

Received: 01.04.2016 / Accepted: 11.07.2016

Resistance to Fusarium head blight [*Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.] of winter wheat lines generated from crosses between winter type cultivars and resistant spring wheat Sumai 3

Podatność na fuzariozę kłosów [*Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.] linii pszenicy ozimej uzyskanych z krzyżowania odmian ozimych z odporną pszenicą jarą Sumai 3

Tomasz Góral^{1*}, Halina Wiśniewska², Dorota Walentyn-Góral¹,
Magdalena Radecka-Janusik¹, Paweł Czembor¹

Summary

Resistance to Fusarium head blight [*Fusarium culmorum* (W.G. Sm.) Sacc.] of 52 winter wheat lines was evaluated. The lines were obtained from crosses between three cultivars of winter wheat and resistant spring wheat cultivar Sumai 3. The presence of *Fhb1* gene was confirmed in 56% of lines using the close linked UMN10 marker. The lines showed a very high resistance of type II (for *Fusarium* spread within the head), while type I resistance (for initial infection) varied. All lines revealed high or very high resistance to Fusarium head blight after inoculation in field experiments. The lines with *Fhb1* gene had on average higher resistance, greater plant height and lower grain yield. However, the lines with very high resistance, average height plants and high yields of grain were identified in both groups as well.

Key words: winter wheat; Fusarium head blight; *Fhb1*; resistance

Streszczenie

Badano odporność na fuzariozę kłosów 52 linii pszenicy ozimej uzyskanych z krzyżowań trzech odmian pszenicy ozimej z odmianą odporną pszenicy jarej Sumai 3. Obecność genu *Fhb1* stwierdzono u 56% badanych linii wykorzystując blisko sprzężony marker UMN10. Linie miały bardzo wysoką odporność typu II (na rozprzestrzenianie się *Fusarium* w kłosie), natomiast wystąpiło zróżnicowanie odporności typu I (na infekcję pierwotną). Wszystkie badane linie wykazały niską lub bardzo niską podatność na fuzariozę kłosów w infekcyjnych doświadczeniach polowych. Linie z genem *Fhb1* miały średnio wyższą odporność, większą wysokość roślin oraz niższy plon ziarna. W obu grupach linii zidentyfikowano jednakże formy o bardzo wysokiej odporności, średniej wysokości roślin oraz wysokim plonie ziarna.

Słowa kluczowe: pszenica ozima; fuzarioza kłosów; *Fhb1*; odporność

¹Institut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy
Radzików, 05-870 Błonie

²Institut Genetyki Roślin Polskiej Akademii Nauk
Strzeszyńska 34, 60-479 Poznań

*corresponding author: t.goral@ihar.edu.pl

Wstęp / Introduction

Fuzarioza kłosów jest chorobą zbóż powodowaną przez grzyby z rodzaju *Fusarium*. Grzyby te porażają kłosa powodując następnie porażenie i uszkodzenie ziarniaków, a także skażenie tkanek oraz ziarna toksynami fuzaryjnymi (Snijders 2004). Gatunki *Fusarium* produkują liczne metabolity wtórne zwane mikotoksynami należące do różnych grup chemicznych. Najważniejszą grupą ze względu na liczbę związków oraz powszechność występowania w ziarnie zbóż są trichoteceny (Bottalico i Perrone 2002).

Odporność na grzyby z rodzaju *Fusarium* powodujące fuzariozę kłosów ma złożoną etiologię. Zidentyfikowano kilka typów (mechanizmów) tej odporności (Mesterházy i wsp. 1999; Foroud i Eudes 2009). Zostały one opisane jako: typ I – odporność na infekcję pierwotną; typ II – odporność na rozprzestrzenianie się *Fusarium* w kłosie (Schroeder i Christensen 1963); typ III – odporność na porażenie ziarniaków przez *Fusarium*; typ IV – tolerancja na fuzariozę kłosów i toksyny (Mesterházy 1995); typ V – odporność na kumulację toksyn fuzaryjnych w ziarnie przez: 1 – chemiczną modyfikację toksyn (Kluger i wsp. 2015), 2 – blokowanie syntezy toksyn (Boutigny i wsp. 2008).

Odporność pszenicy na fuzariozę kłosów jest cechą ilościową (Bai i wsp. 2000). Odnotowano obecność licznych loci cech ilościowych (quantitative trait loci – QTL) związanych z odpornością na tę chorobę. Przy pomocy markerów molekularnych zidentyfikowano na każdym chromosomie pszenicy (z wyjątkiem 7D) przynajmniej jeden QTL tego typu (Buerstmayr i wsp. 2009). QTL-e wyjaśniające stosunkowo dużą zmienność w obrębie opisywanej cechy zlokalizowano na chromosomach 2DL, 3BS, 4B, 5AS i 6B (Buerstmayr i wsp. 2009). Wspomniane loci pochodzą ze źródeł azjatyckich, jak np. Sumai 3, Wuhan 1 i Nyubai oraz z Brazylii – Frontana. Jednym z najbardziej efektywnych genów odporności na fuzariozę kłosów jest *Fhb1* (dawniej oznaczony, jako *Qfhs.ndsu-3BS*) pochodzący z odmiany Sumai 3, który w różnych badaniach był w stanie wyjaśnić od 15 do 55% zmienności odnośnie rozprzestrzeniania się patogena w tkankach (typ odporności II) (Buerstmayr i wsp. 2009). Gen ten determinuje również odporność na toksyczne działanie deoksynivalenolu (DON) poprzez kodowanie transferazy glukozowej DON-u lub regulację ekspresji tego enzymu (Lemmens i wsp. 2005). Zgodnie z publikowanymi wynikami tylko *Fhb1* wykazuje stabilny wpływ na odporność typu II i V w różnych środowiskach i dla różnych

podłoży genetycznych, podczas gdy inne QTL-e dają słaby lub niestabilny efekt (Anderson i wsp. 2007).

Wprowadzenie genu *Fhb1* pozwala na istotne podniesienie poziomu odporności biorcy (np. wysoko plonującej odmiany pszenicy) na fuzariozę kłosów (Buerstmayr i wsp. 2008). Źródłem genu odporności jest najczęściej odmiana pszenicy jarej Sumai 3 lub formy pokrewne (Buerstmayr i wsp. 2002). Niestety odmiana ta wnosi wiele cech niekorzystnych pod względem agronomicznym, a dodatkowo występują trudne do przełamania sprzężenia genu *Fhb1* z innymi genami warunkującymi te cechy (Mesterházy i wsp. 2008). Trudności związane z wprowadzaniem genów odporności na fuzariozę kłosów powodują, że mimo wieloletnich prac zarejestrowano nieliczne komercyjne odmiany pszenicy z genem *Fhb1* (Anderson i wsp. 2015; Van Sanford i wsp. 2016). Są to jedynie odmiany pszenicy jarej. Brak jak na razie zarejestrowanych odmian pszenicy ozimej, co wynika z faktu, że wszystkie źródła genów odporności na fuzariozę kłosów o wysokim efekcie to formy jare.

Rozwiązaniem problemu niekorzystnych cech wnoszonych przez źródła odporności może być selekcja wspomaganą markerami (marker assisted selection – MAS) (Czembor i Słowacki 2014). Metoda ta pozwala na wprowadzenie genu odporności *Fhb1* do genotypów o wysokiej wartości agronomicznej i uniknięcie równoczesnego wprowadzania cech niekorzystnych. Wyżej wspomniane odmiany pszenicy jarej zostały uzyskane dzięki stosowaniu MAS. Prace nad pszenicą ozimą prowadzone są w wielu krajach, w tym w Polsce, w Instytucie Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym.

Celami badań były: ocena odporności linii pszenicy ozimej powstałych z krzyżowania odmian ozimych z pszenicą jarą Sumai 3; określenie obecności genu *Fhb1* w badanych liniach; określenie wpływu obecności genu *Fhb1* na odporność linii oraz na inne cechy fenotypowe, takie jak np. wysokość, wczesność i plon ziarna.

Materiały i metody / Materials and methods

Materiał roślinny / Plant material

Materiał badawczy stanowiły 52 linie pszenicy ozimej (pokolenie F₁₀) uzyskane z krzyżowań z odmianą pszenicy jarej Sumai 3 (linie S) oraz odmiany/linie wzorcowe (odporne – 20828, A40-19-1-2, Arina, Fregata, UNG 136.6.1.1; podatne – SMH 8694, SMH 8816; Tonacja) (tab. 1).

Tabela 1. Pochodzenie linii S oraz odmian i linii wzorcowych
Table 1. Origin of 'S' lines and standard cultivars and lines

Lp. No.	Linie/odmiany Lines/cultivars	Rodowód Pedigree
1	2	3
1	S1 – S7	Begra (= Grana × Bezostaja 1) × Sumai 3 (= Funo × Taiwanmai)
2	S8 – S29	Korweta (= CHD-3672-72-77 × Gama) × Sumai 3
3	S30 – S59	Turnia [= (Polanka × DED-739-75) × (Polanka × TAW-6505-74)] × Sumai 3
4	20828 ^{1,3}	Capo × Sumai 3

1	2	3
5	A40-19-1-2 ^{1,3}	Capo × SVP 72017-17-5-10-1
6	Arina ^{2,3}	Moisson × Zenith
7	Fregata	Kobra × Astron
8	UNG 136.6.1.1 ^{2,3}	(Sagvari × Nobeokabozu) × (Mini-Mano × Sumai 3)
9	SMH 8694 ³	SMH 7297 × Rapsodia
10	SMH 8816 ³	SMH 7293 × Rapsodia
11	Tonacja	Jubilatka × SMH 8134

¹Buerstmayr i wsp. 2008, ²Buerstmayr i wsp. 1999, ³Góral i wsp. 2015b

Linie S były w ciągu kilku lat selekcjonowane w doświadczeniach infekcyjnych w kierunku odporności na fuzariozę kłosów. Oceniano również odporność linii na inne patogeny, takie jak *Blumeria graminis* (DC.) E.O. Speer f. sp. *tritici* Em. Marchal (mączniak prawdziwy) i *Puccinia triticina* Erikss. & Henn (rdza brunatna). Rdza żółta (*Puccinia striiformis* Westend) na pszenicy ozimej pojawiła się w Radzikowie w roku 2014, jednakże nie obserwowano jej występowania w tym roku na liniach S. Dodatkowymi kryteriami selekcji były: wysokość roślin i podatność na wyleganie. Linie/pojedynki wysokie, wylegające lub podatne na patogeny powodujące choroby liści były odrzucane.

Doświadczenia polowe / Field experiment

Odporność na fuzariozę kłosów 52 linii pszenicy testowana była w warunkach polowych w Instytucie Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Radzikowie (województwo mazowieckie) oraz w Instytucie Genetyki Roślin Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu (pole doświadczalne Cerekwica, województwo wielkopolskie). Doświadczenia polowe zostały założone w październiku 2014 roku w układzie losowanych bloków. Pszenica wysiana była na poletkach o powierzchni 0,5 (Cerekwica) lub 1 m² (Radzików) w trzech powtórzeniach oraz w kombinacji kontrolnej (nieinokulowanej).

Do produkcji inokulum wykorzystano trzy izolaty *Fusarium culmorum* (KF 846, KF 350 i ZFR 112). Metodyka produkcji inokulum oraz pochodzenie izolatów zostało opisane w pracy Wiśniewskiej i wsp. (2014). Kłosa pszenicy w fazie kwitnienia opryskiwano zawiesiną zarodników o stężeniu 5 × 10⁵ zarodników/ml w ilości około 100 ml zawiesiny na 1 m². Inokulacja prowadzona była oddzielnie na każdym poletku na początku kwitnienia (BBCH 60) i powtarzana około 3 dni później w fazie pełni kwitnienia (BBCH 65). Inokulacje prowadzone były w godzinach wieczornych, kiedy wzrastała względna wilgotność powietrza. W Cerekwicy w celu uzyskania wysokiej wilgotności powietrza zastosowano po inokulacji przez 72 h mikrozaszycze, utrzymujące wysoką wilgotność powietrza. W Radzikowie doświadczenie prowadzono bez mikrozaszyczy, jednakże pole doświadczalne umiejscowione jest w pobliżu rzeki i obszar ten charakteryzuje się wysoką wilgotnością względną powietrza.

Ocenę rozpoczęto około 10 dni po ostatniej inokulacji. Przeprowadzono dwie oceny w odstępach 7-dniowych. Nasilenie fuzariozy kłosów było określane na podstawie proporcji porażonych kłosów w kłosie (tylko w kłosach

z objawami choroby) oraz proporcji kłosów porażonych na poletku. Z tych wartości został wyliczony indeks fuzariozy kłosów (IFK):

$$\text{IFK} = (\% \text{ porażonych kłosów w kłosie} \times \% \text{ kłosów porażonych na poletku}) / 100$$

Dodatkowo w Radzikowie określono plon ziarna linii S z 1 m² na poletkach kontrolnych po zbiorze za pomocą kombajnu poletkowego. Przeprowadzono również ocenę nasilenia rdzy żółtej powodowanej przez grzyb *P. striiformis* określając procent powierzchni liści z objawami choroby na wszystkich roślinach na poletku.

Badanie odporności typu I i typu II / Evaluation of resistance of type I and type II

W Radzikowie przebadano dodatkowo odporność na *F. culmorum* typu I (odporność na infekcję) oraz typu II (odporność na rozprzestrzenianie się *Fusarium* w kłosie). Do badań wybrano 23 linie S oraz 6 odmian/linii wzorcowych pszenicy ozimej (tab. 1). Do badań włączono również 3 podatne odmiany pszenicy: Belenus, Slade i Meister oraz wysoko podatną odmianę pszenicy twardej (*Triticum durum*) – Komnata. Założono dwa identyczne doświadczenia w dwóch tunelach foliowych wyposażonych w instalację zraszającą. Wysiewano po 20 ziarniaków na pojedynczych rzędkach o długości 1 m.

W celu określenia odporności typu I kłosa pszenicy opryskiwane były zawiesiną zarodników *F. culmorum*, natomiast w celu określenia odporności typu II zastosowana była metoda inokulacji punktowej kłosów (Góral i wsp. 2015a).

Odporność typu I oceniano stosując metodykę zbliżoną do opisanej przez Kubo i wsp. (2013) oraz metodykę Patton-Ozkurt i wsp. dostępną na stronie US Wheat and Barley Scab Initiative (http://scabusa.org/pdfs/ptt/cowger_type1-screening_protocol.pdf). W fazie pełni kwitnienia (BBCH 65) kłosa opryskiwano zawiesiną zarodników 3 izolatów *F. culmorum* o stężeniu 10⁵ zarodników/ml. Zastosowano izolaty wykorzystane w polowych doświadczeniach infekcyjnych: KF 846, ZFR16 i ZFR 112 (Góral i wsp. 2015b). Liczbę punktów infekcji (#pi) oceniano po 7 dniach od inokulacji na 10 kłosach na poletku, traktując kłosek z nekrozą, jako jeden pi. Po 21 dniach po inokulacji przeprowadzona została dodatkowo ocena indeksu fuzariozy kłosów.

Metodyka oceny odporności typu II była zbliżona do opisanej przez Bai, dostępnej na stronie US Wheat and Barley Scab Initiative (http://scabusa.org/pdfs/ptt/Bai_

Greenhouse-Screening.pdf). Kłosa inokulowano w fazie pełni kwitnienia (BBCH 65) przez umieszczanie kropli (około 50 µl) zawiesiny zarodników *F. culmorum* w środkowym kłosku wybranych kłosów za pomocą samonapełniającej się strzykawki. Stężenie zawiesiny wynosiło 50×10^3 zarodników/ml, co dawało około 2500 zarodników na kłosek. Zastosowano dwa izolaty: KF 846 i ZFR112. Każdym izolatem inokulowano po 5 kłosów danej odmiany/linii. Nasilenie fuzariozy kłosów oceniano przez określanie liczby kłosów z objawami choroby – liczba kłosów porażonych (#pk) 21 dni po inokulacji. Objawy te to nekrozy, bielienie kłosów, a w niektórych przypadkach zarodnikowanie *Fusarium* w postaci różowo-pomarańczowego nalotu.

Analiza występowania allelu markera molekularnego UMN10 blisko sprzężonego z genem *Fhb1* / Analysis of presence of the allele of the molecular marker UMN10 close linked to *Fhb1* gene

Materiał roślinny do analiz molekularnych prowadzono w kontrolowanych warunkach komory klimatycznej (16 godzin światła/22°C oraz 8 godzin ciemności/18°C). DNA wyizolowano z liści pięciu 2–3 tygodniowych roślin reprezentujących każdy z badanych obiektów, tj. 52 linii S, odmian rodzicielskich (Begra, Korweta, Sumai 3, Turnia) oraz dwóch wzorców 20828 i UNG 136.6.1.1, które miały w rodowodzie odmianę Sumai 3 (tab. 1).

Izolację DNA przeprowadzono przy zastosowaniu zestawu Nucleo Mag 96 (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, 52355 Düren, Niemcy) ze zmianami (Czembor i wsp. 2014) przy pomocy zautomatyzowanej stacji roboczej Freedom Evo (Tecan Group Ltd., Seestrasse 103, CH-8708 Männedorf, Szwajcaria). Obecność genu *Fhb1* stwierdzano na podstawie występowania produktu PCR długości 239 pz po amplifikacji locus markera UMN10 sprzężonym z typowanym genem (Liu i wsp. 2008). Mieszanina reakcyjna o objętości 8 µl zawierała następujące komponenty: 60 ng matrycy DNA, 1 U Taq polimerazy (Thermo Scientific, Fermentas GmbH, Niemcy), 1 × PCR bufor z domieszką $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (Fermentas), 2,5 mM MgCl_2 (Fermentas), 200 µM każdego z deoksynukleotydów (Fermentas) oraz po 0,5 µM każdego z pary starterów ($5'$ -CGTGGTTCCACGCTTCTTA-3' i $5'$ -TGAAGTTCATGCCACG CATA-3'). Jeden z pary starterów był znakowany barwnikiem fluorescencyjnym TET w formie amidofosforynu (ThermoFisher Scientific, Stany Zjednoczone). Amplifikację prowadzono w aparacie Mastercycler ep Gradient (Eppendorf GmbH, Niemcy) według programu: 94°C/3 min. wstępna denaturacja, 10 cykli składających się z etapów 94°C/30 s, 60°C/30 s i 72°C/1 min. oraz 30 cykli przy obniżonej temperaturze denaturacji do 90°C, reakcja kończyła się inkubacją 72°C/5 min.

Rozdział i analizę znakowanych produktów PCR prowadzono przy użyciu analizatora DNA ABI377XL (Applied Biosystems, Foster City, USA) wspomaganego oprogramowaniem GeneScan 3.1 (Applied Biosystems) stosując 4,5% denaturujący żel poliakrylamidowy (Long Ranger, Cambrex Bio Science, USA). Do nanoszenia mieszaniny poreakcyjnej na żel poliakrylamidowy stosowano grzebienie membranowe (100 zębów) zgodnie z zaleceniem producenta (Web Scientific Ltd., Wielka Brytania).

Analiza statystyczna / Statistical analysis

Analiza statystyczna została wykonana za pomocą pakietu Microsoft® Excel 2010/XLSTAT®-Pro (Version 2015.2.02.18135, Addinsoft, Inc., Brooklyn, NY, USA). Obliczono współczynniki korelacji (XLSTAT: *Correlation tests*). W celu zgrupowania linii na podstawie odporności na fuzariozę kłosów (średnie z dwóch lokalizacji) i rdzę żółtą oraz terminu kwitnienia (średnie z dwóch lokalizacji), wysokości roślin (średnie z dwóch lokalizacji) i plonu ziarna zastosowano metodę analizy składowych głównych (XLSTAT: *PCA*). Istotność różnic między grupami linii pod względem IFK, wysokości i plonu ziarna określono za pomocą testu Kruskala-Wallisa (XLSTAT: *Non-parametric tests – Comparison of k samples*). Porównania wielokrotne między grupami przeprowadzono za pomocą testu Steel-Dwass-Critchlow-Fligner. Wariancje populacji (n) obliczono za pomocą modułu XLSTAT: *Descriptive statistics*.

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Analiza występowania allelu 239 pz markera molekularnego UMN10 wykazała jego brak u odmian matecznych linii S czyli Begry, Korwety oraz Turni (tab. 2). Występowanie tego allelu zostało natomiast potwierdzone u odmiany ojcowskiej Sumai 3.

Wśród 52 analizowanych linii S u 29 (56%) stwierdzono obecność produktu PCR o długości 239 pz, czyli posiadały one gen *Fhb1* (tab. 2). U 20 (39%) linii stwierdzono obecność produktu PCR o długości 236 pz, czyli nie posiadały one typowanego genu odporności. Trzy linie (S 06, S 23, S 28) okazały się heterogenne, ponieważ analiza DNA roślin tych linii wykazała obecność obydwóch alleli w locus UMN10, tj. produktów PCR 239 pz i 236 pz.

Analiza dwóch linii wzorcowych o wysokiej odporności na fuzariozę kłosów wykazała obecność genu *Fhb1* u linii UNG 136.6.1.1 oraz jego brak u linii 20828.

W dwóch doświadczeniach w warunkach kontrolowanych przebadano odporność typu I i typu II u 23 linii S oraz 11 form wzorcowych (tab. 3). Średnia odporność typu I wyniosła 1,5 punktów infekcji (#pi), zakres zmienności od 1,0 do 2,7 #pi. Dla linii S było to średnio 1,4 #pi oraz 1,0–2,0 #pi. Maksymalna liczba punktów infekcji na pojedynczych kłosach wyniosła 3,0 #pi. Najwyższą odporność typu I wykazały linie: S 48 [Fhb1+], S 49 [Fhb1+], S 57 [Fhb1+] oraz odmiany wzorcowe: 20828 [Fhb1–] i Slade. Najniższa odporność została stwierdzona u linii: S 40 [Fhb1–], S 39 [Fhb1+], S 15 [Fhb1–] i S 23 [Fhb1+/-] oraz odmian wzorcowych – pszenicy twardej Komnata, odpornej – UNG 136.6.1.1 [Fhb1+] i podatnych: SMH 8816, SMH 8694, Belenus.

Średnia odporność typu II wyniosła 1,4 porażonych kłosów (#pk), zakres zmienności od 0,6 do 5,3 #pk (tab. 3). Dla linii S było to odpowiednio 0,9 oraz 0,7–1,3 #pk. Najwyższą odporność typu II wykazały linie: S 38 [Fhb1–] i S 45 [Fhb1+] oraz dwa wzorce odporne: A40-19-1-2 i UNG 136.6.1.1 [Fhb1+]. Dla 15 linii S porażenie kłosa wyniosło poniżej 1,0 #pk. Nekrozy obejmowały plewki w pojedynczych kwiatkach lub całe kwiatki.

Tabela 2. Występowanie produktów PCR w locus markera UMN10 blisko sprzężonego z genem *Fhb1* u 52 linii S, odmian rodzicielskich i wzorców odpornychTable 2. Presence of the resistance allele at the locus of UMN10 marker linked to *Fhb1* gene in 61 'S' lines, parental cultivars and resistant control standards

Allel 239 pz ¹ Allele 239 bp ¹	Allel 236 pz ² Allele 236 bp ²	Allel 239 pz/allel 236 pz ³ Allele 239 bp/allele 236 bp ³
Sumai 3; S 01; S 02; S 03; S 04; S 05; S 10; S 11; S 12; S 13; S 26; S 27; S 29; S 30; S 32; S 33; S 39; S 42; S 43; S 44; S 45; S 46; S 48; S 50; S 51; S 52; S 55; S 56; S 57; S 59; UNG 136.6.1.1	Begra; Korweta; Turnia; S 07; S 08; S 09; S 14; S 15; S 16; S 18; S 19; S 20; S 21; S 22; S 24; S 25; S 31; S 34; S 35; S 37; S 38; S 40; S 41; 20828	S 06; S 23; S 28

¹amplifikacja allelu 239 pz w locus markera UMN10 świadczy o występowaniu genu odporności *Fhb1*, ²amplifikacja allelu 236 pz w locus markera UMN10 świadczy o braku występowania genu odporności *Fhb1*, ³linie heterogenne

¹amplification of allele 239 bp in locus of marker UMN10 indicates the presence of resistance gene *Fhb1*, ²amplification of allele 236 bp in locus of marker UMN10 indicates the absence of resistance gene *Fhb1*, ³heterogenic lines

Tabela 3. Odporność typów I i II na fuzariozę kłosów dla 23 linii S oraz odmian i linii wzorcowych

Table 3. Resistance of type I and II to Fusarium head blight for 23 lines 'S' and standard cultivars/lines

Lp. No.	Linia/odmiana Line/cultivar	Typ I [#pi] ¹ Type I [#ip] ¹	Typ II [#pk] ² Type II [#is] ²	Typ I + II Type I + II	IFK [%] ³ FHBi [%] ³
1	2	3	4	5	6
1	S 48	1,0	0,8	0,9	21
2	S 49	1,0	0,8	0,9	21
3	S 45	1,1	0,7	0,9	14
4	A40-19-1-2 (R)	1,2	0,6	0,9	16
5	S 57	1,0	0,8	0,9	16
6	S 43	1,1	0,8	0,9	32
7	S 55	1,2	0,8	1,0	16
8	S 53	1,1	0,9	1,0	16
9	20828 (R)	1,0	1,1	1,0	24
10	S 11	1,3	0,8	1,0	24
11	S 42	1,4	0,8	1,1	32
12	S 38	1,5	0,7	1,1	32
13	S 44	1,3	0,9	1,1	28
14	S 32	1,4	0,9	1,2	24
15	S 04	1,4	1,0	1,2	32
16	S 05	1,2	1,2	1,2	24
17	S 50	1,6	0,8	1,2	32
18	S 52	1,1	1,3	1,2	28
19	S 47	1,5	1,0	1,2	28
20	Turnia	1,1	1,2	1,2	54
21	S 46	1,6	0,9	1,3	32
22	Arina (R)	1,2	1,3	1,3	32
23	UNG 136.6.1.1 (R)	1,9	0,7	1,3	28
24	S 39	1,8	0,9	1,3	40
25	S 30	1,5	1,2	1,4	32
26	S 40	1,7	1,0	1,4	56
27	S 23	2,0	0,8	1,4	32
28	S 15	1,9	1,2	1,6	48
29	SMH 8816 (S)	2,3	2,1	2,2	90

1	2	3	4	5	6
30	Slade	1,0	3,8	2,4	72
32	SMH 8694 (S)	2,4	2,5	2,5	90
32	Belenus	2,7	2,2	2,5	100
33	Meister	1,3	5,3	3,3	64
34	Komnata (<i>T. durum</i>)	1,7	5,0	3,4	100
Średnia dla linii – Means for lines		1,4	0,9	1,2	28,7
Średnia – Mean		1,5	1,4	1,4	39,1

¹liczba punktów infekcji (#pi), ²liczba porażonych kłosków (#pk), ³indeks fuzariozy kłosów w warunkach prowokacyjnych
¹number of infection points (#ip), ²number of infected spikelets (#is), ³Fusarium head blight index under provocative conditions

Taki stopień porażenia był oceniany jako 0,5 #pk. Najniższa odporność została stwierdzona u wzorców podatnych – SMH 8816 i SMH 8694 oraz odmian: Belenus, Slade, Komnata (*T. durum*) i Meister. Spośród linii S najniższą odporność typu II posiadały – S 05 [Fhb1+], S 30 [Fhb1+], S 15 [Fhb1–] i S 52 [Fhb1+].

Najwyższą średnią odporność obu typów wykazały linie: S 43, S 45, S 48, S 49 i S 57 (wszystkie posiadające gen *Fhb1*) oraz wzorzec odporny – A40-19-1-2. Najniższą średnią odpornością charakteryzowały się wzorce podatne – SMH 8816 i SMH 8694 oraz odmiany: Slade, Belenus, Meister, Komnata (*T. durum*). Spośród linii S najniższą średnią odporność obu typów posiadały – S 40 [Fhb1–], S 23 [Fhb1+/-], S 30 [Fhb1+] i S 15 [Fhb1–].

Indeks fuzariozy kłosów w warunkach kontrolowanych wyniósł 39,1%, zakres zmienności cechy 14,0–100%. Najbardziej porażone były kłosa linii: S 45, S 57, S 55, S 53 (wszystkie posiadające gen *Fhb1*) oraz wzorca odpornego – A40-19-1-2. Najsilniej porażone były formy podatne: SMH 8816, SMH 8694 oraz odmiana Belenus i pszenica twarda Komnata. Wśród linii S najsilniej porażone były kłosa linii nieposiadających genu *Fhb1* – S 15 i S 40.

Brak było korelacji obu typów odporności ($r = 0,246$). Odporności typu I i II korelowały istotnie ($p < 0,001$) z IFK w warunkach kontrolowanych – odpowiednio $r = 0,634$ i $r = 0,790$. Najwyższe wartości przyjmował współczynnik korelacji IFK ze średnią odpornością obu typów ($r = 0,888$).

Linie S wysoko odporne w warunkach polowych wykazały odporność typu I zbliżoną do podatnych odmian: Slade, Meister lub Komnata. Można to tłumaczyć mechanizmem działania genu *Fhb1*. Stwierdzono, że ekspresja genu *Fhb1* zachodzi w późniejszym etapie infekcji kłosa przez *Fusarium* (maksimum po 7 dniach) (Kosaka i wsp. 2015). Efektem tego jest tworzenie się nekroz na kłoskach w kłosie odmiany Sumai 3 lub odmian pokrewnych inokulowanych przez opryskiwanie zawiesiną *Fusarium* w warunkach prowokacyjnych. Uruchomienie mechanizmów odpornościowych powoduje jednakże zahamowanie rozprzestrzeniania się grzyba na kolejne kłoski. Stąd obserwowana względnie niska odporność na infekcję (typ I) niektórych linii S lub wzorca UNG 136.6.1.1. Wysoka odporność typu II tych genotypów dała w efekcie niską podatność na fuzariozę kłosów w warunkach polowych. Należy pamiętać, że ocena odporności typu I jest trudna ze względu na wpływ czynników, które modyfikują uzyskiwane wyniki. Takim czynnikiem jest typ

kwitnienia zbóż – otwarty, zamknięty lub mieszany (Kubo i wsp. 2010; Skinnis i wsp. 2010; Lu i wsp. 2013). Najbardziej porażane są genotypy o typie zamkniętym, natomiast najsilniej genotypy o mieszanym typie kwitnienia (Kubo i wsp. 2013).

Linie S wykazały małą podatność na fuzariozę kłosów w warunkach polowych (tab. 4). Średni IFK wyniósł 3,4%. Zakres zmienności cechy mieścił się w granicach 1,0–6,0%. Najwyższą odpornością charakteryzowało się 5 linii uzyskanych z mieszańca Turnia × Sumai 3. Linie te zawierały gen *Fhb1*. Wysoko odporne były również linie, u których nie stwierdzono obecności genu *Fhb1*, takie jak np. S 31, S 38, S 08. Najwyższą podatność wykazało 5 linii. Jedną z tych linii – S 26 – posiadała gen *Fhb1*, natomiast u pozostałych obecności genu nie stwierdzono. Odporność 30 linii była wyższa niż odporność wzorca UNG 136.6.1.1 zawierającego gen *Fhb1*. Wyższą odporność w warunkach polowych wykazał wzorzec 20828, który nie posiadał genu *Fhb1*. Indeks fuzariozy kłosów dla 23 linii S był niższy niż obserwowany dla tego wzorca.

Indeks fuzariozy kłosów dla linii posiadających gen *Fhb1* wyniósł 2,9%, natomiast dla linii bez tego genu – 4,0%. Różnica między grupami była istotna statystycznie. Zmienność IFK w obu grupach była zbliżona. Wariancja cechy wyniosła odpowiednio 1,167 i 1,248. Trzy grupy linii w zależności od odmiany maticznej charakteryzowały się podobnym średnim IFK. Dla odmiany Begra było to 3,3%, dla odmiany Korweta – 3,6% oraz dla odmiany Turnia – 3,2%. Różnice między grupami były nieistotne. Największą zmienność IFK odnotowano dla linii uzyskanych z odmiany Turnia (wariancja 2,185), najniższą dla linii uzyskanych z odmiany Begra (wariancja 0,212).

Linie posiadające gen *Fhb1* wykazywały niższą podatność w porównaniu do linii nieposiadających tego genu. W obu grupach wystąpiła jednakże zmienność reakcji i zidentyfikowano linie o wysokiej odporności przewyższającej formy wzorcowe. W przypadku pierwszej grupy był to efekt ekspresji genu *Fhb1*. W przypadku drugiej grupy mogła nastąpić kumulacja innych genów/loci odporności występujących u odmiany Sumai 3 (Buerstmayr i wsp. 2009). Udział w zwiększaniu odporności mogły mieć również loci odporności o niskim efekcie obecne u odmian maticznych. Występowanie takich loci w europejskiej puli genetycznej pszenicy ozimej zostało już stwierdzone (Miedaner i wsp. 2011; Kollers i wsp. 2013).

Tabela 4. Termin pełni kwitnienia, wysokość roślin, plon ziarna z poletka oraz indeksy fuzariozy kłosów (IFK) dla 52 linii pszenicy ozimej badanych w doświadczeniach infekcyjnych w Radzikowie i Poznaniu (Cerekwica) w roku 2015

Table 4. Full flowering time, plant height, grain yield and Fusarium head blight index (FHBi) for 52 lines of winter wheat evaluated in field experiments in Radzików and Cerekwica (Poznań) in 2015

Lp. No.	Linia/odmiana Line/cultivar	Kłos ¹ Spike ¹	Kwitnienie [dni] Flowering time [Julian days]	Wysokość roślin Plant height [cm]	Plon ziarna ² Grain yield ² [kg]	IFK FHBi [%]	Rdza żółta ² Yellow rust ² [%]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	S 55	O	158	118,7	0,673	1,0	0
2	S 45	O	158	120,3	0,741	1,3	5
3	S 46	O	158	120,0	0,536	1,3	5
4	S 48	O	159	117,7	0,538	1,5	0
5	S 44	O	157	110,3	0,699	1,7	5
6	S 52	O	158	124,7	0,722	2,2	5
7	S 31	B	157	107,0	0,784	2,2	0
8	S 38	O	158	116,0	0,727	2,3	0
9	S 10	O	156	106,3	0,745	2,3	0
10	S 50	O	158	117,7	0,648	2,3	5
11	S 59	O	157	122,0	0,442	2,5	20
12	S 08	B	156	96,7	0,594	2,5	0
13	S 28	O	156	114,3	1,097	2,5	0
14	S 01	B	158	126,7	0,460	2,5	5
15	S 13	O	156	91,7	0,623	2,5	0
16	S 32	B	156	114,3	0,990	2,6	0
17	S 56	B	158	123,3	0,562	2,8	0
18	S 09	B	156	110,3	0,834	2,8	5
19	S 29	O	157	108,7	1,081	2,8	0
20	S 39	B	159	119,3	0,520	2,8	5
21	S 51	O	157	121,0	0,647	2,8	0
22	S 02	B	158	126,0	0,461	3,0	10
23	S 23	B	155	116,3	0,819	3,0	0
24	S 11	O	156	102,3	0,828	3,0	0
25	S 03	B	157	125,0	0,520	3,1	10
26	S 25	B	156	115,3	0,869	3,1	0
27	20828 (R)	O	156	114,0	–	3,1	10
28	S 12	O	156	100,3	0,750	3,1	0
29	S 04	B	157	124,7	0,416	3,3	10
30	S 24	B	155	122,0	1,084	3,3	0
31	S 19	O	156	107,0	0,719	3,5	0
32	S 05	B	157	122,0	0,510	3,6	20
33	UNG 136.6.1.1 (R)	O	156	120,3	–	3,6	0
34	S 57	B	158	125,3	0,637	3,7	0
35	S 30	O	157	110,3	1,125	3,7	0
36	S 06	B	157	116,7	0,643	3,8	5
37	Fregata (R)	B	160	105,0	–	3,8	5
38	S 07	B	156	117,3	0,749	3,8	5
39	S 16	O	156	111,3	0,771	4,0	0
40	S 15	O	157	110,0	0,713	4,1	0
41	S 27	O	156	117,3	0,917	4,1	0
42	S 20	O	156	106,7	0,692	4,2	0
43	S 18	O	156	111,7	0,830	4,3	0

1	2	3	4	5	6	7	8
44	S 37	O	157	99,3	0,567	4,3	0
45	S 14	O	157	106,7	0,752	4,5	0
46	A40-19-1-2 (R)	O	161	104,3	–	4,5	0
47	S 21	O	157	118,3	0,973	4,7	0
48	S 43	O	158	108,3	0,370	4,7	20
49	S 35	O	157	111,7	0,799	4,7	5
50	S 42	O	159	109,7	0,465	4,8	5
51	S 33	B	156	123,7	1,071	4,9	0
52	S 40	B	158	112,3	0,657	5,0	20
53	S 26	O	157	113,7	1,079	5,2	0
54	S 41	B	157	118,3	0,607	5,6	0
55	S 22	O	156	110,3	0,975	5,8	0
56	S 34	O	157	112,0	0,828	6,0	0
57	Arina (R)	B	157	115,0	–	6,5	0
58	Tonacja	B	158	106,9	1,102	9,5	5
59	SMH 8694 (S)	B	157	84,0	–	21,5	0
60	SMH 8816 (S)	B	157	86,0	–	21,9	0
Średnie dla linii Means for lines			156,9	114,2	0,728	3,4	3,3

R – wzorce odporne, S – wzorce podatne, ¹O – ościsty, B – bezostny, ²wyniki z Radzikowa
R – resistant checks, S – susceptible checks, ¹O – awned, B – awnless, ²results from Radzików

Linie S charakteryzowały się dość dużą wysokością roślin wynoszącą średnio 114,2 cm (zakres zmienności 91,7–126,7 cm) (tab. 4). Jedynie 3 linie (S 08, S 13, S 37) były niższe niż 100 cm. Osiem linii było niższych od odmiany Fregata, natomiast 11 niższych od odmiany Tonacja. Średnia wysokość linii z genem *Fhb1* wyniosła 116,3 cm, natomiast bez genu – 111,0 cm. Różnica między grupami była istotna statystycznie. Zakres zmienności w pierwszej grupie wynosił 91,7–126,7 cm, a w drugiej było to 96,7–122,0 cm. Połowa linii w pierwszej grupie miała wysokość powyżej 118,7 cm, dla drugiej grupy było to jedynie 111,5 cm. Dla 53 odmian pszenicy znajdujących się w rejestrze Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych średnia wysokość w tych samych warunkach wyniosła 98,6 cm.

Trzy grupy linii w zależności od odmiany matecznej charakteryzowały się zróżnicowaną wysokością. Dla odmiany Begra było to 122,6 cm, dla odmiany Korweta – 109,4 cm oraz dla odmiany Turnia – 116,0 cm. Różnice między grupami były istotne statystycznie. Największą zmienność wysokości odnotowano dla linii uzyskanych z krzyżowania z odmianami Korweta i Turnia (wariancja odpowiednio 53,885 i 42,289), a najniższą dla linii uzyskanych z krzyżowania z odmianą Begra (wariancja 16,905).

Plon ziarna był zróżnicowany i wynosił średnio 0,728 kg (tab. 4). Wartość cechy wahała się w granicach 0,370–1,125 kg. Najniższy plon ziarna (poniżej 0,5 kg) zanotowano u 6 linii uzyskanych z mieszańców Begra × Sumai 3 i Turnia × Sumai 3, posiadających gen *Fhb1*. Najwyższy plon ziarna (powyżej 1 kg) stwierdzono u 6 linii uzyskanych z mieszańców Korweta × Sumai 3 i Turnia

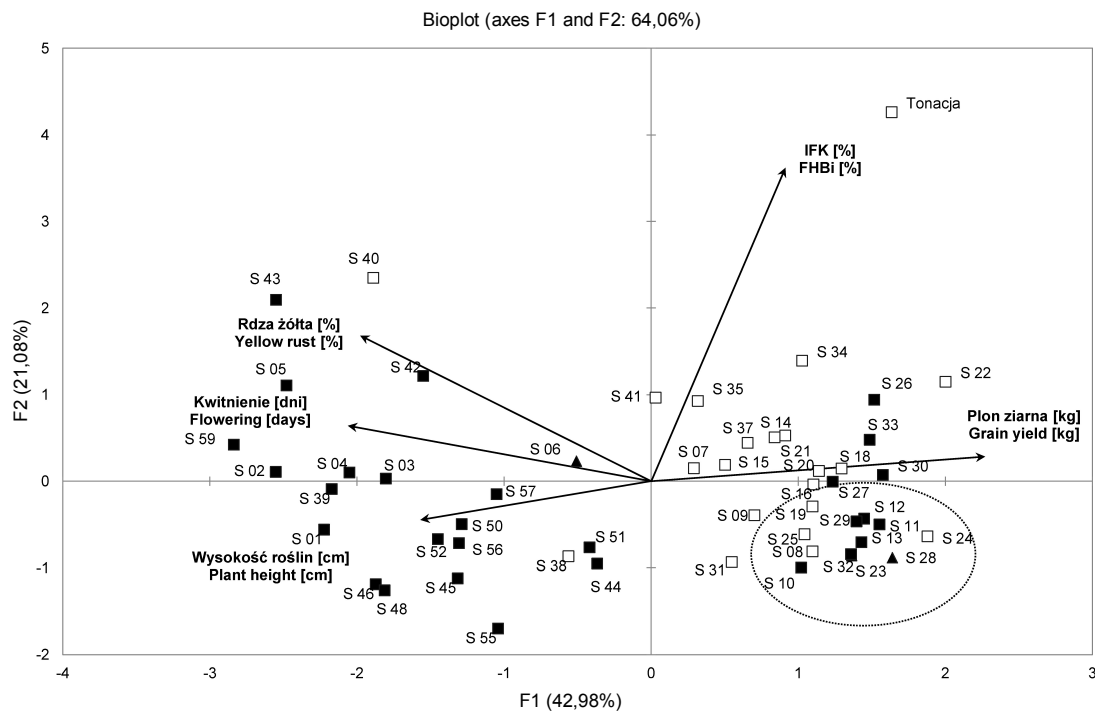
× Sumai 3. Plon ten był zbliżony do plonu dla odmiany Tonacja (1,102 kg).

Średni plon ziarna linii z genem *Fhb1* wyniósł 0,682 kg, natomiast bez genu – 0,776 kg. Różnica między grupami była istotna statystycznie. Zakres zmienności w pierwszej grupie wynosił 0,370–1,125 kg, w drugiej było to 0,567–1,084 kg. Zmienność plonu była wyższa w grupie linii z genem *Fhb1*. Wariancja cechy wyniosła odpowiednio 0,049 i 0,017.

Trzy grupy linii w zależności od odmiany matecznej charakteryzowały się zróżnicowanym plonem ziarna. Dla odmiany Begra było to 0,531 kg, dla odmiany Korweta – 0,845 kg oraz dla odmiany Turnia – 0,681 kg. Różnica plonu między liniami uzyskanymi z odmiany Korweta a pozostałymi była istotna statystycznie. Największą zmienność plonu odnotowano dla linii uzyskanych z odmian Turnia i Korweta (wariancja odpowiednio 0,035 i 0,024), a najniższą dla linii uzyskanych z odmiany Begra (wariancja 0,014).

Podatność na rdzę żółtą zaobserwowano u 19 linii, w tym wszystkich linii (7) uzyskanych z krzyżowania z odmianą Begra (tab. 4). W przypadku linii uzyskanych z krzyżowania z odmianą Korweta małe nasilenie rdzy żółtej obserwowano u jednej linii. Najwyższa była podatność 4 linii – S 05, S 40, S 43, S 59. Występowanie rdzy żółtej na liściach miało istotny, negatywny wpływ na plon ziarna. Współczynnik korelacji obu cech wynosił $r = -0,624$.

Średni termin pełni kwitnienia linii S w dwóch lokalizacjach wynosił 156,9 dnia (tab. 4). Rozpiętość terminu kwitnienia wynosiła 4 dni. Najwcześniejsze były linie: S 23 i S 24 (155 dni), najpóźniejsze to linie: S 39, S 42



Rys. 1. Układ współrzędnych dwóch składowych głównych dla 52 linii S pszenicy ozimej oraz odmiany Tonacja. Składowe wyjaśniają 64,06% zmienności terminu kwitnienia, wysokości roślin, plonu ziarna, odporności na fuzariozę kłosów (IFK) oraz odporności na rdzę żółtą (patrz tab. 4). Okręgiem oznaczono linie kumulujące wszystkie korzystne cechy

■ – linie zawierające gen *Fhb1*, □ – linie bez genu *Fhb1*, ▲ – linie heterogenne

Fig. 1. Biplot of the principal component analysis for 52 winter wheat lines 'S' and cultivar Tonacja. Two first components explained 64.06% of variability of flowering time, plant height, grain yield, FHB index (FHBi) and yellow rust resistance (Tab. 4). Lines combining all positive characters marked with circle

■ – lines containing *Fhb1* gene, □ – lines without *Fhb1* gene, ▲ – heterogenic lines

i S 48 (159 dni). Średni termin kwitnienia linii z genem *Fhb1* wyniósł 157,3 dni, natomiast bez genu – 156,6 dni. Różnica między grupami była istotna statystycznie. Trzy grupy linii w zależności od odmiany matecznej charakteryzowały się zróżnicowanym terminem kwitnienia. Dla odmiany Begra było to 157,0 dni, dla odmiany Korweta – 156,3 dnia oraz dla odmiany Turnia – 157,5 dnia. Różnice między liniami uzyskanymi z krzyżowania z odmianami Korweta i Turnia były istotne statystycznie. Późniejszy termin kwitnienia negatywnie wpływał na plon ziarna linii. Współczynnik korelacji cech wyniósł $r = -0,565$.

Linie uzyskane z krzyżowania bezostnych polskich odmian z ościstą odmianą Sumai 3 miały oba typy kłosa. Większość linii (32) miała kłos ościsty, natomiast kłos bezostny miało 20 linii (w tym wszystkie linie z mieszańca Begra × Sumai 3). Nie znaleziono zależności między obecnością genu *Fhb1* a ościstością kłosa.

Za pomocą analizy składowych głównych stwierdzono, że część linii S łączyła korzystne cechy, takie jak: odporność na fuzariozę kłosów, odporność na rdzę żółtą, wysoki plon ziarna, wczesność oraz wysokość roślin na poziomie odmiany Tonacja (rys. 1). Były to linie: nieposiadające genu *Fhb1* – S 08, S 16, S 19, S 24, S 25; posiadające gen *Fhb1* – S 10, S 11, S 12, S 13, S 27, S 29, S 30, S 32 i linie heterogenne – S 23, S 28. Wyniki te pokazują, że jest możliwe uzyskanie drogą selekcji segregantów o wysokiej odporności i korzystnych cechach agronomicznych. Linie takie zawierają gen(y) odporności

wprowadzone ze źródeł odporności (np. *Fhb1*), ale równocześnie identyfikowane są linie pozbawione tych genów. W pracy Clark i wsp. (2016) stwierdzono, że na 43 linie o wysokiej odporności na fuzariozę kłosów i akumulację DON 6 linii nie posiadało żadnego z 2 wprowadzanych genów odporności (*Fhb1*, *QFhs.nau-2DL*), natomiast pozostałe posiadały obydwa lub pojedyncze geny. Badania odmian i materiałów hodowlanych pszenicy ozimej w Stanach Zjednoczonych pozwoliły na zidentyfikowanie około 5% genotypów wysoko odpornych na fuzariozę kłosów nieposiadających genu *Fhb1* (Jin i wsp. 2013). Autorzy obserwowali również genotypy posiadające gen *Fhb1* wykazujące podatność na fuzariozę kłosów, co wskazuje na różną ekspresję genu w różnych podłożach genetycznych i konieczność stosowania selekcji fenotypowej równocześnie z selekcją molekularną.

Wnioski / Conclusions

1. Obecność genu *Fhb1* stwierdzono u 56% badanych linii za pomocą markera molekularnego UMN10 blisko sprzężonego z tym genem.
2. Badane linie miały średnio wysoką odporność typu II (pojedyncza plewka lub jeden kłosek z objawami nekrozy – brak rozprzestrzeniania się patogena), natomiast wystąpiło zróżnicowanie odporności typu I (od 1 do 3 punktów infekcji).

3. Linie posiadające gen odporności *Fhb1* miały średnio wyższą odporność na grzyb *F. culmorum* powodujący fuzariozę kłosów, większą wysokość roślin oraz niższy plon ziarna w porównaniu do linii pozbawionych tego genu.
4. W obu grupach linii (linie z genem i bez genu *Fhb1*) zidentyfikowano formy o bardzo wysokiej odporności, małej wysokości roślin oraz wysokim plonie ziarna.

Literatura / References

- Anderson J.A., Chao S., Liu S. 2007. Molecular breeding using a major QTL for Fusarium head blight resistance in wheat. *Crop Science* 47: S112–S119.
- Anderson J.A., Wiersma J.J., Linkert G.L., Reynolds S., Kolmer J.A., Jin Y., Dill-Macky R., Hareland G.A. 2015. Registration of 'Rollag' spring wheat. *Journal of Plant Registrations* 9 (2): 201–207.
- Bai G.H., Shaner G., Ohm H. 2000. Inheritance of resistance to *Fusarium graminearum* in wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 100: 1–8.
- Bottalico A., Perrone G. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology* 108: 611–624.
- Boutigny A.-L., Richard-Forget F., Barreau C. 2008. Natural mechanisms for cereal resistance to the accumulation of *Fusarium* trichothecenes. *European Journal of Plant Pathology* 121: 411–423.
- Buerstmayr H., Ban T., Anderson J.A. 2009. QTL mapping and marker-assisted selection for Fusarium head blight resistance in wheat: A review. *Plant Breeding* 128: 1–26.
- Buerstmayr H., Lemmens M., Berlakovich S., Ruckebauer P. 1999. Combining ability of resistance to head blight caused by *Fusarium culmorum* (W.G. Smith) in the F₁ of a seven parent diallel of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica* 110: 199–206.
- Buerstmayr H., Lemmens M., Hartl L., Doldi L., Steiner B., Stierschneider M., Ruckebauer P. 2002. Molecular mapping of QTLs for Fusarium head blight resistance in spring wheat. I. Resistance to fungal spread (type II resistance). *Theoretical and Applied Genetics* 104: 84–91.
- Buerstmayr H., Lemmens M., Schmolke M., Zimmermann G., Hartl L., Mascher F., Trottet M., Gosman N.E., Nicholson P. 2008. Multi-environment evaluation of level and stability of FHB resistance among parental lines and selected offspring derived from several European winter wheat mapping populations. *Plant Breeding* 127: 325–332.
- Clark A.J., Sarti-Dvorjak D., Brown-Guedira G., Dong Y., Baik B., Van Sanford D.A. 2016. Identifying rare FHB-resistant segregants in intraspecific backcross and F₂ winter wheat populations. *Frontiers in Microbiology* 7: 1–14.
- Czembor P.C., Sejbuk K., Kleszcz R. 2014. Evaluation of a partially-automated magnetic bead-based method for DNA extraction for wheat and barley MAS. *Cereal Research Communications* 42: 27–37.
- Czembor P.C., Słowacki P. 2014. Marker assisted backcrossing for Fusarium head blight resistance and high grain protein content in winter wheat. p. 251. *Cereals for Food, Feed and Fuel – Challenge for Global Improvement; Joint EUCARPIA Cereal Section & I•T•M•I Conference*. Germany, Wernigerode, 29.06–04.07.2014, 359 pp.
- Foroud N.A., Eudes F. 2009. Trichothecenes in cereal grains. *International Journal of Molecular Sciences* 10: 147–173.
- Góral T., Walentyn-Góral D., Wiśniewska H. 2015a. Odporność typu I i II pszenicy i pszenżyta na fuzariozę kłosów. [Fusarium head blight resistance of types I and II in wheat and triticale]. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 277: 33–45.
- Góral T., Ochodzki P., Walentyn-Góral D., Belter J., Majka M., Kwiatek M., Wiśniewska H., Bogacki J., Drzazga T., Ługowska B., Matysik P., Witkowski E., Rubrycki K., Woźna-Pawlak U. 2015b. Odporność genotypów pszenicy ozimej na fuzariozę kłosów i akumulację toksyn fuzaryjnych w ziarnie scharakteryzowana za pomocą różnych typów odporności. [Resistance of winter wheat lines to Fusarium head blight and *Fusarium* toxins accumulation characterized using different types of resistance]. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 276: 19–37.
- Jin F., Zhang D., Bockus W., Baenziger P.S., Carver B., Bai G. 2013. Fusarium head blight resistance in U.S. winter wheat cultivars and elite breeding lines. *Crop Science* 53: 2006–2013.
- Kluger B., Bueschl C., Lemmens M., Michlmayr H., Malachova A., Koutnik A., Maloku I., Berthiller F., Adam G., Krska R., Schuhmacher R. 2015. Biotransformation of the mycotoxin deoxynivalenol in *Fusarium* resistant and susceptible near isogenic wheat lines. *PLoS ONE* 10: e0119656.
- Kollers S., Rodemann B., Ling J., Korzun V., Ebmeyer E., Argillier O., Hinze M., Plieske J., Kulosa D., Ganai M.W., Röder M.S. 2013. Whole genome association mapping of Fusarium head blight resistance in European winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLoS ONE* 8: e57500.
- Kosaka A., Manickavelu A., Kajihara D., Nakagawa H., Ban T. 2015. Altered gene expression profiles of wheat genotypes against Fusarium head blight. *Toxins* 7: 604–620.
- Kubo K., Fujita M., Kawada N., Nakajima T., Nakamura K., Maejima H., Ushiyama T., Hatta K., Matsunaka H. 2013. Minor differences in anther extrusion affect resistance to Fusarium head blight in wheat. *Journal of Phytopathology* 161: 308–314.
- Kubo K., Kawada N., Fujita M., Hatta K., Oda S., Nakajima T. 2010. Effect of cleistogamy on Fusarium head blight resistance in wheat. *Breeding Science* 60: 405–411.
- Lemmens M., Scholz U., Berthiller F., Dall'Asta C., Koutnik A., Schuhmacher R., Adam G., Buerstmayr H., Mesterházy A., Krska R., Ruckebauer P. 2005. The ability to detoxify the mycotoxin deoxynivalenol colocalizes with a major quantitative trait locus for Fusarium head blight resistance in wheat. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 18: 1318–1324.
- Liu S.X., Pumphrey M.O., Gill B.S., Trick H.N., Zhang J.X., Dolezel J., Chalhouf B., Anderson J.A. 2008. Toward positional cloning of *Fhb1*, a major QTL for Fusarium head blight resistance in wheat. *Cereal Research Communications* 36: 195–201.
- Lu Q., Lillemo M., Skinner H., He X., Shi J., Ji F., Dong Y., Bjørnstad A. 2013. Anther extrusion and plant height are associated with Type I resistance to Fusarium head blight in bread wheat line „Shanghai-3/Catbird”. *Theoretical and Applied Genetics* 126: 317–334.

- Mesterházy Á. 1995. Types and components of resistance to Fusarium head blight of wheat. *Plant Breeding* 114: 377–386.
- Mesterhazy A., Bartok T., Mirocha C.G., Komoroczy R. 1999. Nature of wheat resistance to Fusarium head blight and the role of deoxynivalenol for breeding. *Plant Breeding* 118: 97–110.
- Mesterházy A., Tóth B., Bartók T., Varga M. 2008. Breeding strategies against FHB in winter wheat and their relation to type I resistance. *Cereal Research Communications* 36: 37–43.
- Miedaner T., Würschum T., Maurer H.P., Korzun V., Ebmeyer E., Reif J.C. 2011. Association mapping for Fusarium head blight resistance in European soft winter wheat. *Molecular Breeding* 28: 647–655.
- Schroeder H.W., Christensen J.J. 1963. Factors affecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology* 53: 831–838.
- Skinnes H., Semagn K., Tarkegne Y., Marøy A.G., Bjørnstad Å. 2010. The inheritance of anther extrusion in hexaploid wheat and its relationship to Fusarium head blight resistance and deoxynivalenol content. *Plant Breeding* 129: 149–155.
- Snijders C.H.A. 2004. Resistance in wheat to *Fusarium* infection and trichothecene formation. *Toxicology Letters* 153: 37–46.
- Van Sanford D.A., Clark A.J., Hershman D., Brown-Guedira G.L., Cowger C., Dong Y., Baik B.-K. 2016. Registration of „Pembroke 2014” soft red winter wheat. *Journal of Plant Registrations* 10: 41–46.