywnie wysokim poziomie w pewnych rodzajach warunków środowiskowych (np. w podrejonach, zwanych mega-środowiskami, albo w nisko- lub wysoko-nakładowych systemach uprawy) — (Cooper i in., 1996; Gauch i Zobel, 1997; Basford i Cooper, 1998; Cooper, 1999; Annicchiarico, 2002 a, b; Chapman i de la Vega, 2002; Annicchiarico i in., 2005, 2006; Samonte i in., 2005; de la Vega i Chapman, 2006; Kaya i in., 2006; Murphy i in., 2007; Przystalski i in., 2008).

Szeroka lub wąska adaptacja odmiany są jej własnościami relatywnymi, opisującymi określony rodzaj reakcji plonowania na środowiska w stosunku do innych badanych odmian. Każda z tych własności dla danej odmiany może być odmienna, zależnie od zbioru badanych odmian, w którym ona uczestniczy oraz od zmienności warunków przyrodniczych docelowego rejonu uprawy.

W programach hodowli roślin bardzo ważny jest wybór strategii i kierunku hodowli odmian o wąskiej lub szerokiej adaptacji. Uznaje się zwykle, że ten wybór powinien być zależny od proporcji wariancji efektów interakcji GE do wariancji głównych efektów genotypowych (odmianowych) plonu lub innych cech w danym układzie genetyczno-środowiskowym (Atlin i in., 2000 a, b; Annicchiarico, 2002 b; de la Vega i Chapman, 2006). Jeżeli wartość wariancji efektów interakcji GE, $\hat{\sigma}_{ge}^2$, jest podobna do wariancji głównych efektów genotypowych dla plonu, $\hat{\sigma}_g^2$, lub ich relacja jest mniejsza od jedności (przeważa wariancja głównych efektów genotypowych), to w takich okolicznościach efektywna może być hodowla odmian o szerokiej adaptacji. Natomiast, jeżeli znacząco przeważa wariancja efektów interakcji GE nad wariancją głównych efektów genotypowych, to proponuje się kierunek hodowli odmian o wąskiej adaptacji, jako skuteczny, ponieważ daje on większy postęp genetyczny, niż hodowla odmian szeroko przystosowanych do warunków w rejonie uprawy (Atlin i in., 2000 a, b; Annicchiarico, 2002 a, b; Chapman i de la Vega, 2002; Annicchiarico i in., 2005, 2006; de la Vega i Chapman, 2006).

PODEJŚCIA I METODY STATYSTYCZNE DO BADANIA STABILNOŚCI I ADAPTACJI ODMIAN W REJONIE UPRAWY

Jak podano w poprzednim podrozdziale, do oceny plonowania i innych cech odmian w danym rejonie uprawy, z uwzględnieniem efektów interakcji GE, stosuje się dwa główne podejścia statystyczne, nazywane analizą stabilności odmian i analizą adaptacji odmian. W każdym z tych podejść stosuje się różne metody statystyczne do analizy danych z wielokrotnych lub wielokrotnych i wieloletnich serii doświadczeń odmianowych. Celem analizy stabilności odmian jest ocena stopnia stabilności plonowania (lub innej cechy) testowanych odmian za pomocą podobieństwa kształtu reakcji plonu każdej odmiany do środowiskowej średniej reakcji plonu, a także na identyfikacji odmian plonujących stabilnie lub w dużym stopniu stabilnie. Natomiast, celem analizy adaptacji odmian jest wyróżnienie i opis odrębnych rodzajów reakcji plonu tych odmian na badane warunki środowiskowe oraz na wskazaniu odmian o szerokiej lub wąskiej adaptacji. Ze względu na ważność i specjalistyczne wymagania oceny szerokiej adaptacji odmian, w obrębie analizy adaptacji odmian wyróżnia się także analizę szerokiej adaptacji odmian. Stanowi ona podejście obejmujące modele, metody i miary statystyczne do oceny natężenia, czyli stopnia szerokiej adaptacji odmian. Warto podkreślić, że dotychczas w literaturze nie wprowadzono określenia „stopień szerokiej adaptacji odmiany”. Jednak, ideologia metod statystycznych posługujących się odpowiednimi miarami, nazywanymi czasami miarami adaptacyjności (ang. adaptability measures lub general adaptability measures) zawiera taką właśnie wymowę (Barah i in., 1981; Fox i in., 1990; Pritts i Luby, 1990; Piepho, 1995; Annicchiarico i Mariani, 1996; Flores i in., 1998; Annicchiarico, 2002 b; Luquez i in., 2002; Kang i in., 2006; Mohammadi i Amri, 2008; Scapim i in., 2010).

Wprowadzenie do metod analizy stabilności plonu i analizy adaptacji odmian

Szczegółowa analiza obszernej literatury dotyczącej badań stabilności i rodzajów adaptacji odmian (analizy stabilności i adaptacji) wskazuje, że pojęcie stabilności odmiany,

które jest tylko składnikiem szerokiej adaptacji jest często utożsamiane z szeroką adaptacją odmiany. Zatem, stabilność i szeroka adaptacja odmian oraz analiza stabilności i szerokiej adaptacji dla plonu i innych cech są rozumiane i stosowane bardzo swobodnie w ocenie i interpretacji reakcji odmian na zmienne warunki środowiskowe.

Wobec częstych przypadków niecisłego i niekonsekwentnego posługiwania się pojęciami i podejściami metodycznymi dotyczącymi stabilności i szerokiej adaptacji odmian, również parametry (miary) statystyczne służące do oceny zarówno stabilności, jak i szerokiej adaptacji odmian są nazywane bardzo często miarami stabilności odmian (Lin i in., 1986; Eskridge, 1990; Hühn, 1990 a, b; Eskridge i Johnson, 1991; Eskridge i in., 1991; Duarte i Zimmermann, 1995; Basford i Cooper, 1998; Flores i in., 1998; Piepho, 1999; Hussein i in., 2000; Scapim i in., 2000; Sabaghnia i in., 2006, 2008; Blanche i in., 2007; Solomon i in., 2007; Mohammadi i in., 2008, 2010; Segherloo i in., 2008). Także, analiza adaptacji odmian jest często nazywana analizą stabilności odmian. Tworzy to niemałą trudność w korzystaniu z literatury naukowej, zwłaszcza przez niedoświadczonych w tej materii naukowców i hodowców.

Jednakże, wielu badaczy i autorów publikacji w zakresie hodowli roślin i biometrii rozróżniają wyraźnie te odrębne pojęcia, podejścia metodyczne oraz miary. Odnoszą je odpowiednio do stabilności odmian (zwykle pod względem plonowania) i nazywają je odpowiednio stabilnością, analizą stabilności oraz miarami stabilności odmian albo do szerokiej adaptacji odmian i nazywają je odpowiednio szeroką adaptacją, analizą szerokiej adaptacji oraz miarami szerokiej adaptacji odmian (Bilbro i Ray, 1976; Barah i in., 1981; Becker i Leon, 1988; Kang, 1988, 1993; Fox i in., 1990; Pritts i Luby, 1990; Kang i Pham, 1991; Eskridge i in., 1992, 1993; Yau i Hamblin, 1994; Annicchiarico i Mariani, 1996; Annicchiarico, 2002 b; Luquez i in., 2002; Abidin i in., 2005; Kang i in., 2006; Mohammadi i Amri, 2008; Scapim i in., 2010). W tym opracowaniu literatury będziemy posługiwali się odpowiednio nazewnictwem, adekwatnie do treści merytorycznej określenia „stabilność odmian” lub „analiza stabilności”, używając go tylko do tych badań, w których wykonywano analizę stabilności odmian, zgodnie z podaną tu klasyczną definicją tego terminu. W innych przypadkach będziemy używali określenia „adaptacja odmian” lub „analiza adaptacji”.

Analizę stabilności i adaptacji odmian wykonuje się głównie dla plonu, ale także dla innych rolniczych cech roślin, głównie określających jakość plonu i porażenie chorobami (Robinson i Jalli, 1999; Grausgruber i in., 2000; Luquez i in., 2002; Robert, 2002; Dopierała i in., 2003; Joshi i in., 2007 a; Williams i in., 2008; Blanche i in., 2009; Murphy i in., 2009; Annicchiarico i in., 2010; Gomez-Becerra i in., 2010).

W praktyce oceny odmian nie wystarcza analiza stabilności odmian pod względem plonu lub innych cech. Bardzo ważna, a nawet decydująca o wartości rolniczej odmiany, jest średnia genotypowa badanej cechy. Jak podawano wcześniej, taka dwukryterialna ocena odmian, która łączy informację o średniej genotypowej cechy odmian i stabilności tej cechy, jest wykonywana w ramach analizy szerokiej adaptacji odmian. Zatem, analiza stabilności odmian, wykonywana za pomocą odpowiednich metod z uwzględnieniem parametrycznych i nieparametrycznych miar stabilności, towarzyszy zwykle analizie szerokiej adaptacji odmian z użyciem różnych miar stopnia szerokiej adaptacji.

Przykłady zastosowań metod i miar stabilności odmian

Aduana i Labuschang (2002) zajmowali się oceną stopnia stabilności plonowania 10 oleistych odmian lnu, przeniesionych z Kanady do Etiopii. Badacze porównywali wzajemne skorelowanie pomiędzy parametrami stabilności w analizie regresji łącznej, tj. współczynnikiem funkcji regresji, wariancją odchyleń od funkcji regresji s_{di}^2 , wariancją stabilności Shukli σ_i^2 , parametrem ASV_i w analizie AMMI, współczynnikiem zmienności CV_i i współczynnikiem determinacji R^2 . Stwierdzili oni silne lub dość silne korelacje rang pomiędzy badanymi wskaźnikami. Oznacza to, że miary stabilności podobnie (zgodnie) porządkowały odmiany według ich stopnia stabilności plonowania. Miary analizy regresji łącznej i AMMI wykazywały podobną przydatność do wykrywania odmian o stabilnej reakcji plonu na środowiska. Annicchiarico i Perenzin (1994) porównywali wyniki analizy regresji łącznej i AMMI dla plonu odmian pszenicy w 31 miejscowościach we Włoszech, badanych przez 3 kolejne sezony wegetacyjne (1990–1992). Stwierdzili także, że obie metody, tj. analiza regresji łącznej i AMMI wykazują podobną przydatność do wykrywania odmian o stabilnej reakcji na środowiska. Wamatu i Thomas (2002) badali stabilność plonu nasion 10 odmian grochu w 7 miejscowościach w Kenii, stosując analizę regresji łącznej i AMMI. Zidentyfikowali jednocześnie te same odmiany jako stabilnie reagujące na środowiska zarówno na podstawie podwójnych wykresów AMMI(1) i AMMI(2), jak i analizy regresji łącznej.

Yue i in. (1997) badali wzajemne korelacje pomiędzy wieloma parametrycznymi miarami stabilności plonowania odmiany, tj. ekowalencją Wricke'go, W_i^2 , współczynnikiem funkcji regresji, wariancją odchyleń od funkcji regresji, s_{di}^2 , współczynnikiem zmienności CV_i , a także dwiema nieparametrycznymi miarami Nassara i Huehna, tj. $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$. Autorzy wykorzystywali dane dla plonu nasion 12 odmian soi w 10 środowiskach (kombinacje 5 miejscowości \times 2 lata) w stanie Kansas, USA w latach 1988–1989. Stwierdzono, że ekowalencja Wricke'go była silnie skorelowana z wariancją odchyleń od funkcji regresji oraz z dwiema miarami nieparametrycznymi $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$, zaś nie była ona znacząco skorelowana ze współczynnikiem funkcji regresji i współczynnikiem zmienności CV_i . Oznacza to, że tylko cztery rozpatrywane miary, tj. W_i^2 , s_{di}^2 , oraz $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ wykazywały podobną przydatność do wykrywania odmian soi o stabilnej reakcji plonu na środowiska.

Cassida i in. (2005) zastosowali analizę AMMI do oceny stabilności plonowania odmian prosa różgowatego w zakresie zmienności środowiskowej. Wykorzystali oni dane dla plonu suchej masy ligniny i celulozy 9 odmian w 5 miejscowościach stanów południowo-centralnych USA w 3 latach. Wskazali oni odmiany o stabilnej reakcji rozpatrywanych cech na badane środowiska, decydującej o ich przydatności do uprawy w celu uzyskania surowca do produkcji biopaliwa. Również Li i in. (2006) badali stabilność plonowania 11 odmian pszenicy jarej w 20 środowiskach w Chinach za pomocą parametru ASV_i , jako miary stabilności AMMI(s). W obu wymienionych pracach potwierdzono skuteczność analizy AMMI do badania stabilności plonowania odmian.

Annicchiarico (1997) porównywał analizę regresji łącznej i analizę AMMI pod względem powtarzalności oceny stabilności odmian w różnych sezonach wegetacyjnych. Obie te metody, tj. analiza AMMI oraz miary stabilności oparte na modelu analizy regresji łącznej (współczynnik regresji i wariancja stabilności Shukli), okazały się pod tym względem podobne. Metody porównano na zbiorach danych, pochodzących z serii doświadczeń wielokrotnych i wieloletnich, przeprowadzonych we Włoszech z pszenicą chlebową, pszenicą twardą, kukurydzą i owsem.

Przykłady zastosowań metod do badania adaptacji odmian

Do analizy adaptacji odmian stosuje się przeważnie cztery metody, tj. analizę regresji łącznej (ang. joint regression analysis), analizę AMMI [ang. the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model-based analysis], analizę GGE [ang. the genotype main effects and genotype \times environment interaction effects (GGE) model-based analysis] oraz łączną analizę skupień i analizę GGE lub AMMI (ang. pattern analysis) — (Gauch, 1992, 2006; Caliński i in., 1995; Sivapalan i in., 2000, 2003; Annicchiarico, 2002 b; Yan i Kang, 2003; Smith i in., 2005; Yan i Tinker, 2005; Kaya i in., 2006; Yan i in., 2007; Gauch i in., 2008; Paderewski, 2008; Paderewski i in., 2008, 2011). W Polsce dostępny jest pakiet statystyczny SERGEN (Caliński i in. 1995), który umożliwia zastosowanie większości wymienionych metod do analizy danych z serii odmianowych doświadczeń wielokrotnych i wieloletnich. Był i jest on szeroko wykorzystywany przez hodowców i badaczy wartości gospodarczej odmian (Kaczmarek i in., 1997; Dopierała i in., 2003)

W pracy Annicchiarico i in. (2005) dokonano grupowania odmian pszenicy twardej pod względem rodzaju adaptacji za pomocą analizy AMMI na podstawie środowiskowej reakcji plonu odmian. Wydzielono grupy odmian o szerokiej adaptacji i odmian specyficznym przystosowanych do badanych środowisk, obejmujących 18 miejscowości w Algierii. Również w pracy Mohammadi i Amri (2009) dokonano grupowania odmian pszenicy twardej pod względem rodzaju adaptacji za pomocą analizy AMMI. Wydzielono grupy odmian o szerokiej adaptacji i odmian specyficznym przystosowanych do wyznaczonych grup środowisk w obrębie 19 miejscowości w Iranie. Zatem analiza AMMI umożliwiła wskazanie odmian stabilnie plonujących oraz odmian dobrze zaadaptowanych do środowisk o sprzyjających warunkach do plonowania oraz odmian zaadaptowanych do środowisk o niesprzyjających warunkach do plonowania.

Analiza AMMI wykorzystana przez Annicchiarico i in. (2006) okazała się przydatna do wykrywania odmian traw, należących do 4 gatunków, tj. kostrzewy trzcinowatej, kostrzewy czerwonej, wiechliny łąkowej, życicy trwałej o wąskiej adaptacji (specyficznym przystosowanych) do danej grupy środowisk we Włoszech na podstawie danych dla trwałości darni i gęstości runi. W pracy Annicchiarico i Piano (2005) na podstawie wyników analizy AMMI dla plonu suchej masy lucerny zidentyfikowano 3 odmiany o wąskiej adaptacji, czyli odmiany, które w odpowiednich dla nich warunkach środowisk we Włoszech plonowały relatywnie najwyżej, spośród badanych odmian. Ebdon i Gauch (2002), badając jakość zadarniania odmianami życicy trwałej i wiechliny łąkowej w USA, wskazali 3 spośród 125 odmian wiechliny łąkowej i 4 ze 123 odmian życicy trwałej o najlepszej jakości darni, specyficznym przystosowane do wyznaczonych grup środowisk.

Mulema i in. (2004) stosowali metodę AMMI do analizy stabilności i adaptacji odmian ziemniaków pod względem odporności na zarazę ziemniaczaną w 4 miejscowościach i 3 latach w Afryce. Za pomocą wykresu AMMI(1) badacze określili odmiany stabilne oraz o dużej średniej odporności na tę chorobę, czyli takie, które są relatywnie odporne na rozpatrywaną chorobę w różnych warunkach środowiskowych. Takie odmiany można nazwać obiektami genetycznymi o szerokiej adaptacji pod względem odporności na zarazę ziemniaczaną.

Analiza AMMI i GGE były stosowane do identyfikacji odmian o wąskiej i szerokiej adaptacji odmian łubinu na podstawie danych dla plonu z niekompletnej serii doświadczeń (Stefanova i Buirchell, 2010). Łączna analiza AMMI i analiza skupień została wykorzystana w pracy Annicchiarico i Perezin (1994) do zidentyfikowania odmian o wąskiej i szerokiej adaptacji odmian dla plonu pszenicy w 31 miejscowościach rozlokowanych na terenie Włoch. Paderewski (2008) oraz Paderewski i in. (2011) zaproponowali łączne zastosowanie analizy AMMI i analizy skupień do badania rodzajów adaptacji odmian pszenicy ozimej na podstawie danych dla plonu z niekompletnej serii doświadczeń odmianowych. Autorzy wykazali skuteczność tej procedury na przykładzie doświadczeń przedrejestranych z odmianami pszenicy ozimej. Haussmann i in. (2000) do analizy stabilności plonowania i szerokiej adaptacji stosowali łączną analizę skupień i analizę GGE (ang. pattern analysis). Wykrywali odmiany sorga o szerokiej adaptacji jako te, które plonowały powyżej średniej środowiskowej w większości lub wszystkich badanych miejscowościach w Afryce.

Sharma i in. (2010) badali plonowanie 101 odmian (rodów) pszenicy ozimej w wielokrotnej i 4-letniej serii doświadczeń w dużej liczbie miejscowości Centralnej i Zachodniej Azji. Celem tych badań była ocena stabilności plonowania, a zwłaszcza ocena zdolności adaptacyjnej tych odmian za pomocą analizy GGE, w celu wybrania odmian o szerokiej adaptacji. Także Zhang i in. (2005) stosowali analizę GGE do porównania charakteru plonowania 100 odmian soi w stanie Virginia, USA, aby wybrać odmiany najwyżej i stabilnie plonujące, czyli posiadające szeroką adaptację.

Shah i in. (2009) wykonali analizę adaptacji odmian pszenicy, w której zastosowali metodę oceny odmian o szerokiej i wąskiej adaptacji na podstawie ich klasyfikacji pod względem jednocześnie średniej genotypowej plonu i wariancji stabilności. Wydzielili oni trzy grupy odmian. W pierwszej grupie znalazły się odmiany o średnio względnie wysokim i stabilnym plonie, czyli odmiany o szerokiej adaptacji. W drugiej grupie znalazły się odmiany o średnio względnie wysokim i niestabilnym plonie, czyli o lepszym przystosowaniu do niektórych warunków środowiskowych, czyli odmiany o wąskiej (specyficznej) zdolności adaptacyjnej. W trzeciej grupie znalazły się odmiany o średnio względnie niskim i stabilnym plonie, czyli odmiany nie posiadające zarówno szerokiej, jak i wąskiej adaptacji do warunków środowiskowych.

Metody analizy szerokiej adaptacji odmian z użyciem różnych miar

Z wcześniej podanego przeglądu literatury wynika, że wiele metod statystycznych stosowanych w analizie stabilności i analizie adaptacji odmian, zarówno tych do łącznego badania średniej genotypowej i stabilności plonu odmian, jak i rodzajów adaptacji odmian na podstawie ich środowiskowej reakcji cechy, prowadziły do identyfikacji takich odmian,

spośród badanych, które mają szeroką lub wąską adaptację. Szeroka adaptacja odmian była traktowana jako atrybut w skali dwu-wartościowej, obejmującej posiadanie zdolności odmiany do szerokiej adaptacji (wykazywanie szerokiej adaptacji) lub brak takich zdolności adaptacyjnych odmiany (nie wykazywanie szerokiej adaptacji, czyli wykazywanie wąskiej adaptacji lub brak adaptacji do wszystkich badanych warunków środowiskowych). Takie podejście zero-jedynkowe do oceny szerokiej adaptacji, która jest z natury atrybutem stopniowalnym, zbytnio upraszcza oraz zubaża metodologiczne możliwości ilościowej charakterystyki tego atrybutu. Dlatego, bardzo cenne są te metody analizy adaptacji odmian, które wykorzystują miary pozwalające na ilościową charakterystykę natężenia (stopnia) szerokiej adaptacji i na uporządkowanie odmian pod tym względem. Takie metody składają się na podejście metodyczne, nazwane analizą szerokiej adaptacji. Stosując je, badacz może stwierdzić nie tylko, które odmiany wykazują szeroką adaptację (było to także możliwe przy użyciu metod przedstawionych w podrozdziale 2.3.1), ale także określić natężenie, czyli stopień szerokiej adaptacji. Jest to szczególnie ważne dla odmian o najwyższych średnich genotypowych plonu w zbiorze badanych odmian i mogących posiadać przez to w dużym stopniu szeroką adaptację (Gauch i Zobel, 1997; Zhang i in., 2005; Annicchiarico i Iannucci, 2008; Sharma i in., 2007, 2010). Zostało opracowanych wiele metod i towarzyszących im miar statystycznych, przeznaczonych do analizy szerokiej adaptacji odmian (Lin i in., 1986; Becker i Leon, 1988; Fox i in., 1990; Hühn, 1990 a, b; Basford i Cooper, 1998; Flores i in., 1998; Hussein i in., 2000; Annicchiarico, 2002 b, Iwańska i in., 2008; Scapim i in., 2010).

Flores i in. (1998) zastosowali metodę analizy składowych głównych do wydzielenia grup miar skutecznych do oceny stabilności plonowania lub szerokiej adaptacji odmian. Wykorzystali dane dla plonu 12 odmian fasoli i 11 odmian grochu badanych w 16 miejscowościach w Hiszpanii, w latach 1988–1990. Wydzielili oni pięć grup miar przydatnych do oceny tylko stabilności plonowania lub tylko szerokiej adaptacji odmian fasoli i grochu. Grupy te zawierały odpowiednio tylko miary stabilności plonowania (wariancję stabilności Shukli, σ_i^2 lub dwie miary Hühna, tj. $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$), albo tylko miary stopnia szerokiej adaptacji odmian (w jednej grupie znalazła się średnia genotypowa plonu oraz P_i , CV_i i TOP_i , zaś w drugiej, cztery miary, tj. $S_i^{(3)}$, $S_i^{(6)}$, wskaźnik AMMI i RS_i).

Sabaghnia i in. (2008) badali wzajemne korelacje rang między średnią genotypową plonu soczewicy, jego wariancją środowiskową, miarą nadrzędności plonowania odmiany, P_i oraz kilkoma parametrami, wywodzącymi się z genotypowych parametrów interakcyjnych składowych głównych w modelu AMMI, które charakteryzują zmienność efektów interakcyjnych odmian. Te parametry wywodzące się z modelu AMMI były dość słabo skorelowane w cytowanych badaniach. Natomiast, miara nadrzędności plonowania odmiany, P_i , była skorelowana dość silnie i przeciwnie ze średnim plonem odmian oraz ich wariancją środowiskową (bezwzględne wartości współczynników korelacji rang były równe odpowiednio 0,7 i 0,8).

W celu określenia stabilności plonowania i szerokiej adaptacji odmian Adugna i Labuschange (2003) badali na podstawie 10 oleistych odmian lnu w 18 środowiskach w Etiopii, przeprowadzonych w latach 1996–1998, wzajemne korelacje rang pomiędzy

miarą stopnia szerokiej adaptacji odmian, tj. miarą nadrzędności plonowania odmiany, P_i , oraz miarami stabilności, tj. wariancją stabilności Shukli σ_i^2 , współczynnikiem zmienności CV_i , a także dwiema miarami nieparametrycznymi Nassara i Huehna, tj. $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$. Autorzy stwierdzili, że miara P_i była dość słabo skorelowana ze wszystkimi rozpatrywanymi miarami stabilności oraz wykazywała ona przydatność do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian. Natomiast miary stabilności, tj. wariancja stabilności Shukli oraz dwie miary nieparametryczne $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$ były dość silnie wzajemnie skorelowane. Oznacza to, że te trzy miary stabilności wykazywały przydatność do oceny stabilności plonowania odmian, czyli podobnie (zgodnie) porządkowały odmiany lnu według ich stopnia stabilności plonowania.

Scapim i in. (2010) badali wzajemne korelacje rang pomiędzy średnią genotypową plonu, trzema miarami stopnia szerokiej adaptacji odmian, tj. miarą nadrzędności plonowania odmiany P_i , miarą sumy rang Kanga RS_i oraz miarą Hühna $S_i^{(3)}$, a także miarami stabilności, tj. ekowalencją Wricke'go, W_i^2 , współczynnikiem funkcji regresji, wariancją odchyłeń od unkcji regresji s_{di}^2 oraz miarami stabilności Nassara i Hühna $S_i^{(1)}$ i $S_i^{(2)}$. Autorzy wykorzystywali dane dla plonu ziarna 19 odmian kukurydzy typu popcorn w 21 środowiskach w Brazylii w roku 2006/07. Stwierdzili oni dość silne korelacje rang między miarami stabilności. Oznacza to, że miary te wykazywały przydatność do oceny stopnia stabilności plonowania odmian kukurydzy. Stwierdzili także dość silne korelacje rang pomiędzy badanymi miarami stopnia szerokiej adaptacji. Oznacza to, że miary P_i , RS_i oraz $S_i^{(3)}$ wykazywały przydatność do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian kukurydzy na ziarno prażone, ponieważ zgodnie porządkowały badane odmiany. Ponadto, autorzy tej pracy wykonali statystyczne badanie natury informacyjnej miar P_i i RS_i (skorelowania ze średnią genotypową i miarami stabilności plonu), mające na celu sprawdzenie własności statystycznych rozpatrywanych miar do poprawnej (zgodnej) oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian. Stwierdzili, że dwie miary stopnia szerokiej adaptacji odmian, tj. P_i i RS_i są znacznie silniej skorelowane ze średnią genotypową, niż z miarami stabilności plonu.

Rose i in. (2008) badali stabilność i szeroką adaptację dla plonu suchej masy 5 odmian trawy bermudagrass (*Cynodon dactylon* L. Pers.) w 11 środowiskach w Oklahomie, USA, stosując miary nieparametryczne Nassara i Hühna, tj. $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$, $S_i^{(6)}$, miarę sumy rang Kanga RS_i i metodę GGE. Stwierdzili oni, że miara Kanga RS_i oraz model GGE są przydatne do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian, a więc obie te metody zgodnie porządkowały badane odmiany pod względem stopnia szerokiej adaptacji. Blanche i in. (2007) zajmowali się oceną stabilności plonowania i szerokiej adaptacji 7 odmian bawełny w 18 środowiskach w stanie Luizjana, USA. Badali wzajemne skorelowanie pomiędzy parametrami modelu GGE, a dwiema miarami stopnia szerokiej adaptacji, tj. miarą nadrzędności plonowania odmiany P_i oraz miarą Kanga średniego plonu i jego stabilności YS_i , a także parametrami stabilności, tj. wariancją stabilności Shukli σ_i^2 , i wariancją odchyłeń od funkcji regresji s_{di}^2 . Stwierdzili oni silne lub dość silne korelacje rang pomiędzy badanymi trzema parametrami modelu GGE oraz dwoma parametrami

stabilności plonowania odmian, tj. σ_i^2 i s_{di}^2 . Oznacza to, że model GGE był przydatny do oceny stabilności plonowania. Stwierdzono także dość silne skorelowanie jednego parametru w modelu GGE z dwiema miarami stopnia szerokiej adaptacji, tj. YS_i i P_i . Oznacza to, że model GGE był także przydatny do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian.

Moghaddam i Pourdad (2009) badali stabilność plonowania i szeroką adaptację 17 odmian krokosza w 33 środowiskach w Iranie w latach 2003–2006, stosując miarę nadrzędności plonowania odmiany P_i , miarę sumy rang Kanga RS_i , miarę TOP_i , ekowalencję Wricke'go W_i^2 , współczynnik funkcji regresji, b_i , wariancję odchyłeń od funkcji regresji s_{di}^2 , wariancję środowiskową odmian, $s_{e(i)}^2$, a także cztery miary Nassara i Hühna, tj. $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$, $S_i^{(3)}$, $S_i^{(6)}$ oraz cztery miary Thennarasu'go, tj. $NP_i^{(1)}$, $NP_i^{(2)}$, $NP_i^{(3)}$, $NP_i^{(4)}$. Stwierdzili oni dość silne, dodatnie korelacje rang pomiędzy średnią genotypową plonu, a czterema miarami stopnia szerokiej adaptacji odmian, tj. b_i , P_i , RS_i i TOP_i . Na podstawie analizy składowych głównych (PCA), autorzy wykazali, że średnia genotypowa plonu i cztery miary, tj. b_i , P_i , RS_i oraz TOP_i były przydatne do poprawnej i zgodnej oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian krokosza. Stwierdzili oni także bardzo słabe korelacje rang pomiędzy średnią genotypową plonu, a pięcioma miarami stabilności, tj. W_i^2 , s_{di}^2 oraz $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$ i $NP_i^{(1)}$. Na podstawie analizy PCA uznali, że skorelowane miary $S_i^{(2)}$ i $NP_i^{(1)}$ były przydatne do poprawnej oceny stabilności plonowania odmian krokosza.

Jarvie i Shanahan (2009) stosowali miarę nadrzędności plonowania odmiany, P_i i ekowalencję Wricke'go, W_i^2 do oceny stabilności plonowania i adaptacji odmian soi pod względem odporności na porażenie rdzą w południowej Afryce i w 3 sezonach wegetacyjnych. Za pomocą wykresu podwójnego GGE badacze określili odmiany stabilne oraz o dużej (najwyższej) średniej odporności na tę chorobę, czyli takie, które są relatywnie odporne na rozpatrywaną chorobę w różnych warunkach środowiskowych. Te odmiany można nazwać obiektami genetycznymi o szerokiej adaptacji pod względem odporności na porażenie rdzą odmian soi.

Silva i Duarte (2006) badali korelacje rang między wieloma miarami stopnia stabilności plonowania i szerokiej adaptacji odmian soi w doświadczeniach przeprowadzonych w Brazylii. Stwierdzili oni bardzo silną korelację rang między miarą nadrzędności plonowania odmiany, P_i oraz niezawodnym plonem minimalnym odmiany, $I_{i(P)}$. Także, stwierdzono bardzo niską korelację każdej z tych miar, a ekowalencją Wricke'go, W_i^2 , jako miarą stopnia stabilności plonowania odmiany.

Yan i in. (2007) podali bardzo ciekawą koncepcję tzw. odmiany „idealnej” (ang. „ideal” genotype). Odmiana „idealna” została określona jako ta, spośród odmian badanych w danej serii doświadczeń, która wykazała najwyższą średnią genotypową plonu i plonowałaby idealnie stabilnie (jest to założenie formalne). Taka funkcja środowiskowej reakcji plonu odmiany „idealnej” stanowiłaby pewną reakcję normatywną (normę), jako punkt odniesienia do porównania środowiskowej reakcji każdej z badanych odmian. Byłaby ona alternatywną normą w stosunku do środowiskowej reakcji plonu średniego i

maksymalnego, które są wykorzystywane w konstrukcji odpowiednio miar niezawodności przewagi plonowania odmiany, R_i i $R_i(d_i)$ oraz miary nadrzędności plonowania odmiany, P_i . Autorzy porządkowali odmiany pszenicy pod względem stopnia szerokiej adaptacji na podstawie miary odległości środowiskowej reakcji plonowania danej odmiany od reakcji plonu odmiany „idealnej”, posługując się wykresem GGE. Taka miara jest podobna pod względem koncepcji do miary nadrzędności plonowania odmiany, P_i . To samo podejście zastosowali także Sharma i in. (2010) z dobrym skutkiem.

Ze względu na mnogość podejść, metod i wskaźników (miar) proponowanych do oceny stabilności i adaptacyjności odmian pod względem plonu oraz innych cech, przestrzegana jest zwykle zasada metodyczna, polegająca na stosowaniu wielu metod i wskaźników do badania zbioru odmian pod względem ich stabilności i adaptacyjności. Panuje przekonanie, że różne metody pozwalają ocenić wymienione własności odmian pod innym kątem i w ten sposób dostarczają informacji do wielostronnej i wyczerpującej oceny relatywnego zachowania się badanych odmian w zmiennych warunkach środowiskowych (Lin i in., 1986; Duarte i Zimmermann, 1995; Basford i Cooper, 1998; Flores i in., 1998; Grausgruber i in., 2000; Luquez i in., 2002; Solomon i in., 2007; Adugna. 2008; Baxevanos i in., 2008; Lillemo i in., 2010; Mohammadi i in., 2010; Scapim i in., 2010). Taka filozofia metodologiczna jest poprawna, jednak pod warunkiem, że wybrane metody do rozwiązania postawionych problemów w podjętych badaniach faktycznie dostarczają informacji alternatywnych i uzupełniają się w tworzeniu obrazu danego zjawiska (Cooper i DeLacy, 1994; Cooper i in., 1996; Solomon i in., 2007). W przeciwnym przypadku, jeśli różne miary są znacząco skorelowane, czyli podobnie porządkują odmiany pod względem stopnia stabilności plonowania lub szerokiej adaptacji, wystarczy stosować tylko jedną miarę (Duarte i Zimmermann, 1995; Sabaghnia, 2006; Silva i Duarte, 2006; Salomon i in., 2007; Mohammadi i in., 2010; Scapim i in., 2010). Badania nad zgodnością oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian pszenicy ozimej za pomocą różnych miar parametrycznych i nieparametrycznych przeprowadziła Iwańska (2010).

LITERATURA

- Abidin P.E., Eeuwijk F.A., Stam P., Struik P.C., Malosetti M., Mwangi R.O.M., Odongo B., Hermann M., Carey E.E. 2005. Adaptation and stability analysis of sweet potato varieties for low-input systems in Uganda. *Plant Breed.* 124: 491 — 497.
- Adugna A. 2008. Assessment of yield stability in sorghum using univariate and multivariate statistical approaches. *Hereditas* 145: 28 — 37.
- Adugna W., Labuschagne M.T. 2002. Genotype-environment interactions and phenotypic stability analyses of linseed in Ethiopia. *Plant Breed.* 121: 66 — 71.
- Adugna W., Labuschagne M.T. 2003. Parametric and nonparametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica* 129: 211 — 218.
- Akcura M., Kaya Y. 2008. Nonparametric stability methods for interpreting genotype by environment interaction of bread wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Gen. Mol. Biol.* 31: 906 — 913.
- Albrizio R., Todorovic M., Matic T., Stellacc A.M. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* 115: 179 — 190.
- Allard R.W., Bradshaw A.D. 1964. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. *Crop Sci.* 4: 503 — 508.

- Anbessa Y., Juskiw P., Good A., Nyachiro J., Helm J. 2010. Selection efficiency across environments in improvement of barley yield for moderately low nitrogen environments. *Crop Sci.* 50: 451 — 457.
- Annicchiarico P., Abdelguerfi A. Ben Younes M., Bouzerzour H., Carroni A.M., Pecetti L., Tibao G. 2008. Adaptation of sulla cultivars to contrasting Mediterranean environments. *Austr. J. Agric. Res.* 59: 702 — 706.
- Annicchiarico P. 1997. Joint regression vs AMMI analysis of genotype-environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica* 94: 53 — 62.
- Annicchiarico P. 2002a. Defining adaptation strategies and yield stability targets in breeding programmes. In: Kang M.S. (Ed.) *Quantitative genetics, genomics and plant breed.* CABI, Wallingford, UK.: 165 — 183.
- Annicchiarico P. 2002 b. Genotype-environment interactions: challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. *FAO Plant Production and Protection Paper No. 174.* Food and Agriculture Organization, Rome.
- Annicchiarico P., Bellah F., Chiari T. 2005. Defining subregions and estimating benefits for a specific-adaptation strategy by breeding programs: A case study. *Crop Sci.* 45: 1741 — 1749.
- Annicchiarico P., Chiapparino E., Perenzin M. 2010. Response of common wheat varieties to organic and conventional production systems across Italian locations, and implications for selection. *Field Crops Res.* 116: 230 — 238.
- Annicchiarico P., Bellah F., Chiari T. 2006. Repeatable genotype×location interaction and its exploitation by conventional and GIS-based cultivar recommendation for durum wheat in Algeria. *Europ. J. Agron.* 24: 70 — 81.
- Annicchiarico P., Iannucci A. 2008. Adaptation strategy, germplasm type and adaptive traits for field pea improvement in Italy based on variety responses across climatically contrasting environments. *Field Crops Res.* 108: 133 — 142.
- Annicchiarico P., Mariani G. 1996. Prediction of adaptability and yield stability of durum wheat genotypes from yield response in normal and artificially drought-stressed conditions. *Field Crops Res.* 46: 71 — 80.
- Annicchiarico P., Perenzin M. 1994. Adaptation patterns and definition of macro-environments for selection and recommendation of common-wheat genotypes in Italy. *Plant Breed.* 113: 197 — 205.
- Atlin G.N., Baker R.J., McRae K.B., Lu X. 2000 b. Selection response in subdivided target regions. *Crop Sci.* 40: 7 — 13.
- Atlin G.N., McRae K.B., Lu X. 2000a. Genotype region interaction for two-row barley yield in Canada. *Crop Sci.* 40: 1 — 6.
- Basford K.E., Cooper M. 1998. Genotype×environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Austr. J. Agric. Res.* 49: 153 — 174.
- Barah B.C., Binswanger H.P., Rana B.S., Rao N.G.P. 1981. The use of risk aversion in plant breeding: concept and application. *Euphytica* 30: 451 — 458.
- Baxevanos D., Goulas C., Tzortzios S., Mavromatis A. 2008. Interrelationship among and repeatability of seven stability indices estimated from commercial cotton (*Gossypium hirsutum* L.) variety evaluation trials in three Mediterranean countries. *Euphytica* 161: 371 — 382.
- Becker H.C. 1981. Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30: 835 — 840.
- Becker H.C., Leon J. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breed.* 101: 1 — 23.
- Bilbro J.D., Ray L.L. 1976. Environmental stability and adaptation of several cotton cultivars. *Crop Sci.* 16: 821 — 824.
- Blanche S.B., Myers G.O., Kang M.S. 2007. GGE biplots and traditional stability measures for interpreting genotype by environment interactions. *J. Crop Improv.* 20: 123 — 135.
- Blanche S.B., Utomo H.S., Wenefrida I., Myers G.O. 2009. Genotype x environment interactions of hybrid and varietal rice cultivars for grain yield and milling quality. *Crop Sci.* 49: 2011 — 2018.
- Blum A. 1980. Genetic improvement of drought adaptation. In: *Adaptation of plants to water and high temperature stress.* (Eds.): N.C. Turner, Kramer P.J. John Wiley and Sons, New York: 450 — 452.
- Braun H.J., Rajaram S., van Ginkel M. 1996. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica* 92: 175 — 183.

- Braun H.J., Ekiz H., Eser V., Keser M., 1998. Breeding priorities of winter wheat programs. In: Braun HJ, Altay F, Kronstad WE, Beniwal SPS, McNab A et al (eds) *Wheat: prospects for global improvement*. Kluwer, Dordrecht: 553 — 560.
- Brennan P.S., Byth D.E. 1979. Genotype \times environmental interactions for wheat yields and selection for widely adapted wheat genotypes. *Austr. J. Agr. Res.* 30: 221 — 232.
- Burgueno J., Crossa J., Cornelius P.L., Yang R.C. 2008. Using factor analytic models for joining environments and genotypes without crossover genotype \times environment interaction. *Crop Sci.* 48:1291 — 1305.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z. 1980. Analiza jednorocznej serii ortogonalnej doświadczeń odmianowych ze szczególnym uwzględnieniem interakcji odmianowo-środowiskowej. 1. Analiza ogólna. *Biul. Oceny Odmian* 12: 67 — 81.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z. 1983. Analiza jednorocznej serii ortogonalnej doświadczeń odmianowych ze szczególnym uwzględnieniem interakcji odmianowo-środowiskowej. 2. Analiza szczegółowa. *Biul. Oceny Odmian* 15: 39 — 60.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z., Krajewski P., Siatkowski I. 1995. SERGEN — a computer program for the analysis of series of variety trials. *Biul. Oceny Odmian* 26–27: 39 — 41.
- Carena M.J., Yang J., Caffarel J.C., Mergoum M., Hallauer A.R. 2009. Do different production environments justify separate maize breeding programs? *Euphytica* 169: 141 — 150.
- Casanoves F., Baldessari J., Balzarini M. 2005. Evaluation of multi-environment trials of peanut cultivars. *Crop Sci.* 45: 18 — 26.
- Cassida K.A., Muir J.P., Hussey M.A., Read J.C., Venuto B.C., Ocumpaugh W.R. 2005. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in South Central U.S. environments. *Crop Sci.* 40: 692.
- Ceccarelli S. 1989. Wide adaptation: How wide? *Euphytica* 40: 197 — 205.
- Ceccarelli S., Grando S. 2007. Decentralized participatory plant breeding: an example of demand driven research. *Euphytica* 155: 349 — 360.
- Chapman S.C., Cooper M., Butler D.G., Henzell R.G. 2000. Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. I. Characteristics that confound interpretation of hybrid yield. *Austr. J. Agric. Res.* 51: 197 — 207.
- Chapman S.C., de la Vega A.J. 2002. Spatial and seasonal effects confounding interpretation of sunflower yields in Argentina. *Field Crops Res.* 73: 107 — 120.
- Chloupek O., Hrstkova P. 2005. Adaptation of crops to environment. *Theor. Appl. Gen.* 111: 1316 — 1321.
- Cochran W.G., Cox G.M. 1957. *Experimental designs*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., London.
- Cooper M. 1999. Concepts and strategies for plant adaptation research in rainfed lowland rice. *Field Crops Res.* 64: 13 — 34.
- Cooper M., Byth D.E. 1996. Understanding plant adaptation to achieve systematic applied crop improvement — a fundamental challenge. In: Cooper M., Hammer G.L. (Eds.), *Plant Adaptation, Crop Improvement*. CAB International/International Rice Research Institute (IRRI)/International Crops Research Institute for Semi Arid Tropics (CRISAT), Wallingford, UK/Los Banos, Laguna, Philippines/Hyderabad, India: 5 — 24.
- Cooper M., DeLacy I.H. 1994. Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype by environment interaction in plant breeding multi-environment experiments. *Theor. Appl. Genet.* 88: 561 — 572.
- Cooper M., DeLacy I.H., Basford K. E. 1996. Relationships among analytical methods used to analyze genotypic adaptation in multi-environment trials. In: *Plant Adaptation and Crop Improvement* (Eds Cooper M., Hammer G. L.), CAB International, Wallingford, UK: 191 — 224.
- Crossa J. 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44: 55 — 85.
- Dehghani H. 2008. Estimating yield stability by nonparametric stability analysis in maize (*Zea mays* L.). *Plant Breed. Seed Sci.* 58: 61 — 77.
- de la Vega A.J., Chapman S.C., Hall A.J. 2001. Genotype by environment interaction and indirect selection for yield in sunflower. I. Two-mode pattern analysis of oil and biomass yield across environments in Argentina. *Field Crop Res.* 72: 17 — 38.
- de la Vega A.J., Chapman S.C. 2010. Mega-environment differences affecting genetic progress for yield and relative value of component traits. *Crop Sci.* 50: 574 — 583.

- de la Vega A.J., Chapman S.C. 2006. Defining sunflower selection strategies for a highly heterogeneous target population of environments. *Crop Sci.* 46: 136 — 144.
- Dopierała P., Bujak H., Kaczmarek J., Dopierała A. 2003. Ocena interakcji genotypowo-środowiskowej plonu populacyjnych i mieszańcowych odmian żyta ozimego. *Biul. IHAR* 230: 243 — 254.
- Dreccer M.F., Borgognone M.G., Ogbonnaya F.C., Trethowan R.M., Winter B. 2007. CIMMYT-selected derived synthetic bread wheats for rainfed environments: Yield evaluation in Mexico and Australia. *Field Crops Res.* 100: 218 — 228.
- Drzazga T., Paderewski J., Mądry W., Kajewski P. 2009. Ocena rodzajów reakcji plonowania odmian pszenicy ozimej w doświadczeniach PDO na przestrzennie zmienne warunki przyrodnicze w kraju. *Biul. IHAR* 253:71 — 82
- Duarte J.B., Zimmermann M.J. 1995. Correlation among yield stability parameters in common bean. *Crop Sci.* 35: 905 — 912.
- Eberhard S.A., Russell W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36 — 40.
- Ebdon J.S., Gauch H.G. 2002b. Additive main effect and multiplicative interaction analysis of national turfgrass performance trials: II. Cultivar recommendations. *Crop Sci.* 42: 497 — 506.
- Elandt R. 1964. *Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczalnictwa rolniczego*. PWN, Warszawa.
- Epinat-Le Signor C., Dousse S., Lorgeou J., Denis J.B., Bonhomme R., Carolo P., Charcosset A. 2001. Interpretation of genotype \times environment interactions for early maize hybrids over 12 years. *Crop Sci.* 41: 663 — 669.
- Eskridge K.M. 1990. Selection of stable cultivars using a safety-first rule. *Crop Sci.* 30: 369 — 374.
- Eskridge K.M., Byrne P.F., Crossa J. 1991. Selection of stable varieties by minimizing the probability of disaster. *Field Crops Res.* 27: 169 — 181.
- Eskridge K.M., Johnson B.E. 1991. Expected utility maximization and selection of stable plant cultivars. *Theor. Appl. Genet.* 81:825 — 832.
- Eskridge K.M., Mumm R.F. 1992. Choosing plant cultivars based on the probability of outperforming a check. *Theor. Appl. Genet.* 84:494 — 500.
- Eskridge K.M., Smith O.S., Byrne P.F. 1993. Comparing test cultivars using reliability functions of test-check differences from on-farm trials. *Theor. Appl. Genet.* 87: 60 — 64.
- Fan X.M., Kang M.S., Chen H., Zhang Y., Tan J., Xu C. 2007. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agron. J.* 99: 220 — 228.
- Finlay K.W., Wilkinson G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14: 742 — 754.
- Flores F., Moreno M.T., Cubero J.I. 1998. A comparison of univariate and multivariate methods to analyze $G \times E$ interaction. *Field Crops Res.* 56: 271 — 286.
- Fox P.N., Skovmand B., Thompson B.K., Braun H.J., Cormier R. 1990. Yield and adaptation of hexaploid spring triticale. *Euphytica* 47: 57 — 64.
- Fufa H., Stephen Baenziger P., Beecher B.S., Graybosch R.A., Eskridge K.M., Nelson L.A. 2005. Genotypic improvement trends in agronomic performances and end-use quality characteristics among hard red winter wheat cultivars in Nebraska. *Euphytica* 144: 187 — 198.
- Ghaderi A., Adams M.W., Saettler A.W. 1982. Environmental response patterns in commercial classes of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Theor. Appl. Genet.* 63:17 — 22.
- Gauch H.G. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials. AMMI analysis of factorial designs*. Elsevier Science, New York.
- Gauch H.G. 2006. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE. *Crop Sci.* 46: 1488 — 1500.
- Gauch H.G., Piepho H.P., Annicchiarico P. 2008. Statistical analysis of yield trials by AMMI and GGE: Further considerations. *Crop Sci.* 48: 866 — 889.
- Gauch H.G., Zobel R.W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Sci.* 37: 311 — 326
- Gomez-Becerra H., Morgounov A., Abugalieva A. 2007. Evaluation of yield grain stability, reliability and cultivar recommendation in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) from Kazakhstan and Siberia. *J. Cent. Eur. Agric.* 7: 649 — 660.

- Gomez — Becerra H.F., Yazici A., Ozturk L., Budak H., Peleg Z., Morgounov A., Fahima T., Saranga Y., Cakmak I. 2010. Genetic variation and environmental stability of grain mineral nutrient concentrations in *Triticum dicoccoides* under five environments. *Euphytica* 171: 39 — 52.
- Grausgruber H., Oberforster M., Werteker M., Ruckenbauer P., Vollmann J. 2000. Stability of quality traits in Austrian-grown winter wheats. *Field Crops Res.* 66:257 — 267.
- Hausmann B.I.G., Obilana A.B., Ayiecho P.O., Blum A., Schipprack W., Geiger H.H. 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in a semi-arid area of Kenya. *Crop Sci.* 40: 319 — 329.
- Helms T.C. 1993. Selection for yield and stability among oat lines. *Crop Sci.* 33: 423 — 426.
- Hernandez-Segundo E., Capettini F., Trethowan R., van Ginkel M., Mejia A., Carballo A., Crossa J., Vargas M., Balbuena-Melgarejo A. 2009. Mega-environment identification for barley based on twenty-seven years of global grain yield data. *Crop Sci.* 49: 1705 — 1718.
- Herring M.R., O'Brien L. 2000. A regional adaptation analysis of oats in New South Wales and southern Queensland for grain yield and dry matter production. *Austr. J. Agric. Res.* 51: 961 — 970.
- Hill J., Becker H.C., Tigerstedt P.M. 1997. Quantitative and ecological aspects of plant breeding. Chapman and Hall, London.
- Howe T.G., Brunner A.M. 2005. An evolving approach to understanding plant adaptation. *New Phytol.* 167: 1 — 5.
- Hühn M. 1990 a. Nonparametric measures of phenotypic stability: Part 1. Theory. *Euphytica* 47: 189 — 194.
- Hühn M. 1990 b. Nonparametric measures of phenotypic stability: Part 2. Applications. *Euphytica* 47: 195 — 201.
- Hühn M. 1996. Nonparametric analysis of genotype × environment interactions by ranks. In: Genotype by environment interaction. (Eds.): M.S. Kang, Gauch H.G. CRC Press, Boca Raton, FL, USA: 213 — 228.
- Hussein M.A., Bjørnstad A., Aastveit A.H. 2000. SASG X ESTAB: A SAS program for computing genotype × environment stability statistics. *Agron. J.* 92: 454 — 459.
- Iwańska M., Mądry W., Drzazga T., Rajfura A. 2008. Zastosowanie miar statystycznych do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian pszenicy ozimej na podstawie serii doświadczeń przedrejestrowych. *Biul. IHAR* 250: 67 — 86.
- Iwańska M. 2010. Przydatność różnych miar statystycznych do oceny stopnia szerokiej adaptacji odmian pszenicy ozimej. Praca doktorska, Wydział Rolnictwa i Biologii, SGGW, Warszawa.
- Jalaluddin M.D., Harrison S.A. 1993. Repeatability of stability statistics for grain yield in wheat. *Crop Sci.* 33: 720 — 725.
- Jarvie J.A., Shanahan P.E. 2009. Assessing tolerance to soybean rust in selected genotypes. *Field Crops Res.* 114: 419 — 425.
- Joshi A.K., Ortiz-Ferrara G., Crossa J., Singh G., Alvarado G., Bhatta M.R., Duveiller E., Sharma R.C., Pandit D.B., Siddique A.B., Das S.Y., Sharma R.N., Chand R. 2007a. Associations of environments in South Asia based on spot blotch disease of wheat caused by *Cochliobolus sativus*. *Crop Sci.* 47: 1071 — 1081.
- Joshi K.D., Musa A.M., Johansen C., Gyawali S., Harris D., Witcombe J.R. 2007b. Highly client-oriented breeding, using local preferences and selection, produces widely adapted rice varieties. *Field Crops Res.* 100: 107 — 116.
- Kaczmarek Z., Adamski T., Surma M. 1997. The influence of cytoplasmic effects on yielding and stability of barley DH lines. W: Krajewski P., Kaczmarek Z (Ed), *Advances in Biometrical Genetics*, Poznań: 159 — 163.
- Kang M.S. 1988. A rank-sum method for selecting high yielding stable corn genotypes. *Cereal Res. Comm.* 16:113 — 115.
- Kang M.S. 1993. Simultaneous selection for yield and stability in crop performance trials: Consequences for growers. *Agron. J.* 85: 754 — 757.
- Kang M.S. 1998. Using genotype-by environment interaction for crop cultivar development. *Adv. Agron.* 62: 199 — 253.
- Kang M.S., Aggarwal V.D., Chirwa R.M. 2006. Adaptability and stability of bean cultivars as determined via yield-stability statistic and GGE biplot analysis. *J. Crop Improvement* 15: 97 — 120.
- Kang M.S., Magari R. 1995. Stable: a basic program for calculating stability and yield-stability statistics. *Agron. J.* 87: 276 — 277.

- Kang M.S., Pham H.N. 1991. Simultaneous selection for high and stable crop genotypes. *Agron. J.* 83: 161—165.
- Kataoka S. 1963. A stochastic programming model. *Econometrika* 31:181 — 196.
- Kaut A.H.E.E., Mason H.E., Navabi A., O'Donovan J. T., Spaner D. 2009. Performance and stability of performance of spring wheat variety mixtures in organic and conventional management systems in western Canada. *J. Agric. Sci.* 147: 141 —153.
- Kaya Y., Akcura M., Ayranci R., Taner S. 2006. Pattern analysis of multi-environment trials in bread wheat. *Commun. Biometry Crop Sci.* 1: 63 —71.
- Léon J., Becker H. C. 1988. Repeatability of some statistical measures of phenotypic stability — Correlations between single year results and multi years results. *Plant Breed.* 100: 137 — 142.
- Li W., Yan Z.H., Wei Y.M., Lan X.J., Zheng Y.L. 2006. Evaluation of genotype × environment interactions in Chinese spring wheat by the AMMI model, correlation and path analysis. *J. Agron. Crop Sci.* 192: 221 — 227.
- Lillemo M., van Ginkel M., Trethowan R. M., Hernandez E., Crossa J. 2005. Differential adaptation of CIMMYT bread wheat to global high temperature environments. *Crop Sci.* 45: 2443 — 2453.
- Lillemo M., Singh R.P., van Ginkel M. 2010. Identification of stable resistance to powdery mildew in wheat based on parametric and nonparametric methods. *Crop Sci.* 50: 478 — 485.
- Lin C.S., Binns M.R. 1988. A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Can. J. Plant Sci.* 68: 193 — 198.
- Lin C.S., Binns M. R., Lefkovitch L. P. 1986. Stability analysis: where do we stand? *Crop Sci.* 26: 894 — 900.
- Link W., Schill B., von Kittlitz E. 1996. Breeding for wide adaptation in faba bean. *Euphytica* 92: 185 — 190.
- Luquez J. E., Aguirreza L. A. N., Aguero M. E., Pereyra V. R. 2002. Stability and adaptability of cultivars in non-balanced yield trials: Comparison of methods for selecting 'high oleic' sunflower hybrids for grain yield and quality. *J. Agron. Crop Sci.* 188: 225 — 234.
- Mądry W. 2002. Skuteczność kryterium YS Kanga, opartego na średniej i stabilności plonu w wyborze genotypów zbóż o szerokiej adaptacji w rejonie uprawnym. *Roczn. Nauk Roln. Seria A.* 116: 11 — 24.
- Mądry W. 2003. Analiza statystyczna miar stabilności na podstawie danych w klasyfikacji genotypy × środowiska. Część II. Model mieszany Shukli i model regresji łącznej. *Coll. Biom.* 33: 207 — 220.
- Mądry W., Rajfura A. 2003. Analiza statystyczna miar stabilności na podstawie danych w klasyfikacji genotypy × środowiska. Część I. Model mieszany Scheffego-Calińskiego i model regresji łącznej. *Coll. Biom.* 33: 181 — 206.
- Mądry W., Talbot M., Ukalski K., Drzazga T., Iwańska M. 2006. Podstawy teoretyczne znaczenia efektów genotypowych i interakcyjnych w hodowli roślin na przykładzie pszenicy ozimej. *Biul. IHAR* 240/241: 13 — 31.
- Mekbib F. 2002. Simultaneous selection for high yield and stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *J. Agric. Sci.* 138: 249 — 253.
- Mekbib F. 2003. Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Euphytica* 130: 147 — 153.
- Moghaddam M.J., Pourdad S.S. 2009. Comparison of parametric and non-parametric methods for analysing genotype x environment interactions in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *J. Agric. Sci.* 147: 601 — 612.
- Mohammadi R., Amri A. 2008. Comparison of parametric and nonparametric methods for selecting stable and adapted durum wheat genotypes in variable environments. *Euphytica* 159: 419 — 432.
- Mohammadi R., Amri A. 2009. Analysis of genotype x environment interactions for grain yield in durum wheat. *Crop Sci.* 49: 1177 — 1186.
- Mohammadi R., Pourdad S.S., Amri A. 2008. Grain yield stability of spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Austr. J. Agric. Res.* 59: 546 — 553.
- Mohammadi R., Haghparast R., Amri A. Ceccarelli S. 2010. Yield stability of rainfed durum wheat and GGE biplot analysis of multi-environment trials. *Crop Pasture Sci.* 61: 92 — 101.
- Mohebodini M., Dehghani H., Sabaghpour S.H. 2006. Stability of performance in lentil (*Lens culinaris* Medik) genotypes in Iran. *Euphytica* 149: 343 — 352.

- Möhring J., Piepho H. P. 2009. Comparison of weighting in two-stage analysis of plant breeding trials. *Crop Sci.* 49: 1977 — 1988.
- Mulema J.M.K., Olanya O.M., Adipala E., Wagoire W. 2004. Stability of late blight resistance in population B potato clones. *Potato Research* 47: 11 — 24.
- Murphy K.M., Campbell K.G., Lyon S.R., Jones S.S. 2007. Evidence of varietal adaptation to organic farming systems. *Field Crops Res.* 102: 172 — 177.
- Murphy S.E., Lee E.A., Woodrow L., Seguin P., Kumar J., Rajcan I., Ablett G.R. 2009. Genotype × environment interaction and stability for isoflavone content in soybean. *Crop Sci.* 49: 1313 — 1321.
- Navabi A., Yang R.-C., Helm J., Spaner D.M. 2006. Can spring wheat-growing mega-environments in the Northern Great Plains be dissected for representative locations or niche-adapted genotypes? *Crop Sci.* 46: 1107 — 1116.
- Paderewski J. 2008. Przydatność modelu AMMI do badania reakcji roślin rolniczych na warunki środowiskowe. Praca doktorska, Wydział Rolnictwa i Biologii, SGGW, Warszawa.
- Paderewski J., Mądry W., Pilarczyk W., Drzazga T. 2008. Retrospektywne badanie reakcji plonu odmian pszenicy ozimej na warunki środowiskowe w miejscowościach za pomocą łącznej analizy AMMI i skupień: ocena postępu genetycznego w plonowaniu. *Biul. IHAR* 250: 87 — 106.
- Paderewski J., Gauch H.G., Mądry W., Drzazga T., Rodrigues P.C. 2011. Yield response of winter wheat to agro-ecological conditions using Additive Main Effects and Multiplicative Interaction and cluster analysis. *Crop Sci.* 51: 969 — 980.
- Pham H.N., Kang M.S. 1988. Interrelationships among repeatability of several stability statistics estimated from international maize trials. *Crop Sci.* 28: 925 — 928.
- Piepho H.P. 1995. Assessing cultivar adaptability by multiple comparison with the best. *Agron. J.* 87: 1225 — 1227.
- Piepho H.P. 1998. Methods for comparing the yield stability of cropping systems- A review. *J. Agron. Crop Sci.* 180: 193 — 213.
- Piepho H.P. 1999. Stability analysis using the SAS system. *Agron. J.* 91: 154 — 160.
- Pritts M., Luby J. 1990. Stability indices for horticultural crops. *HortScience* 25:740 — 745.
- Przystalowski M., Osman A., Thiemt E.M., Rolland B., Ericson L., Østergård H., Levy L., Wolfe M., Büchse A., Piepho H.P., Krajewski P. 2008. Comparing the performance of cereal varieties in organic and non-organic cropping systems in different European countries. *Euphytica* 163: 417 — 433.
- Rajfura A., Mądry W., 2001. Metoda wyboru genotypów o szerokiej adaptacji wykorzystująca zarówno ich średnie w rejonie jak i stabilność plonowania. *Coll. Biom.*: 169 — 182.
- Robert N. 2002. Comparison of stability statistics for yield and quality traits in bread wheat. *Euphytica* 128: 333 — 341.
- Robinson J., Jalli M. 1999. Sensitivity of resistance to net blotch in barley. *J. Phytopathol.* 147: 235 — 241.
- Rodriguez M., Rau D., Papa R., Attene G. 2008. Genotype by environment interactions in barley (*Hordeum vulgare* L.): different responses of landraces, recombinant inbred lines and varieties to Mediterranean environment. *Euphytica* 163: 231 — 247.
- Romay M. C., Malvar R.A., Campo L., Alvarez A., Moreno-González J., Ordás A., Pedro R. 2010. Climatic and genotypic effects for grain yield in maize under stress conditions. *Crop Sci.* 50:51 — 58.
- Roozeboom K.L., Schapaugh W.T., Tuinstra M.R., Vanderlip R.L., Milliken G.A. 2008. Testing wheat in variable environments: genotype, environment, interaction effects, and grouping test locations. *Crop Sci.* 48: 317 — 330.
- Rose L.W., Das M.K., Taliaferro C.M. 2008. A comparison of dry matter yield stability assessment methods for small numbers of genotypes of bermudagrass. *Euphytica* 164: 19 — 25.
- Sabaghnia N., Dehghani H., Sabaghpour S.H. 2006. Nonparametric methods for interpreting genotype × environment interaction of lentil genotypes. *Crop Sci.* 46: 1100 — 1106.
- Sabaghnia N., Sabaghpour S.H., Dehghani H. 2008. The use of an AMMI model and its parameters to analyse yield stability in multi-environment trials. *J. Agric. Sci.* 146: 571 — 581.
- Samonte S.O., Wilson L.T., McClung A.M., Medley J.C. 2005. Targeting cultivars onto rice growing environments using AMMI and SREG GGE biplot analyses. *Crop Sci.* 45: 2414 — 2424.

- Scapim C.A., Oliveira V.R., Braccinil A.L., Cruz C.D., Andrade C.A.B., Vidigal M.C.G. 2000. Yield stability in maize (*Zea mays* L.) and correlations among the parameters of the Eberhart and Russell, Lin and Binns and Huehn models. *Gen. Mol. Biol.* 23: 387 — 393.
- Scapim C.A., Pacheco C.A., Amaral A.T., Vieira R.A., Pinto R.J., Conrado T.V. 2010. Correlations between the stability and adaptability statistics of popcorn cultivars. *Euphytica* (w druku) .
- Segherloo A.E., Sabaghpour S.H., Dehghani H., Kamrani M. 2008. Nonparametric measures of phenotypic stability in chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *Euphytica* 162: 221 — 229.
- Shah S.H., Shah S.M., Khan M.I., Ahmed M., Hussain I., Eskridge K.M. 2009. Nonparametric methods in combined heteroscedastic experiments for assessing stability of wheat genotypes in Pakistan. *Pak. J. Bot.* 41: 711 — 730.
- Sharma R.C., Ortiz-Ferrera G., Crossa J., Bhatta M.R., Sufian M.A., Shoran J., Joshi A.K., Chand R. Singh G., Ortiz R. 2007. Wheat grain yield and stability assessed through regional trials in the Eastern Gangetic Plains of South Asia. *Euphytica* 157: 457 — 464.
- Sharma R.C., Morgounov A.I., Braun H.J., Akin B., Keser M., Bedoshvili D., Bagci A., Martius C. van Ginkel M. 2010. Identifying high yielding stable winter wheat genotypes for irrigated environments in Central and West Asia. *Euphytica* 171: 53 — 64.
- Shukla G.K. 1972. Some aspects of partitioning genotype. environmental components of variability. *Heredity* 28:237 — 245.
- Silva W.C., Duarte J.B. 2006. Statistical methods to study phenotypic adaptability and stability in soybean (praca w języku portugalskim). *Pesq. agropec. bras.* Brasília 41:23 30 <http://www.scielo.br/pdf/pab/v41n1/28136.pdf>.
- Singh R.P., Huerta-Espino J., Sharma R., Joshi A.K., Trethowan R. 2007. High yielding spring bread wheat germplasm for global irrigated and rainfed production systems. *Euphytica* 157: 351 — 363.
- Sivapalan S., O'Brien L., Ortiz-Ferrera G., Hollamby G.J., Barclay I., Martin P.J. 2000. An adaptation analysis of Australian and CIMMYT/ICARDA wheat germplasm in Australian production environments. *Austr. J. Agric. Res.* 51: 903 — 915.
- Sivapalan S., O'Brien L., Ortiz-Ferrera G., Hollamby G.J., Barclay I., Martin P.J. 2003. A comparative study for yield performance and adaptation of some Australian and CIMMYT/ICARDA wheat genotypes grown at selected locations in Australia and WANA region. *Austr. J. Agric. Res.* 54: 91 — 100.
- Smith A.B., Cullis B.R., Thompson R. 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. *J. Agr. Sci. Cam.* 143: 449 — 462.
- Solomon K.F., Smit H.A., Malan E., Du Toit W.J. 2007. Comparison study using rank based nonparametric stability statistics of durum wheat. *World J. Agric. Sci.* 3: 444 — 450.
- Stefanova K.T., Buirchell B. 2010. Multiplicative mixed models for genetic gain assessment in lupin breeding. *Crop Sci.* 50: 880 — 891.
- St-Pierre C.A., Klinck H.R., Gauthier F.M. 1967. Early generation selection under different environments as it influences adaptation of barley. *Can. J. Oplant Sci.* 47: 507 — 517.
- Tollenaar M., Lee E.A. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize *Field Crops Res.* 75: 161 — 169.
- Trethowan R.M., van Ginkel M., Rajaram S. 2002. Progress in breeding wheat for yield and adaptation in global drought affected environments. *Crop Sci.* 42: 1441 — 1446.
- Ulukan H. 2008. Agronomic adaptation of some field crops: a general approach. *J. Agronomy & Crop Sci.* 194: 169 — 179.
- Waldron B.L., Asay K.H., Jensen K.B. 2002. Stability and yield of cool — season pasture grass species grown at five irrigation levels. *Crop Sci.* 42: 890 — 896.
- Wamatu J.N., Thomas E. 2002. The influence of genotype x environment interaction on the grain yields of 10 pigeonpea cultivars grown in Kenya. *J. Agron. Crop Sci.* 188: 25 — 33.
- Weber R., Zalewski D. 2006. Wpływ interakcji genotypowo-środowiskowej na plonowanie pszenicy ozimej. *Biul. IHAR* 240/241: 33 — 42.
- Williams R.M., O'Brien L., Eagles H.A., Solah V.A., Jayasena V. 2008. The influences of genotype, environment, and genotype × environment interaction on wheat quality. *Aust. J. Agric. Res.* 95: 95 — 111.

- Wójcik A.R. 1987. Statystyka matematyczna z elementami rachunku prawdopodobieństwa i statystyki opisowej. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.
- Wricke G. 1965. Zur Berechnung der Ökivalenz bei Sommerweizen und Hafer. *Pflanzenzüchtung* 52: 127 — 138.
- Yang R.C. 2007. Mixed model analysis of crossover genotype x environment interactions. *Crop Sci.* 47: 1051 — 1062.
- Yan W., Hunt L.A., Sheng Q., Szlavnic Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Sci.* 40: 597 — 605.
- Yan W., Kang M.S. 2003. *GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists.* Boca Raton, FL, CRC Press.
- Yan W., Rajcan I. 2003. Prediction of cultivar performance based on single- versus multiple-year tests in soybean. *Crop Sci.* 43: 549 — 555.
- Yan W., Tinker N.A. 2005. An integrated system of biplot analysis for displaying, interpreting, and exploring genotype-by-environment interactions. *Crop Sci.* 45: 1004 — 1016.
- Yan W., Kang M.S., Ma B., Woods S., Cornelius P.L. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 47: 643 — 655.
- Yau S.K., Hamblin J. 1994. Relative yield as a measure of entry performance in variable environments. *Crop Sci.* 34: 813 — 817.
- Yue G.L., Roozeboom K.L., Schapaugh W.T., Liang G.H. 1997. Evaluation of soybean cultivars using parametric and nonparametric stability estimates. *Plant Breed.* 116: 271 — 275.
- Zhang M., Kang M.S., Reese P.F., Harbans J., Bhardwaj L. 2005. Soybean cultivar evaluation via GGE biplot analysis. *J. New Seeds* 7: 37 — 50.