

WIESŁAW MĄDRY <sup>1</sup>  
JAKUB PADEREWSKI <sup>1</sup>  
JAN ROZBICKI <sup>2</sup>  
DARIUSZ GOZDOWSKI <sup>1</sup>  
JAN GOLBA <sup>2</sup>  
MARIUSZ PIECHOCIŃSKI <sup>2</sup>  
MARCIN STUDNICKI  
ADRIANA DEREJKO <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki, SGGW, Warszawa

<sup>2</sup> Katedra Agronomii, SGGW, Warszawa

## Plonowanie odmian pszenicy ozimej w różnych środowiskach — jednoroczna seria PDOiR\*

### Yielding of winter wheat cultivars across environments — one-year multi-environment post-registration trial

Celem pracy jest odpowiednie przygotowanie i przedstawienie statystycznej metodyki wniosowania o adaptacyjnej reakcji odmian na zróżnicowane warunki środowiskowe w miejscowościach, na podstawie danych kompletnych z jednorocznej, wielokrotnej serii dwuczynnikowych doświadczeń PDOiR oraz empiryczna ilustracja zastosowania i ocena przydatności tej metodyki dla plonu ziarna pszenicy ozimej. Rozpatrywane dane doświadczalne stanowią trójkierunkową kompletną klasyfikację o postaci Odmiana × Agrotechnika × Miejscowość. Stosowana metodyka statystyczna obejmuje łączną trójkierunkową analizę wariancji opartą na modelu stałym dla danych z wymienionej serii doświadczeń, analizę AMMI dla interakcji odmiany x miejscowości (interakcji GL) oraz analizę skupień dla odmian, w której zmiennymi opisującymi odmiany były średnie poprawione przez model AMMI dla plonu w badanych miejscowościach. Te średnie poprawione były obliczane poprzez dwie badane intensywności agrotechniki, A1 i A2, z wykorzystaniem istotnych multiplikatywnych składników efektów interakcyjnych GL otrzymanych w analizie AMMI. Proponowana metodyka okazała się skutecznym narzędziem do rozróżniania rodzajów adaptacyjnej reakcji 28 odmian pszenicy ozimej na warunki środowiskowe, czyli agroekosystemy. Umożliwia ona efektywne poszukiwanie odmian o szerokiej i wąskiej adaptacji. Stwierdzono, że w sezonie wegetacyjnym 2008/2009 szeroką adaptację wykazały dwie odmiany, tj. polska odmiana Bogatka (wyhodowana przez DANKO Hodowla Roślin sp. z o.o.) oraz niemiecka odmiana Jenga (wyhodowana przez Nordsaat Saatuchtgesellschaft mbH). Pozostałe odmiany były wąsko zaadaptowane do niektórych badanych środowisk lub były relatywnie nie zaadaptowane do żadnych spośród testowanych środowisk, ponieważ plonowały zawsze znacząco poniżej średnich środowiskowych.

\* PDOiR = Porejstrowe Doświadczalnictwo Odmianowe i Rolnicze. Praca zawiera wyniki badań w projekcie własnym Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N310 091136 pt. „Badanie uwarunkowania plonu ziarna odmian pszenicy ozimej przez cechy plonotwórcze roślin”.

**Słowa kluczowe:** adaptacja odmian, analiza AMMI, analiza skupień, PDOiR, plon ziarna, pszenica ozima

The aim of the paper is adequate modification and presenting a statistical methodology to assess patterns of cultivar adaptive response to agricultural environments (agro-ecosystems) on the basis of complete Genotype  $\times$  Crop Management  $\times$  Location (G $\times$ M $\times$ L) data obtained from yearly multi-location two-factor trials conducted in a net of post-registration trials (PDOiR), empirical illustration of using and usefulness of this methodology applied to winter wheat grain yield. This statistical technique consists of three procedures, i.e. three-way ANOVA based on a fixed model, AMMI procedure for genotype  $\times$  location interaction modeling and cluster analysis for classification of cultivar adaptive response described by AMMI-modeled (adjusted) genotype  $\times$  location means calculated across two crop management intensities (A1 and A2). The considered methodology was an efficient tool to reliable classification of 28 winter wheat cultivars into cultivar groups that exhibited homogenous adaptive response to the environments. Then, it permits to identify cultivars showing wide or specific adaptation. It was revealed that in the season 2008/2009 Polish cultivar Bogatka (bred by DANKO Hodowla Roślin sp. z o.o.) and German cultivar Jenga (bred by Nordsaat Saatzeitgesellschaft mbH) showed wide adaptation to the testing environments. The remaining cultivars were locally adapted to some testing environments or some of them were not relatively adapted to the environments because they always yielded substantially below environmental means.

**Key words:** AMMI analysis, cluster analysis, cultivar adaptation, grain yield, post-registration trials, winter wheat

## WSTĘP

Pszenica jest głównym gatunkiem roślin uprawnych na świecie, pokrywającą 53% potrzeb żywieniowych ludności w krajach rozwiniętych i 85% w krajach rozwijających się (Pena, 2007; Denčić i in., 2011). Jest ona także najważniejszą rośliną uprawną w Polsce. Ilościowe cechy rolnicze, takie, jak plon ziarna, atrybuty jakości plonu oraz porażenie chorobami i szkodnikami pszenicy, a także innych gatunków roślin uprawnych, są uwarunkowane przez genotyp odmiany, środowisko rolnicze (warunki biotyczne i abiotyczne agroekosystemu w rolniczej przestrzeni produkcyjnej), warunki pogodowe w latach oraz agrotechnikę, a także interakcję tych czynników (Basford i Cooper, 1998; Oscarsson i in., 1998; Ma i in., 2004; Souza i in., 2004; Trethowan i Crossa, 2007; Annicchiarico i in., 2010; Anderson, 2010). Ze względu na znaczące efekty interakcyjne pomiędzy wymienionymi czynnikami na plon i inne cechy rolnicze roślin uprawnych, ocena działania tych czynników, a zwłaszcza ocena wartości gospodarczej odmian, oparta na ich efektach głównych nie jest wystarczająco wiarygodna (Basford i Cooper, 1998; Annicchiarico, 2002; Anderson, 2010). Wobec tego, w metodologii badań agronomicznych główna uwaga jest skupiona na adekwatnym modelowaniu statystycznym, wykrywaniu oraz interpretowaniu różnorodnych reakcji badanych odmian pod względem cech rolniczych (zwłaszcza plonu) na warunki środowiskowe oraz agrotechnikę (Cooper i in., 2001; Schmidt i in., 2001; Annicchiarico, 2002; Ma i in., 2004). Wymienione reakcje odmian są nazywane ich reakcjami adaptacyjnymi (ang. cultivar adaptive response lub adaptation pattern) — (Annicchiarico, 2002; Annicchiarico i Iannucci, 2008; Gauch i in., 2008; Annicchiarico i in., 2010, 2011; Anderson i in., 2011). Są one określone przez średnie doświadczalne badanej cechy rolniczej danej odmiany w rozpatrywanych środowiskach lub rodzajach agrotechniki. Zależnie od reakcji adaptacyjnej odmian, scharakteryzowanej

w postaci relatywnej zdolności adaptacyjnej w różnych warunkach środowiskowych lub agrotechnicznych, wyróżnia się dwa główne typy albo rodzaje adaptacji odmian, tj. adaptację wąską, zwaną też swoistą lub lokalną (ang. local lub specific adaptation) oraz adaptację szeroką (ang. wide adaptation) — (Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico 2002; Gauch i in., 2008; Annicchiarico i in., 2010; Anderson i in., 2011; Miyan i in., 2011). W polskiej literaturze, podstawy teoretyczne i metodologiczne, dotyczące wymienionych rodzajów adaptacji odmian można znaleźć m.in. w przeglądowych pracach Mądrego i Iwańskiej (2011) oraz Paderewskiego i Mądrego (2012).

W badaniach hodowlanych i agronomicznych, do oceny adaptacyjnej reakcji odmian ważnych gatunków roślin uprawnych, włączając także pszenicę, wykonywane są serie odmianowych lub odmianowo-agrotechnicznych doświadczeń polowych (ang. multi-environment trials, METs). Najczęściej wykonuje się serie doświadczeń odmianowych w celu oceny adaptacyjnej reakcji odmian pod względem plonu i innych cech rolniczych na zmienne warunki środowiskowe (Basford i Cooper, 1998; Sivapalan i in., 2000; Annicchiarico, 2002; Fan i in., 2007; Annicchiarico i Iannucci, 2008; Sharma i in., 2009; Annicchiarico i in., 2011 a; Paderewski i in., 2011). Natomiast, rzadziej wykonywane są serie doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych, które dostarczają danych do badania rodzajów adaptacji odmian zarówno na środowiska, jak i agrotechnikę (Cooper i in., 2001; Schmidt i in., 2001; Carr i in., 2003; Ma i in., 2004; Souza i in., 2004; Anderson 2010 (oraz prace tam cytowane), Annicchiarico i in., 2010; Anderson i in., 2011). W Polsce serie doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych dla ważnych gospodarczo gatunków roślin uprawnych są realizowane w Porejestrowym Doświadczalnictwie Odmianowym i Rolniczym (PDOiR), do 2010 roku określanym, jako Porejestrowe Doświadczalnictwo Odmianowe (PDO). PDOiR jest systemem stałych lub okresowych badań wartości gospodarczej odmian roślin rolniczych, wpisanych do Krajowego Rejestru Odmian oraz znajdujących się we Wspólnotowym Katalogu Odmian Roślin Rolniczych (CCA). Badania w ramach PDOiR są prowadzone z zachowaniem doboru odmian i reprezentatywności środowisk rolniczych (podmiotów oceniających odmiany) zarówno dla rolniczej przestrzeni produkcyjnej całego kraju (seria L), jak i województw (seria K).

W ramach PDOiR dla pszenicy ozimej wykonuje się corocznie wielokrotne serie dwuczynnikowych doświadczeń odmianowo-agrotechnicznych, to znaczy doświadczenia powtórzone w wielu, odpowiednio wybranych środowiskach rolniczych, czyli miejscowościach (w Stacjach lub Zakładach Doświadczalnych Oceny Odmian dla serii L oraz w wymienionych i innych podmiotach oceniających odmiany w serii K) — (COBORU, 2002, <http://www.coboru.pl>). W tych doświadczeniach jednym czynnikiem są odmiany, drugim zaś, poziomy intensywności agrotechniki (A1 — o niższych nakładach, A2 — o wyższych nakładach). W serii dwuczynnikowych doświadczeń PDOiR, w każdej miejscowości jest stosowany układ pasów prostopadłych, nazywany też układem split-block (Elandt, 1964; Mejza, 1999; Mintenko i in., 2002). Zatem, serie dwuczynnikowych doświadczeń w PDOiR dla pszenicy ozimej są źródłem danych, przydatnych do badania adaptacyjnej reakcji odmian na zmienne warunki środowiskowe w rolniczej przestrzeni produkcyjnej całego kraju lub w obrębie województw, przy jednej z dwóch badanych intensywności agrotechniki, a także reakcji na intensywność agrotechniki w każdym

badanych warunkach środowiskowych (Ma i in., 2004; Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010). Jednakże, efektywne badanie adaptacyjnej reakcji odmian pszenicy ozimej na środowiska i intensywność agrotechniki na podstawie danych dla plonu (lub innych cech plonotwórczych roślin) z serii doświadczeń PDOiR w każdym roku oddzielnie lub też danych zebranych z serii tych doświadczeń, przeprowadzonych w kilku latach, jest trudnym zadaniem metodycznym. Najważniejszym powodem tej trudności jest niekompletność danych, tworzących klasyfikację trójkierunkową o postaci Odmiany  $\times$  Agrotechnika  $\times$  Miejscowości, w skrócie klasyfikacji  $G \times M \times L$  (pochodzącą z wielokrotnej serii tych doświadczeń w jednym roku) lub klasyfikację czterokierunkową o postaci Odmiany  $\times$  Agrotechnika  $\times$  Miejscowości  $\times$  Lata, w skrócie klasyfikacji  $G \times M \times L \times Y$  (stanowiącą dane zebrane z wielokrotnej serii tych doświadczeń, przeprowadzonych w kilku latach) — (Casanoves i in., 2005; Virk i Witcombe, 2008; Crossa i in., 2010). Niekompletność danych w wymienionych klasyfikacjach jest wynikiem zróżnicowanych zestawów odmian w wybranych miejscowościach oraz latach. Wobec tego, wyczerpujące i zaawansowane badania nad oceną wartości gospodarczej odmian pszenicy ozimej i innych ważnych gatunków roślin uprawnych, a zwłaszcza zdolności adaptacyjnej odmian w ramach PDOiR, wymagają opracowania nowych albo uogólnienia, dostosowania lub modyfikacji istniejących, specjalistycznych metod statystycznych, opartych na mieszanych modelach liniowych (Cooper i in., 2001; Mintenko i in., 2002; Virk i Witcombe, 2008; Crossa i in., 2010) oraz multiplikatywnych (Ma i in., 2004; Annicchiarico i in., 2010; Crossa i in., 2010).

Jest warte podkreślenia, że do badania adaptacji odmian na podstawie danych w kompletnej klasyfikacji trójkierunkowej  $G \times M \times L$  lub czterokierunkowej  $G \times M \times L \times Y$ , otrzymanych z serii doświadczeń PDOiR, można dostosować, zmodyfikować lub rozwinąć dostępną i stosowaną aktualnie metodykę analizy danych z kompletnych serii doświadczeń odmianowych lub odmianowo-agrotechnicznych, która jest znacznie prostsza, niż ta, dla danych niekompletnych (McIntosh, 1983, Cooper i in. 2001, Mintenko i in., 2002; Ma i in., 2004; Annicchiarico i in., 2010; Crossa i in., 2010). Pierwsze podejście metodyczne do rozpatrywanego tutaj wnioskowania na podstawie analizy danych w kompletnej klasyfikacji trójkierunkowej  $G \times M \times L$ , pochodzących z jednorocznej serii doświadczeń PDOiR, zostało zaprezentowane i zilustrowane empirycznie w pracy Derejko i in. (2011) dla pszenicy ozimej. Metoda proponowana w cytowanej pracy, obejmująca analizę wariancji oraz wielokrotne testowanie średnich, może być stosowana do klasycznego wnioskowania o efektach głównych odmian, intensywności agrotechniki i miejscowości, a także o efektach interakcyjnych tych czynników. Kompletną klasyfikację  $G \times M \times L$  uzyskano przez ograniczenie się do takiego samego zestawu odmian w każdej miejscowości, wybranych z całej serii doświadczeń. W pracy Derejko i in. (2011) nie przedstawiono specjalistycznych metod, opartych na modelach multiplikatywnych, które stosuje się zwykle do badania adaptacyjnej reakcji odmian na środowiska rolnicze. Cenną propozycją źródłową wymienionej metodyki są prace Ma i in. (2004) oraz Annicchiarico i in. (2010), w których zastosowano model multiplikatywny AMMI dla danych kompletnych w klasyfikacji czterokierunkowej o postaci  $G \times M \times L \times Y$ .

Celem niniejszej pracy jest 1) odpowiednie przygotowanie i przedstawienie komplementarnej metodyki statystycznej do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji badanych odmian na zróżnicowane warunki środowiskowe w miejscowościach, na podstawie danych kompletnych z jednorocznej, wielokrotnej serii dwuczynnikowych doświadczeń PDOiR, 2) empiryczna ilustracja zastosowania i ocena przydatności tej metodyki dla plonu ziarna pszenicy ozimej. Metodyka ta obejmuje łączną trójkierunkową analizę wariancji, opartą na modelu stałym dla danych z wymienionej serii doświadczeń, analizę AMMI dla interakcji odmiany  $\times$  miejscowości (interakcji GL) oraz analizę skupień dla odmian, w której zmiennymi opisującymi odmiany były średnie poprawione przez model AMMI dla plonu w badanych miejscowościach.

## MATERIAŁ I METODY

### Material doświadczalny

W tej pracy rozpatrywano dane dotyczące plonu ziarna, uzyskane dla 28 odmian pszenicy ozimej w serii L doświadczeń w systemie PDOiR, wykonanych w 8 miejscowościach (Stacjach i Zakładach Doświadczalnych Oceny Odmian COBORU) w sezonie wegetacyjnym 2008/2009. Nazwy badanych odmian podano w tabeli 3, a ich pochodzenie (hodowców) można znaleźć m.in. w pracy Derejko i in. (2011).



**Rys. 1. Lokalizacja ośmiu Stacji i Zakładów Doświadczalnych Oceny Odmian, w których przeprowadzono rozpatrywaną serię L doświadczeń z pszenicą ozimą w ramach PDOiR w sezonie wegetacyjnym 2008/2009**

**Fig. 1. Geographic distribution of the trial locations (the COBORU Cultivar Testing Stations) of the PDOiR trials for winter wheat cultivars tested in 2008/2009 season**

Miejscowości badawcze wybrano spośród 20 uczestniczących w tej serii doświadczeń, wszystkich Stacji i Zakładów Doświadczalnych COBORU, rozmieszczonych w całym

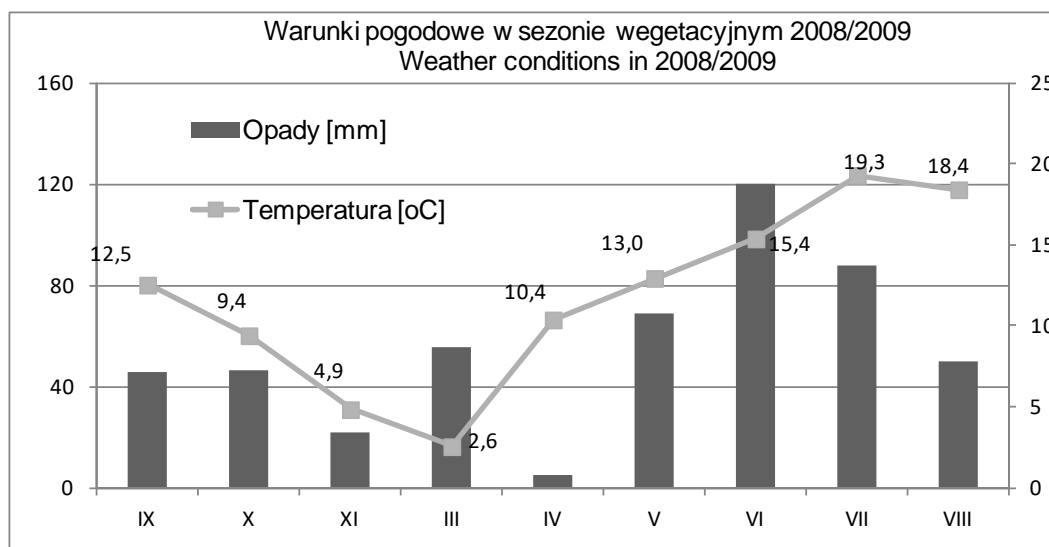
kraju, aby reprezentować zmienność środowiskową w głównych rejonach uprawy pszenicy ozimej. Rozmieszczenie geograficzne rozpatrywanych miejscowości badawczych przedstawiono na rysunku 1, zaś charakterystykę warunków glebowych w tych środowiskach podano w tabeli 1. Rozkład średnich opadów i temperatury w ośmiu stacjach oceniających w badawczym sezonie wegetacyjnym podano na rysunku 2.

Tabela 1  
**Charakterystyka gleb w ośmiu miejscowościach badawczych w serii L doświadczeń PDOiR z pszenicą ozimą w sezonie wegetacyjnym 2008/2009**  
**Description of soils in eight trial locations included in PDOiR trials for winter wheat in season 2008/2009**

Miejscowość Locality	Kompleks przydatności rolniczej Agricultural soil quality	Klasa gleby Soil class	Typ, rodzaj gleby Soil type	pH
Węgrzce	2	II	brunatna właściwa wytw. z lessu - brown soil on loess	6,1
Głębokie	2	IIIa	czarne ziemie właściwe wytw. z glin lekkich pylastych – black earth formed from light silt-loam	6,0
Głubczyce	1	II	gleba brunatna właściwa wytw. z utworów lessowych ilastych - brown soil formed from clayey loess	6,4
Radostowo	1	I	czarne ziemie zdegradowane zalegające na glebach mocnych – degraded black earth on strong soil	6,1
Nowa Wieś Ujska	4	IV a	płowa, piasek gliniasty lekki na glinie lekkiej zalegającej płytko – grey-brown, light loamy sand on light loam	5,4
Marianowo	4	IV a	brunatna właściwa wytw. z pyłów na glinie lekkiej pylastej - brown soil formed from silt on light silty loam	5,9
Seroczyn	5	IV b	gleby bielcowe i pseudobielcowe; piaski słabogliniaste i gliny lekkie – podsolic and pseudopodsolic, slightly loamy sands and light loams	6,4
Kościelna Wieś	2	III a	brunatna wylugowana, pyły zwykłe na glinie średniej – leached brown soil, very fine sands on medium loam	6,4

Badane w publikacji odmiany wybrano spośród wszystkich obiektów testowanych w tej serii doświadczeń PDOiR, w taki sposób, aby były one zróżnicowane pod względem potencjału plonowania oraz cech jakości ziarna oraz były reprezentatywne dla puli nowoczesnych odmian pszenicy ozimej, zarejestrowanych w ostatnich kilku latach w Krajowym oraz Wspólnotowym Rejestrze Odmian tego gatunku. Analizowane dane doświadczalne uzyskano w trakcie badań w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N310 091136 pt. „Badanie uwarunkowania plonu ziarna odmian pszenicy ozimej przez cechy plonotwórcze roślin”.

Rośliny pobierano w fazie dojrzałości pełnej z mikropoletek o powierzchni 1 m<sup>2</sup>, wyciętych z każdego poletka o powierzchni do zbioru 15 m<sup>2</sup> (10 × 1,5 m), w poszczególnych doświadczeniach, we wszystkich miejscowościach. Dla roślin z tych mikropoletek obserwowano plon ziarna (g/m<sup>2</sup>) oraz składowe plonu, tj. liczbę kłosów z 1 m<sup>2</sup>, liczbę ziarniaków w kłosie i masę tysiąca ziarniaków, a także inne zmienne opisujące ontogenetyczny proces tworzenia plonu i gospodarowanie azotem przez rośliny. W tej pracy przeprowadzono analizę statystyczną danych dla plonu ziarna. Dane te stanowiły kompletną, trójkierunkową klasyfikację o postaci G×M×L.



**Rys. 2. Rozkład średnich opadów i temperatury w ośmiu Stacjach i Zakładach Doświadczalnych Oceny Odmian, w których przeprowadzono rozpatrywaną serię L doświadczeń z pszenicą ozimą w ramach PDOiR, w sezonie wegetacyjnym 2008/2009**

**Fig. 2. Distribution of average rainfall and temperature across the eight trial locations (the COBORU Cultivar Testing Stations) of the PDOiR trials network for winter wheat cultivars in 2008/2009 season**

### Analiza statystyczna

Do analizy danych była zastosowana łączna trójkierunkowa analiza wariancji według modelu stałego z trzema błędami doświadczalnymi, odpowiednimi dla układu doświadczalnego split-block, która jest opisana w pracy Derejko i in. (2011). Przyjęto, że miejscowości badawcze (stacje) oraz odmiany i intensywność agrotechniki są czynnikami stałymi. Konsekwencją metodyczno-statystyczną tego założenia jest odnoszenie wniosków o plonowaniu odmian pszenicy ozimej tylko do tych miejscowości, w których wykonano serię doświadczeń PDOiR. W łącznej trójkierunkowej analizie wariancji dla danych w trójkierunkowej klasyfikacji o postaci  $G \times M \times L$ , efekty interakcji Odmiana  $\times$  Miejscowość (GL) analizowano za pomocą procedury (analizy) AMMI dla średnich arytmetycznych plonów, dotyczących kombinacji GL, czyli obliczonych z dwóch poziomów intensywności agrotechniki (Gauch, 1988, 1992; Annicchiarico, 2002, 2009; Annicchiarico i in., 2010). Taka procedura statystyczna jest nazywana także modelowaniem AMMI genotypowo-środowiskowych efektów interakcyjnych (Annicchiarico, 2009; Annicchiarico i in., 2011 a).

W analizie AMMI średnich arytmetycznych plonów, dotyczących kombinacji GL, efekty główne odmian i miejscowości są estymowane za pomocą metody ANOVA (tutaj łącznej trójkierunkowej analizy wariancji), zaś efekty interakcji GL są wyrażone matematycznie za pomocą składników multiplikatywnych, zgodnie z następującym równaniem (Gauch 1988, 1992, Annicchiarico 2002, 2009, Annicchiarico i in. 2010):

$$GL_{ij} = \sum_{t=1}^T \lambda_t u_{it} v_{jt}$$

gdzie:

$GL_{ij}$  jest efektem interakcji Odmiana  $\times$  Miejscowość dla  $i$ -tej odmiany ( $i = 1, \dots, I$ ) oraz  $j$ -tej miejscowości ( $j = 1, \dots, J$ ),  $\lambda_t$  jest wartością osobliwą macierzy ocen efektów interakcyjnych GL dla  $t$ -tej [ $t=1, \dots, T \leq \min\{(I-1), (J-1)\}$ ] składowej głównej ( $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_T$ ),  $u_{it}$  jest parametrem  $t$ -tej interakcyjnej składowej głównej dla  $i$ -tej odmiany,  $v_{jt}$  jest parametrem  $t$ -tej interakcyjnej składowej głównej dla  $j$ -tej miejscowości.

Analiza AMMI w rozpatrywanym przypadku składa się z testowania istotności kolejnych pierwszych interakcyjnych składowych głównych za pomocą testu  $F_R$  (Cornellius i in. 1996, Dias i Krzanowski 2003) oraz obliczenia poprawionych albo odtworzonych średnich plonów odmian w każdej miejscowości (ang. AMMI-adjusted means lub AMMI-modeled means), za pomocą analizy AMMI z wykorzystaniem istotnych interakcyjnych składowych głównych — (Sivapalan i in., 2000; Annicchiarico, 2002; Annicchiarico i in., 2011 b). Tak poprawione średnie plony, modelują efektywnie w sensie statystycznym, adaptacyjne reakcje plonu odmian na warunki środowiskowe (Gauch, 1988, 1992; Annicchiarico, 2002; Gauch i in., 2008). Reakcje te, oznaczone symbolem  $R_{ij}$ , opisuje następujące równanie (Annicchiarico, 2002, 2009; Annicchiarico i in., 2011 b):

$$R_{ij} = \hat{m}_i + \hat{L}_j + \sum_{t=1}^S \hat{\lambda}_t \hat{u}_{it} \hat{v}_{jt}$$

gdzie:

$\hat{m}_i$  jest oszacowaną (metodą najmniejszych kwadratów) średnią brzegową dla  $i$ -tej odmiany,  $\hat{L}_j$  jest oszacowanym (metodą najmniejszych kwadratów) efektem głównym dla  $j$ -tej miejscowości,  $\hat{\lambda}_t$ ,  $\hat{u}_{it}$ ,  $\hat{v}_{jt}$  są oszacowanymi parametrami multiplikatywnymi modelu AMMI metodą rozkładu macierzy ocen efektów interakcyjnych GL według wartości osobliwych (metodą składowych głównych),  $S$  jest liczbą istotnych interakcyjnych składowych głównych.

Na wartościach średnich poprawionych plonu dla odmian w środowiskach,  $R_{ij}$ , przeprowadzono analizę skupień metodą Warda dla badanych odmian z kwadratem odległości Euklidesa jako miarą niepodobieństwa odmian pod względem zmiennych opisujących odmiany (Sivapalan i in., 2000; Crossa i in., 1991; Mądry i in., 2011), czyli średnich poprawionych przez model AMMI dla plonu odmian w badanych miejscowościach (Crossa i in., 1991; Annicchiarico, 2002; Annicchiarico i in., 2010; Mądry i in., 2011). Dla każdej grupy jednorodnej (skupienia) odmian pod względem reakcji plonu na warunki środowiskowe, wyznaczono średnią (grupową) reakcję adaptacyjną plonu odmian (Mądry i in., 2011).

Łączną analizę wariancji dla plonu ziarna (surowych danych) z rozpatrywanych serii doświadczeń PDOiR, wykonano za pomocą procedury GLM w programie SAS 9.1 (SAS Institute Inc. 2004; Derejko i in., 2011). Testowanie istotności poszczególnych efektów w



modelu stałym dla łącznej trójkierunkowej analizy wariancji (tab. 2) oraz kod procedury wykorzystanej w łącznej analizie wariancji i wielokrotnych porównaniach średnich obiektowych za pomocą metody Tukeya jest przedstawiony w pracy Derejko i in. (2011). Analiza AMMI, która stanowi uzupełnienie łącznej analizy wariancji (tab. 2), została wykonana w języku R (R Development Core Team, 2009) za pomocą procedury „La.svd”, służącej do rozkładu macierzy według wartości osobliwych (ang. singular *value decomposition*). Natomiast, analiza skupień metodą Warda została wykonana za pomocą procedury ‘hclust’ w języku R.

#### WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Analiza wariancji (tab. 2) wykazała, że interakcja Odmiana  $\times$  Miejscowość była istotna, co wskazuje na niejednakową (nierównoległą) reakcję plonu badanych odmian pszenicy ozimej na zmienne warunki środowiskowe w miejscowościach (agroekosystemy), przeciętnie poprzez dwa poziomy intensywności agrotechniki. Nieistotna interakcja potrójna Odmiana  $\times$  Agrotechnika  $\times$  Miejscowość,  $G \times M \times L$  (tab. 2) wskazuje, że kształty reakcji plonu każdej z badanych odmian na środowiska były podobne (w dużym stopniu powtarzalne) przy obu poziomach intensywności agrotechniki. Ma to ważne, pozytywne konsekwencje metodyczne przy modelowaniu adaptacyjnej reakcji plonu odmian w agroekosystemach przy obu badanych rodzajach agrotechniki. Fakt nieistotnej interakcji  $G \times M \times L$  uzasadnia poprawność (bez straty informacji) ograniczenia się do analizy, interpretacji i przedstawiania zróżnicowanej adaptacyjnej reakcji plonu odmian na środowiska, tylko na średnich plonach poprzez dwa rodzaje uprawy (tutaj na poprawionych średnich plonach za pomocą modelu AMMI). Interakcja  $G \times L$  dla plonu i jego jakości u pszenicy ozimej jest powszechnie stwierdzanym zjawiskiem na różnych szerokościach geograficznych (Ayoub i in., 1994; Basford i Cooper, 1998; Cooper i in., 2001; Ma i in., 2004; Souza i in., 2004; Sharma i in., 2009; Anderson, 2010; Annicchiarico i in., 2010; Denčić i in., 2011; Paderewski i in., 2011).

Relacje sum kwadratów dla źródeł zmienności w analizie wariancji (tab. 2) informują o relatywnym znaczeniu wielkości wpływu danego źródła zmienności na plon (Basford i Cooper, 1998; Annicchiarico, 2002; Gauch i in., 2008). Ponieważ suma kwadratów dla efektów interakcji  $G \times L$  jest prawie 3-krotnie większa, niż suma kwadratów dla efektów głównych odmian ( $G$ ), więc wypowiedanie się o relatywnym plonowaniu odmian w zmiennych środowiskach (i wybieranie odmian o relatywnie najwyższym plonowaniu), tylko na podstawie średniego plonu odmian poprzez środowiska jest niewłaściwe (Annicchiarico, 2002, 2009; Sharma i in., 2009). Dlatego wykres średnich odmianowych plonu, obliczonych poprzez miejscowości i intensywności agrotechniki, podany w pracy Derejko i in. (2011), nie jest wiarygodnym i wystarczającą oceną plonowania odmian w zmiennych agroekosystemach i agrotechnice. Przy niewielkim zróżnicowaniu średnich genotypowych (odmianowych) plonu, stwierdzonym w badaniach Derejko i in. (2011) na tych samych danych, dużego znaczenia nabiera uwzględnianie efektów interakcji  $G \times L$  w modelowaniu adaptacyjnej reakcji odmian. Test  $F_R$  (Cornellius i in., 1996; Dias i Krzanowski, 2003, tab. 2) wykazał istotność dwóch pierwszych interakcyjnych

składowych głównych, które akumulują 46,3% sumy kwadratów dla efektów interakcji  $G \times L$ . Zatem, do uzyskania poprawionych plonów dla odmian w badanych miejscowościach za pomocą modelu AMMI, wykorzystano dwie pierwsze interakcyjne składowe główne (Gauch, 1988, 1992; Annicchiarico, 2002).

Tabela 2

**Łączna analiza wariancji oparta na modelu stałym dla plonu ziarna pszenicy ozimej obserwowanego w kompletnej, wielokrotnej serii dwu-czynnikowych doświadczeń PDOiR, przeprowadzonej w sezonie 2008/2009**  
**Combined analysis of variance based on a fixed effect model for winter wheat grain yield data obtained in a complete two-factorial post-registration (PDOiR) multi-location trials carried out in the season 2008/2009**

Źródło zmienności Sources of variation	St. sw. Df	Sumy kwadr. SS	Średnie kwadr. MS	F <sub>emp.</sub> F	Wartość p p-Value
Miejscowość Location (L)	7	10444575	1492082	306,99	<0,0001
Bloki w Miejsc. Blocks in locations	8	394695	49337		
Agrotechnika Management (M)	1	1877311	1877311	163,27	<0,0001
Agrotechnika × Miejscowość Management × Location (M × L)	7	375691	53670	4,67	0,023
Błąd I Error I	8	91983	11498		
Odmiana Cultivar (G)	27	503471	18647	4,15	<0,0001
<b>Odmiana × Miejscowość Cultivar × Location (G × L):</b>	<b>189</b>	<b>1307860</b>	<b>6920</b>	<b>1,54</b>	<b>0,001</b>
<b>AMMI IPC1</b>	<b>189<sup>a)</sup></b>	<b>1307860<sup>a)</sup></b>	<b>6920</b>	<b>1,54</b>	<b>0,001</b>
<b>AMMI IPC2</b>	<b>156<sup>a)</sup></b>	<b>990930<sup>a)</sup></b>	<b>6352</b>	<b>1,41</b>	<b>0,009</b>
<b>AMMI IPC3</b>	<b>125<sup>a)</sup></b>	<b>702358<sup>a)</sup></b>	<b>5619</b>	<b>1,25</b>	<b>0,076</b>
<b>AMMI IPC4</b>	<b>96<sup>a)</sup></b>	<b>459051<sup>a)</sup></b>	<b>4782</b>	<b>1,06</b>	<b>0,350</b>
Błąd II Error II	216	970121	4491		
Agrotechnika × Odmiana Management × Cultivar (GxM)	27	161590	5985	1,23	0,208
Agrotechnika × Odmiana × Miejscowość Management × Cultivar × Location (G × M × L)	189	894343	4732	0,97	0,574
Błąd III (Reszta) Error III (Residual)	216	1049823	4860		

a) stopnie swobody i sumy kwadratów według testu  $F_R$  (Cornellius et al. 1996, Dias and Krzanowski 2003)

a) degrees of freedom and sum of squares are computed according  $F_R$  test (Cornellius et al. 1996, Dias and Krzanowski 2003)

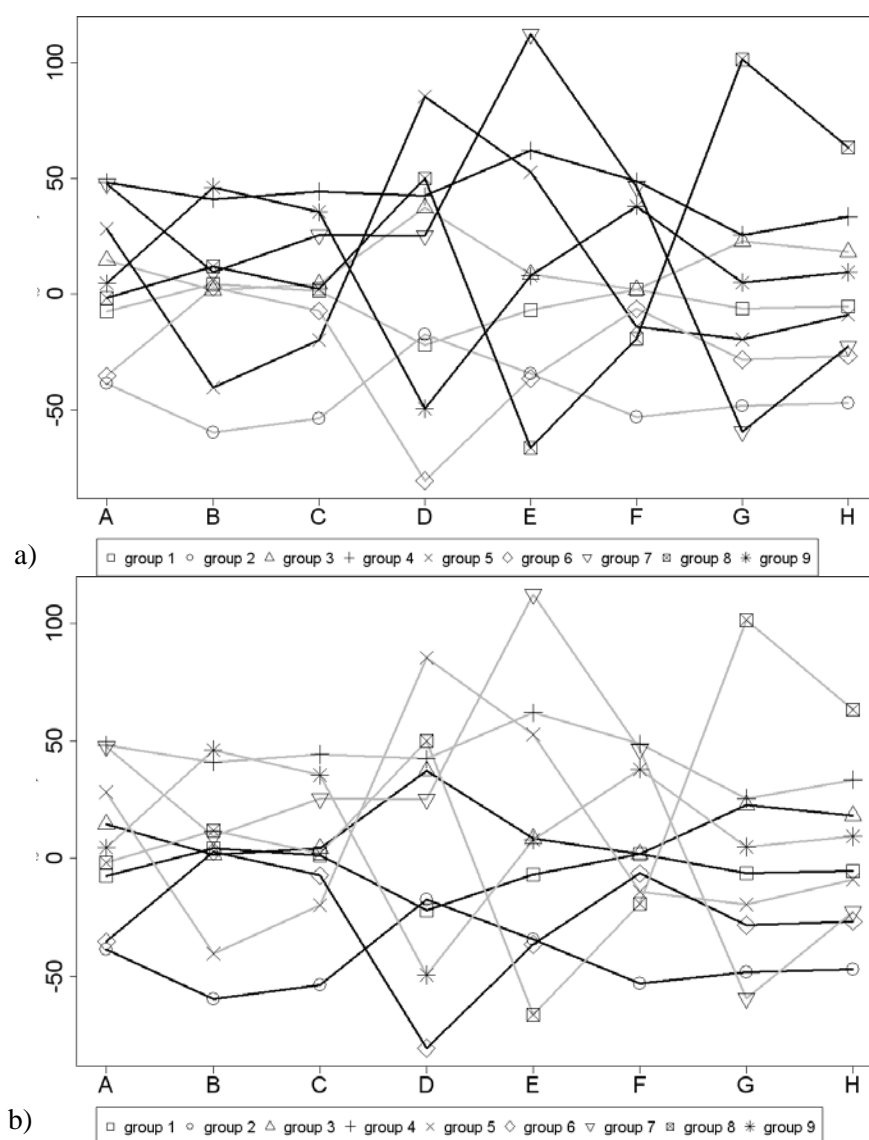
Za pomocą analizy skupień odmian za pomocą metody Warda na tych poprawionych plonach wydzielono 9 skupień (grup) odmian (tab. 3). Grupy te zachowują 86,5% całkowitej sumy kwadratów dla średnich plonów poprawionych za pomocą modelu AMMI2 (ang. AMMI2-adjusted means). Dlatego, można wnioskować o dużym podobieństwie adaptacyjnej reakcji plonu odmian w wyznaczonych grupach i dobrym odwzorowaniu typu reakcji adaptacyjnej odmian w każdej grupie przez średnie adaptacyjne reakcje plonu odmian w grupie na zmienne warunki środowiskowe.

Tabela 3

**Grupy odmian pszenicy ozimej o podobnej adaptacyjnej reakcji plonu w ośmiu środowiskach w Polsce, wydzielone za pomocą analizy skupień plonów poprawionych za pomocą modelu AMMI2**  
**Groups of cultivars with similar adaptive yield response across eight agro-ecosystems of Poland, distinguished with the use of cluster analysis of AMMI2-adjusted data**

Grupa 1 Group 1	Grupa 2 Group 2	Grupa 3 Group 3	Grupa 4 Group 4	Grupa 5 Group 5	Grupa 6 Group 6	Grupa 7 Group 7	Grupa 8 Group 8	Grupa 9 Group 9
Akteur	Alkazar	Anthus	Bogatka	Boomer	Flair	Kohelia	Legenda	Rapsodia
Finezja	Smuga	Figura	Jenga	Nadobna	Markiza		Meteor	Turkis
Garantus	Wydma	Mulan			Satyna			
Kris Ludwig		Muszelka						
Mewa		Tonacja						
Naridana								
Ostroga								

Linie na rysunku 3 odwzorowują wymienione średnie reakcje plonu grup odmian na warunki środowiskowe, uzyskane po odjęciu od nich średnich środowiskowych. Zabieg taki jest często stosowany w pracach nad oceną adaptacyjnej reakcji odmian po to, aby uzyskać mniejszy zakres zmienności skali transformowanych w ten sposób średnich i lepiej wizualnie zobrazować stwierdzone różnice odmian w każdym środowisku (Cooper i in., 2001; Annicchiarico, 2002; Zhang i in., 2006). Dodajmy, że różnice średnich odmian lub ich grup jednorodnych dla danej cechy w każdym środowisku, które są kryterium oceny zdolności adaptacyjnej odmian, są niezmiennicze dla wykresów z odmianowym średnim plonem „surowym” lub poprawionym przez model AMMI w środowiskach oraz dla wykresów po odjęciu od nich średnich środowiskowych. Zatem, rysunku 3 jest podstawą do wnioskowania o relatywnej zdolności adaptacyjnej odmian w badanych środowiskach, ponieważ pozwala wskazać te grupy odmian (o podobnej reakcji adaptacyjnej), które były wśród najwyższej plonujących tylko w jednym środowisku lub grupie środowisk (odmiany o wąskiej adaptacji) lub we wszystkich lub prawie wszystkich środowiskach (odmiany o szerokiej adaptacji). Wykonując analizę AMMI danych w klasyfikacji  $G \times L$  badacze często ograniczają się do modelu AMMI1, nawet wtedy, gdy wybrany test statystyczny lub inna metoda (na przykład metoda cross-validation) wykaże istotność większej liczby interakcyjnych składowych głównych. Taki model nazywany jest suboptymalnym (Annicchiarico i in. 2011 a). W następstwie wyboru takiego modelu uzyskiwany jest łatwy w interpretacji, nawet dla dużej liczby odmian, wykres plonu nominalnego (Gauch, 1992; Gauch i Zobel, 1997; Annicchiarico, 2002, 2009; Gauch i in., 2008). W rozpatrywanym tu przykładzie, pierwsza interakcyjna składowa główna wyjaśniła tylko 24,2% sumy kwadratów dla efektów interakcji  $G \times L$ . Zatem, wskazane było uwzględnienie kolejnej składowej głównej, uznanej za istotną na podstawie testu  $F_R$ .



A — Marianowo; B — Nowa Wieś Ujska; C — Głębokie; D — Seroczyn; E — Kościelna Wieś; F — Głubczyce; G — Radostowo; H — Węgrzce.

a) liniami czarnymi zostały przedstawione reakcje grup odmian o szerokiej lub wąskiej adaptacji, zaś liniami szarymi przedstawiono reakcje grup odmian relatywnie nieprzystosowanych do badanych środowisk

b) wymienione reakcje grup odmian przedstawiono odpowiednio liniami szarymi i czarnymi  
 a) bold lines describe mean yield response for cultivar groups showing specific or wide adaptation, light lines are for those relatively non-adapted to all environments

b) the two response patterns of the cultivar groups are presented using the reverse kinds of lines

**Rys. 3. Średnie grupowe reakcje adaptacyjne plonu odmian pszenicy ozimej na warunki środowiskowe w ośmiu miejscowościach (grupy odmian są podane w tab. 3)**

**Fig. 3. Pattern of winter wheat mean yield response of cultivar groups across eight trial locations (cultivar groups are presented in table 3)**

Autorzy uważają, że 46,3% sumy kwadratów dla efektów interakcji  $G \times L$ , akumulowane przez pierwszą i drugą interakcyjną składową główną, które łącznie uczestniczą w określeniu adaptacyjnych reakcji badanych odmian, stanowi rozsądne usunięcie błędu losowego z tych empirycznych funkcji reakcji, który kumuluje się głównie w obserwowanych efektach interakcyjnych (Gauch, 1988, 1992; Gauch i in., 2008).

Rozpatrując grupowe reakcje adaptacyjne odmian na rys. 3, stwierdzamy, że w sezonie wegetacyjnym 2008/2009 szeroką adaptację wykazały odmiany z grupy 4 (Bogatka, Jenga), plonując we wszystkich miejscowościach na 1. lub 2. miejscu, zaś na 3. miejscu w Seroczynie. Grupa odmian 8 (odmiany: Legenda, Meteor) wykazała wąską adaptację do warunków środowiskowych w dwu miejscowościach o najwyższym średnim plonie, tj. Radostowo i Węgrzce. Odmiany te relatywnie dość wysoko plonowały także w miejscowości Seroczyn i bardzo słabo w miejscowości Kościelna Wieś. W pozostałych miejscowościach plonowały one blisko średniej środowiskowej odmian i dlatego blisko zera na rysunku 3. Odmiana Kohelia, zaliczona do grupy 7 plonowała najwyżej w miejscowości Kościelna Wieś, a w miejscowości Głęboczycy i Marianowo niewiele ustępowała najwyżej tam plonującej grupie (w obu przypadkach grupie 4). Natomiast w obu miejscowościach o najwyższym plonie, Kohelia plonowała relatywnie bardzo słabo. Specyficzną adaptację do agroekosystemu w miejscowości Nowa Wieś Ujska (1 miejsce w plonowaniu) oraz miejscowości Głębokie i Głęboczycy wykazała grupa odmian 9 (Rapsodia, Turkis). Grupa odmian 5 (Boomer, Nadobna) była przystosowana wąsko do warunków środowiskowych w miejscowości Seroczyn. Stabilnie, choć zaledwie blisko średniej środowiskowej plonowały odmiany z grupy 1 (Akteur, Finezja, Garantus, Kris, Ludwig, Mewa, Naridana, Ostroga), niewiele wyżej plonowały odmiany z grupy 3 (Anthus, Figura, Mulan, Muszelka, Tonacja). Stabilnie, ale relatywnie bardzo nisko, plonowały odmiany z grupy 2 (Alcazar, Smuga, Wydma), wykazując w ten sposób brak adaptacji do warunków środowiskowych w głównych rejonach uprawy pszenicy ozimej w Polsce. Brak adaptacji do warunków środowiskowych w Polsce wykazały też mało stabilne odmiany z grupy 6 (Flair, Markiza, Satyna).

#### WNIOSKI

1. W badanych warunkach pogodowych sezonu wegetacyjnego 2008/2009 nowoczesne polskie i wspólnotowe odmiany pszenicy ozimej reagowały różnie pod względem plonu ziarna na przestrzennie zmienne warunki środowiskowe w Polsce (miały różną średnią odmianową oraz stabilność plonowania), zaś te reakcje środowiskowe były podobne przy obu poziomach intensywności uprawy,
2. Szeroką adaptację wykazały polska odmiana Bogatka (wyhodowana przez HR Danko oraz niemiecka odmiana Jenga (wyhodowana przez Nordsaat Saatuchtgesellschaft mbH), w nielicznych tylko środowiskach ustępując najwyższych rang pod względem plonowania innym grupom odmian o wąskiej adaptacji,
3. Przedstawiona komplementarna metodyka statystyczna, obejmująca łączną analizę wariancji kompletnych danych z jednorocznej, wielokrotnej serii dwuczynnikowych doświadczeń PDOiR w układzie split-block, analizę AMMI dla kombinacji średnich w

- klasyfikacji odmiany  $\times$  miejscowości oraz analizę skupień dla odmian opartą na średnich odmianowych w miejscowościach, poprawionych przez analizę AMMI, okazała się efektywnym narzędziem do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji plonu ziarna badanych odmian pszenicy ozimej na zmienne warunki środowiskowe,
4. W przypadkach, w których uzasadniony jest wybór modelu AMMI zawierający więcej, niż jedną interakcyjną składową główną, analiza skupień na poprawionych przez analizę AMMI średnich odmianowych w miejscowościach oraz wykres adaptacyjnych reakcji plonu dla grup odmian, umożliwiają sprawną interpretację zróżnicowanej zdolności adaptacyjnej dużej liczby badanych odmian.

#### LITERATURA

- Anderson W.K. 2010. Closing the gap between actual and potential yield of rained wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Research* 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 Science* 62: 115 — 124.
- Annicchiarico P. 2002. Genotype  $\times$  environment interactions — challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations, FAO plant production and protection paper 174. FAO, 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. 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., 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 a. Adaptation of landrace and variety germplasm and selection strategies for lucerne in the Mediterranean basin. *Field Crops Res.* 120: 283 — 291.
- Annicchiarico P., Pecetti L., Bouzerzour H., Kallida R., Khedim A., Porqueddu C., Simoes N.M., Volaire F., Lelièvre F. 2011. Adaptation of contrasting cocksfoot plant types to agricultural environments across the Mediterranean basin. *Environ. Experim. Bot.* 74: 82 — 89.
- Ayoub M., Guertin S., Fregeau-Reid J., Smith D.L. 1994. Nitrogen fertilizer effect on breadmaking quality of hard red spring wheat in eastern Canada. *Crop Sci.* 34: 1346 — 1352.
- Basford K. E., Cooper M. 1998. Genotype  $\times$  environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Austr. J. Agric. Res.* 49: 153 — 174.
- Bradu D. Gabriel K.R. 1978. The biplot as a diagnostic tool for model of two-way tables. *Technometrics* 1978: 47 — 63.
- Carr P.M., Horsley R.D., Poland W.W. 2003. Tillage and seeding rate effects on wheat cultivars: I. grain production. *Crop Sci.* 43: 202 — 209.
- Casanoves F., Baldessari J., Balzarini M. 2005. Evaluation of multi environment trials of peanut cultivars. *Crop Sci.* 45: 18 — 26.
- Cornelius P.L., Crossa J., Seyedsadr M. 1996 Statistical tests and estimators of multiplicative models for genotype-by-environment interaction. In: Kang M.S., Gauch H.G. (Eds.), *Genotype by Environment Interaction*. CRC Press, Boca Raton: 199 — 234.
- Crossa J., Fox P.N., Pfeiffer W.H., Rajaram S., Gauch H.G. 1991. AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theor. Appl. Genet.* 81:27 — 37.

- Crossa J., Vargas M., Joshi A.K. 2010. Linear, bilinear, and linear-bilinear fixed and mixed models for analyzing genotype environment interaction in plant breeding and agronomy. *Can. J. Plant Sci.* 90:561 — 574.
- Dias C., Krzanowski W. 2003. Model selection and cross validation in additive main effect and multiplicative interaction models. *Crop Sci.* 43:865 — 873.
- COBORU. 2002. Zboża. Metodyka badania wartości odmian. COBORU, Słupia Wielka.
- 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 Research*, 69: 47 — 67.
- Denčić S., Mladenov N., Kobiljski B. 2011. Effects of genotype and environment on breadmaking quality in wheat. *Int. J. Plant Prod.* 5:71 — 82.
- 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.
- Dhungana P., Eskridge K.M., Baenziger P.S., Campbell B.T., Gill K.S., Dweikat I. 2007. Analysis of genotype-by-environment interaction in wheat using a structural equation model and chromosome substitution lines. *Crop Sci.* 47: 477 — 484.
- Elandt R. 1964. *Statystyka matematyczna w zastosowaniu do doświadczeń rolniczego*. PWN, Warszawa.
- 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.
- Gauch H.G. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44:705 — 715
- Gauch H.G. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials. AMMI analysis of factorial designs*. Elsevier Science, New York, NY.
- 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.
- Geleta B., Atak M., Baenziger P.S., Nelson L.A., Baltenesperger D.D., Eskridge K.M., Shipman M.J., Shelton D.R. 2002. Seeding rate and genotype effect on agronomic performance and end-use quality of winter wheat. *Crop Sci.* 42: 827 — 832.
- 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., Gacek E.S., Paderewski J., Gozdowski D., Drzazga T., 2011. Adaptive yield response of winter wheat cultivars across environments in Poland using combined AMMI and cluster analyses. *Int. J. Plant Prod.* 5: 299 — 310.
- Mądry W., Iwańska M. 2011. Przydatność metod oraz miar statystycznych do oceny stabilności i adaptacji odmian: przegląd literatury. *Biul. IHAR* 260/261: 193 — 218.
- McIntosh M.S 1983. Analysis of combined experiments. *Crop Sci.* 75:153 — 156.
- Mejza I. 1999. Planowanie serii doświadczeń dwuczynnikowych z rozszczepionymi jednostkami i analiza wyników. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, vol. 301.
- Mintenko A. S., Smith S. R., Cattani D. J. 2002. Turfgrass evaluation of native grasses for the Northern Great Plains Region. *Crop Sci.* 42: 2018 — 2024.
- Miyan M.S., Impiglia A., Anderson W. K. 2011. Agronomic practices for durum wheat in an area new to the crop. *Communications in Biometry and Crop Sci.* 6: 64 — 79.
- Oscarsson M., Andersson R., Aman P., Jonsson A. 1998. Effects of cultivar, nitrogen fertilization rate and environment on yield and grain quality of barley. *J. Sci. Food Agric.* 78: 359 — 366.
- 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 środowiska. *Biul. IHAR* 263: 161 — 188.

- Pena R. J. 2007. Current and future trends of wheat quality needs. In: Buck H. T., Nisi J. E., Salomon N. (Eds.). *Wheat production in stressed environments*. Springer Verlag: 411 — 424.
- R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. Available at <http://www.Rproject.org> (verified 3 Dec. 2010). R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SAS Institute. 2004. SAS system for Windows. v. 8.2. SAS Inst., Cary, NC.
- Schmidt J. P., Lamb J.A., Schmitt M.A., Randall G.W., Orf J. H., Gollany H. T. 2001. Soybean varietal response to liquid swine manure application. *Agron. J.* 93: 358 — 363.
- Sharma R. C., Morgounov A. I., Braun H.J., Akin B., Keser M., Bedoshvili D., Bagci A., Martius C., van Ginkel M. 2009. Identifying high yielding stable winter wheat genotypes for irrigated environments in Central and West Asia. *Euphytica*, 171: 53 — 64.
- 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. *Aust. J. Agric. Res.* 51: 903 — 915.
- Souza E. J., Martin J.M., Guttieri M.J., O'Brien K. M., Habernicht D. K., Lanning S. P., McLean R., Carlson G. R., Talbert L. E. 2004. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Sci.* 44: 425 — 432.
- Virk D. S., Witcombe J. R. 2008. Evaluating cultivars in unbalanced on-farm participatory trials. *Field Crops Res.* 106: 105 — 115.
- Yan W., Kang M.S. 2003. *GGE Biplot Analysis: A Graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists*. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Zhang Y., He Z., Zhang A., van Ginkel M., Ye G. 2006. Pattern analysis on grain yield of Chinese and CIMMYT spring wheat cultivars grown in China and CIMMYT. *Euphytica* 147: 409 — 420.