

TOMASZ GÓRAL ¹
PIOTR OCHODZKI ¹
DOROTA WALENTYN-GÓRAL ¹
JOLANTA BELTER ²
MACIEJ MAJKA ²
MICHAŁ KWIATEK ²
HALINA WIŚNIEWSKA ²
JERZY BOGACKI ³
TADEUSZ DRZAZGA ⁴
BOGUSŁAWA ŁUGOWSKA ³
PRZEMYSŁAW MATYSIK ⁵
EDWARD WITKOWSKI ⁶
KRZYSZTOF RUBRYCKI ⁷
URSZULA WOŹNA-PAWLAK ⁷

¹ Zakład Fitopatologii, Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — PIB, Radzików

² Zakład Genomiki, Instytut Genetyki Roślin PAN, Poznań

³ DANKO Hodowla Roślin, Choryń

⁴ Małopolska Hodowla Roślin HBP, Kraków

⁵ Hodowla Roślin Strzelce, Strzelce

⁶ Hodowla Roślin Smolice, Smolice

⁷ Poznańska Hodowla Roślin, Tulce

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

W doświadczeniach infekcyjnych w warunkach polowych w Radzikowie i Poznaniu/Cerekwicy
badano odporność na fuzariozę kłosów 224 genotypów oraz 10 odmian/linii wzorcowych pszenicy

* Badania finansowano częściowo ze środków projektu MRiRW: Badania Podstawowe na rzecz Postępu
Biologicznego w Produkcji Roślinnej; decyzja HORhn-801-12/14; lp. 6
Praca przedstawiona na konferencji IHAR — PIB, Zakopane, 3 lutego 2015 roku

Redaktor prowadzący: Barbara Zagdańska

ozimej. Genotypy te pochodziły z programów hodowlanych pszenicy ozimej oraz z kolekcji utworzonej w wyniku badań nad odpornością na fuzariozę kłosów w latach 2008–2013. Kłosa pszenicy inokulowane były izolatami *Fusarium culmorum*. Oceniano porażenie kłosa oraz stopień uszkodzenia ziarniaków. W ziarnie wybranych 61 genotypów analizowano zawartość ergosterolu, trichotecenów z grupy B oraz zearalenonu. Genotypy pszenicy były istotnie zróżnicowane pod względem odporności na fuzariozę kłosów. Średni indeks fuzariozy wyniósł 23,7%. Stwierdzono istotny wpływ wysokości roślin na wartość indeksu fuzariozy kłosów ($r = -0,528$). Badane genotypy wykazały zróżnicowaną odporność na uszkodzenie ziarniaków przez *Fusarium* (średnio 48,4%) oraz zróżnicowaną zawartość ergosterolu w ziarnie (średnio $30,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Nasilenie fuzariozy kłosów istotnie korelowało z uszkodzeniem ziarniaków pszenicy ($r = 0,768$). Genotypy pszenicy wykazały zróżnicowaną odporność na akumulację toksyn fuzaryjnych. Średnia zawartość deoksyniwalenolu (+pochodne acetylowe) wyniosła $20,515 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, natomiast zearalenonu $932 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Stopień porażenia kłosów, odporność typu II oraz uszkodzenie ziarniaków korelowały istotnie z zawartością ergosterolu, deoksyniwalenolu i zearalenonu w ziarnie. Zidentyfikowano genotypy łączące odporności różnych typów na fuzariozę kłosów.

Słowa kluczowe: *Fusarium culmorum*, fuzarioza kłosów, pszenica ozima, trichoteceny, zearalenon

The resistance to *Fusarium* head blight (FHB) of 224 lines and 10 check cultivars/lines of winter wheat was evaluated in the field experiments in Radzików and Poznań/Cerekwica. These lines originated from breeding programs of winter wheat and from the collection established based on the results of studies on the resistance to FHB in the years 2008-2013. Spikes of wheat were inoculated with *Fusarium culmorum*. Spike infection and *Fusarium* kernel damage were scored. In grain of selected 61 lines accumulation of ergosterol, trichothecenes of group B, and zearalenone was analyzed. Wheat genotypes varied significantly in resistance to FHB. The average FHB index amounted to 23.7%. A significant effect of plant height on the FHB index value ($r = -0.528$) was found. The tested lines showed varied resistance to *Fusarium* kernel damage (on average:48.4%) and ergosterol content in grain (on average: $30.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). The severity of spike infection significantly correlated with *Fusarium* kernel damage ($r = 0.768$). Wheat genotypes showed varied resistance to accumulation of *Fusarium* toxins. Average contents of deoxynivalenol (+ acetyl derivatives) amounted to $20.515 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, while zearalenone to $932 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The spike infection, resistance of type II and *Fusarium* kernel damage correlated significantly with the contents of ergosterol, deoxynivalenol and zearalenone in the grain. Genotypes integrating the various types of resistance to FHB were identified.

Key words: *Fusarium culmorum*, *Fusarium* head blight, trichothecenes, wheat, zearalenone

WSTĘP

Fuzarioza kłosów jest chorobą zbóż powodowaną przez kompleks grzybów z rodzaju *Fusarium* (głównie *F. culmorum* i *F. graminearum*) (Bottalico, 1998; Bottalico i Perrone, 2002). Grzyby te wytwarzają toksyczne metabolity — mikotoksyny. Porażenie kłosa przez *Fusarium* prowadzi do uszkodzenia ziarniaków i akumulacji toksyn fuzaryjnych w ziarnie (Snijders, 1990; Miller, 2008). W przypadku spożycia żywności lub paszy wytworzonej ze skażonego ziarna stanowią one zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt. Ze względu na ilości stwierdzone w ziarnie zbóż najważniejszymi toksynami fuzaryjnymi są deoksyniwalenol (DON) i zearalenon (ZEA) (Bottalico i Perrone, 2002). Na odporność na fuzariozę kłosów pszenicy składa się kilka typów (mechanizmów): odporność na infekcję (typ I), odporność na rozprzestrzenianie się *Fusarium* w kłosie (typ II), odporność na uszkodzenie ziarniaków przez *Fusarium* (typ III), tolerancja na akumulowane toksyny (niskie porażenie ziarna lub mała redukcja plonu mimo silnego porażenia kłosa lub dużej

zawartości toksyn w ziarnie) (typ IV) oraz odporność na akumulację toksyn fuzaryjnych w ziarnie (typ V) poprzez ich chemiczną modyfikację (klasa 1) lub blokowanie syntezy (klasa 2) (Mesterhazy, 2002; Boutigny i in., 2007; Foroud i Eudes, 2009).

Celem badań było wstępne zidentyfikowanie genotypów pszenicy ozimej o zwiększonej odporności na fuzariozę kłosów powodowaną przez grzyb *Fusarium culmorum* i niskiej akumulacji toksyn fuzaryjnych w ziarnie. Badanie odporności różnych typów pozwoliło na znalezienie genotypów łączących te odporności, a tym samym charakteryzujących się stabilną reakcją w różnych warunkach środowiska i uprawy.

MATERIAŁ I METODY

W roku 2014 w doświadczeniach infekcyjnych w Radzikowie i Cerekwicy badano odporność na fuzariozę kłosów 224 genotypów oraz 14 odmian/linii wzorcowych pszenicy ozimej. Genotypy te pochodziły z programów hodowlanych pszenicy ozimej (152 genotypy — DW 2014) oraz z kolekcji utworzonej w wyniku badań nad odpornością na fuzariozę kłosów w latach 2008–2013 (68 genotypy — „odporne”). Wzorce stanowiły odmiany wysoko plonujące — KWS Ozon, Patars oraz wzorzec o wysokiej jakości wypiekowej ziarna — odmiana Tonacja (www.coboru.pl/dr/Publ_Wynikow_PDO_WWPO_Zbozaozime_2014.pdf); linie/odmiany o wysokiej odporności na fuzariozę kłosów — A40-19-1-2 (R), UNG 136.6.1.1 (VR), Arina (R), 20828 (R) (Buerstmayr i in., 1999, 2008; Paillard i in., 2004); genotypy pszenicy o wysokiej podatności na porażenie kłosa w roku 2013 — SMH 8694 (S), SMH 8816 (S), NAD 10079 (S) oraz genotypy pszenicy akumulujące znaczne ilości trichotecenów w 2013 — DD 548/09 (Tox), DM 2728/09 (Tox), DM 3131/10 (Tox), STH 102 (Tox) (Góral T. i in., — wyniki niepublikowane).

Kłosa pszenicy w fazie kwitnienia zostały opryskane zawiesiną zarodników *Fusarium culmorum*. Do wytworzenia inokulum wybrano trzy izolaty *Fusarium culmorum* tworzące deoksyniwalenol (KF846, ZFR 16 — chemotyp DON) i zearalenon (ZFR 112 — chemotyp DON). Izolaty należące do chemotypu DON pochodziły z Radzikowa i zostały wyizolowane z kłosów pszenicy (Wiśniewska i Kowalczyk, 2005; Ochodzki i Góral, 2006).

Szczegółowa metodyka założenia doświadczenia, produkcji inokulum oraz inokulacji była zbliżona do opisanej w pracy Wiśniewskiej i in. (2014).

Ocenę porażenia rozpoczęto po pojawieniu się objawów fuzariozy kłosów. Obserwacje przeprowadzono 2-krotnie: po 14 i 21 dniach od inokulacji. Nasilenie fuzariozy kłosów (typ odporności I + II) zostało określone na podstawie proporcji porażonych kłosków w kłosie (tylko w kłosach z objawami choroby) oraz proporcji kłosów prażonych na poletku. Z tych wartości wyliczono indeks fuzariozy kłosów (IFK):

$$IFK = (\% \text{ porażenia kłosa } \times \% \text{ kłosów porażonych na poletku}) / 100.$$

Przeprowadzono zbiór ręczny 30 dojrzałych inokulowanych kłosów z każdego poletka. Kłosa wymłócono ręcznie, Proporcję ziarniaków uszkodzonych przez *Fusarium* (FDK) określano poprzez podział próby ziarniaków na zdrowe i ziarniaki z objawami porażenia

(typ odporności III) (Argyris i in., 2003). Do oceny FDK wybrano 126 genotypów o odporności na porażenie kłosa powyżej średniej.

Na podstawie wartości IFK oraz FDK wybrano 47 genotypów o najwyższej odporności typów I, II oraz III (32 z grupy „odporne” oraz 15 z frupy DW2104). W ziarnie tych genotypów oraz 14 odmian/linii wzorcowych analizowano zawartość ergosterolu (ERG) (typ odporności III), trichotecenów z grupy B (deoksyniwalenol [DON], 3-acetyldeoksyniwalenol, 15-acetyldeoksyniwalenol, niwalenol) (typ odporności V) oraz zearalenonu (ZEA) Zawartość trichotecenów z grupy B (DON, pochodne acetylowe DON — 3-AcDON, 15-AcDON, NIV) w ziarnie analizowano przy wykorzystaniu techniki chromatografii gazowej z detekcją wychwytu elektronów (GC-ECD) (Perkowski i in 2007, 2008). Mikotoksyny ekstrahowano z 5 g zmielonego ziarna za pomocą 25 ml wodnego roztworu acetonitrylu (acetonitryl:woda 84:16 v/v) wytrząsając na wytrząsarce przez 2 h. Próbę odwirowano ($3000 \text{ obr} \times \text{min}^{-1}$, 5 min.), a uzyskany w ten sposób ekstrakt oczyszczono na kolumnie Trich 227+ (RomerLabs). Do 4 ml oczyszczonego ekstraktu dodano 1 μg wzorca wewnętrznego (chloraloza) i odparowano do sucha w strumieniu powietrza. Mikotoksyny przeprowadzono w pochodne (etry trimetylosilylowe) za pomocą mieszaniny silylującej Sylon BTZ (BSA+TMCS+TMSI, 3:2:3, Supelco). U pochodnione mikotoksyny rozpuszczono w izooktanie, a nadmiar czynnika silylującego rozłożyło i usunięto za pomocą wody. Warstwę organiczną przeniesiono do fiolki autosamplera i poddano analizie chromatograficznej przy użyciu chromatografu SRI 8610C, wyposażonego w kapilarną kolumnę BGB-5MS, o długości 30m i średnicy wewnętrznej 0,25 mm. Gazem nośnym był wodór. Chromatogram rozwijano w gradiencie temperatury od 170°C do 310°C , szybkość wzrostu temperatury $5^\circ\text{C} \times \text{min}^{-1}$. Detekcję mikotoksyn prowadzono za pomocą detektora wychwytu elektronów (ECD). Identyfikacji poszczególnych związków dokonano przez porównanie czasów wymywania z kolumny czystych wzorców mikotoksyn: DON, 3AcDON, 15AcDON, NIV (Sigma-Aldrich). Stężenie mikotoksyn określono na podstawie krzywej kalibracji, z zastosowaniem chloralozy, jako wzorca wewnętrznego.

Zawartość zearalenonu (ZEA) oznaczano za pomocą ilościowego testu immunoenzymatycznego AgraQuant® zearalenone zgodnie z procedurą podaną przez producenta (Wiśniewska i in., 2014).

Zawartość ergosterolu określono metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (Perkowski i in., 2007, 2008). Ergosterol został wyekstrahowany roztworem metanolu w środowisku alkalicznym przy jednoczesnym zmydłaniu z użyciem promieniowania mikrofalowego. Po neutralizacji roztworu, ergosterol został wyekstrahowany do fazy organicznej za pomocą pentanu. Po wysuszeniu w strumieniu azotu ergosterol był rozpuszczany w metanolu i rozdzielany chromatograficznie techniką HPLC na kolumnie krzemionkowej za pomocą metanolu. Detekcja prowadzona była na detektorze UV przy długości fali $\lambda = 282 \text{ nm}$. Identyfikacji ergosterolu dokonano na podstawie czasu retencji. Ilość ergosterolu została określona na podstawie krzywej kalibracyjnej czystego wzorca (metoda wzorca zewnętrznego).

Dla 30 genotypów (z grupy „odporne”), które wykazały wysoką odporność na fuzariozę kłosów i akumulację toksyn w doświadczeniach polowych określono dodatkowo

odporności typu I oraz typu II. Do badań włączono również 12 odmian/linii wzorcowych. Badania przeprowadzono w dwóch niezależnych doświadczeniach w IHAR — PIB Radzików. Metodyka opisana została w pracy Górala i in. (2015).

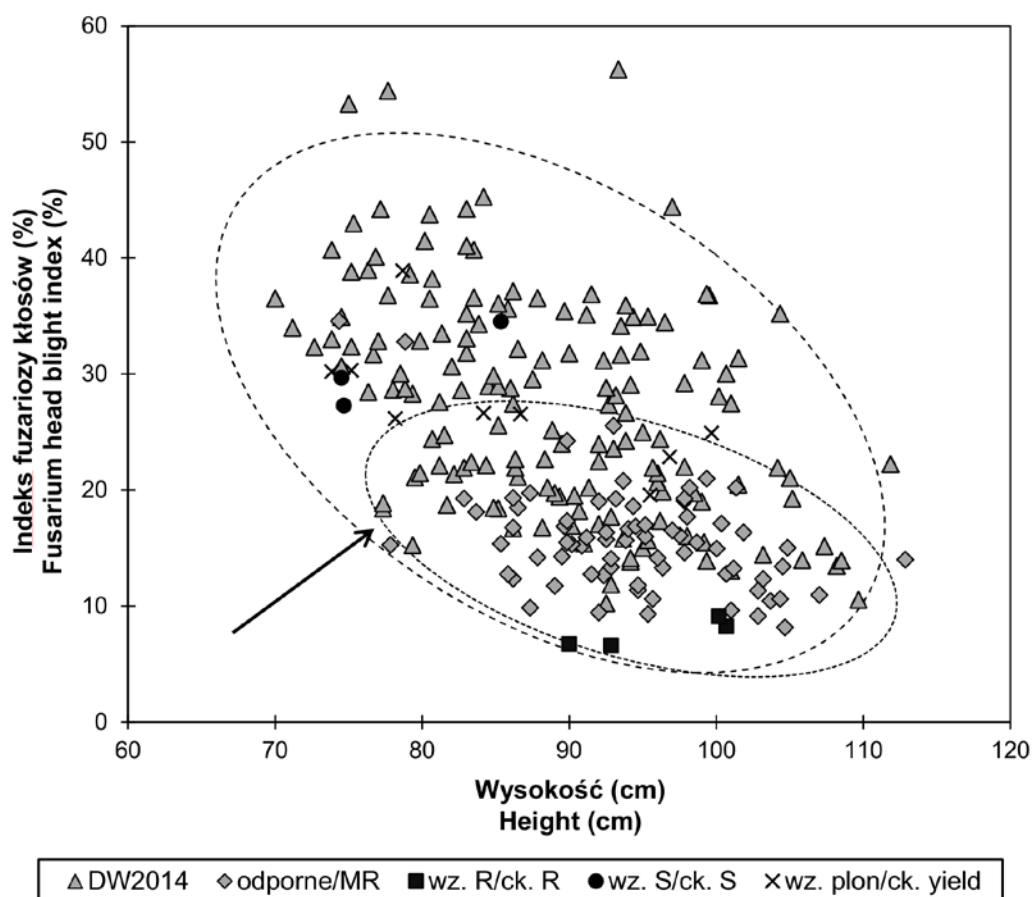
Analiza statystyczna została wykonana za pomocą pakietu Microsoft® Excel 2010/XLSTAT©-Pro (Version 2013.4.07, Addinsoft, Inc., Brooklyn, NY, USA). Przeprowadzono analizę wariancji dla IFK, FDK, ERG, DON i ZEA (XLSTAT: ANOVA). Obliczono współczynniki korelacji IFK, FDK, oraz zawartości poszczególnych metabolitów *Fusarium* (XLSTAT: Correlation tests). W celu zgrupowania rodów na podstawie różnych typów odporności w dwóch latach badań zastosowano metodę analizy składowych głównych (XLSTAT: PCA).

WYNIKI I DYSKUSJA

Średnie nasilenie fuzariozy kłosów dla 224 genotypów pszenicy ozimej wyniosło w Cerekwicy IFK = 23,9%, natomiast w Radzikowie IFK = 23,5%. Nie było istotnych statystycznie różnic pomiędzy indeksami fuzariozy kłosów w obu miejscowościach. Współczynnik korelacji pomiędzy IFK w Cerekwicy i IFK w Radzikowie był istotny i wynosił $r = 0,605$. Zakres IFK mieścił się w granicach: Cerekwica — 5,9% (STH 1144) — 72,5% (KBP 0938), Radzików — 0,5% (UNG 136.6.1.1) — 54,7% (KBP 1121). Dla genotypów z grupy DW2104 IFK wyniósł: 28,2% w Cerekwicy i 26,8% w Radzikowie, natomiast dla genotypów z grupy „odporne” było to: 15,1% w Cerekwicy i 16,4% w Radzikowie.

Wysokość roślin pszenicy w Cerekwicy była znacznie mniejsza niż w Radzikowie i wynosiła odpowiednio 75,0 cm (52,0–102,0 cm) i 105,4 cm (81,7–136,3 cm). Jedynie 3 genotypy w Cerekwicy miały powyżej 100 cm, natomiast w Radzikowie było to 2/3 genotypów. Genotypy z grupy „odporne” miały większą średnią wysokość roślin (94,2 cm) w porównaniu do genotypów z grupy DW2014 (88,5 cm) (rys. 1). W obu lokalizacjach zależności pomiędzy grupami były takie same. Wysokość roślin istotnie, lecz słabo korelowała z IFK w Cerekwicy ($r = -0,204$), natomiast w Radzikowie współczynnik korelacji był wysoko istotny ($r = -0,628$). Wysokość roślin miała istotny negatywny wpływ na nasilenie fuzariozy kłosów ($r = -0,528$).

Genotypy w grupie „odporne” były istotnie słabiej porażane fuzariozą kłosów. W grupie DW2014 również zidentyfikowano genotypy wykazujące odporność np. STH 1144, POB 0513, STH 2041, NAD 11017. Większość tych genotypów charakteryzowała się jednakże wysokością powyżej 90 cm. Niższe porażenie genotypów wysokich jest głównie wynikiem ich morfologii i różnic w mikroklimacie na poziomie kłosa (Mesterhazy, 1995, 2002; Yan i in., 2011). Genotypy niskie (poniżej 80 cm) miały indeksy FK w większości powyżej 25%. Wyjątek stanowiły genotypy DD 137/10-4, NAD 10041, STH 1124, DL 414/10, DL 414/10/6/3 z grupy DW2014 oraz CHD 6651/06 z grupy odpornych.



DW2014 — genotypy z programów hodowlanych pszenicy ozimej, odporne — genotypy o podwyższonej odporności na fuzariozę kłosów, wz. R — wzorce odporne, wz. S — wzorce podatne, wz. plon — wzorce wysokoplunujące.

Rys. 1. Zależność indeksu fuzariozy kłosów od wysokości roślin 224 genotypów pszenicy ozimej. Strzałką oznaczono genotypy odporne o wysokości poniżej 80 cm

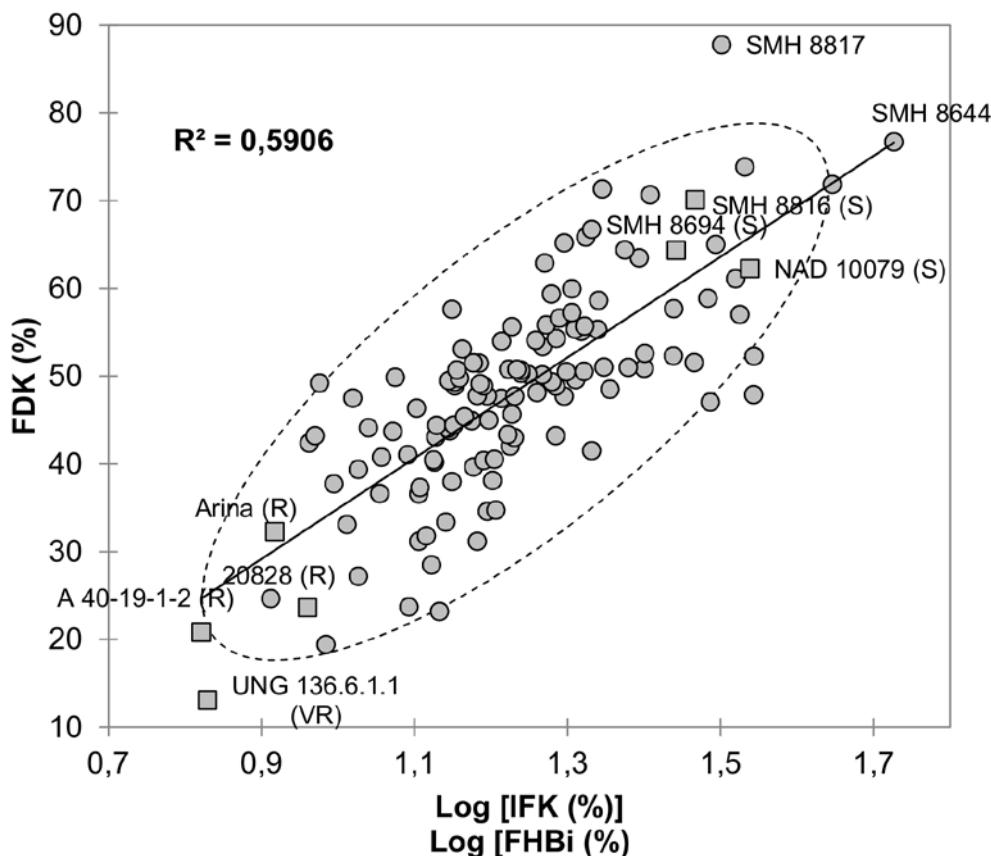
DW2014 — novel breeding lines, MR — medium resistant lines, ck. R — resistant checks, ck. S — susceptible checks, ck. yield — high-yielding checks

Fig. 1. Relationship between plant height and Fusarium head blight index for 224 lines of winter wheat. Resistant lines shorter than 80 cm are indicated with an arrow

Większa podatność genotypów niskich może również wynikać z obecności genu karłowatości *Rht-D1b* (Miedaner i Voss, 2008, Kollers i in., 2013). (Draeger i in., 2007) stwierdzili, że takie oddziaływanie genu *Rht-D1b* wynika ze sprzężenia z genami zwiększającymi podatność na fuzariozę kłosów lub fizjologicznego efektu plejotropowego alleli karłowatości w *locus Rht-D1* zwiększającego podatność. Stwierdzono również, że gen *Rht-D1b* wpływał głównie na odporność typu I (odporność na infekcję) a nie typu II (odporność na rozprzestrzenianie się patogena) (Srinivasachary i in., 2008). Jednakże (Kollers i in., 2013) znaleźli istotny wpływ genu *Rht-D1* zarówno na występowanie

(związane z typem I odporności), jaki i nasilenie (związane z typem II odporności) fuzariozy kłosów.

Średnie uszkodzenie ziarniaków 126 genotypów pszenicy w Cerekwicy wyniosło 66,7%. Zakres reakcji mieścił się w granicach od 19,1% (UNG 136.6.1.1, C 3779/10) do 97,0% (SMH 8644). W Radzikowie wartość FDK wyniosła 30,0% i wahała się od 7,1% (UNG 136.6.1.1, C 3779/10) do 80,9% (SMH 8177). Średnie uszkodzenie ziarniaków korelowało istotnie z logarytmem ze średniego indeksu fuzariozy kłosów ($r = 0,768$) (rys. 2).



Rys. 2. Zależność pomiędzy zlogarytmowanym indeksem fuzariozy kłosów (IFK) a stopniem uszkodzenia ziarniaków przez *Fusarium* (FDK) dla 126 genotypów pszenicy ozimej. Średnie wartości z doświadczeń w Radzikowie i Cerekwicy. Oznaczono genotypy wzorcowe pszenicy (kwadraty)
Fig. 2. Relationship between log-transformed Fusarium head blight index (FHBi) and proportion of *Fusarium* damaged kernels (FDK) for 126 lines of winter wheat. Mean values from experiments in Radzików and Cerekwica. Check lines/cultivars are marked with squares

Tabela 1

Odporność na fuzariozę kłosów 61 genotypów i odmian pszenicy ozimej inokulowanych izolatami *Fusarium culmorum* w doświadczeniach w Radzikowie i Cerekwicy. Genotypy uszeregowane wg wartości indeksu fuzariozy kłosów
Resistance to *Fusarium* head blight in 61 lines and cultivars of winter wheat inoculated with *Fusarium culmorum* in experiments in Radzików and Cerekwica. Lines ordered according to values of the *Fusarium* head blight index

L.p. No.	Genotyp Genotype	Odp. typu I (#PI) Type I res. (#IP)	Odp. typu II (#PK) Type II res. (#IS)	Średnia typ I+II Type I+II combined	IFK(%) ¹ FHBi (%) ¹	FDK (%) ¹
1	2	3	4	5	6	7
1	A 40-19-1-2 (R)	1,0	1,1	1,1	6,6	20,8
2	UNG 136.6.1.1 (VR)	2,0	1,1	1,6	6,8	13,1
3	KBP 1058	1,3	1,2	1,3	8,2	24,7
4	Arina (R)	2,0	1,7	1,9	8,3	32,3
5	20828 (R)	1,0	1,7	1,4	9,1	23,7
6	KBP 04.164	2,7	2,0	2,3	9,3	43,2
7	STH 9059	2,3	1,6	2,0	9,6	19,5
8	AND 1055/02	1,0	2,3	1,7	9,9	37,8
9	STH 1144	-	-	-	10,3	33,1
10	STH 008	1,3	3,3	2,3	10,6	27,2
11	POB 0111	1,0	2,0	1,5	10,6	39,4
12	DCh 4763/07	1,7	1,6	1,6	11,0	44,1
13	DED 389/-6	1,7	1,9	1,8	11,3	36,6
14	SMH 7983	1,0	2,1	1,6	11,8	43,7
15	LAD 463/05	1,0	2,6	1,8	12,4	23,7
16	MOB 5578/06	1,0	1,9	1,5	12,8	37,4
17	KBP 05.271	1,7	2,1	1,9	12,8	31,2
18	KBP 0820	3,0	2,2	2,6	12,8	36,6
19	NAD 11017	-	-	-	13,0	31,8
20	MOB ZB 301206	2,3	1,1	1,7	13,3	28,5
21	SMH 7974	1,7	2,3	2,0	13,4	43,1
22	POB 0211	1,0	1,6	1,3	13,4	40,2
23	KBP 1040	1,3	2,0	1,7	13,5	28,0
24	AND 143/10	-	-	-	13,5	44,4
25	C 3779/10	-	-	-	13,6	23,2
26	DM 2566/11	-	-	-	13,8	33,4
27	KBP 1013	-	-	-	13,9	44,0
28	DM 3131/10 (Tox)	1,7	2,8	2,2	14,1	57,6
29	DD 137/10-4	-	-	-	14,2	49,3
30	DC 332/09-3	2,7	2,3	2,5	14,2	48,9
31	DM 3873/10	3,0	2,0	2,5	14,5	53,1
32	POB 457/07	2,0	1,4	1,7	15,0	39,7
33	KOH 275	-	-	-	15,2	31,2
34	SMH 8553	1,0	1,9	1,5	15,2	47,8
35	STH 9007	2,0	1,3	1,7	15,5	40,4
36	POB 1013/10	-	-	-	15,7	36,0
37	STH 032	2,7	3,1	2,9	15,9	38,2
38	KBP 0936	-	-	-	16,0	40,6
39	POB 262/07	3,7	2,0	2,8	16,1	34,7

c.d. Tabela 1

1	2	3	4	5	6	7
40	STH 188	-	-	-	16,7	50,5
41	STH 087	1,7	2,6	2,1	16,8	42,1
42	STH 105	1,3	3,3	2,3	16,9	45,7
43	POB 0112	2,3	2,5	2,4	17,1	50,8
44	STH 102 (Tox)	1,7	3,2	2,4	17,3	50,3
45	C 4573/10	-	-	-	17,3	50,7
46	POB 0212	1,3	3,0	2,2	17,7	45,7
47	DM 2728/09 (Tox)	1,0	2,5	1,8	18,1	54,1
48	C 41/10	-	-	-	18,2	48,1
49	POB 0911	1,3	2,5	1,9	18,6	62,9
50	DD 548/09 (Tox)	2,0	1,6	1,8	19,3	52,3
51	Tonacja (wz)	1,7	2,9	2,3	20,4	55,4
52	POB 0713	-	-	-	20,5	49,6
53	KBP 1034	4,0	1,4	2,7	20,8	55,1
54	KBP 1017	-	-	-	21,0	55,7
55	NAD 11100	-	-	-	21,5	41,5
56	C 1/10	-	-	-	22,7	48,6
57	Patras (wz)	-	-	-	25,1	50,9
58	SMH 8816 (S)	3,0	3,1	3,1	27,3	70,1
59	SMH 8694 (S)	2,7	2,2	2,4	29,7	64,3
60	KWS Ozon (wz)	-	-	-	30,4	58,9
61	NAD 10079 (S)	3,3	3,3	3,3	34,5	62,3
Średnie Means		1,9	2,2	2,0	15,7	42,1

¹ — średnie wartości z doświadczeń w Radzikowie i Cerekwicy

¹ — mean values from experiments in Radzików and Cerekwica

#PI — liczba punktów infekcji, #PK — liczba porażonych kłosek, IFK — indeks fuzariozy kłosek, FDK — uszkodzenie ziarniaków

VR, R — wzorze odporne; S — wzorze podatne; Tox — wzorze o wysokiej akumulacji toksyn; wz — wzorze o wysokim plonie.

#IP — number of infection points, #IS - number of infected spikelets, FHBi — Fusarium head blight index, FDK — proportion of *Fusarium* damaged kernels

VR, R — resistant checks, S — susceptible checks, Tox — high toxin accumulation checks, wz — high yielding checks

Do analiz erosterolu i toksyn fuzaryjnych wybrano 61 genotypów (tab. 1). Najwyższą odporność na infekcję kłosa, z wyjątkiem wzców odpornych, wykazały genotypy KBP 1058, KBP 04.164 oraz STH 9059. Podatne były, z wyjątkiem wzców podatności, odmiany Patras i KWS Ozon. Najślabsze uszkodzenie ziarniaków, z wyjątkiem wzców odpornych, wykazały genotypy STH 9059, C 3779/10, LAD 463/05, KBP 1058. Odmiana Arina (R) miała najwyższe uszkodzenie ziarniaków spośród wzców odpornych.

Najwyższą odporność typu I miały dwa wzorze A 40-19-1-2 (R) i 20828 (R) oraz 8 innych genotypów pszenicy (Tab. 1). Najbardziej podatne były genotypy KBP 0820, DM 3873/10, POB 262/07, KBP 1034 oraz dwa wzorze podatne SMH 8816 (S) NAD 10079 (S). Najwyższą odporność typu II miały wzorze A 40-19-1-2 (R) i UNG 136.6.1.1 (VR) oraz genotypy pszenicy MOB ZB 301206, KBP 1058, STH 9007. Najbardziej podatne były genotypy STH 008 i STH 105 oraz dwa wzorze NAD 10079 (S) i STH 102 (Tox).

Summaryzna odporność obu typów była najwyższa u genotypów KBP 1058 i POB 0211 oraz wzców A 40-19-1-2 (R) i 20828 (R), natomiast najniższa u dwóch wzców podatnych NAD 10079 (S) i SMH 8816 (S).

Tabela 2

Akumulacja ergosterolu i toksyn fuzaryjnych w ziarnie 61 genotypów i odmian pszenicy ozimej inokulowanych izolatami *Fusarium culmorum* w doświadczeniach polowych w Radzikowie i Cerekwicy
Genotypy uszeregowane wg średniej ze standaryzowanych zawartości DON i ZEA
Accumulation of ergosterol and *Fusarium* toxins in grain of 61 winter wheat lines and cultivars inoculated with *Fusarium culmorum* in experiments in Radzików and Cerekwica. Lines ordered according to the average of standardised amounts of DON and ZEA

L.p. No.	Genotyp Genotype	ERG (mg·kg ⁻¹) ¹	DON (mg·kg ⁻¹) ¹	ZEA (µg·kg ⁻¹) ¹	ERG/DON
1	2	3	4	5	6
1	A 40-19-1-2 (R)	8,1	4,055	197	2,01
2	UNG 136.6.1.1 (VR)	13,9	7,888	196	1,76
3	STH 9059	15,9	8,189	193	1,94
4	NAD 11017	15,1	10,090	103	1,50
5	20828 (R)	14,6	8,510	351	1,71
6	KBP 1040	20,4	8,912	331	2,29
7	LAD 463/05	17,0	9,759	289	1,74
8	MOB 5578/06	20,0	10,710	360	1,87
9	C 3779/10	20,3	12,540	207	1,62
10	POB 0212	26,6	11,212	377	2,37
11	KBP 04.164	18,8	12,993	262	1,45
12	STH 1144	18,5	14,894	48	1,24
13	C 1/10	22,4	15,252	134	1,47
14	MOB ZB 301206	22,4	13,455	387	1,67
15	Arina (R)	17,2	15,859	126	1,09
16	KBP 05.271	22,5	14,523	359	1,55
17	KBP 1058	16,4	15,267	281	1,08
18	STH 008	19,6	16,775	186	1,17
19	KBP 1013	27,5	17,977	186	1,53
20	DED 389/-6	26,9	15,994	487	1,68
21	KBP 0820	29,1	17,062	370	1,71
22	POB 262/07	32,1	15,851	632	2,03
23	STH 9007	27,2	13,418	955	2,03
24	KOH 275	19,0	16,898	586	1,12
25	STH 105	30,1	19,243	319	1,57
26	POB 0713	37,7	19,637	300	1,92
27	SMH 7983	28,1	14,985	970	1,88
28	DM 3873/10	25,0	17,834	687	1,40
29	STH 032	35,6	15,232	1030	2,34
30	POB 0111	26,9	21,814	267	1,23
31	DM 2566/11	25,5	17,562	853	1,45
32	POB 1013/10	26,1	15,591	1168	1,68
33	STH 188	36,5	20,322	726	1,80
34	POB 457/07	33,2	20,783	684	1,60
35	C 41/10	28,2	24,399	242	1,15
36	STH 102 (Tox)	38,2	18,314	1065	2,09
37	DD 137/10-4	30,3	20,206	908	1,50
38	DC 332/09-3	34,5	22,664	597	1,52

1	2	3	4	5	6
39	C 4573/10	36,2	26,876	93	1,35
40	SMH 7974	25,6	18,916	1213	1,35
41	AND 143/10	30,0	24,507	514	1,23
42	POB 0112	22,4	15,297	1727	1,47
43	KBP 1017	31,1	23,898	812	1,30
44	KBP 1034	30,5	27,092	488	1,12
45	DCh 4763/07	33,9	22,773	1120	1,49
46	POB 0211	33,2	27,686	617	1,20
47	KWS Ozon (wz)	58,0	25,315	1020	2,29
48	Tonacja	36,3	28,168	672	1,29
49	STH 087	38,1	21,104	1568	1,80
50	Patras (wz)	30,0	26,094	1011	1,15
51	SMH 8553	29,0	26,663	1084	1,09
52	DM 3131/10 (Tox)	51,6	32,520	856	1,59
53	DM 2728/09 (Tox)	47,9	28,156	1466	1,70
54	KBP 0936	35,3	26,448	1852	1,33
55	AND 1055/02	32,4	31,812	1362	1,02
56	POB 0911	59,0	36,043	1140	1,64
57	SMH 8816 (S)	79,5	45,779	1845	1,74
58	DD 548/09 (Tox)	55,5	26,525	4522	2,09
59	NAD 11100	34,7	58,654	1814	0,59
60	NAD 10079 (S)	59,9	34,474	6450	1,74
61	SMH 8694 (S)	67,8	39,956	6190	1,70
Średnie Means		30,9	20,515	932	1,51

¹ — średnie wartości z doświadczeń w Radzikowie i Cerekwicy

¹ — mean values from experiments in Radzików and Cerekwica

ERG — ergosterol, DON — deoksynivalenol, ZEA — zearalenon, ERG/DON — współczynnik ilości ergosterolu na 1 mg deoksynivalenolu w ziarnie

VR, R — wzorce odporne, S — wzorce podatne, Tox — wzorce o wysokiej akumulacji toksyn, wz — wzorce o wysokim plonie

ERG — ergosterol, DON — deoxynivalenol, ZEA — zearalenone, ERG/ DON — ergosterol/deoxynivalenol ratio

VR, R — resistant checks, S — susceptible checks, Tox — high toxin accumulation checks, wz — high yielding checks

Zawartość ergosterolu w ziarnie wybranych genotypów wyniosła średnio 30,9 mg·kg⁻¹ (tab. 2). Zakres zmienności cechy mieścił się w granicach 8,1–79,5 mg·kg⁻¹. W próbach ziarna z Cerekwicy zawartość ERG była 3-krotnie większa (47,3 mg·kg⁻¹) niż w próbach z Radzikowa (14,6 mg·kg⁻¹). W Cerekwicy zakres zmienności cechy mieścił się w granicach 12,8 mg·kg⁻¹ (A 40-19-1-2) — 138,7 mg·kg⁻¹ (SMH 8816), natomiast w Radzikowie w granicach 4,5 mg·kg⁻¹ (A 40-19-1-2) — 38,4 mg·kg⁻¹ (KWS Ozon).

Średnia zawartość DON (wraz z 15AcDON) w ziarnie pszenicy ozimej wynosiła 20,515 mg·kg⁻¹ (tab. 2). Zakres zawartości DON wynosił od 4,055 mg·kg⁻¹ (STH 9059) do 58,654 mg·kg⁻¹ (NAD 11100). W próbach ziarna z Cerekwicy zawartość DON była 20-krotnie większa (38,724 mg·kg⁻¹) niż w próbach z Radzikowa (2,306 mg·kg⁻¹). W ziarnie pszenicy nie stwierdzono obecności pochodnej DON — 3AcDON oraz śladowe ilości 15AcDON i niwalenolu. W Cerekwicy zakres zmienności cechy mieścił się w granicach 7,997 mg·kg⁻¹ (A 40-19-1-2) — 115,577 mg·kg⁻¹ (NAD 11100), natomiast w Radzikowie w granicach 0,113 mg·kg⁻¹ (40-19-1-2) — 4,629 mg·kg⁻¹ (POB 0713).

Średnia zawartość zearalenonu w ziarnie pszenicy ozimej wynosiła 932 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tab. 2). W próbach z Radzikowa stwierdzono śladowe zawartości ZEA (poniżej limitu kwantyfikacji), dlatego też nie zostały one uwzględnione w tabeli. Zakres zawartości ZEA mieścił się w granicach od 48 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (STH 1144) do 6450 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (NAD 10079 S).

Indeks fuzariozy kłosów (IFK) oraz stopień uszkodzenia ziarniaków (FDK) korelowały istotnie z zawartością ERG oraz ilością toksyn fuzaryjnych (DON, ZEA) w ziarnie (tab. 3). Najwyższe wartości przyjmowały współczynniki korelacji FDK z zawartością ERG oraz zawartości ERG z akumulacją DON (rys. 3, 4) Niższy był współczynnik korelacji ERG z akumulacją ZEA w ziarnie.

Tabela 3

Współczynniki korelacji odporności typu I i II, indeksu fuzariozy kłosów, uszkodzenia ziarniaków oraz akumulacji ergosterolu i toksyn fuzaryjnych w ziarnie 61 genotypów pszenicy inokulowanych *F. culmorum* w doświadczeniach w Cerekwicy i Radzikowie
Coefficients of correlation between resistances of type I and II, Fusarium head blight index, *Fusarium* damaged kernels and accumulation of ergosterol and *Fusarium* toxins in grain of 61 lines of wheat inoculated with *F. culmorum* in experiments in Cerekwica and Radzików

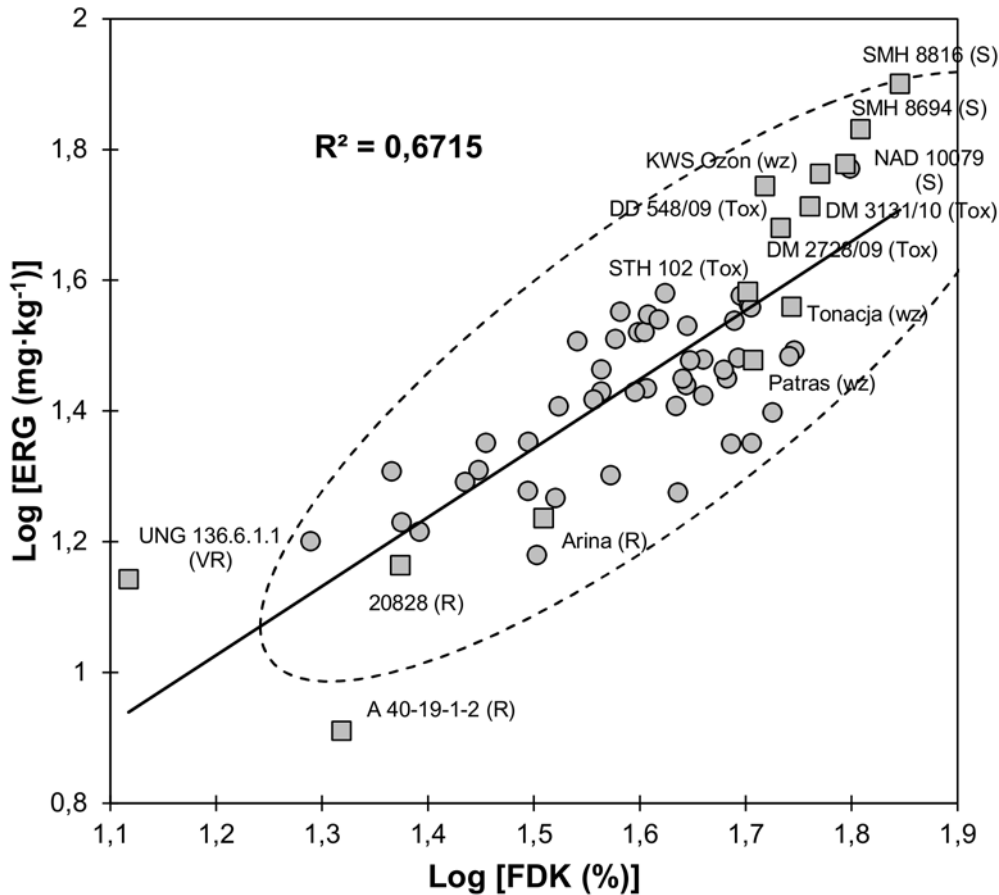
Zmienne Variables	Odp. typu I (#PI) ¹ Type I res. (#IP) ¹	Odp. typu II (#PK) ¹ Type II res. (#IS) ¹	Średn. typ I+II ¹ Type I+II combined ¹	IFK(%) FHBi (%)	FDK (%)	ERG (mg·kg ⁻¹)	DON (mg·kg ⁻¹)	ZEA (μg·kg ⁻¹)
Odp. typu II (#KP) Type II res. (#IS)	0,012							
Sredn. typ I+II Type I+II combined	0,763**	0,643**						
IFK (%) FHBi (%)	0,403**	0,537**	0,655**					
FDK (%)	0,256	0,532**	0,526**	0,773**				
ERG (mg·kg ⁻¹)	0,295	0,511**	0,542**	0,771**	0,819**			
DON (mg·kg ⁻¹)	0,218	0,428**	0,440**	0,657**	0,765**	0,848**		
ZEA (μg·kg ⁻¹)	0,237	0,334*	0,364*	0,565**	0,541**	0,699**	0,585**	
DON+ ZEA stnd ²	0,279	0,344*	0,410**	0,667**	0,626**	0,784**	0,816**	0,792**

— współczynniki dla 42 genotypów; 2 — średnia ze standaryzowanych wartości DON i ZEA. Zmienne transformowane logarytmicznie. Współczynniki istotne na poziomie: * - P<0,05, ** - P<0,01

1 — coefficients for 42 lines; 2 — average from standardized concentrations of DON and ZEA. Variables log transformed. Coefficients significant at: * - P<0.05, ** - P<0.01

Odporność typu I (na infekcję) dla 42 genotypów korelowała jedynie z indeksem fuzariozy kłosów (tab. 3). Natomiast odporność typu II (na rozprzestrzenianie się *Fusarium* w kłosie) korelowała zarówno z IFK i FDK jak i zawartością ergosterolu oraz toksyn w ziarnie. Odporność typu II wiąże się z odpornością na DON, który jest czynnikiem niezbędnym dla rozprzestrzeniania się patogena w tkankach. Trichoteceny produkowane przez *Fusarium* powoduje nekrozę tkanki pszenicy, która następnie jest kolonizowana przez grzybnie *Fusarium* (Gunnaiyah i in., 2012). Główny gen odporności na fuzariozę kłosów *Fhb1* który wyjaśnia do 60% zmienności odporności typu II jest odpowiedzialny

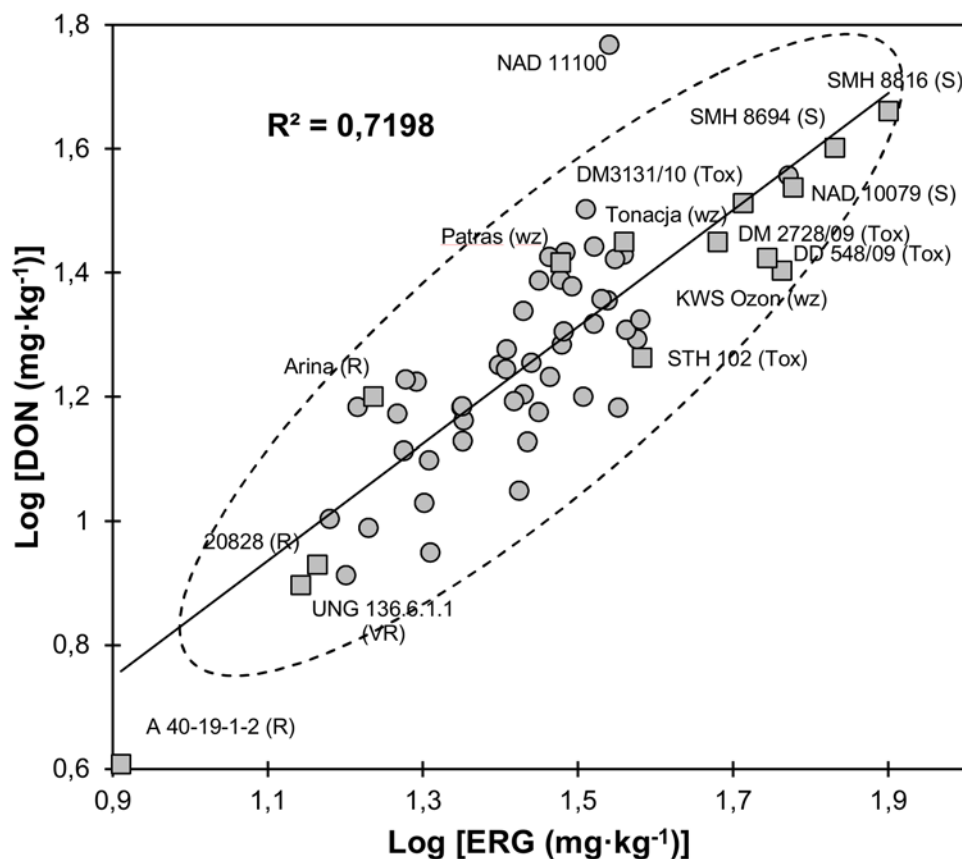
za obniżenie toksyczności DON (Lemmens i in. 2008, Buerstmayr i in l. 2009). Odbywa się to poprzez glikozylację DON i tworzenie słabo fitotoksycznego 3-glikozydo-deoksyniwalenolu (Berthiller i in., 2005; Boutigny i in., 2008). Zdolność do produkcji deoksyniwalenolu określa agresywność danego izolatu *Fusarium* (*F. culmorum*, *F. graminearum* i innych gatunków produkujących DON) (Mesterhazy, 2002).



Rys. 3. Zależność pomiędzy uszkodzeniem ziarniaków (FDK) a zawartością ERG w ziarnie 61 genotypów pszenicy ozimej. Oznaczono genotypy wzorcowe pszenicy (kwadraty)
 Fig. 3. Relationship between *Fusarium* damaged kernels (FDK) and concentration of ergosterol (ERG) in grain of 61 winter wheat lines. Check lines/cultivars are marked with squares

Korelacja typów odporności I i II z akumulacją DON w ziarnie była obserwowana przez Zhu i in. (1999) u jęczmienia. Współczynniki dla typu I były nieistotne lub miały wartości od 0,37 do 0,67. Dla typu II było to 0,30 i 0,49. Nieistotne współczynniki dla typu I stwierdzono stosując metodykę podobną do opisanej w niniejszej pracy, czyli opryskiwanie kłosów zawieszoną rodnikiem. Istotne były współczynniki w przypadku zastosowania

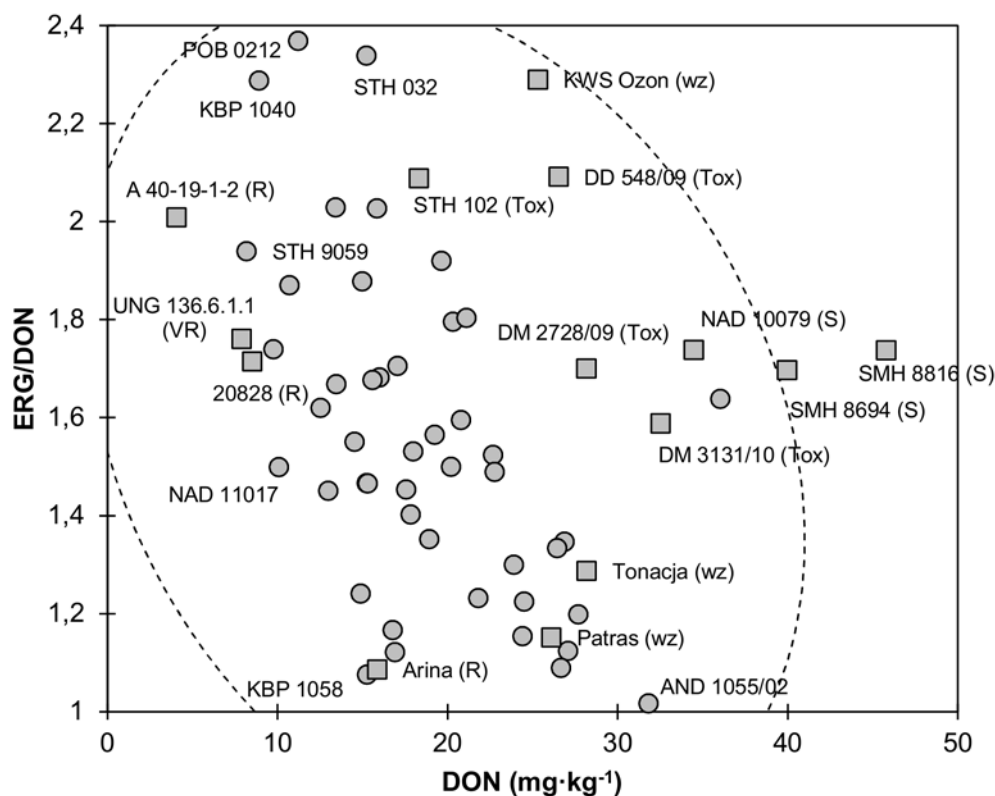
metody rozsypywania wysuszonego inokulatu na powierzchni gleby. Należy mieć jednakże na uwadze, że u jęczmienia typ odporności II ma mniejsze znaczenie, ponieważ zwykle patogen nie rozprzestrzenia się do sąsiadujących kłosek (Bai i Shaner, 2004).



Rys. 4. Zależność pomiędzy zawartością ergosterolu (ERG) a akumulacją deoksynivalenolu (DON) w ziarnie 61 genotypów pszenicy ozimej. Oznaczono genotypy wzorcowe pszenicy (kwadraty)
Fig. 4. Relationship between concentrations of ergosterol (ERG) and deoxynivalenol (DON) in grain of 61 winter wheat lines. Check lines/cultivars are marked with squares

Wyliczono współczynnik ERG/DON wskazujący ilość ergosterolu (miernika zawartości grzybni) potrzebną do wytworzenia 1 mg deoksynivalenolu (tab. 2). Średnia wartość współczynnika wynosiła 1,51 mg ERG/1 mg DON. Współczynnik zmieniał się w zakresie od 2,37 (POB 0212) do 0,59 (NAD 11100). Genotypy o niskiej zawartości DON w ziarnie (<15 mg/kg) miały zróżnicowane wartości ERG/DON np. >2,00: POB 0212, KBP 1040, STH 9007, A 40-19-1-2 (R) lub ≤1,50: NAD 11017, KBP 04.164, STH 1144 (rys. 5). Również wśród genotypów akumulujących większe ilości DON znaleziono obiekty o wartości ERG/DON >2,00: KWS Ozon (wz), DD 548/09 (Tox). Wysoka wartość

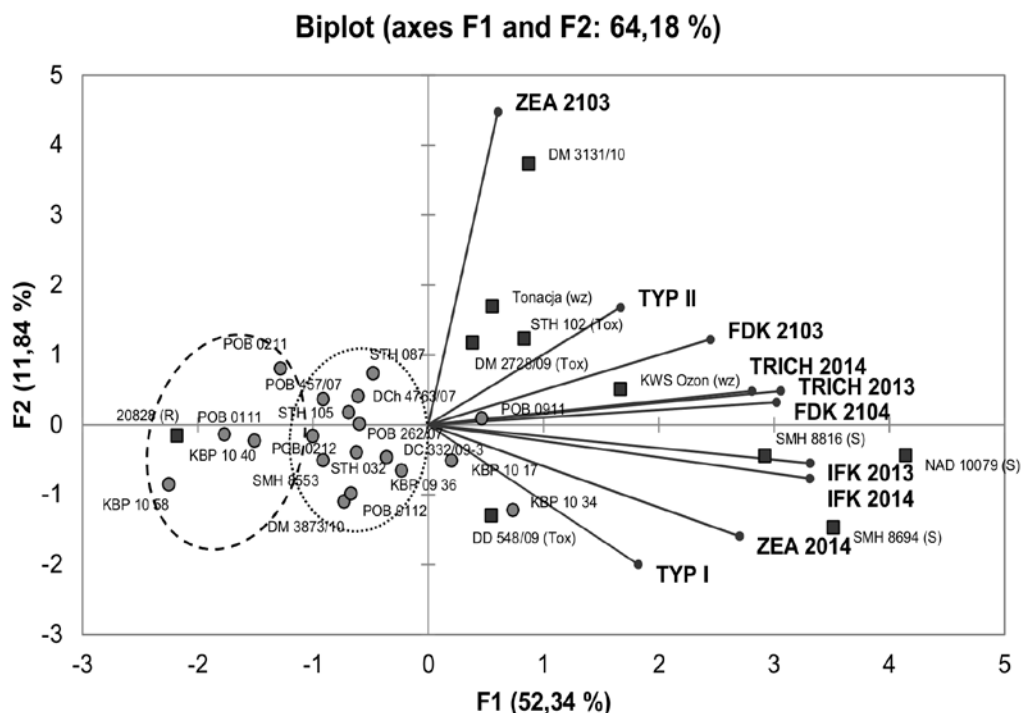
współczynnika wskazuje na wyższą odporność typu V, czyli na akumulację trichotecenów (Perkowski i in., 1995). Taką odporność wykazały wymienione powyżej genotypy o wartości ERG/DON powyżej 2 (rys. 5). Genotypy o wysokiej zawartości DON w ziarnie miały wartość współczynnika zbliżoną do średniej. Podobną wartość miały dwie linie odporne, w tym linia UNG 136.6.1.1 (VR) zawierająca gen *Fhb1* (Czembor P. — wyniki niepublikowane).



Rys. 5. Wykres rozrzutu zawartości deoksynivalenolu (DON) w ziarnie 61 genotypów pszenicy ozimej oraz współczynnika ERG/DON. Oznaczono genotypy wzorcowe pszenicy (kwadraty)

Fig. 5. Scatterplot of deoxynivalenol (DON) content in grain of 61 winter wheat lines and DON/ERG ratio. Check lines/cultivars are marked with squares

W pracy Mesterhazy'ego (2002) stwierdzono, że współczynniki IFK/DON oraz FDK/DON były wysokie u genotypów odpornych. Autor wyjaśnia to zjawisko faktem, że mechanizmy odporności powodują zwiększoną produkcję DON-u przez *Fusarium* w celu zasiedlenia tkanek gospodarza. U genotypów podatnych reakcja na DON jest silniejsza, więc jego produkcja jest relatywnie mniejsza (w odniesieniu na jednostkę infekcji). W odniesieniu do współczynnika ERG/DON powinno to przekładać się na niską wartość np. KBP 1058, NAD 11017, Arina.



Rys. 6. Układ współrzędnych dwóch pierwszych składowych głównych dla 29 genotypów pszenicy ozimej. Dwie pierwsze składowe wyjaśniają 64,2% zmienności odporności na fuzariozę kłosów mierzonej indeksem fuzariozy kłosów (IFK), uszkodzeniem ziarniaków (FDK) oraz zawartością zearalenonu (ZEA) i trichotecenów B (TRICH) w ziarnie w Radzikowie i Cerekwicy latach 2013 i 2014 oraz odpornością typu I (TYP I) i typu II (TYP II). Linia przerywana — genotypy o najwyższej odporności, linia kropkowana — genotypy o średniej odporności

Fig. 6. Biplot of the principal component analysis for 29 winter wheat lines. Two first components explained 64.2% of variability of Fusarium head blight resistance characterized with FHB index (IFK), Fusarium damaged kernels (FDK) and concentration of zearalenone (ZEA) and trichothecenes B (TRICH) in grain in 2013 and 2014 in Radzików and Cerekwica as well as resistance of type I (TYP I) and type II (TYP II). Dashed line — the most resistant lines, dotted line — medium resistant lines

Wartość współczynnika była niska dla odpornej na infekcję kłosa odmiany Arina (1,09). Odmiana ta miała bardzo niskie porażenie kłosa, niską zawartość ergosterolu, jednakże średnie wartości FDK oraz zawartości DON w ziarnie. Badania genetyczne wskazują, że u odmiany Arina występuje przede wszystkim odporność typu I zlokalizowana w innych rejonach genomu pszenicy niż pozostałe *loci* odporności (Semagn i in., 2007; Buerstmayr i in., 2009).

Miedaner i in. (2001) w swojej publikacji badali odporność pszenicy, żyta oraz pszenżyta na fuzariozę kłosów. Wyliczone współczynniki DON/ERG mieściły się w granicach od 0,42 do 0,71, średnio 0,55 oraz dla pszenicy 0,52. Wartości te były zbliżone do obserwowanych w niniejszej pracy (w przeliczeniu na DON/ERG średnio 0,66).

Współczynniki DON/ERG dla poszczególnych genotypów różniły się istotnie. Podobnie było w przypadku genotypów badanych w tej pracy (tab. 2). Wskazuje to istotny wpływ genotypu gospodarza na akumulację DON w ziarnie.

W badanej populacji pszenicy odporność 29 genotypów oceniano również w doświadczeniach infekcyjnych w roku 2013 w Radzikowie i Cerekwicy (Góral i in., 2014). Indeksy fuzariozy kłosów, stopień uszkodzenia ziarniaków oraz akumulacja trichotecenów B z obu lat korelowały istotnie (odpowiednio $r = 0,878$, $r = 0,448$, $r = 0,525$). Brak było korelacji z akumulacją zearalenonu w obu latach doświadczeń.

Najwyższą odporność wszystkich typów w czterech środowiskach (lata, lokalizacje) wykazała linia odporna 20828 (R) oraz genotypy KBP 1040, KBP 1058, POB 0111 i POB 0211. Pozostałe średnio odporne genotypy oznaczono na rysunku 6.

WNIOSKI

1. Genotypy pszenicy były istotnie zróżnicowane pod względem odporności na fuzariozę kłosów w warunkach polowych (typ odporności I+II).
2. Stwierdzono istotny wpływ wysokości roślin na wartość indeksu fuzariozy kłosów.
3. Badane genotypy wykazały zróżnicowaną odporność na uszkodzenie ziarniaków przez *Fusarium culmorum* oraz zróżnicowaną zawartość ergosterolu w ziarnie (typ odporności III).
4. Nasilenie fuzariozy kłosów istotnie korelowało z uszkodzeniem ziarniaków pszenicy.
5. Badane genotypy wykazały zróżnicowaną odporność na akumulację toksyn fuzaryjnych (typ odporności IV).
6. Stopień porażenia kłosów, odporność typu II oraz uszkodzenie ziarniaków korelowały istotnie z zawartością ergosterolu, deoksynivalenolu i zearalenonu w ziarnie.
7. Genotypy 20828 (R), KBP 1040, KBP 1058, POB 0111 i POB 0211 wykazały wysoką odporność na fuzariozę kłosów wszystkich badanych typów.

LITERATURA

- Argyris J., Sanford D., Van, TeKrony D. 2003. *Fusarium graminearum* infection during wheat seed development and its effect on seed quality. *Crop Sci.* 43: 1782 — 1788.
- Bai G., Shaner G. 2004. Management and resistance in wheat and barley to *Fusarium* head blight. *Annu. Rev. Phytopathol.* 42: 135 — 161.
- Berthiller F., Dall'Asta C., Schuhmacher R., Lemmens M., Adam G., Krska R. 2005. Masked mycotoxins: determination of a deoxynivalenol glucoside in artificially and naturally contaminated wheat by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem.* 53: 3421 — 3425.
- Bottalico A. 1998. *Fusarium* diseases of cereals: Species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *J. Plant Pathol.* 80: 85 — 103.
- Bottalico A., Perrone G. 2002. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *Eur. J. Plant Pathol.* 108: 611 — 624.
- Boutigny A.-L.L., Richard-Forget F., Barreau C. 2008. Natural mechanisms for cereal resistance to the accumulation of *Fusarium* trichothecenes. *Eur. J. Plant Pathol.* 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 Breed.* 128: 1 — 26.

- Buerstmayr H., Lemmens M., Berlakovich S., Ruckenbauer 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., Schmolke M., Zimmermann G., Hartl L., Mascher F., Trotter 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 Breed.* 127: 325 — 332.
- Draeger R., Gosman N., Steed A., Chandler E., Thomsett M., Srinivasachary, Schondelmaier J., Buerstmayr H., Lemmens M., Schmolke M., Mesterhazy A., Nicholson P. 2007. Identification of QTLs for resistance to Fusarium head blight, DON accumulation and associated traits in the winter wheat variety Arina. *Theor. Appl. Genet.* 115: 617 — 625.
- Foroud N. A., Eudes, F. 2009. Trichothecenes in cereal grains. *Int. J. Mol. Sci.* 10: 147 — 173.
- Góral T., Walentyn-Góral D., Wiśniewska H. 2015. Odporność pszenicy i pszenżyta na fuzariozę kłosów — odporność typu I oraz typu II. *Biul. IHAR* (w druku).
- Góral T., Wiśniewska H., Ochodzki P., Walentyn-Góral, D., Belet J., Kwiatek M., Bogacki J., Drzazga T., Ługowska B., Matysik P., Witkowski E., Rubrycki K., Woźna-Pawlak U. 2014. Screening of winter wheat breeding lines for resistance to Fusarium head blight and accumulation of *Fusarium* toxins in grain. *Book of Abstracts. Cereals for Food, Feed and Fuel — Challenge for Global Improvement; Joint EUCARPIA Cereal Section & I•T•M•I Conference, 29.06 – 04.07, 2014; Wernigerode, Niemcy: 254 p.*
- Gunnaiah R., Kusalappa A.C., Duggavathi R., Fox S., Somers D. J. 2012. Integrated metabolo-proteomic approach to decipher the mechanisms by which wheat QTL (*Fhb1*) contributes to resistance against *Fusarium graminearum*. *PLoS One.* 7: e40695.
- 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.
- Lemmens M., Koutnik A., Steiner B., Buerstmayr H., Berthiller F., Schuhmacher R., Maier F., Schäfer W. 2008. Investigations on the ability of *Fhb1* to protect wheat against nivalenol and deoxynivalenol. *Cereal Res. Commun.* 36: 429 — 435.
- Mesterházy Á. 2002. Role of deoxynivalenol in aggressiveness of *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* and in resistance to Fusarium head blight. *Eur. J. Plant Pathol.* 108: 675 — 684.
- Mesterházy Á. 1995. Types and components of resistance to Fusarium head blight of wheat. *Plant Breed.* 114: 377 — 386.
- Miedaner T., Reinbrecht C., Lauber U., Schollenberger M., Geiger H. H. 2001. Effects of genotype and genotype-environment interaction on deoxynivalenol accumulation and resistance to Fusarium head blight in rye, triticale, and wheat. *Plant Breed.* 120:97 — 105.
- Miedaner T., Voss, H.-H. 2008. Effect of dwarfing genes on Fusarium head blight resistance in two sets of near-isogenic lines of wheat and check cultivars. *Crop Sci.* 48: 2115.
- Miller J. D. 2008. Mycotoxins in small grains and maize: old problems, new challenges. *Food Addit Contam.* 25: 219 — 30.
- Ochodzki P., Góral T. 2006. Production of mycotoxins by selected *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* isolates cultured on rice and wheat. *Conference Papers of 28. Mykotoxin-Workshop, Bydgoszcz, Poland, 29-31 May 2006: p. 73.*
- Paillard S., Schnurbusch T., Tiwari R., Messmer M., Winzeler M., Keller B., Schachermayr G. 2004. QTL analysis of resistance to Fusarium head blight in Swiss winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 109: 323 — 332.
- Perkowski J., Buśko M., Stuper K., Kostecki M., Matysiak A., Szwajkowska-Michałek L. 2008. Concentration of ergosterol in small-grained naturally contaminated and inoculated cereals. *Biologia* 63: 542 — 547.
- Perkowski J., Miedaner T., Geiger H. H., Muller H. M., Chelkowski J. 1995. Occurrence of deoxynivalenol (DON), 3-acetyl-DON, zearalenone, and ergosterol in winter rye inoculated with *Fusarium culmorum*. *Cereal Chem.* 72: 205 — 209.

- Perkowski J., Wiwart M., Busko M., Laskowska M., Berthiller F., Kandler W., Krska R. 2007. Fusarium toxins and total fungal biomass indicators in naturally contaminated wheat samples from north-eastern Poland in 2003. *Food Addit Contam.* 24: 1292 — 1298.
- Semagn K., Skinnes H., Bjørnstad Å., Marøy A.G., Tarkegne Y. 2007. Quantitative trait loci controlling Fusarium head blight resistance and low deoxynivalenol content in hexaploid wheat population from 'Arina' and NK93604. *Crop Sci.* 47: 294.
- Snijders C. H. A. 1990. Fusarium head blight and mycotoxin contamination of wheat, a review. *Netherlands J Plant Pathol.* 96: 187 — 198.
- Srinivasachary, Gosman N., Steed A., Simmonds J., Leverington-Waite M., Wang Y., Snape J., Nicholson P. 2008. Susceptibility to Fusarium head blight is associated with the Rht-D1b semi-dwarfing allele in wheat. *Theor. Appl. Genet.* 116: 1145 — 1153.
- Wiśniewska H., Góral T., Ochodzki P., Walentyn-Góral D., Kwiatek M., Majka M., Grzeszczak I., Bełtr J., Banaszak Z., Pojmał M., Kurlito D., Konieczny M., Budzianowski G., Cicha A., Paizert K., Woś H. 2014. Odporność rodów hodowlanych pszenżyta ozimego na fuzariozę kłosów. *Biul. IHAR* 271: 29 — 43.
- Wiśniewska H., Kowalczyk, K. 2005. Resistance of cultivars and breeding lines of spring wheat to *Fusarium culmorum* and powdery mildew. *J. Appl. Genet.* 46: 35 — 40.
- Yan W., Li, H. B., Cai S.B., Ma H.X., Rebetzke, G.J., Liu C. J. 2011. Effects of plant height on type I and type II resistance to Fusarium head blight in wheat. *Plant Pathol.* 60: 506 — 512.
- Zhu H., Gilchrist L., Hayes P., Kleinhofs A., Kudrna D., Liu Z., Prom L., Steffenson B., Toojinda T., Vihar H. 1999. Does function follow form? Principal QTLs for Fusarium head blight (FHB) resistance are coincident with QTLs for inflorescence traits and plant height in a doubled-haploid population of barley. *Theor. Appl. Genet.* 99: 1221 — 1232.