

ADRIANA DEREJKO**WIESŁAW MĄDRY**

Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

Przegląd zastosowań metod statystycznych w analizie danych z serii doświadczeń odmianowych i odmianowo-agrotechnicznych

Overview of applications of statistical methods in the analysis of data from a series of experiments

Wprowadzenie do uprawy nowych odmian związane jest z ryzykiem ich niepowodzenia w produkcji, które zwiększa się wraz z malejącą wiedzą o ich reakcji na zróżnicowane warunki środowiskowe (siedliskowe) i czynniki agrotechniczne. Zatem, proces wdrażania każdej odmiany nie kończy się na etapie badań wstępnych i jej zarejestrowania, lecz obok reprodukcji materiału nasiennego, obejmuje on także ocenę wartości gospodarczej odmiany w wielokrotnych seriach doświadczeń porejestrowych. Stały dopływ do rolnictwa nowo zarejestrowanych odmian nakłada na porejestrowe doświadczalnictwo odmianowe i odmianowo-agrotechniczne, konieczność sprawnej i wiarygodnej weryfikacji ich wartości gospodarczej. Wymienione doświadczenia pozwalają znacząco zmniejszyć ryzyko wprowadzenia do uprawy odmian nieprzydatnych dla rolnictwa, czyli takich, które nie zapewniają wysokich efektów produkcyjnych i ekonomicznych w różnych lub tylko wybranych (specyficznych) warunkach środowiskowych oraz systemach uprawy roślin i agrotechnice. Dane z wymienionych serii doświadczeń wymagają zastosowania specjalistycznej i komplementarnej metodyki statystycznej. W niniejszej pracy przedstawiony został przegląd serii doświadczeń odmianowych i odmianowo-agrotechnicznych wraz z zastosowaną metodyką statystyczną.

Słowa kluczowe: metodyka statystyczna, wielokrotne serie doświadczeń, łączna analiza wariancji

Introduction of new varieties to the cultivation is associated with the risk of failure in the production which increases with decreasing knowledge of their response to different environmental conditions and crop management factors. Thus, the implementation of each variety does not stop at the stage of preliminary tests and its registration, but next to the reproduction of the seed, it also includes an assessment of the economic value of variety in multiple series of post-registration trials. A steady supply to agriculture of newly registered varieties requires from the post-registration experimental variety testing, the efficient and reliable verification of the economic value of tested varieties. These field experiments allow to significantly reduce the risk of introducing the cultivation of varieties unsuitable for agriculture, i.e. those which do not provide high production and economic effects in

different or only selected (specific) environmental conditions and systems of crops and agricultural techniques. Data from these series of experiments require the use of specialized and complementary statistical methodology. In this work, an overview of a series of varietal and agrotechnical experiments is presented and the statistical methodology described.

Key words: statistical methods, multi-environment experimental series, combined analysis of variance

WSTĘP

Głównym celem niniejszej pracy jest przegląd metod statystycznych używanych do analizy danych z serii doświadczeń odmianowych i odmianowo-agrotechnicznych. Zatem, podjęto próbę zebrania oraz opracowania literatury światowej i krajowej przedstawiającej wyniki badań teoretycznych i empirycznych nad skutecznością oraz oceną przydatności metod statystycznych służących do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji odmian na podstawie danych kompletnych i niekompletnych z wielokrotnych serii doświadczeń jednorocznych oraz wieloletnich, odmianowych i odmianowo-agrotechnicznych. Metody te są bardzo liczne i różnorodne pod względem treści metodologicznej i matematycznej. Służą głównie zwiększeniu precyzji oceny reakcji odmian na środowiska, grupowaniu odmian pod względem ich reakcji adaptacyjnej, grupowaniu miejscowości podobnych pod względem efektów interakcyjnych $G \times L$ oraz graficznemu przedstawieniu reakcji odmian lub jednorodnych grup odmian na warunki środowiskowe (Gauch, 1992, 2006; Basford i Cooper, 1998; Annicchiarico, 2002 b, 2009; Yan i Kang, 2003). W niniejszej pracy o charakterze przeglądowym została przedstawiona metodyka statystyczna dla wielokrotnych serii doświadczeń odmianowych i odmianowo-agrotechnicznych.

WIELOKROTNE SERIE JEDNOROCZNYCH DOŚWIADCZEŃ ODMIANOWYCH

W procesie badania odmian w Polsce, wielokrotne serie jednorocznych doświadczeń odmianowych prowadzone są w ramach doświadczeń wstępnych oraz rejestrowych (dla mniej ważnych gatunków roślin). Są one wykonywane przez hodowców lub pracowników COBORU. Obejmują doświadczenia z podobnymi zestawami odmian, powtarzane w danym sezonie wegetacyjnym, w kilku do kilkunastu stacjach, należących do hodowców lub COBORU. Stacje te stanowią środowiska rolnicze (agro-ekosystemy), wybrane w sposób losowy w przestrzeni kraju, tak, aby dobrze reprezentowały zmienność przyrodniczą najważniejszych rejonów uprawy badanych gatunków. Wyniki z serii takich doświadczeń dostarczają informacji o przydatności badanych odmian do warunków agro-ekologicznych na podstawie zachowania się tych odmian w wielu środowiskach, ale tylko w jednym sezonie wegetacyjnym. Zatem, ich wartość gospodarcza nie jest sprawdzona pod względem powtarzalności w innych warunkach pogodowych i biotycznych (Annicchiarico, 2002 a, b; So i Edwards, 2009; Anderson, 2010).

Oddziaływanie warunków środowiskowych na cechy odmian jest skomplikowane i trudne do interpretacji. Z licznych doniesień w literaturze wiadomo, że odmiany roślin uprawnych niejednakowo reagują pod względem plonu i innych cech rolniczych na zróżnicowane warunki środowiskowe w miejscowościach (Becker i Leon, 1988; Ma i in.,

2004; Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010 a; Pecetti i in., 2011). Jest to związane zarówno ze średnimi odmianowymi, jak i interakcją Odmiana \times Miejscowość, w skrócie oznaczaną symbolem $G \times L$. W odniesieniu do reakcji plonowania odmian (lub innych cech odmianowych) na warunki środowiskowe, nazywanej też reakcją adaptacyjną odmian (Anniccharico i in., 2010 b; DeVita i in., 2010), wyróżnia się dwa rodzaje adaptacji odmian tj. adaptację wąską oraz szeroką (Finlay i Wilkison, 1963; Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b, 2009; DeVita i in., 2010). Odmiany plonujące średnio względnie wysoko (w porównaniu z resztą ocenianych odmian) i stabilnie w obrębie danego rejonu uprawy (zakresu środowisk), wykazują szeroką zdolność adaptacyjną do tych środowisk (Kang, 1993, 1998; Basford i Cooper, 1998; Iwańska i in., 2008). Nazywane są one odmianami o szerokiej adaptacji. Odmiany te osiągają relatywnie wysoki plon we wszystkich środowiskach tego rejonu uprawy (DeVita i in., 2010; Mohammadi i in., 2011). Natomiast, odmiany plonujące średnio względnie wysoko w pewnego rodzaju (lub kilku rodzajach) środowisk w obrębie rozpatrywanego rejonu uprawy, tj. w podrejonach, wykazują wąską (lokalną lub specyficzną) adaptację (Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b, 2009; Annicchiarico i in., 2010 b).

Pojęcia wąskiej i szerokiej adaptacji odmian są używane także do oceny plonowania odmian w latach (sezonach wegetacyjnych) lub przy zróżnicowanych poziomach agrotechniki, a także jej głównych czynników, tj. nawożenie, nawodnienie, gęstość siewu (Anniccharico i in., 2010 a; Anderson, 2010; Anderson i in., 2011). Z punktu widzenia oceny wartości gospodarczej odmian, bardzo ważna jest możliwie trafna ocena ich zdolności adaptacyjnej w zmiennych przestrzennie warunkach środowiskowych, a także w różnych warunkach agrotechnicznych (Finlay i Wilkison, 1963; Annicchiarico, 2002 b; Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010 b). Taka ocena ma ogromne znaczenie w efektywnym wdrażaniu postępu odmianowego do praktyki rolniczej, uczestniczącym w coraz większym stopniu w postępie agronomicznym, decydującym o zwiększeniu produktywności roślin uprawnych teraz i w przyszłości (Anniccharico, 2002 a, b; Smith i in., 2005; DeVita i in., 2010).

Dane z wielokrotnych serii jednorocznych doświadczeń odmianowych stanowią zazwyczaj niekompletną klasyfikację w postaci Odmiana \times Miejscowość. Niekompletność ta wynika z częściowo zróżnicowanego zestawu odmian badanych w różnych środowiskach (stacjach). Ta sama charakterystyka odnosi się do innych rodzajów serii doświadczeń, rozpatrywanych w tym przeglądzie literatury. W dotychczasowej praktyce oceny odmian w rozpatrywanych seriach doświadczeń, zwykle badacze ograniczają się do analizy danych w kompletnych klasyfikacjach Odmiana \times Miejscowość (Anniccharico, 2002 b; So i Edwards, 2009). Badacz, decydując się na kompletną klasyfikację danych, zmuszony jest ograniczyć się do takich odmian, które są badane w każdej z rozpatrywanych miejscowości badawczych (Pinnschmidt i Hovmøller, 2002; So i Edwards, 2009; Crossa i in., 2010). Zwykle, te odmiany mają większą przydatność rolniczą, głównie ze względu na wstępne oznaki wyróżniania się szeroką adaptacją (Pinnschmidt i Hovmøller, 2002; Annicchiarico i in., 2010 a, b). Wymieniona praktyka w ocenie odmian jest uzasadniona możliwością stosowania znacznie prostszej metodyki statystycznej do analizy danych kompletnych z serii doświadczeń (Anniccharico, 2002 b, 2009; Yan i Kang, 2003; So i

Edwards, 2009), w porównaniu do metod opracowanych dla danych niekompletnych, opartych na liniowych i multiplikatywnych modelach mieszanych (Piepho i van Eeuwijk, 2002; Smith i in., 2005; Crossa i in., 2010; Welham i in., 2010).

Metody statystyczne służące do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji odmian na podstawie danych kompletnych i niekompletnych z wielokrotnych serii doświadczeń jednorocznych odmianowych, nazwane są metodami analizy i interpretacji interakcji $G \times L$, (Smith i in., 2005; Crossa i in., 2010; Paderewski i Mądry, 2012). Obejmują one metody jednowymiarowe, oparte na stałych lub mieszanych modelach liniowych (modelach analizy wariancji) — (Basford i Cooper, 1998; Annicchiarico, 2002 b, 2009; Iwańska i in., 2008; Paderewski i Mądry, 2012) oraz metody wielowymiarowe, oparte na stałych lub mieszanych modelach multiplikatywnych (Annicchiarico, 2002 b, 2009; Yan i Kang, 2003; Smith i in., 2005; Crossa i in., 2010). W analizie danych z omawianej serii doświadczeń odmianowych, obserwowane wartości rozpatrywanej zmiennej zależnej opisuje się matematycznie, w liniowym modelu, jako sumę efektów głównych (przeciętnych) odmian (G), efektów głównych miejscowości (L) oraz efektów interakcyjnych $G \times L$, związanych z każdą kombinacją wymienionych czynników (Annicchiarico, 2002 b; Paderewski i Mądry, 2012). Efekt interakcji $G \times L$ określa rezultat jednoczesnego wpływu poziomów obu czynników na badaną zmienną zależną, niewytłumaczony przez sumę ich efektów głównych (Gauch i Zobel, 1997; Kang, 1998, 2002). Efekty interakcji $G \times L$ manifestują się w postaci niejednakowego zróżnicowania odmian w środowiskach i tym samym, jako nierównoległa reakcja odmian w środowiskach. Podstawową metodą statystyczną, służącą do analizy danych z serii jednorocznych doświadczeń odmianowych, jest dwuczynnikowa analiza wariancji.

DWUCZYNNIKOWA ANALIZA WARIANCJI OPARTA NA MODELACH STAŁYCH, LOSOWYCH I MIESZANYCH).

Dla danych kompletnych z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń odmianowych, przedstawionych w klasyfikacji dwukierunkowej krzyżowej o postaci Odmiana \times Miejscowość, odpowiednie modele liniowe (modele ANOVA) uważane są za podstawowe narzędzia do analizy efektów głównych obu tych czynników i efektów ich interakcji (Annicchiarico, 2002 b; Gauch i in., 2008). Różnorodność modeli ANOVA związana jest z charakterem statystycznym poszczególnych czynników, czyli traktowaniem ich jako czynnik stały (ang. fixed factor), czyli taki, dla którego poziomy są wybrane świadomie przez badacza lub jako czynnik losowy (ang. random factor), czyli taki, dla którego poziomy są wybierane reprezentatywnie (losowo) przez badacza z wyjściowej populacji tych poziomów. Gdy oba czynniki są uważane jako stałe, to model ANOVA, odpowiedni do danych w klasyfikacji Odmiana \times Miejscowość, jest modelem z efektami stałymi dla poziomów każdego z czynników, nazywanym dwuczynnikowym modelem stałym (ang. two-factor fixed model). Jeśli oba czynniki uznano za losowe, to odpowiedni model ANOVA jest modelem z efektami losowymi dla poziomów każdego z czynników, nazywanym dwuczynnikowym modelem losowym (ang. two-factor random model). Natomiast, jeżeli jeden czynnik jest uznany za stały, a drugi za losowy, wtedy

odpowiednim modelem ANOVA jest dwuczynnikowy model mieszany (ang. two-factor mixed model) — (Caliński i in., 1995, 1998; Annicchiarico, 2002 b; Mądry, 2003; Piepho i in., 2008).

W eksperymentalnych pracach naukowych z wykorzystaniem danych z wielokrotnych serii jednorocznych doświadczeń odmianowych, przyjmuje się trzy rodzaje założeń w modelach ANOVA, dotyczących odmian i miejscowości. W pierwszym rodzaju tych modeli odmianę i miejscowość traktuje się jako czynniki stałe, zaś dla danych przyjmuje się dwuczynnikowy model stały (Gauch, 1992; Caliński i in., 2005, 2009; Paderewski i in., 2011). W innych badaniach tego typu, opartych na mieszanych modelach ANOVA, odmianę traktuje się jako czynnik stały, zaś miejscowość, jako czynnik losowy (Piepho i van Eeuwijk, 2002; Mądry i Kang, 2005; Iwańska i in., 2008). Natomiast, w przypadkach trzeciego rodzaju z zastosowaniem modeli mieszanych, odmianę traktuje się jako czynnik losowy, zaś miejscowość, jako czynnik stały (Smith i in., 2005; So i Edwards, 2009; de la Vega i Chapman, 2010).

Dwuczynnikowy model liniowy analizy wariancji danych w klasyfikacji dwukierunkowej Odmiana \times Miejscowość nie umożliwia przejrzystej i efektywnej merytorycznie interpretacji efektów interakcji $G \times L$, ukierunkowanej na potrzeby hodowli i uprawy roślin (Gauch, 1992; Annicchiarico, 2002 a, b; Ebdon i Gauch, 2002; Yan i Kang, 2003; Crossa i in., 2010). Do bardziej wnikliwej i wiarygodnej oceny odmian, zwłaszcza pod względem ich adaptacji, stosowane są metody oparte na rozszerzonych dwuczynnikowych modelach ANOVA z podanymi wyżej, różnymi, założeniami o własnościach statystycznych czynników i ich efektów (Gauch, 1992; Piepho i van Eeuwijk, 2002; Yan i Kang, 2003; Caliński i in., 2005, 2009; Smith i in., 2005).

ROZWINIĘCIA DWUCZYNNIKOWEGO MODELU LINIOWEGO ANOVA I OPARTE NA NICH METODY.

Większość zaawansowanych metod statystycznych służących do analizy interakcji $G \times L$ została opracowana dla danych stanowiących kompletną klasyfikację dwukierunkową krzyżową Odmiana \times Miejscowość, w której jednym kierunkiem są odmiany, drugim zaś miejscowości. Do najbardziej skutecznych i najczęściej stosowanych metod opartych na różnych modyfikacjach dwuczynnikowego modelu ANOVA, należy analiza regresji łącznej, analiza AMMI (ang. Additive Main Effect and Multiplicative Interaction analysis) i analiza GGE (ang. Genotype main effect and Genotype \times Environment interaction analysis) — (Gauch, 1992; Annicchiarico, 2002 b; Piepho i van Eeuwijk, 2002; Yan i Kang, 2003; Mądry i Kang, 2005). Wymienione metody są oparte na modelach z multiplikatywną interakcją $G \times L$, dlatego są one czasami nazywane modelami upraszczającymi efekty interakcji $G \times L$ (ang. parsimonious models) — (Viele i Srinivasan, 2000; Annicchiarico, 2002 b; Crossa i Cornelius, 2002). Parametry tych modeli są bardziej przydatne (niż parametry modelu ANOVA) do wnioskowania o stabilności plonowania i adaptacji (szerokiej lub wąskiej) odmian w rozpatrywanych środowiskach rolniczych.

Jednym ze sposobów podejścia do analizy danych z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń odmianowych jest podział odmian lub środowisk na grupy jednorodne, w których zmienność efektów interakcji $G \times L$ jest odpowiednio zmniejszona w stosunku do zmienności tych efektów w całej serii doświadczeń (Gauch i Zobel, 1997; de la Vega i Chapman, 2006). Zatem, w każdej grupie jednorodnej odmian lub miejscowości profile interakcji $G \times L$ są podobne (Gauch i Zobel, 1996; Annicchiarico, 2002 b). Wykorzystanie tego podejścia pozwala sprawnie opisać reakcje odmian na środowiska bez pogorszenia tej oceny w porównaniu z oceną reakcji pojedynczych odmian. Do wydzielenia grup odmian i środowisk jednorodnych pod względem ich efektów interakcyjnych oraz oceny zróżnicowania pomiędzy tymi grupami stosuje się różne metody statystyczne, głównie zaś analizę AMMI i analizę GGE (Gauch i Zobel, 1996; Annicchiarico, 2002 b, 2009; Yan i Kang, 2003).

W badaniu efektów interakcji $G \times L$ możliwa jest poprawa dokładności ich oceny. Estymatory efektów interakcji $G \times L$ można podzielić na składniki powtarzalne (ang. pattern effects) i składniki losowe, nazywane błędem doświadczalnym lub szumem, które są spowodowane czynnikami niekontrolowanymi, czyli niepowtarzalnymi (Gauch i in., 2008; Piepho i in., 2008). Poprawa dokładności oceny efektów interakcji $G \times L$ polega na usunięciu składników losowych z szacowanych efektów interakcji $G \times L$ (Ebdon i Gauch, 2002; Paderewski, 2008; Mądry i in., 2012). Na podstawie tak oszacowanych efektów interakcji $G \times L$ otrzymuje się tzw. poprawione średnie dla kombinacji $G \times L$ (ang. AMMI-adjusted means), które można wykorzystać do dalszej analizy statystycznej z wykorzystaniem różnych metod służących do szczegółowej oceny i interpretacji interakcji $G \times L$ w podany wyżej sposób (Gauch i Zobel, 1996; Annicchiarico, 2002 b, 2009; Paderewski i Mądry, 2012).

Jedną z częściej stosowanych i przydatnych metod jest analiza AMMI, wykorzystująca model AMMI — (Gollob, 1968; Caliński i in., 1983, 1987; Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b). Ta metoda jest szeroko stosowana do opisu reakcji odmian roślin rolniczych na zmienne warunki agro-ekologiczne. Metoda zakłada addytywność efektów głównych odmian i miejscowości, natomiast efekty interakcyjne $G \times L$ wyrażone są za pomocą składników (parametrów) multiplikatywnych (Gollob, 1968; Gauch, 1992, 2006). Zastosowanie analizy AMMI do oceny reakcji odmian na warunki środowiskowe opiera się zwykle na wykorzystaniu składników multiplikatywnych dla dwóch pierwszych interakcyjnych składowych głównych (Gauch, 2006). Składniki multiplikatywne efektów interakcji $G \times L$ są oceniane za pomocą analizy składowych głównych (rozkładu macierzy efektów interakcji $G \times L$ według wartości osobliwych). Mogą być one wykorzystane w celu wizualizacji profili efektów interakcyjnych $G \times L$ na wykresach stanowiących element analizy AMMI. Zastosowanie metody AMMI było prezentowane w nielicznych krajowych pracach naukowych (Caliński i in., 1987; Pilarczyk i Kamiński, 1995; Mądry i in., 2006; Paderewski i Mądry, 2006).

Możliwe jest także łączne zastosowanie wielowymiarowych metod klasyfikacji, czyli grupowanie obiektów za pomocą analizy skupień (ang. clustering methods) oraz analizy AMMI, do badania zróżnicowania i relacji odmian pod względem ich reakcji na środowiska (Annicchiarico i in., 2009; Mądry i in., 2011; Paderewski i in., 2011). W analizie skupień parametry multiplikatywne dla efektów interakcji $G \times L$ są wykorzystywane w celu określenia odległości pomiędzy odmianami lub miejscowościami. Dodatkowo, parametry te stwarzają możliwość praktyczną dość dokładnego przedstawienia charakterystyki podobieństwa i niepodobieństwa pomiędzy obiektami w przestrzeni dwóch pierwszych interakcyjnych składowych głównych (Chapman i in., 1997; de la Vega i Chapman, 2006; Paderewski i Mądry, 2012).

WIELOKROTNE SERIE WIELOLETNICH DOŚWIADCZEŃ ODMIANOWYCH

Wnioskowanie o wartości rolniczej odmian (głównie reakcji odmian na warunki agrokologiczne), oparte na danych z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń odmianowych, nie jest zwykle wystarczająco wiarygodne (Annicchiarico i Iannucci, 2008; Annicchiarico i in., 2010 a). Zatem, wymagane jest powtórzenie takich wielokrotnych doświadczeń również w kilku latach wegetacji (Annicchiarico i in., 2002 b; De Vita i in., 2010; Welham i in., 2010). W procesie badania odmian w Polsce wielokrotne serie wieloletnich doświadczeń odmianowych przeprowadzane są w ramach doświadczeń rejestrowych oraz porejestrowych (www.coboru.pl). Są one wykonywane przez COBORU w celu oceny adaptacji odmian pod względem plonu i innych cech rolniczych w zmiennych warunkach środowiskowych na przestrzeni kilku lat (Paderewski i in. 2011, www.coboru.pl). Obejmują one doświadczenia ze zróżnicowanym zestawem odmian w obrębie miejscowości i lat przeprowadzanych badań. Zatem, wartość gospodarcza odmian jest sprawdzana pod względem powtarzalności reakcji adaptacyjnej w zróżnicowanych warunkach pogodowych i biotycznych (Annicchiarico, 2002 a, b; De Vita i in., 2010). Zjawisko stopnia powtarzalności reakcji adaptacyjnej odmian jest związane z interakcją potrójną Odmiana \times Miejscowość \times Rok, oznaczana także jako interakcja $G \times L \times Y$.

Z wielokrotnych serii wieloletnich doświadczeń odmianowych otrzymujemy dane (średnie z powtórzeń), stanowiące zwykle niekompletną klasyfikację o postaci Odmiana \times Miejscowość \times Rok, czyli klasyfikację $G \times L \times Y$ (van Eeuwijk i in., 1995; Smith i in., 2005; de la Vega i in., 2007). Niekompletność danych w wymienionej klasyfikacji jest wynikiem zróżnicowanych zestawów odmian w rozpatrywanych miejscowościach oraz latach przeprowadzonych obserwacji (Smith i in., 2005; So i Edwards, 2009; DeLacy i in., 2010 a, b). Dla takich danych można stosować dwa podejścia do analizy statystycznej. Podobnie, jak we wcześniejszym rodzaju serii doświadczeń, można zastosować metodykę statystyczną dla danych niekompletnych w postaci $G \times L \times Y$ lub można zastosować dostępną aktualnie metodykę analizy danych dla kompletnych wielokrotnych serii wieloletnich doświadczeń odmianowych (Pinnschmidt i Hovmoller, 2002; So i Edwards, 2009).

Niektórzy autorzy twierdzą, że nawet przy dużym stopniu niekompletności danych w postaci $G \times L \times Y$ można przeprowadzić skutecznie ich analizę statystyczną oraz odpowiednie wnioskowanie merytoryczne o odmianach i miejscowościach, opierając się na odpowiednim modelu analizy wariancji (Smith i in., 2005; DeLacy i in., 2010 a, b; Welham i in., 2010). W analizie danych w klasyfikacji $G \times L \times Y$, odmiana i miejscowość są uznawane za czynniki stałe, zaś rok jako czynnik losowy (Annicchiarico, 2002 b, 2009; Paderewski i in., 2011) albo też miejscowość i rok są traktowane jako czynniki stałe, a odmiana, jako czynnik losowy (Smith i in., 2005; DeLacy i in., 2010 a, b; Welham i in., 2010) lub odwrotnie, czyli odmiana określona jest jako czynnik stały, a miejscowość i rok jako losowy. Jeszcze inne podejście do określenia charakteru statystycznego badanych czynników zaprezentowali Peltonen-Sainio i in. (2009), którzy rok i odmianę potraktowali jako czynniki stałe, zaś miejscowość jako czynnik losowy. W każdym wymienionym przypadku przyjęty model liniowy łącznej, trójczynnikowej analizy wariancji dla danych był modelem mieszanym. Decydując się na analizę danych w klasyfikacji niekompletnej, do estymacji parametrów modelu mieszanego stosuje się metodę największej wiarygodności REML (Restricted maximum likelihood) — (van Eeuwijk i in., 1995; Smith i in., 2005; Welham i in., 2010). Ta metoda została wdrożona w pakietach statystycznych SAS (SAS Institute, 2001), GenStat (GenStat, 2002) oraz ASReml (Gilmour i in., 1995, 2004; Gogel i in., 2009, www.vsni.co.uk). W badaniach Peltonen-Sainio i in. (2009) doświadczenia odmianowe ich wielokrotnej serie (zwane Official Variety Trials) były założone zarówno w kompletnych, jak i niekompletnych układach blokowych w 3–4 powtórzeniach w zależności od rozpatrywanych miejscowości i lat badań. Liczba badanych odmian była zróżnicowana w obrębie 28 miejscowości w Finlandii, a także na przestrzeni lat 1976–2006. Autorzy zastosowali analizę statystyczną dla danych w klasyfikacji niekompletnej, wykorzystując metodę REML za pomocą procedury MIXED w pakiecie SAS.

Alternatywnym rozwiązaniem jest analiza statystyczna, oparta na danych kompletnych w klasyfikacji Odmiana \times Miejscowość \times Rok. Jej celem jest ocena adaptacyjnej reakcji odmian na warunki środowiskowe w kilku sezonach badań (Annicchiarico, 2002 b; Annicchiarico i in., 2010 a; Mohammadi i in., 2010) oraz wskazanie odmian o szerokiej i wąskiej adaptacji (BASFORD i Cooper, 1998; Gauch i in., 2008). Analiza danych z wielokrotnej serii wieloletnich doświadczeń odmianowych może być wykonana w dwóch etapach, czyli za pomocą procedury dwustopniowej (Annicchiarico, 2002 b; Smith i in., 2005; de la Vega i in., 2007). W pierwszym kroku wykonuje się oddzielne jednoczynnikowe analizy wariancji dla danych pochodzących z doświadczeń pojedynczych w każdym środowisku (miejscowości) i roku, zgodnie z układem połowym wykonanego doświadczenia (zwykle jest to układ bloków niekompletnych). W ten sposób wyznacza się średnie poprawione dla cechy roślin (np. plonu) dotyczące odmian w danej miejscowości i roku oraz średnie kwadraty odchyłeń dla błędu doświadczalnego. Średnie poprawione w kombinacjach $G \times L \times Y$ stanowią odpowiednią klasyfikację trójkierunkową. Drugim etapem jest analiza wariancji średnich poprawionych w tej klasyfikacji, oparta na odpowiednim modelu liniowym łącznej analizy wariancji, zgodnym z ustalonym charakterem badanych czynników. Jednakże, analiza wariancji jest mało skuteczna przy

wnioskowaniu o reakcji cechy odmian na warunki środowiskowe, ponieważ nie umożliwia szczegółowej interpretacji ocen istotnych efektów interakcji $G \times L$ oraz nie pozwala na efektywne badanie podobieństwa i niepodobieństwa rozważanych ocen reakcji odmian (Annicchiarico, 2002 b; Crossa i in., 2010).

Do oceny adaptacji odmian na przestrzeni kilku lat obserwacji stosuje się przeważnie trzy metody, tj. analizę AMMI, łączną analizę skupień i analizę GGE (Gauch i in., 2008; Mohammadi i Amri, 2009; Paderewski i in., 2011). Przy wykorzystaniu metod wielowymiarowych dla danych w postaci $G \times L \times Y$ czasami środowisko (E) określane jest jako kombinacja $L \times Y$. Wówczas dane z klasyfikacji $G \times L \times Y$ tworzą klasyfikację dwukierunkową o postaci $G \times E$ (Annicchiarico 2002 b; Pinnschmidt i Hovmoller, 2002; Mohammadi i in., 2010; Loyce i in., 2011). W takich przypadkach efekty główne odmian i miejscowości w latach mogą być estymowane za pomocą klasycznej dwukierunkowej analizy wariancji, zaś efekty interakcji $G \times E$ mogą być wyrażone za pomocą składników multiplikatywnych otrzymanych metodami wielowymiarowymi, np. metodą AMMI lub GGE. Najbardziej przydatną metodyką okazuje się łączne stosowanie wielowymiarowych metod klasyfikacji, czyli grupowania obiektów za pomocą analizy skupień z metodami ordynacyjnymi służącymi do oceny zróżnicowania obiektów (Chapman i in., 1997; de la Vega i Chapman, 2006; Zhang i in., 2006). Analiza skupień ona narzędziem służącym do eksploacyjnej analizy danych, której celem jest ułożenie obiektów w grupy w taki sposób, aby stopień powiązania obiektów z tej samej grupy był jak największy, a z obiektami z pozostałych grup jak najmniejszy. Wykorzystując tę analizę grupowanie obiektów odbywa się na podstawie przyjętej miary podobieństwa lub niepodobieństwa dla zmiennych opisujących te obiekty. Ponadto należy określić metodę aglomeracji, czyli zasadę łączenia obiektów w grupy i łączenia mniejszych grup w większe. Dlatego istnieje wiele metod analizy skupień, określonych łącznie przez miarę odległości, oraz metodę aglomeracji. Wybór odpowiedniej metody analizy skupień do badań empirycznych jest ważnym krokiem w metodyce tych doświadczeń (Crossa i Franco, 2004).

W analizie skupień najczęściej stosuje się technikę opartą na metodzie Warda (metodę Warda) z odległościami euklidesowymi, która pozwala na wyodrębnienie grup obiektów o dużym podobieństwie wewnętrznym. Modelem z multiplikatywnymi efektami interakcji $G \times E$ jest model AMMI, zaś z efektami głównymi odmian i multiplikatywnymi efektami $G \times E$ jest model GGE. Wykorzystanie parametrów multiplikatywnych dla wymienionych efektów interakcyjnych służy do zwykle dość dokładnego przedstawienia i charakterystyki podobieństwa i niepodobieństwa między obiektami najczęściej w przestrzeni dwóch pierwszych składowych głównych (Ward, 1963; Chapman i in., 1997; Yan i in., 2007; Gauch i in., 2008). Pozwala to na podział odmian na grupy jednorodnie reagujące podobnie w rozpatrywanych środowiskach rolniczych. Ma to znaczenie w uproszczeniu wizualizacji reakcji odmian na środowiska przede wszystkim w seriach doświadczeń wykonywanych z dużą liczbą odmian. Przy komplementarnym wykorzystaniu tych metod, możliwa jest skuteczna interpretacja oceny reakcji odmian na zmienne warunki w miejscowościach na podstawie wykresu przedstawiającego oceny parametrów AMMI, czyli efektów głównych odmian (określonych jako odmianowa pierwsza interakcyjna składowa główna GIPC1) i miejscowości, uśrednionych przez lata (określonych jako środowiskowa pierwsza

interakcyjna składowa główna EIPC1) oraz ich efektów interakcyjnych. Stosowanych jest wiele możliwości prezentacji dla ocen parametrów modelu AMMI. Każdy typ wizualizacji wyników obrazuje odpowiednią charakterystykę reakcji cech odmian na środowiska rolnicze (Annicchiarico i Iannucci, 2008; Gauch, 2006; Mohammadi i Amri, 2009). Zarówno parametry odmianowe $GIPC_t$, jak i środowiskowe $EIPC_t$ są wzajemnie ortogonalne, czyli nie zachodzi liniowa zależność parametrów jednej interakcyjnej składowej głównej od pozostałych składowych. Oceny obu rodzajów tych parametrów dla pierwszej lub dwóch pierwszych interakcyjnych składowych głównych mogą być zobrazowane graficznie w postaci wykresu podwójnego w układzie dwóch osi prostokątnych (Gabriel, 1971; Gauch, 1992; Annicchiarico, 2002 b). W celu wizualizacji reakcji odmian na warunki środowiskowe, efekty główne odmian, oszacowane metodą ANOVA oraz parametry multiplikatywne, oszacowane metodą AMMI coraz częściej są wykorzystywane w postaci AMMI-1 plonów nominalnych (ang. AMMI-1 nominal yields) — (Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002 b). Ta metoda jest szeroko propagowana i polecana przez Paulo Annicchiarico (Annicchiarico i Iannucci, 2008; Annicchiarico i in., 2010 a, 2011).

W procesie badania odmian poza oceną ich reakcji na środowisko, poważne znaczenie rolnicze ma zweryfikowanie wpływu stosowanych zabiegów agrotechnicznych na zachowanie odmian. Do takich badań wymagane jest przeprowadzenie wielokrotnych serii doświadczeń odmianowych z udziałem zróżnicowanej agrotechniki (Ma i in., 2004; Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010 a).

WIELOKROTNE SERIE JEDNOROCZNYCH DOŚWIADCZEŃ ODMIANOWO-AGROTECHNICZNYCH

Wielokrotne serie jednorocznych doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych wykonuje się w ramach Porejstrowego Doświadczalnictwa Odmianowego i Rolniczego (www.coboru.pl). Serie tych dwuczynnikowych doświadczeń są źródłem danych przydatnych do badania adaptacyjnej reakcji odmian na zmienne warunki środowiskowe w rolniczej przestrzeni produkcyjnej całego kraju (seria L) lub w obrębie województw (seria K), przy każdej z dwóch badanych intensywności agrotechniki (Bujak i Tratwał, 2011; Derejko i in., 2011; Mądry i in., 2012, www.coboru.pl). Jednakże, efektywne badanie adaptacyjnej reakcji odmian na środowisko i rodzaj agrotechniki na podstawie danych dla plonu (lub innych cech plonotwórczych roślin) z wielokrotnych, jednorocznych i wieloletnich, serii doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych jest trudnym zadaniem metodyczno-statystycznym, ze względu na wielość efektów czynnikowych i wymogi analityczne (Annicchiarico i Iannucci, 2008; Anderson, 2010; Mądry i in., 2012). Dane z wielokrotnych, jednorocznych serii doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych tworzą klasyfikację trójkierunkową o postaci Odmiana \times Agrotechnika \times Miejscowość, w skrócie klasyfikacji $G \times M \times L$. Przy analizie danych o postaci $G \times M \times L$, czasami środowisko (E) określane jest jako kombinacja $M \times L$ (Raman i in., 2011; Thangavel i in., 2011). Dodatkowym powodem trudności w analizie rozpatrywanych danych jest ich niekompletność (Smith i in., 2005; So i Edwards, 2009; Mądry i in., 2012). Jednakże,

akceptowalnym podejściem do analizy danych w klasyfikacji $G \times M \times L$, jest skupienie się na możliwie obszernym, kompletnym podziorze tych danych (So i Edwards, 2009; Mądry i in., 2012). To podejście pozwala na zastosowanie znacznie prostszej metodyki statystycznej, niż ta, dla danych niekompletnych (Ma i in., 2004; Annicchiarico i in., 2010 a; Crossa i in., 2010). W metodyce badań agronomicznych na podstawie wymienionych danych kompletnych, służącej ocenie wartości gospodarczej odmian, zwraca się uwagę na adekwatne modelowanie statystyczne danych, wykrywanie i interpretowanie różnych reakcji badanych odmian na warunki środowiskowe oraz stosowaną agrotechnikę.

Jeżeli efekty interakcji pomiędzy odmianą, intensywnością agrotechniki i środowiskiem (miejscowością) są istotne, wówczas ocena reakcji odmian, oparta jedynie na ich efektach głównych, nie jest wystarczająco wiarygodna (Basford i Cooper, 1998; Loyce i in., 2008; Anderson, 2010). Czasami podejście statystyczne do analizy danych o postaci $G \times M \times L$ ogranicza się jedynie do użycia ANOVA (Souza i in., 2004; Derejko i in., 2011). Jednakże, kompleksowa metodyka analityczna dla danych kompletnych z wielokrotnych serii jednorocznych doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych, powinna składać się z łącznej trójkierunkowej analizy wariancji i metod opartych na modelach multiplikatywnych, a także analizy skupień (Thangavel i in., 2011; Mądry i in., 2012). Różnorodność modeli ANOVA związana jest z charakterem statystycznym poszczególnych czynników, czyli traktowaniem ich jako czynnik stały lub losowy. W pracach naukowych z wykorzystaniem danych z wielokrotnych serii jednorocznych doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych, przyjmuje się różne rodzaje założeń w modelach ANOVA, dotyczących odmian, agrotechniki i miejscowości. Częstym podejściem metodycznym jest przyjęcie mieszanego modelu ANOVA, w którym odmiany i agrotechnika określone są jako czynniki stałe, miejscowości zaś jako czynnik losowy (Oscarsson i in., 1998; Schmidt i in., 2001; Souza i in., 2004; Gan i in., 2007). Wspomniane podejście metodyczne do wnioskowania na podstawie danych, pochodzących z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń PDOiR, zostało zaprezentowane i zilustrowane w pracach Derejko i in. (2011) oraz Mądrego i in. (2012) dla pszenicy ozimej. Kompletność danych uzyskano przez ograniczenie się do zestawu odmian badanych w każdej miejscowości, wybranych z całej serii doświadczeń PDOiR. Metodyka statystyczna stosowana w cytowanej pracy, składa się z trójkierunkowej analizy wariancji opartej na stałym modelu liniowym oraz wielokrotnego testowania średnich obiektowych za pomocą procedury Tukeya. Autorzy, za punkt wyjścia wzięli algorytm McIntosh (1983) dla łącznej analizy wariancji danych z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń dwuczynnikowych, planowanych w układzie losowanych bloków i split-plot, z odmianami, rodzajami agrotechniki i miejscowościami, traktowanymi jako czynniki stałe. Niektóre inne rodzaje algorytmów analizy wariancji podane w pracy McIntosh (1983) zostały także wykorzystane do wnioskowania w wielokrotnych seriach doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych (Schmidt i in., 2001; Geleta i in., 2002; Carr i in., 2003).

Metodyka proponowana dotychczas może być stosowana do klasycznego wnioskowania o efektach głównych odmian, agrotechniki i miejscowości, a także o efektach interakcji tych czynników (Derejko i in., 2011). Jednakże, w celu zwiększenia możliwości wnioskowania o reakcji odmian na środowisko i intensywność agrotechniki używa się metod specjalistycznych, opartych na modelach multiplikatywnych (Ma i in., 2004; Annicchiarico i in., 2011 a; Thangavel i in., 2011; Mądry i in., 2012). W pracy Mądrego i in. (2012) efekty interakcji Odmiana \times Miejscowość analizowano za pomocą metody AMMI. Na wartościach średnich, poprawionych za pomocą analizy AMMI, dla plonu odmian w środowiskach, przeprowadzono analizę skupień metodą Warda, grupującą badane odmiany. W ten sposób uzyskano grupowe reakcje badanych odmian na środowiska, co pozwoliło na sprawne wnioskowanie o adaptacji grup odmian, zamiast opisu reakcji każdej odmiany z osobna.

Zastosowanie wymienionej metodyki statystycznej dla danych kompletnych z wielokrotnej serii jednorocznych doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych, może być efektywnym narzędziem do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji odmian na warunki środowiskowe i agrotechnikę tylko w jednym sezonie wegetacji. Natomiast, bardziej wiarygodne badania nad reakcją odmian na środowisko i agrotechnikę wymagają powtórzenia serii tych doświadczeń w kilku sezonach wegetacji (Ma i in., 2004; Loyce i in., 2008, 2011; Anderson, 2010). Badania te pozwalają na bardziej trafny dobór odmian zarówno do agrotechniki, jak i do miejscowości, w których osiągają one relatywnie wysoki plon (Brancourt-Hulmel i in., 2003; Ma i in., 2004; Annicchiarico i in., 2010 a).

WIELOKROTNE SERIE WIELOLETNICH DOŚWIADCZEŃ ODMIANOWO-AGROTECHNICZNYCH

W Polsce wielokrotne serie wieloletnich doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych są wykonywane w systemie PDOiR (www.coboru.pl). Zarówno w miejscowościach, jak i latach badań liczba i zestaw rozpatrywanych odmian są zróżnicowane. Zatem, wspomniane serie doświadczeń dostarczają danych w niekompletnej klasyfikacji o postaci Odmiana \times Agrotechnika \times Miejscowość \times Rok ($G \times M \times L \times Y$). Autorce niniejszej pracy nie są znane publikacje metodyczno-statystyczne dotyczące analizy niekompletnych danych w klasyfikacji $G \times M \times L \times Y$. Natomiast, dorobek naukowy dotyczący analizy danych kompletnych w tej klasyfikacji jest dość znaczący, zarówno na świecie, jak i w Polsce (Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010 a; Mohammadi i in., 2011; Mądry i in., 2012). Metodyka statystyczna stosowana w tego typu badaniach, podobnie jak we wcześniej omawianych doświadczeniach, opiera się głównie na łącznej, czteroczynnikowej analizie wariancji. Metoda ta umożliwia oszacowanie i badanie istotności efektów głównych rozpatrywanych czynników, czyli odmian, agrotechniki, miejscowości i lat, a także ich efektów interakcji na rozpatrywane cechy roślin (Loyce i in., 2011; Gan i in., 2010). Sama łączna analiza wariancji, choć stosowana w takich badaniach, nie jest narzędziem wystarczająco efektywnym do szczegółowej oceny reakcji odmian na środowisko i agrotechnikę (Cooper i in., 2001; Brancourt-Hulmel i in., 2003; Derejko i in., 2011).

Określenie statystycznego charakteru czynników, a tym samym rodzaju modeli łącznej analizy wariancji w tych badaniach, jest zróżnicowane. Najczęściej rok uznaje się jako czynnik losowy, natomiast odmianę, agrotechnikę oraz miejscowość jako czynniki stałe (McIntosh, 1983; Anderson, 2010; Anicchiarico i in., 2010 a). Stiller i in. (2004) traktowali odmianę i agrotechnikę (nawodnienie) jako czynniki stałe, zaś miejscowość i rok, jako czynniki losowe. Jednakże, w badaniach zaprezentowanych przez Surprenant i in. (1993) jako czynnik stały określono agrotechnikę oraz rok, pozostałe dwa czynniki jako losowe. Natomiast, w pracy Coopera i in. (2001) miejscowość i rok uznano za czynniki stałe, zaś odmianę i agrotechnikę, za czynniki losowe. Uzasadnieniem takiego podejścia wymienionych badaczy była mała liczba poziomów czynników stałych (3 miejscowości i 2 lata) oraz dążenie do zastosowania estymatora BLUP dla średnich dotyczących kombinacji $G \times M$. Estymator BLUP szacuje dokładniej niż estymator BLUE, stosowany do oceny wymienionych średnich, przy założeniu, że odmiana i agrotechnika są czynnikami stałymi.

Przy analizie danych kompletnych o postaci $G \times M \times L \times Y$, czasami środowisko, nazywane też siedliskiem (ang. site) określane jest jako kombinacja $L \times Y$ (Ma i in., 2004; Gan i in., 2007, 2010; Loyce i in., 2008, 2011) lub jako kombinacja $L \times M$ (Suprenant i in. 1993, Raman i in. 2011). W obu rodzajach podejść do środowisk, są one traktowane jako czynnik losowy. Zatem, w cytowanych pracach łączna analiza wariancji danych o postaci $G \times M \times L \times Y$ była oparta na odpowiednim mieszanym modelu liniowym. Uzupełnieniem łącznej 4-czynnikowej analizy wariancji w rozpatrywanych rodzajach badań jest metoda AMMI lub analiza regresji łącznej dla efektów interakcji $G \times L$ (Ma i in., 2004; Anicchiarico i in., 2010 a; Mohammadi i in., 2011). Te metody pozwalają na skuteczne badanie reakcji odmian na warunki środowiskowe, przeciętnie poprzez rodzaje agrotechniki i lata badań, czyli na podstawie średnich w klasyfikacji $G \times L$ (Ma i in., 2004; Loyce i in., 2008, 2011). Ma i in. (2004) zastosowali metodę AMMI do badania wpływu nawożenia azotem na plon ziarna pszenicy jarej przeciętnie poprzez badane odmiany, oddzielnie w każdym rozpatrywanym środowisku.

Ważnymi publikacjami dla metodyki proponowanej w tej rozprawie są prace Ma i in. (2004) oraz Andersona i in. (2011). W pierwszej pracy wykonano analizę statystyczną danych pochodzących z serii doświadczeń dla 10 odmian pszenicy jarej, 4 dawek nawożenia mineralnego, 11 środowisk (środowisko było rozumiane jako kombinacja $L \times Y$) i 3 lat badań. W pierwszym kroku została wykonana 4-czynnikowa łączna analiza wariancji według modelu mieszanego, a następnie wykorzystano analizę AMMI oraz GGE w celu interpretacji interakcji Nawożenie \times Środowisko oraz Odmiana \times Środowisko. Podwójny wykres AMMI dla średnich dotyczących poziomów obu czynników oraz efektów interakcji Nawożenie \times Środowisko opierał się na pierwszej interakcyjnej składowej głównej, zaś GGE na dwóch interakcyjnych składowych głównych. Dokonano podziału środowisk oraz odmian na grupy jednorodne z wykorzystaniem analizy skupień metodą Warda z odległością euklidesową. Wykorzystane metody były efektywne w graficznym przedstawieniu badanych efektów interakcji. W badaniach Andersona i in. (2011) na podstawie danych z serii doświadczeń, planowanych w układzie split-plot, dla 22 odmian pszenicy, 3 sposobów agrotechniki, 22 miejscowości oraz 3 lat została wykonana łączna

analiza wariancji według modelu mieszanego. Stwierdzono istotną interakcję Agrotechnika \times Środowisko, która wskazuje na odmienną przeciętną reakcję badanych odmian (przeciętną reakcję poprzez odmiany i lata) na agrotechnikę w różnych środowiskach rolniczych. Podobne wnioski sformułowano na podstawie badań Murphy'ego i in. (2007) nad reakcją plonu ziarna 35 linii hodowlanych pszenicy ozimej na technologię uprawy i środowisko, stanowiące kombinację miejscowości z rokiem. Wymienieni badacze oceniali także wpływ rodzaju technologii uprawy (konwencjonalnej i organicznej) na plon ziarna linii, oddzielnie w każdym rozpatrywanym środowisku.

LITERATURA

- Anderson W. K. 2010. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Res.* 116: 14 — 22.
- Anderson W. K., Van Burgel A. J., Sharma D. L., Shackley B. J., Zaicou-Kunesch C. M., Miyan M. S., Amjad M. 2011. Assessing specific agronomic responses of wheat cultivars in a winter rainfall environment. *Crop and Pasture Sci.* 62: 115 — 124.
- Annicchiarico P. 2002 a. Defining adaptation strategies and yield stability targets in breeding programmes W: Kang M.S. (Ed.) *Quantitative genetics, genomics and plant breeding*. CAB, 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. 2009. Coping with and exploiting genotype \times environment interactions. In: Ceccarelli S., Guimarães E. P., Weltzien E. (eds), *Plant Breeding and Farmer Participation*. Food and Agricultural Organization, Rome: 519 — 564.
- Annicchiarico P., Chiapparino E., Perenzin M. 2010 a. 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., Scotti C., Carelli M., Pecetti L. 2010 b. Questions and avenues for lucerne improvement. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 46:1 — 13.
- 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., Pecetti L., Abdelguerfi A., Bouizgaren A., Carroni A. M., Hayek T., M'Hammadi Bouzina M., Mezni M. 2011. Adaptation of landrace and variety germplasm and selection strategies for lucerne in the Mediterranean basin. *Field Crops Res.* 120: 283 — 291.
- Basford K. E., Cooper M. 1998. Genotype \times environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 49: 153 — 174.
- Becker H. C., Leon J. 1988. Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding* 101, 1: 1 — 23.
- Brancourt-Hulmel M., Doussinault G., Lecomte C., Berard P., Le Buaec B., Trottet M. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Sci.* 43: 37 — 45.
- Bujak H., Tratwa G. 2011. Ocena stabilności plonowania odmian pszenicy ozimej na podstawie doświadczeń porejestrowych w Polsce. *Biul. IHAR* 260/261: 69 — 79.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z., Krajewski P. 1998. SERGEN 4 — Analysis of series of variety trials and plant genetic or breeding experiments. Institute of Plant Genetics, Polish Academy of Sciences, and Department of Mathematical and Statistical Methods, Agricultural University, Poznań, Poland.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z. 1983. Analiza jednorocznej serii ortogonalnej doświadczeń odmianowych ze szczególnym uwzględnieniem interakcji odmianowo-środowiskowej. 1. Analiza szczegółowa. *Biul. Oceny Odmian* 15: 39 — 60.

- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z. 1987. A model for the analysis of a series of experiments repeated at several places over a period of years. I. Theory. *Biul. Oceny Odmian* 17/18: 7 — 33.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z., Krajewski P., Pilarczyk W. 2005. Analyzing Multi-environment Variety Trials Using Randomization-Derived Mixed Models. *Biometrics* 61 (2): 448 — 55.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z., Krajewski P., Pilarczyk W. 2009. Analyzing the genotype-by-environment interactions under a randomization-derived mixed model. *JABES* 14 (2).
- 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.
- Chapman S.C., Crossa J., Edmeades G. O. 1997. Genotype by environment effects and selection for drought tolerance in tropical maize. I. Two mode pattern analysis of yield. *Euphytica* 95: 1 — 9.
- Cooper M., Woodruff D. R., Phillips I. G., Basford K.E., Gilmour A. R. 2001. Genotype-by-management interactions for grain yield and grain protein concentration of wheat. *Field Crops Res.* 69: 47 — 67.
- Crossa J., Cornelius P. L., Yan W. 2002. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype \times environment interaction *Crop Sci.* 42: 619 — 633.
- Crossa J., Franco J. 2004. Statistical methods for classifying genotypes. *Euphytica* 137: 19 — 37.
- Crossa J., Vargas M., Joshi A. K. 2010. Linear, bilinear, and linear-bilinear fixed and mixed models for analyzing genotype \times environment interaction in plant breeding and agronomy. *Can. J. Plant Sci.* 90: 561 — 574.
- 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.
- de la Vega A. J., Chapman S. 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., DeLacy I. H., Chapman S.C. 2007. Changes in agronomic traits of sunflower hybrids over 20 years of breeding in central Argentina. *Field Crops Res.* 100: 73 — 81.
- DeLacy I. H., Kaul S., Rana B. S., Cooper M. 2010 a. Genotypic variation for grain and stover yield of dry land (rabi) sorghum in India, 1. Magnitude of genotype \times environment interactions. *Field Crops Res.* 118: 228 — 235.
- DeLacy I. H., Kaul S., Rana R. A., Cooper M. 2010 b. Genotypic variation for grain and stover yield of dryland (rabi) sorghum in India, 2. A characterization of genotype \times environment interactions. *Field Crops Res.* 118: 236 — 242.
- De Vita P., Mastrangelo A. M., Matteu L., Mazzucotelli E., Virzi N., Palumbo M., Lo Storto M., Rizza F., Cattivelli L. 2010. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crops Res.* 119: 68 — 77.
- Derejko A., Mądry W., Gozdowski D., Rozbicki J., Golba J., Piechociński M., Studnicki M. 2011. Wpływ odmian, miejscowości i intensywności uprawy oraz ich interakcji na plon pszenicy ozimej w doświadczeniach PDO. *Biul. IHAR* 259: 131 — 146.
- Ebdon J. S., Gauch H. G. 2002. Additive main effect and multiplicative interactions analysis of national turfgrass performance trials. Interpretation of genotype \times environment interactions. *Crop Sci.* 42: 489 — 496.
- Finlay K. W., Wilkison G. N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agric. Sci.* 14.
- Gan Y., Johnston A., Knight D., McDonald C., Stevenson C. 2010. Nitrogen dynamics of chickpea: Effects of cultivar choice, N fertilization, *Rhizobium* inoculation, and cropping systems. *Can. J. Plant Sci.* 90: 655 — 666.
- 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. 1996. AMMI analysis of yield trials. In: M. S. Kang, H. G. Gauch (Ed.) *Genotype by environment interaction*. CRC Press, Boca Raton: 85 — 122.
- Gauch H. G., Zobel R. W. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Sci.* 37: 311 — 326.
- GenStat 2002. *The guide to Genstat. Release 6.1*. VSN International. Oxford, UK.
- Gilmour A., Cullis B., Welham S., Gogel B., Thompson R. 2004. An efficient computing strategy for prediction in mixed linear models. *Comput. Stat. Data An.* 44: 571 — 586.
- Gilmour A., Thompson R., Cullis B. R. 1995. Average information REML: An efficient algorithm for variance parameter estimation in linear mixed models. *Biometrics* 51: 1440 — 1450.
- Gogel B. J., Cullis, B. R., Thompson R. 2009. *ASReml UserGuide Release 3.0* VSN International Ltd, Hemel Hempstead, HP1 1ES, UK.
- Gollob H. 1968. A statistical model which combines features of factor analytic and analysis of variance techniques. *Psychometrika* 33: 73 — 115.
- 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.
- 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. 2002. Genotype-environment interaction: Progress and prospects. In: Kang M.S. (Ed.), *Quantitative genetics, genomics and plant breeding*, CAB International Wallingford, UK: 221 — 243.
- Loyce C., Meynard J. M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M. H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Felix I., Hedddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Meausoone M., Doussinault G. 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protect.* 27: 1131 — 1142.
- Loyce C., Meynard J. M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M. H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Felix I., Hedddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Meausoone M., Doussinault G. 2011. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Res.* 125: 167 — 178.
- Ma B. L., Yan W., Dwyer L. M., Fregeau-Reid J., Voldeng H. D., Dion Y., Nass H. 2004. Graphic analysis of genotype, environment, nitrogen fertilizer, and their interactions on spring wheat yield. *Agron. J.* 96: 169 — 180.
- 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., Kang M. S. 2005. Scheffé-Caliński and Shukla models: their interpretation and usefulness in stability and adaptation analyses. *J. Crop Improv.* 14: 325 — 369.
- Mądry W., Paderewski J., Drzazga T. 2006. Ocena reakcji plonu ziarna rodów hodowlanych pszenicy ozimej na zmienne warunki środowiskowe za pomocą analizy AMMI. *Fragm. Agron.* 92: 130 — 143.
- Mądry W., Paderewski J., Gazdowski D., Drzazga T. 2011. Adaptive yield response of winter wheat cultivars across environments in Poland using joint AMMI and cluster analyses. *Intern. J. Plant Prod.* 5: 299 — 310.
- Mądry W., Paderewski J., Rozbicki J., Gozdowski D., Golba J., Piechociński M., Studnicki M., Derejko A. 2012. Plonowanie odmian pszenicy ozimej w różnych środowiskach — jednoroczna seria PDOiR. *Biul. IHAR* 263: 189 — 204.

- McIntosh M. S. 1983. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75: 153 — 155.
- Mohammadi R., Amri A. 2009. Analysis of genotype \times environment interactions for grain yield in durum wheat. *Crop Sci.* 49: 1177 — 1186.
- Mohammadi R., Sadeghzadeh D., Armion M., Amri A. 2011. Evaluation of durum wheat experimental lines under different climate and water regime conditions of Iran. *Crop Pasture Sci.* 62: 137 — 151.
- 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.
- Paderewski J. 2008. Przydatność modelu AMMI do badania reakcji roślin rolniczych na warunki środowiskowe. Praca doktorska, Wydział Rolnictwa i Biologii, SGGW.
- 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.
- Paderewski J., Mądry W. 2012. Zastosowania modelu AMMI do analizy reakcji odmian na warunki środowisk rolniczych. *Biul. IHAR* 263: 161 — 188.
- Pecetti L., Annicchiarico P., Abdelguerfi A., Kallida R., Mefti M., Porqueddu C., Simoes N., Volaire F., Lelievre F. 2011. Response of mediterranean tall fescue cultivars to contrasting agricultural environments and implications for selection. *J. Agron. Crop Sci.* 197: 12 — 20.
- Peltonen-Sainio P., Jauhiainen L., Laurila I. P. 2009. Cereal yield in northern European conditions. Changes in yield potential and its realisation. *Field Crops Res.* 110:85 — 90.
- Piepho H. P., Möhring J., Melchinger A. E., Büchse A. 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica* 161: 209 — 228.
- Piepho, H. P., van Eeuwijk F.A. 2002. Stability analyses in crop performance evaluation. In: Kang M.S. [ed.]: *Crop improvement: Challenges in the twenty-first century*. Food Products Press, Binghamton. New York: 307 — 342.
- Pilarczyk W. 1983. Wykorzystanie analizy skupień do podziału stacji doświadczalnych na grupy o małej interakcji odmianowo-środowiskowej. *Colloquium Biometryczne* 13: 133 — 147.
- Pilarczyk W., Kamiński J. 1995. Application of some traditional models and AMMI model for analysis of a series of cereal trials. *Biuletyn Oceny Odmian.* 26–27: 179 — 188.
- Pinnshmidt H. O., Hovmøller M. S. 2002. Genotype \times environment interactions in the expression of net blotch resistance in spring and winter barley varieties. *Euphytica* 125: 227 — 243.
- Raman A., Ladha J. K., Kumar V., Sharma S., Piepho H. P. 2011. Stability analysis of farmer participatory trials for conservation agriculture using mixed models. *Field Crops Res.* 121: 450 — 459.
- SAS Institute Inc. 2004 SAS OnlineDoc® 9.1.3, Cary, NC.
- 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. Agric. Sci.* 143:449 — 462.
- So Y.S., Edwards J. 2009. A Comparison of mixed-model analyses of the Iowa Crop Performance Test for corn. *Crop Sci.* 49: 1593 — 1601.
- Stiller W. N., Reid P. E., Constable G. A. 2004. Maturity and leaf shape as traits influencing cotton cultivar adaptation to dryland conditions. *Agron. J.* 96: 656 — 664.
- Surprenant J., Drapeau R., Fernet C. 1993. Cultivar by management interactions effects on timothy yield and quality evaluation. *Can. J. Plant Sci.* 73: 445 — 460.
- Thangavel P., Anandan A., Eswaran R. 2011. AMMI analysis to comprehend genotype by environment (G \times E) interactions in rainfed grown mungbean (*Vigna radiata* L.). *Aust. J. Crop Sci.* 5: 1767 — 1775.
- van Eeuwijk F. A., Keizer L. C. E., Bakker J. J. 1995. Linear and bilinear models for the analysis of multi-environment trials: II. An application to data from the Dutch Maize Variety Trials. *Euphytica* 84: 9 — 22.
- Viele K., Srinivasan C. 2000. Parsimonious estimation of multiplicative interaction in analysis of variance using Kullback-Leibler Information. *J. Stat. Plan. Inf.* 84: 201 — 219.

- Ward J. H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58: 236 — 244.
- Welham S. J., Gogel B. J., Smith A. B., Thompson R., Cullis B. R. 2010. A comparison of analysis methods for late stage variety evaluation trials. *Aust. N. Z. J. Stat.* 52: 125 — 149.
- Yan W., Kang M. S. 2003. *GGE biplot analysis: A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- 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 — 653.
- Zhang Y., He Z., Zhang A., van Ginkel M., Pena R.J., Ye G. 2006. Pattern analysis on protein properties of Chinese and CIMMYT spring wheat cultivars sown in China and CIMMYT. *Austr. J. Agric. Res.* 57: 811 — 822.
- Strongy internetowe:
www.coboru.pl.
www.vsni.co.uk.