

TADEUSZ DRZAZGA¹**MARCIN STUDNICKI**²¹ Małopolska Hodowla Roślin sp. z o.o. Oddział w Kobierzycach² Katedra Doświadczalnictwa i Bioinformatyki, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Analiza adaptacji środowiskowej rodów hodowlanych w wielokrotnych, jednorocznych doświadczeniach, na przykładzie plonowania rodów pszenicy ozimej

Evaluation of adaptability to environments of varieties in multiple annual trials: a case study of winter wheat

Celem pracy jest przedstawienie statystycznej metody wnioskowania o adaptacyjnej reakcji odmian na zróżnicowane warunki środowiskowe w miejscowościach, na podstawie danych kompletnych z jednorocznej serii doświadczeń przedrejestrowych oraz ilustracja zastosowania i ocena przydatności tej metody dla plonu ziarna pszenicy ozimej. Rozpatrywane dane doświadczalne stanowią dwukierunkową kompletną klasyfikację o postaci odmiana \times miejscowość. Obserwacje plonu odmian poddano analizie statystycznej metodą wykorzystującą mieszany model wielowymiarowy, realizowaną przez programy komputerowe Sergen 4 i Eksplan 2. Badane odmiany pszenicy ozimej zostały podzielone na grupy o jednorodnych średnich genotypowych za pomocą analizy skupień metodą Warda. Proponowana metoda może być wspomagającym narzędziem w pracach hodowlanych do rozróżniania rodzajów adaptacyjnej reakcji odmian pszenicy ozimej na warunki środowiskowe, umożliwiając efektywne poszukiwanie genotypów o szerokiej i wąskiej adaptacji.

Słowa kluczowe: adaptacja odmian, analiza skupień, doświadczenia przedrejestrowe, plon ziarna, pszenica ozima

The objective of this work is presenting the statistical procedures and method of inference about varieties' responses to different environmental conditions in tested locations based on balanced dataset from annual pre-registration trials. Considered data set consisted of two-way genotype \times environments classification. The two factor mixed model approaches included in Sergen 4 and Eksplan 2 softwares were used for analysis of the grain yield data. The evaluated winter wheat varieties were classified to groups with similar responses to the environments using Ward's method for cluster analysis. Proposed statistical methods may be supporting tools in the breeding processes to differentiate the types of adaptive response to the environments in winter wheat varieties and enabling an effective search for genotypes with wide and narrow adaptation.

Key words: cluster analysis, cultivar adaptation, grain yield, pre-registration trials, winter wheat

WSTĘP

Jednoroczne, wielokrotne serie doświadczeń z pszenicą ozimą prowadzone w ramach doświadczeń wstępnych w Polsce obejmują doświadczenia z podobnymi zestawami odmian, powtarzane w danym sezonie wegetacyjnym w 7–8 stacjach, należących do spółek hodowlanych. Wyniki z serii tych doświadczeń dostarczają informacji o przydatności badanych odmian do warunków agroekologicznych na podstawie zachowania się tych odmian w wielu środowiskach i są postawą wniosku do ich dalszego testowania w doświadczeniach rejestrowych prowadzonych przez COBORU.

W stacjach, w których są zakładane doświadczenia, prowadzi się również hodowlę tego gatunku. Miejscowości te stanowią środowiska rolnicze, niestety nie są wybrane w sposób w przybliżeniu losowy w przestrzeni kraju, tak aby dobrze reprezentowały zmienność przyrodniczą najważniejszych rejonów uprawy pszenicy ozimej. Wyniki z serii takich doświadczeń dostarczają informacji o przydatności badanych odmian do warunków agroekologicznych na podstawie zachowania się tych odmian w wielu środowiskach, ale tylko w jednym sezonie wegetacyjnym. Ich wartość gospodarcza nie jest sprawdzona pod względem powtarzalności w innych warunkach pogodowych i biotycznych (Annicchiarico, 2002 a; Anderson, 2010).

Reakcja każdej badanej odmiany pod względem cech produktywności roślin (głównie plonu) na środowiska rolnicze, czyli agroekosystemy, nazywana jest adaptacyjną reakcją odmiany w środowiskach (Mądry i in., 2006, 2011; Paderewski i in., 2011; Pecetti i in., 2011). Każda odmiana charakteryzuje się odpowiednim rodzajem adaptacyjnej reakcji.

Do oceny adaptacji odmian na przestrzeni kilku lat obserwacji stosuje się przeważnie trzy metody, tj. analizę AMMI, łączną analizę skupień i analizę GGE (Paderewski i in., 2011). 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; Annicchiarico i in., 2009; Paderewski i in., 2011). Analiza skupień jest narzędziem służącym do 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. Grupowanie obiektów odbywa się na podstawie przyjętej miary podobieństwa lub niepodobieństwa dla zmiennych opisujących te obiekty. 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 (Ward, 1963). Pozwala to na podział odmian na grupy podobnie reagujących w rozpatrywanych środowiskach rolniczych. Ma to znaczenie w uproszczeniu wizualizacji reakcji odmian na środowiska, przede wszystkim w seriach doświadczeń wykonywanych z dużą liczbą odmian. W pracy Mądrego i in. (2012) efekty interakcji odmiana × 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. Łączne zastosowanie analizy AMMI oraz analizy skupień, umożliwia skuteczną ocenę i interpretację różnych rodzajów adaptacji odmian do określonych rodzajów środowisk rolniczych, przy danej intensywności agrotechniki.

Oceny reakcji odmian na środowiska z ich podziałem na grupy jednorodne pod względem ich reakcji adaptacyjnej oraz graficznym przedstawieniem można zastosować również do analizy danych z serii jednorocznych doświadczeń odmianowych. W toku dalszego postępowania dokonujemy szczegółowej analizy ocen reakcji pojedynczych odmian.

Celem niniejszej pracy jest:

- przedstawienie komplementarnej metody statystycznej do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji badanych odmian na zróżnicowane warunki środowiskowe w miejscowościach, na podstawie danych kompletnych z jednorocznej, wielokrotnej serii doświadczeń,
- ilustracja zastosowania i ocena przydatności tej metody dla plonu ziarna pszenicy ozimej.

MATERIAŁ I METODY

Do analiz wykorzystano dane plonowania rodów pszenicy z jednorocznej, wielokrotnej serii doświadczeń przedrejestranych — wstępnych, pochodzącymi z różnych ośrodków hodowlanych w Polsce. Doświadczenia były zakładane w sezonie 2010/11 w 7 miejscowościach (DED — Dębina, KOC — Kobierzyce, NAD — Nagradowice, POB — Polanowice, SMH — Smolice, STH — Strzelce, SZD — Szelejewo), w układzie bloków niekompletnych z trzema powtórzeniami na poletkach o powierzchni 10 m². W doświadczeniach badano 61 rody. Zabiegi agrotechniczne; nawożenie, ochronę przed chwastami i szkodnikami zastosowano odpowiednio do lokalnych potrzeb.

Przedstawiona metoda obejmuje łączną analizę wariancji, opartą na modelu stałym dla danych z wymienionej serii doświadczeń, analizę AMMI dla interakcji odmiany × miejscowości (interakcji GL) oraz analizę skupień dla odmian, w której zmiennymi opisującymi odmiany były średnie poprawione przez model AMMI dla plonu w badanych miejscowościach.

Obserwacje plonu rodów poddano analizie statystycznej metodą wykorzystującą mieszany model wielowymiarowy, realizowaną przez program komputerowy Sergen 4 i (Caliński i in., 2003) i Eksplan 2 (Krajewski i in., 2006).

Otrzymane wartości średnie poprawione plonu dla obiektów w środowiskach wykorzystano do oceny adaptacji odmian poprzez grupowanie obiektów za pomocą analizy skupień opartą na metodzie Warda (Ward, 1963).

WYNIKI I DYSKUSJA

Dla średnich poprawionych plonu ziarna wykonano analizę wariancji na podstawie modelu stałego AMMI (tab. 1). Stwierdzono, że 12,99% sumy kwadratów odchyłeń dla plonu w kombinacjach GL było wyjaśnione przez efekty główne odmian, zaś 57,75% tej sumy kwadratów wynikało z efektów głównych miejscowości. Pozostałe 29,26% zmienności plonowania w tych kombinacjach przypadało na efekty interakcji GL. Wyniki te potwierdzają ogólną prawidłowość polegającą na tym, że kluczowym źródłem zmienności plonu różnych gatunków roślin uprawnych w przestrzeni rolniczej jest przeciętny wpływ środowisk, czyli miejscowości i lat (Annicchiarico, 2002 b; Mądry i in., 2006; Drzazga i in., 2009). W programach hodowli roślin bardzo ważny jest wybór strategii i kierunku hodowli odmian o wąskiej lub szerokiej adaptacji. Uznaje się zwykle, że ten wybór powinien być zależny od proporcji wariancji efektów interakcji GE do wariancji głównych efektów genotypowych (odmianowych) plonu lub innych cech w danym układzie genetyczno-środowiskowym (Annicchiarico, 2002 b; de la Vega i Chapman, 2006). W badaniach własnych, znacząco przeważają efekty interakcji GE nad efektami genotypowymi, co sugeruje na możliwość prowadzenia bardziej skutecznej selekcji w kierunku hodowli odmian o wąskiej adaptacji, niż hodowla odmian szeroko przystosowanych do warunków w rejonie uprawy.

Tabela 1

Analiza wariancji dla plonu ziarna pszenicy ozimej z jednorocznej serii doświadczeń przedrejestrowych — wstępnych założonych w sezonie 2010/11
Analysis of variance in winter wheat grain yield in annual pre-registration trials in season 2010/2011

Źródło zmienności Source of variability	Liczba stopni swobody Degrees of freedom	Suma kwadratów Sum of squares	Średni kwadrat Mean square	Statystyka F F statistic	Wartość krytyczna F Critical value of F	
					0,05	0,01
α					0,05	0,01
Środowiska Locations	6	18550,72	3091,79	493,89	2,11	2,82
Genotypy Cultivars	68	4173,25	61,37			
Genotypy × Środowiska Genotype × Locations	408	9399,53	23,04	3,24	1,15	1,22
Regresja względem środowiska Regression on environment	68	1123,65	16,52			
Odchylenie od regresji Deviations from regression	340	8275,88	24,34	3,43	1,16	1,23
Błąd doświadczeń Experimental error	824		6,26			

Na podstawie wyników analizy skupień, dokonano podziału badanych rodów na 6 grup obiektów w ramach analizowanej serii (tab. 2). W każdej wydzielonej grupie jednorodnej, rody w grupach są relatywnie podobne pod względem plonu ziarna. Miejscowości na osi poziomej zostały ułożone w kolejności rosnących średnich środowiskowych plonu (rys. 1). Wykazane różnice plonu między odmianami w danym środowisku są równe różnicom faktycznej średniej odmian, co umożliwia ich podział na grupy jednorodne reagujących

podobnie w rozpatrywanych miejscowościach. W analizowanej serii najwyższą plennością wykazały się obiekty z grup 5. Rody z tej grupy plonowały w każdej miejscowości powyżej średniej środowiskowej. Grupa cechuje się najmniejszą liczebnością i zawiera tylko 4 obiekty. Wyższa plenność rodów z tej grupy nad pozostałymi rodami wynika z ich wyjątkowo wysokich plonów osiągniętych w miejscowościach DED — Dębina i STH — Strzelce. W pozostałych miejscowościach: SZD — Szelejewo, NAD — Nagradowice, SMH — Smolice, POB — Polanowice i KOC — Kobierzyce, te różnice w plonowaniu między grupami są mniejsze. Do odmian relatywnie słabiej plonujących należą rody z gr. 3 i 6, relatywnie źle przystosowane do warunków Polski reprezentowanych przez rozpatrywane stacje doświadczane. Ponadto rody z 6 grupy wykazały się bardzo zmiennym plonowaniem w środowiskach. Podobne zachowanie stwierdzono dla rodów z grupy 4. Rody z grupy 1 plonowały nieco powyżej lub na poziomie średniej środowiskowej, można je zaliczyć do genotypów stabilnych.



Rys. 1. Układ miejscowości w seriach doświadczeń przedrejestrowych — wstępnych z rodami pszenicy ozimej w sezonie 2010/11

Fig. 1. Geographical distribution of locations for pre-registration trials of winter wheat varieties in the seasons 2010/11

Rysunek 2 może być 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). Wykres średnich odmianowych plonu, obliczonych poprzez miejscowości podany w pracy, nie jest w pełni wiarygodnym i wystarczającą oceną plonowania odmian w zmiennych agroekosystemach i agrotechnice, zwłaszcza przy niewielkim zróżnicowaniu średnich genotypowych (odmianowych) plonu (Derejko i in., 2011). W związku z tym można przeprowadzić

grupowanie odmian podobnych pod względem kształtu reakcji plonowania na środowiska w miejscowościach za pomocą analizy skupień metodą Warda (Paderewski i in., 2008). Genotypowe profile ocen efektów interakcji GL wykorzystywane są do opisu kształtów reakcji plonu ziarna genotypów na warunki środowiskowe w badanych miejscowościach i do grupowania genotypów podobnych pod względem tych kształtów. W obrębie każdej jednorodnej grupy odmian, wydzielono podgrupy odmian jednorodnych pod względem średnich genotypowych dla plonu. Można więc uznać, że odmiany w każdej takiej podgrupie jednorodnej mają podobne (nieistotnie zróżnicowane) funkcje reakcji plonu na środowiska w miejscowościach.

Tabela 2

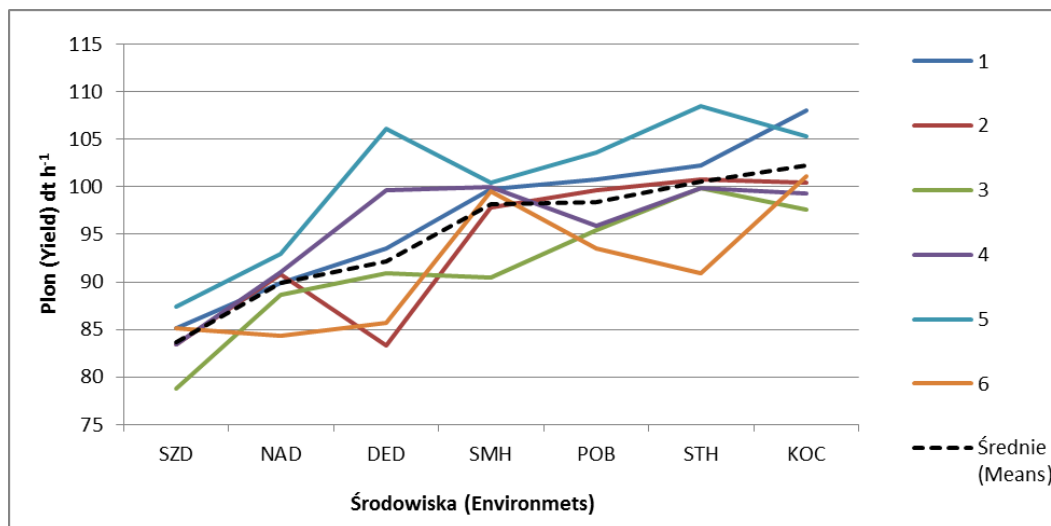
Grupy jednorodne rodów pszenicy ozimej pod względem plonu średniego poprawionego, wydzielone metodą Warda, seria doświadczeń wstępnych w sezonie 2010/11
Groups of winter wheat varieties clustered by Ward's method based on grain yield in the pre-registration trials in season 2010/11

Grupa 1 Group 1	Grupa 2 Group 2	Grupa 3 Group 3	Grupa 4 Group 4	Grupa 5 Group 5	Grupa 6 Group 6
AND_4008/10	AND_394/07	DC_621-1/9	AND_732/07	DC_557-2/9	DL_347/07
DC_705-1/9	AND_4015/09	DD_344/07	DC_3317-2/98	DC_648/06	NAD_08081
DD_323/07	AND_444/07	DL_463/07	DD_559/07	KBP_08.49	POB_597/07
DD_414/07-4	DC_3318-2/9D	HRSM_775	HRSM_752	NAD_08099	SMH_7124
DL_659/07	DD_229/07	HRSM_779	HRSM_761		STH_005
DS_2942/07	DS_3028/07	KBH_409/08	HRSM_772		
KBP_09.22	KBH_1220/07	SMH_8592	HRSM_773		
KBP_09.38	KBH_4785/04	STH_004	KBP_09.1		
KBP_09.6	KBP_08.53	Tonacja	NAD_0720		
KBP_09.7	MIB_08_220		SMH_8529		
KWS OZON	MIB_08_342		STH_006		
Muszelka	POB_1146/07		STH_007		
NAD_08047	POB_1210/07		STH_008		
NAD_08060	POB_572/07		STH_10		
NAD_08169	POB_573/07		STH_012		
SMH_8646	POB_623/07				
STH_002	STH_013				
STH_003					
STH_009					

W analizie różnic pomiędzy adaptacyjną reakcją badanych odmian za pomocą wykresów plonu, ważne jest wyróżnienie odmian o dużej adaptacji w określonych rodzajach (grupach) środowisk, czyli odmian o szerokiej i wąskiej adaptacji. Takie podejście znacząco upraszcza i ułatwia oraz usprawnia graficzną prezentację różnych rodzajów reakcji odmian na środowiska, zwłaszcza w przypadku, kiedy liczba badanych odmian jest duża.

Porównanie adaptacyjne reakcji odmian w środowiskach, głównie poprzez ocenę rankingu plonu odmian oraz jego ilościowego zróżnicowania międzyodmianowego w ramach analizowanej serii, wskazując odmiany o relatywnie najwyższym plonie w środowiskach, jest wystarczające do prowadzenia efektywnej selekcji nowych odmian. Otrzymane grupowe reakcje badanych odmian na środowiska, pozwala na sprawne wnioskowanie o adaptacji grup odmian (rys. 2). W dalszym etapie można uzupełnić o opis

reakcji każdej odmiany, wyznaczając parametry stabilności i adaptacji ocenianych genotypów: średniej genotypowej z badanych środowisk, wariancji stabilności, współczynnika regresji liniowej i determinacji dla zależności efektów (odchyłeń) interakcyjnych od środowiskowych efektów głównych, wariancji reszt (odchyłeń) regresyjnych dla tej zależności oraz miary Kanga (tab. 2, Krajewski i in., 2006).



Rys. 2. Reakcja grup rodów pszenicy ozimej na środowiska — seria doświadczeń wstępnych w sezonie 2010/11

Fig. 2. Grain yield response of the winter wheat varieties to the environments in pre-registration trials in season 2010/11

W pracy przedstawiono przykładowe wyniki analiz dla rodów z grupy 5 (tab. 3).

Ocena efektu głównego jest miarą przewagi średniej genotypowej *i*-tego genotypu nad średnią ogólną w serii doświadczeń. W obrębie omawianej grupy, istotność tego efektu stwierdzono dla rodów: DC_557-2/9 i KBP 08.49. Zauważyć należy, że jedynie genotyp 1 nie wykazał istotnej interakcji ze środowiskami, dla pozostałych były one istotne. Oznacza to, że te rody podlegają silnym wpływom środowiska, czyli są mniej stabilne w plonowaniu. Miarą zmienności efektów interakcyjnych dla genotypu oraz miarą podobieństwa tej reakcji na środowiska do reakcji stabilnej rolniczo jest ocena wariancji stabilności. W przypadku rodu DC_557-2/9 wariancja ta jest nieistotna, co pozwala uznać nam ten genotyp za stabilny rolniczo. Miarą podobieństwa reakcji genotypu pod względem plonowania do normy szerokiej adaptacji jest miara Kanga. Im większa wartość tego parametru, tym genotyp relatywnie wysoko plonuje w różnych środowiskach. Takim zachowaniem wykazał ród DC_557-2/9, co pozwala go zaliczyć do genotypów o szerokiej adaptacji.

Im większa ocena wariancji stabilności, tym reakcja plonowania *i*-tego genotypu jest bardziej odległa od normy stabilności rolniczej. Tego rodzaju reakcje wykazały pozostałe genotypy. Dla wyjaśnienia tego zachowania wykorzystujemy regresyjną zależność

interakcji genotypowo-środowiskowej (GE) od przeciętnego poziomu plonowania wszystkich genotypów w danym środowisku, tzn. od średniej środowiskowej. Oszacowane zależności regresyjnej dla genotypów DC 648/06 i KBP 08.49 były nieistotne, istotna dla NAD-08099 na poziomie 0,05. Jednak bardzo niska wartość współczynnika determinacji ogranicza wnioskowanie o jego reakcji na warunki środowiska.

Tabela 3

Testowanie poszczególnych genotypów z wydzielonej grupy 5 serii 1 doświadczeń wstępnych 2010/11 i ich interakcji ze środowiskami
Evaluation of selected genotypes from group 5 in pre-registration trials in season 2010/11 and their genotype × environments interaction

Odmiana Variety	DC_557-2/9	DC_648/06	KBP_08,49	NAD_08099
Średnia genotypowa plonu q/ha Genotype mean yield	102,664	100,106	100,235	99,482
Ocena efektu głównego Estimated main effect	7,747	5,188	5,317	4,565
Statystyka F dla efektu głównego F-Statistic for main effect	42,11	5,30	6,05	2,26
Poziom istotności Significance level	<0,001	0,061	0,049	0,183
Statystyka F dla interakcji GE F-Statistic for interaction	1,13	4,04	3,72	7,32
Poziom istotności Significance level	0,341	<0,001	0,001	<0,001
Wariancja stabilności Stability variance	2,747	26,747	24,453	53,203
Statystyka F F-Statistic	0,42	4,05	3,70	8,06
Poziom istotności Significance level	0,869	<0,001	0,001	<0,001
Współczynnik regresji Regression coefficient	-0,086	-0,150	0,031	0,107
Współczynnik determinacji (%) Determination coefficient	11,14	3,80	0,18	0,99
Statystyka F dla regresji F-Statistic for regression	0,63	0,20	0,01	0,05
Poziom istotności Significance level	0,464	0,675	0,928	0,832
Wariancja dla odchyleń od regresji Variance for deviations from regression	3,1946	30,3594	28,8365	61,7689
Statystyka F dla odchyleń regresyjnych F-Statistic for deviations from regression	0,48	4,60	4,37	9,36
Poziom istotności Significance level	0,788	<0,001	<0,001	<0,001
Miara Kanga YSi Kang's measure YSi	71*	61*	60*	59*
Ranking wg miary YSi Ranking by Kang's measure YSi	1	6	4	7

PODSUMOWANIE

Przedstawiona komplementarna metoda statystyczna, obejmująca łączną analizę wariancji kompletnych danych z jednorocznej, wielokrotnej serii jednoczynnikowych doświadczeń hodowlanych, 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, może być efektywnym narzędziem do wnioskowania o adaptacyjnej reakcji plonu ziarna badanych odmian pszenicy ozimej na zmienne warunki środowiskowe. Z drugiej strony, wydzielanie grup odmian o podobnej reakcji na środowiska uprości postępowanie przy ocenie szerokiego materiału hodowlanego. Wyżej wymieniona metoda może być przydatna w pracach selekcyjnych i uwzględniona w przyszłej modernizacji programu Eksplan jako dodatkowe narzędzie statystyczne dla hodowców.

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.
- Annicchiarico P. 2002 a. Defining adaptation strategies and yield stability targets in breeding programmes In: 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., Royo C., Bellah F., Moragues M. 2009. Relationships among adaptation patterns, morphophysiological traits and molecular markers in durum wheat. *Plant Breed.* 128: 164 — 71.
- Caliński T., Czajka S., Kaczmarek Z., Krajewski P., Siatkowski I. 2003. Podręcznik użytkownika programu SERGEN 4. Instytut Genetyki Roślin PAN, Poznań.
- 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.
- 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.
- 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.
- Drzazga T., Paderewski J., Mądry W., Krajewski P., 2009. Ocena rodzajów reakcji plonowania odmian pszenicy ozimej w doświadczeniach PDO na przestrzennie zmienne warunki przyrodnicze w kraju. *Biul. IHAR* 293: 71 — 82.
- Krajewski P., Kaczmarek Z., Czajka S. 2006. Podręcznik użytkownika programu Eksplan wersja 2.
- 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., Gozdowski 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.
- Paderewski J., Mądry W., Pilarczyk W., Drzazga T., 2008. Retrospektywne badanie reakcji plonu odmian pszenicy ozimej na warunki środowiskowe w miejscowościach za pomocą łącznej analizy AMMI i skupień: ocena postępu genetycznego w plonowaniu. *Biul. IHAR* 250: 87 — 106.
- Paderewski J., Gauch H. G., Mądry W., Drzazga T., Rodrigues P. C. 2011. Yield response of winter wheat to agro-ecological conditions using additive main effects and multiplicative interaction and cluster analysis. *Crop Sci.* 51: 969 — 980.
- Mądry W., Iwańska M. 2012. Measures of genotype wide adaptation level and their relationships in winter wheat. *Cereal Res. Comm.* 40: 592 — 601.

- 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.
- Ward J. H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58: 236 — 244.