

Fuzarioza kłosów pszenicy. Część 1. Opis choroby i charakterystyka patogenów

Fusarium head blight of wheat. Part 1. Disease description and characteristics of the pathogens

Tomasz Góral 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Biologii Stosowanej, Radzików, 05-870 Błonie

[✉t.goral@ihar.edu.pl](mailto:t.goral@ihar.edu.pl)

Fuzarioza kłosów jest chorobą powodowaną przez grzyby z rodzaju *Fusarium*. Choroba poraża wszystkie zboża uprawiane w Polsce. Największe szkody powoduje w uprawach pszenicy zwyczajnej. Szkodliwość fuzariozy kłosów wynika przede wszystkim z zanieczyszczenia ziarna wtórnymi metabolitami *Fusarium* – mykotoksynami. Mają one negatywny wpływ na organizmy ludzi i zwierząt w przypadku spożycia żywności lub paszy skażonej mykotoksynami. W pierwszej części pracy przedstawiono etiologię choroby. Scharakteryzowano gatunki *Fusarium* powodujące fuzariozę kłosów zbóż wraz z najnowszą systematyką tych gatunków. Opisano najważniejsze mykotoksyny wytwarzane przez *Fusarium*. Przedstawiono również główne metody ograniczania i zwalczania fuzariozy kłosów.

Słowa kluczowe: *Fusarium*, fuzarioza kłosów, *Triticum*, mykotoksyny, zboża

Fusarium head blight is a disease caused by fungi belonging to the genus *Fusarium*. This disease affects all the cereals grown in Poland. The greatest damage is caused to bread wheat crops. The harmfulness of Fusarium head blight results primarily from grain contamination with mycotoxins, which are secondary metabolites of *Fusarium*. They are harmful to humans and animals when food or feed contaminated with mycotoxins containing them are consumed. The etiology of the disease is presented in the first part of this study. *Fusarium* species that cause Fusarium head blight in small-grain cereals are characterized along with the latest systematics of these species. The most important mycotoxins produced by *Fusarium* are described. The main methods for limiting and controlling Fusarium head blight are also presented.

Keywords: *Fusarium*, Fusarium head blight, mycotoxins, *Triticum*, cereals

Grzyby z rodzaju *Fusarium* powodują liczne choroby zbóż takie jak zgorzele korzeni i podstawy źdźbła, fuzariozy liści i kłosów (Kazan i Gardiner, 2018). Rodzaj ten należy do gromady workowców (*Ascomycota*), podgromady *Ascomycotina*, klasy *Sordariomycetes*, rzędu rozetkowców (*Hypocreales*) oraz rodziny gruzełkowatych (*Nectriaceae*). Spośród fuzaryjnych chorób zbóż największe znaczenie ma fuzarioza kłosów (Goswami i Kistler, 2004; Savary i in., 2012). Powodem jest to, że choroba ta powoduje zarówno obniżenie plonu ziarna jak i pogorszenie jego jakości, przede wszystkim ze względu na skażenie ziarna mykotoksynami – wtórnymi metabolitami wytwarzanymi przez *Fusarium* (Bakker i in., 2018; Ji i in., 2019).

Występowanie i etiologia fuzariozy kłosów

Fuzarioza kłosów występuje na wszystkich zbożach uprawianych w Polsce. Najbardziej podatna na fuzariozę kłosów jest pszenica twarda (*Triticum turgidum* ssp. *durum*), u której jak dotąd nie zidentyfikowano form odpornych (Haile i in., 2019; Prat i in., 2014) (Rys. 1). Pszenica zwyczajna (*T. aestivum* ssp. *aestivum*) jest mniej podatna (Langevin i in., 2004). W populacji tego zboża występuje duże zróżnicowanie odporności od form bardzo podatnych do form wysoce odpor-

nych, bardzo słabo porażanych. Pszenżyto (*xTriticosecale*) wykazuje wyższą odporność w porównaniu do pszenicy. Najbardziej odporne na fuzariozę kłosów jest żyto (*Secale cereale*) (Rys. 2). Owies (*Avena sativa*, *A. nuda*) i jęczmień (*Hordeum vulgare*) wykazują mniejszą podatność na fuzariozę kłosów (wiech) w porównaniu do pszenicy i pszenżyta. Choroba występuje również na uprawnych gatunkach pokrewnych wobec pszenicy i pszenicy twardej takich jak orkisz (*T. aestivum* ssp. *spelta*), płaskurka (*T. turgidum* ssp. *dicoccon*) i pszenica samopsza (*T. monococcum* ssp. *monococcum*) (Góral i Ochodzki, 2017; Oliver i in., 2008) (Rys. 3).

Kłosy zbóż infekowane są przede wszystkim podczas kwitnienia (György i in., 2020; Reis i in., 2016). W tym stadium zboża są najbardziej podatne na infekcję zarodnikami grzybów *Fusarium* (Lacey i in., 1999; Skinner i in., 2010; Strange i Smith, 1971). Okres największej wrażliwości pszenicy na infekcję wynosi około 6-8 dni od fazy pełni kwitnienia (BBCH 65) (Beccari i in., 2019; György i in., 2020). Infekcja w tym okresie powodowała największe uszkodzenie ziarniaków przez *Fusarium* oraz najwyższe skażenie ziarna mykotoksyną fuzaryjną deoksyniwalenolem (DON) Po infekcji grzyb rozwija się w zakażonym kwiatku przerastając następnie do innych kwiatków w kło-

sku (Kang i Buchenauer, 2000; Kazan i in., 2012; Ribichich i in., 2000). Następnie poprzez osadkę kłosową grzyb rozprzestrzenia się na kolejne kłoski (Dweba i in., 2017; Ma i in., 2013). W przypadku silnego porażenia następuje zamieranie kłosa powyżej miejsca infekcji (Buerstmayr i in., 2002; Lemmens i in., 2004).

Obraz choroby jest inny u jęczmienia, u którego przerastanie grzybnii do sąsiednich kłosek jest ograniczone i objawy choroby występują na pojedynczych kłoskach (Janssen i in., 2018). Grzyb przerasta do sąsiednich kłosek nie penetrując osadki kłosowej (Sallam i in., 2023). U owsa, ze względu na luźną budowę wiechy objawy choroby występują na pojedynczych kłosach (Tekle i in., 2011). Grzyb kolonizuje również rozwijający się ziarniak powodując jego uszkodzenia o różnym nasileniu (Miller i in., 2004). Może to być uszkodzenie zarodka (ziarniak nie rozwija się), obniżenie masy ziarniaków, ich pomarszczenie, osłabienie siły kiełkowania oraz zasiedlenie ziarniaków przez *Fusarium* spp. (Argyris i in., 2003). Wytwarzane w procesie patogenezы mykotoksyny (DON, niwalenol, zearaleon, toksyny T-2 i HT-2, moniliformina i wiele innych) gromadzą się w tkankach kłosa oraz w ziarniakach.

W przypadku dużego nasilenia fuzarioza kłosów może powodować spadki plonu ziarna, u pszenicy dochodzące do 35% w przypadku infekcji powodowanej przez *F. culmorum* (Snijders i Perkowski, 1990). Gatunek *F. graminearum* redukuje plon ziarna pszenicy twardej o 32% a masę 1000 ziarniaków o 34% (Wong i in., 1992). W Holandii plony pszenicy były silnie powiązane z nasileniem fuzariozy kłosa co wskazuje, że grzyby *Fusarium* spp. były zagrożeniem dla upraw pszenicy (Daamen i in. 1991). Obserwowano średni spadek plonu do 60% u podatnych odmian pszenicy zakażanych sztucznie izolatami *F. culmorum* i *F. graminearum* (stosowanymi oddzielnie) (Mesterhazy i Bartok, 1993). W badaniach rodów hodowlanych pszenicy ozimej fuzarioza kłosów po sztucznym zakażeniu *F. culmorum* powodowała redukcję plonu ziarna w zakresie od 0 do 55%, w zależności od odporności rodu (Góral i in., 2017). Jednakże szkodliwość fuzariozy kłosów polega przede wszystkim na obniżeniu jakości ziarna pomimo braku istotnego spadku plonu (Dweba i in., 2017). Zainfekowane ziarniaki, nawet wyglądające na zdrowe, mogą być skażone mykotoksynami (Cowger i Arrellano, 2010; Del Ponte i in., 2007).



Rys. 1. Objawy fuzariozy kłosów na (od lewej) pszenicy twardej, pszenicy zwyczajnej i pszenżycie (fot. T. Góral).
Fig. 1. Symptoms of *Fusarium* head blight on (from left) durum wheat, bread wheat and triticale (photo T. Góral)

Nasilenie fuzariozy kłosów zależy przede wszystkim od warunków pogodowych podczas kwitnienia a także innych czynników agrotechnicznych, takich jak odporność odmian, sposób uprawy gleby, przedplon i inne (Klem i in., 2007; Marzec-Schmidt i in., 2021; West i in., 2012). Na zawartość mykotoksyn w ziarnie wpływ mają także warunki pogodowe po kwitnieniu do momentu zbiorów ziarna (Cowger i in., 2009). Interakcja genotypu ze środowiskiem odgrywa istotną rolę w układzie pasożytniczym *Fusarium* – pszenica. Dlatego też, uszeregowania genotypów pod

względem odporności mogą się różnić w znacznym stopniu w różnych latach badań. Stabilność ekspresji odporności w różnych środowiskach zależy od poziomu odporności genotypu. Wysoko odporne genotypy (np. posiadające gen *Fhb1*) generalnie wykazują mniejszą zmienność środowiskową niż genotypy średnio wrażliwe na fuzariozę kłosów. Odporność na fuzariozę kłosów jest odpornością niespecyficzną zarówno na poziomie izolatów jaki i gatunków *Fusarium* (Mesterhazy i in., 2005; van Eeuwijk i in., 1995).



Rys. 2. Objawy fuzariozy kłosów (wiech) na (od lewej) życie, jęczmieniu i owsie (fot. T. Góral).
Fig. 2. Symptoms of Fusarium head blight on (from left) rye, barley and oats (photo T. Góral).



Rys. 3. Objawy fuzariozy kłosów na (od lewej) orkiszu, płaskurce i samopszy (fot. T. Góral).
Fig. 3. Symptoms of Fusarium head blight on (from left) spelt, emmer and einkorn (photo T. Góral).

Gatunki *Fusarium* powodujące fuzariozę kłosów

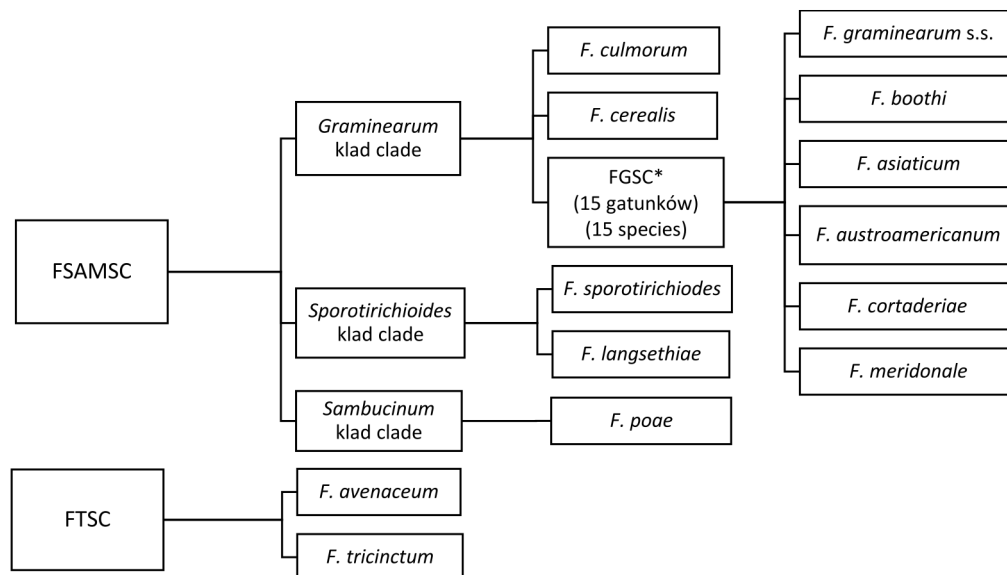
Głównymi sprawcami fuzariozy kłosów są następujące gatunki *Fusarium*: *F. culmorum*, *F. graminearum* i *F. avenaceum* (Bilska i in., 2018; Bottalico, 1998; Bottalico i Perrone, 2002; Góral i in., 2021; Iwaniuk i in. 2018; Kuzdraliński i in. 2018). Dominacja danego gatunku jest uzależniona od jego wymagań termicznych. *F. culmorum* przeważa głównie w regionach o chłodnym klimacie (Niemcy, Holandia, Skandynawia, Polska), podczas gdy *F. graminearum* dominuje w regionach o cieplejszym klimacie (np. południowa Europa, Stany Zjednoczone).

Badania z zastosowaniem technik molekularnych na kolekcji izolatów *F. graminearum* pokazały, że gatunek ten jest w rzeczywistości kompleksem gatunkowym *F. graminearum* species complex (FGSC). Do tej pory wyróżniono w

FGSC 16 odrębnych gatunków (O'Donnell i in., 2000; Sarver i in., 2011; Starkey i in., 2007; Ward i in., 2008). W kompleksie FGSC najczęściej występującym gatunkiem jest *F. graminearum* sensu stricto. W Europie *F. graminearum* s.s. jest gatunkiem dominującym (Amarasinghe i in., 2019; Bilska i in., 2018; Talas i in., 2011). Stwierdzono obecność jedynie pojedynczych izolatów innych gatunków (*F. boothii*, *F. cortaderiae*), co pokazano w analizie wpływu klimatu na rozmieszczenie gatunków FGSC wykonanej przez Backhouse (2014) oraz analizie bibliograficznej Del Ponte i in. (2022). W Ameryce Północnej również dominuje *F. graminearum* s.s., natomiast w Ameryce Południowej stwierdzono znaczny udział *F. meridionale* (Astolfi i in., 2012). We wschodniej Azji udział w kompleksie FGSC *F. asiaticum* jest podobny jak *F. graminearum* s.s., natomiast w południowej Afryce znacząca jest obecność gatunku *F. boothii* (Boutigny i in., 2011). Należy dodać, że

gatunki z kompleksu FGSC oraz *F. culmorum* są blisko spokrewnione i wchodzą w skład *F. sambucinum* species complex (FSAMSC) (O'Donnell i in., 2013) (Rys. 4). Do FSAMSC należą również *F. cerealis*, *F. langsethiae*, *F. poae* i *F. sporotrichioides*. Gatunki *F. avenaceum* wraz z *F. tricinctum*

należą natomiast do *F. tricinctum* species complex (Laraba i in., 2022). Występujący również na kłosach zbóż gatunek *F. equiseti* należy do *F. incarnatum-F. equiseti* species complex (O'Donnell i in., 2013).



Rys. 4. Drzewo filogenetyczne kompleksów gatunkowych *Fusarium sambucinum* species complex (FSAMSC) oraz *F. tricinctum* species complex (FTSC). Uwzględniono jedynie najważniejsze gatunki powodujące fuzariozę kłosów zbóż. FGSC – *F. graminearum* species complex; * - pokazano najczęściej występujące gatunki kompleksu FGSC.

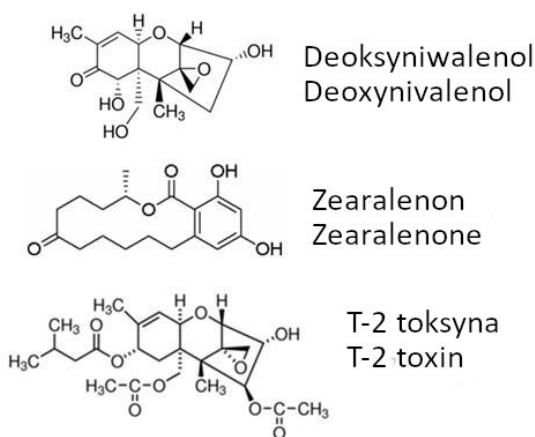
Fig. 4. Phylogenetic tree of the *Fusarium sambucinum* species complex (FSAMSC) and *F. tricinctum* species complex (FTSC). Only the most important species causing FHB in cereals were included. FGSC – *F. graminearum* species complex; * - the most common species of the FGSC complex.

W ostatnich latach obserwuje się wzrost znaczenia gatunku *F. graminearum* s.s. jako sprawcy fuzariozy kłosów w środkowej i północnej Europie (Bilska i in., 2018; Góral i in., 2021; Parikka i in., 2012; Yli-Mattila i in., 2013). Następuje natomiast spadek znaczenia gatunku *F. culmorum*. Zmianę tę publikowane badania wyjaśniają jako skutek ocieplenia klimatu (*F. graminearum* s.s. potrzebuje wyższej temperatury do rozwoju) oraz znacznym wzrostem powierzchni uprawy kukurydzy w środkowej i północnej Europie (Jennings i in., 2004; Vaughan i in., 2016; West i in., 2012; Xu i in., 2005). *F. graminearum* s.s. jest jednym z głównych (wraz z *F. verticillioides*) sprawców fuzariozy kolb kukurydzy (Munkvold, 2003). Resztki poźniwe kukurydzy – duże fragmenty nierozdrobnionych łodyg i kolb są miejscem dla rozwoju i przetrwania grzybów z rodzaju *Fusarium* (Maiorano i in., 2008). Są one głównym źródłem inokulum pierwotnego *F. graminearum* s.s. porażającego kłosy pszenicy.

Toksyny wytwarzane przez *Fusarium*

Grzyby rodzaju *Fusarium* porażające zboża posiadają zdolność do wytwarzania trichotecenów z grupy A (np. toksyny T-2 i HT-2) oraz z grupy B (np. deoksyniwalenol=DON, niwalenol), monili-

forminy, zearalenonu (ZEN), enniatyn, bewerycyny i wielu innych toksyn (Tab. 1, Rys. 5).



Rys. 5. Najważniejsze toksyny tworzone przez *Fusarium* występujące w ziarnie pszenicy.

Fig. 5. Main *Fusarium* toxins contaminating wheat grain.

Trichoteceny mają silne toksyczne działanie wobec ludzi i zwierząt, takie jak podrażnienia skóry, wymioty, biegunka, osłabienie łaknienia, krwotoki, zaburzenia neurologiczne, poronienia, a nawet mogą prowadzić do śmierci (Escrivá i in., 2015; Placinta i in., 1999). Długotrwałe spożywanie DON-u i zbliżonych związków zmniejsza od-

Tabela 1
Table 1Toksyny wytwarzane przez gatunki *Fusarium* występując na pszenicy (według Munkvold, 2017)
Mycotoxins produced by *Fusarium* species infecting wheat (based on Munkvold, 2017)

Gatunek <i>Fusarium</i> <i>Fusarium</i> species	Wytwarzane toksyny Toxins produced
<i>F. graminearum</i> species complex (chemotypy: 3ADON, 15ADON, NIV)	DON, 3AcDON, 15AcDON, NIV, ZEN, FUZ, NX
<i>F. culmorum</i> (chem. 3ADON, NIV)	DON, 3AcDON, NIV, ZEN, FUZ, ENN, NX
<i>F. avenaceum</i>	MON, ENN, FUZ, BEA
<i>F. cerealis</i>	NIV, FUZ
<i>F. poae</i>	NIV, FUS-X, DAS, MAS, BEA, ENN
<i>F. sporotrichioides</i>	T-2, HT-2, NEO, DAS, BEA, ENN, MON
<i>F. langsethiae</i>	T-2, HT-2, DAS, NEO
<i>F. tricinctum</i>	ENN, MON, FUZ
<i>F. equiseti</i>	ZEN, BEA, MON, DAS, FUCH

Skróty nazw mykotoksyn: DON – deoksyniwalenol i jego pochodne 3AcDON, 15AcDON; NIV – niwalenol; FUS-X – fuzarenon-X; ZEN – zearalenon; FUZ – fuzaryny C; ENN – enniatyny; BEA – bowerycyna; T-2 – toksyna T-2, jej pochodna: HT-2 toksyna, NEO – neosolaniol; DAS – diacetokyscirpenol; MAS – monoacetokyscirpenol; NX – toksyny NX (trichoteceny z grupy A) (Schiwek i in., 2022; Varga i in., 2015); FUCH - fuzarochromanon

Abbreviations of mycotoxin names: DON – deoxynivalenol and derivatives 3AcDON, 15AcDON; NIV – nivalenol; FUS-X – fusarenon-X; ZEN – zearalenone; FUZ – fusarins C; ENN – enniatins; BEA – beauvericin; T-2 – T-2 toxin, derivative: HT-2 toxin, NEO – neosolaniol; DAS – diacetoxyscirpenol; MAS – monoacetoxyscirpenol; NX – NX toxins (type A trichothecenes) (Schiwek i in., 2022; Varga i in., 2015); FUCH - fusarochromanone

porność na choroby i osłabia system immunologiczny. Fumonizyny są silnie toksyczne i rakotwórcze. DON jest jedną z głównych mykotoksyn wytwarzanych przez gatunki *F. graminearum* i *F. culmorum*. Jest to najczęściej występująca mykotoksyną w ziarnie zbóż, szkodliwa zarówno dla roślin jak i dla zwierząt i ludzi (Ji i in., 2019; Latham i in., 2023).

W grupie gatunków wytwarzających trichoteceny typu B zidentyfikowano trzy genotypy trichotecenowe (chemotypy) (Alexander i in., 2011; Miller i in., 1991). Chemotyp jest to grupa izolatów *Fusarium* o podobnym profilu wytwarzanych toksyn z grupy trichotecenów. Izolaty chemotypu NIV mogą wytwarzać NIV i jego acetylowaną pochodną. Izolaty chemotypu DON mogą wytwarzać DON i jego acetylowane pochodne (3-acetyl DON i 15-acetyl DON). W ramach chemotypu DON obecne są dwa warianty: izolaty 3ADON wytwarzają DON i 3AcDON, a izolaty 15ADON wytwarzają DON i 15AcDON. Wszystkie trzy chemotypy wykryto u *F. graminearum* s.s. (Starkey i in., 2007). U *F. culmorum* zidentyfikowano tylko chemotypy 3ADON i NIV (Quarta i in., 2005; Tóth i in., 2004).

Wyniki badań wskazują, że izolaty chemotypu NIV są mniej agresywne wobec pszenicy niż izolaty chemotypu DON (3ADON, 15ADON) (Liu i in., 2017; Miedaner i Reinbrecht, 2001; Muthomi i in., 2000). Jednakże Goswami i Kistler (2005) stwierdzili, że agresywność izolatów FGSC nie zależała od rodzaju wytwarzanej toksyny (DON versus NIV). Na ich agresywność wpływała głównie ilość wytwarzanych toksyn. Autorzy uważają, że jest to kluczowy czynnik decydujący o agresywności izolatów wobec pszenicy. Podob-

ne wnioski można znaleźć w artykule Qu i in. (2008) dotyczącym agresywności izolatów FGSC. W artykule opublikowanym przez Maier i in. (2006) pokazano, że rozwój fuzariozy na kłosach pszenicy był wolniejszy, a objawy były słabsze dla izolatu wytwarzającego NIV w porównaniu z izolatami wytwarzającymi DON. Jednak obie toksyny były kluczowe dla infekcji kłosa, ponieważ izolaty (DON i NIV) z wyłączonym genem *Tri5* nie rozprzestrzeniały się poza inokulowane punkto-wo kłoski. Gen *Tri5* jest pierwszym genem w cyklu syntezy trichotecenów i koduje enzym syntazę trichodieniu (Foroud i in., 2019). W warunkach polowych Mesterhazy i in. (1999) porównali agresywność izolatów *F. culmorum* NIV oraz zestawu izolatów wytwarzających DON i nie stwierdzili różnic w nasileniu objawów fuzariozy kłosów i produkcji trichotecenów. Carter i in. (2002) nie znaleźli różnic w agresywności izolatów FGSC wytwarzających DON i NIV (zidentyfikowanych później jako *F. asiaticum*) wobec pszenicy. Co ciekawe, izolaty NIV były bardziej agresywne wobec kukurydzy niż izolaty DON. Wyniki te potwierdzają badania Machado i in. (2022), którzy porównywali agresywność wobec kukurydzy izolatów *F. graminearum* s.s. oraz *F. meridionale* (gatunki z kompleksu FGSC). Izolaty *F. meridionale* tworzące NIV była bardziej agresywne wobec kukurydzy niż *F. graminearum* s.s wytwarzające DON.

DON i NIV są czynnikami agresywności *Fusarium* wobec pszenicy. Wprowadzone w czystej postaci do kłosów pszenicy powodują objawy podobne do objawów fuzariozy kłosów (Gunupuru i in., 2017; Lemmens i in., 2008; Proctor i in., 2002). Stwierdzono różnice w mechanizmie de-

toksycacji obu toksyn. Lemmens i in. (2008) zasugerowali, że różne geny w klastrze genów *Fhb1* mogą być zaangażowane w odporność na te toksyny. NIV jest mniej toksyczny dla roślin pszenicy niż DON (Eudes i in., 2000; Foroud i in., 2012). Natomiast NIV jest bardziej toksyczny dla ludzi i zwierząt (Escrivá i in., 2015). Ilości NIV wykryte w produktach rolnych są niższe niż ilości DON, ale obie mykotoksyny mogą współwystępować i stanowić zagrożenie dla konsumentów, gdy ich całkowita ilość przekracza maksymalne limity dla DON (Alassane-Kpembé i in., 2017).

W związku ze stwierdzoną szkodliwością toksyn tworzonych przez grzyby z rodzaju *Fusarium*, w wielu krajach świata przyjęto limity zawartości tych toksyn w żywności i paszach. W Unii Europejskiej limity reguluje Rozporządzeniu Komisji (WE) NR 1126/2007 z dnia 28 września 2007 r. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R1126>). Dopuszczalną zawartość DON w nieprzetworzonej pszenicy twardej, owsie i kukurydzy ustalono na 1,75 mg/kg ziarna, a w innych nieprzetworzonych zbożach na 1,25 mg·kg⁻¹. W przypadku ZEN limity te wynoszą 0,10 mg·kg⁻¹ ziarna zbóż innego niż kukurydza i 0,20 mg·kg⁻¹ ziarna kukurydzy. Zawartość mykotoksyn w ziarnie zbóż dla celów paszowych podana jest w Zaleceniu Komisji z dnia 17 sierpnia 2006 r. w sprawie obecności deoksynivalenolu, zearalenonu, ochratoksyny A, T-2 i HT-2 oraz fumonizyn w produktach przeznaczonych do żywienia zwierząt (2006/576/WE). Ilości te nie powinny przekraczać 8,00 mg·kg⁻¹ DON w ziarnie (5,00 mg·kg⁻¹ w całej paszy), oraz 2,00 mg·kg⁻¹ ZEN w ziarnie. W przypadku świń normy są znacznie niższe ze względu na większą wrażliwość tych zwierząt na mykotoksyny (Accensi i in., 2006; Minervini i in., 2008). Trwają prace nad ustaleniem limitów dla trichotecenów z grupy A (T-2 toksyna, HT-2 toksyna). Wstępnie zalecane maksymalne dopuszczalne stężenia sumy T-2 toksyny i toksyny HT-2 dla pszenicy nie powinny przekraczać 0,10 mg/kg ziarna, a w pszenicy przeznaczonej do bezpośredniej konsumpcji lub w produktach z mielonego ziarna – 0,05 mg·kg⁻¹. Dla makaronów wartość ta wynosi 0,025 mg·kg⁻¹ [Zalecenie Komisji z dnia 27 marca 2013 r. w sprawie obecności toksyn T-2 i HT-2 w zbożach i produktach zbożowych (2013/165/UE)].

Metody zwalczania fuzariozy kłosów

Do zwalczania fuzariozy kłosów zbóż można stosować fungicydy specjalnie dedykowane dla tej choroby. Jednakże badania pokazały, że nawet najlepsze substancje aktywne nie są w pełni efektywne w zwalczaniu tej choroby (Dweba i in., 2017; Gromadzka i in., 2012; Haidukowski i in., 2005; Mesterházy i in., 2003; Tini i in., 2020). Dotyczy to zwłaszcza redukcji zawartości trichotecenów (DON, NIV) w ziarnie (Ioos i in., 2005).

Istotnym problemem w przypadku fuzariozy kłosów jest odpowiedni termin zastosowania zabiegu fungicydowego. Zalecanym terminem oprysku jest okres od kwitnienia pszenicy do dojrzałości wodnej ziarna (Freije i Wise, 2015; Mesterházy i in., 2018; Nakajima, 2010). Stosowanie fungicydów w innych terminach znacznie obniża efektywność zwalczania choroby i wzrost skażenia ziarna mykotoksynami. Pojawiają się również doniesienia o pojawieniu się szczepów *Fusarium* odpornych na substancje czynne fungicydów takie jak bezymidazole (karbendazym) i triazole (tebukonazol) (Chen i Zhou, 2009; Duan i in., 2019; Spolti i in., 2014). Substancje czynne z grupy strobiluryn (QoI = quinone outside inhibitors) są powszechnie stosowane w fungicydach stosowanych do zwalczania chorób grzybowych roślin uprawnych np. azoksystrobina. Stosowanie tych substancji jest jednakże mało efektywne w zwalczaniu fuzariozy kłosów (Hallen-Adams et al., 2011; Mesterházy et al., 2003). Stwierdzono również, że strobiluryny mogą stymulować produkcję DON poprzez zwiększanie ekspresji genów *Tri5* i *Tri6* (geny szlaku biosyntezy trichotecenów) (Duan et al., 2020). Odporność grzybów z rodzaju *Fusarium* na substancje czynne fungicydów oraz wycofywanie niektórych grup substancji z użytku stwarza potrzebę opracowania nowych substancji zwalczających grzyby *Fusarium* i produkcję toksyn. Przykładem badań może być praca Liu i in. (2015) dotycząca podjednostek enzymu syntazy kwasu acetylohydroksylowego (AHAS) specyficznych dla *F. graminearum*. Wyłączenie genów je kodujących powodowało osłabienie wzrostu grzybnicy, zmniejszenie wirulencji wobec pszenicy oraz produkcji DON u *F. graminearum*. W pracy Hu i in. (2023) przedstawiono potencjalne możliwości wykorzystania wenturycydyny A substancji pochodzącej z bakterii *Streptomyces pratensis*. Substancja ta zmniejszała nasilenie fuzariozy kłosów a także hamowała biosyntezę DON. Stan badań nad metodami zwalczania fuzariozy kłosów przedstawiono w pracy przeglądowej Moonjely i in. (2023).

Biorąc pod uwagę powyższe oraz wprowadzanie od 2014 roku w Polsce systemu integrowanej ochrony roślin (dyrektywa 2009/128/WE oraz rozporządzenie nr 1107/2009), uprawa genetycznie odpornych odmian jest najbardziej ekonomicznym sposobem zwalczania fuzariozy kłosa. Wielu hodowców zaczyna dostrzegać konieczność włączenia odporności na fuzariozę kłosa do swojego materiału hodowlanego. Zmienność genetyczna odporności na fuzariozę kłosa jest dobrze udokumentowana u pszenicy i gatunków pokrewnych. Nieznane jest źródło odporności pełnej tzn. jak dotąd u żadnego z badanych genotypów pszenicy nie zaobserwowano całkowitej odporności, jednakże liczne wysoko odporne genotypy zostały zidentyfikowane i opisane. Są to pszenice jare pochodzące z Chin (Sumai 3, linie Ning, linie Wu-

han, linie CJ, Wangshuibai), Japonii (Nobeokabozu-Komugi, Shinchunaga) i Brazylii (Frontana, Encruzilhada) (Jia i in., 2018; Jiang i in., 2006; Kubo i in., 2013; Saharan, 2020; Yang i in., 2006). W populacji pszenicy ozimej zmienność odporności na fuzariozę kłosów jest mniejsza, jednakże możliwe jest zidentyfikowanie genotypów o podwyższonej odporności, takich jak np. Arina, Praag 8, Bence, Ringo Star, linie SVP (Góral, 2005; Mesterházy i in., 2018, Snijders, 1990a). W przypadku pszenicy ozimej podwyższona odporność wynika z obecności licznych genów niskim efekcie czego przykładem jest odmiana Arina (Draeger i in., 2007).

Hodowla pszenicy ozimej w kierunku odporności na fuzariozę kłosa jest z wielu powodów trudnym zadaniem. Najodporniejsze genotypy mają egzotyczne pochodzenie i wiele niekorzystnych cech agronomicznych, odporność na fuzariozę jest odpornością typu oligogenicznego lub poligenicznego (Buerstmayr i in., 2019; Mesterházy, 2014). Selekcja pod względem odporności podlega silnym wpływom warunków środowiska (stopień prażenia kłosów i ziarniaków oraz zawartość toksyn zależą od warunków pogodowych), jest pracochłonna i kosztowna (metodyka inokulacji, ocena porażenia kłosów i ziarniaków, analizy zawartości toksyn) (György i in., 2020; Mesterházy et al., 2020; Miedaner et al., 2001; Steiner et al., 2017; Wang et al., 2021).

Chińska odmiana pszenicy Sumai 3 i genotypy jej pokrewne charakteryzują się wysoką, stabilną odpornością na fuzariozę kłosa. Niestety odmiana ta ma wiele cech negatywnych (niski plon, podatność na wyleganie, osypywanie ziarna) pod względem agronomicznym (Kosová i in., 2009; Steiner i in. 2017; Zhang and Mergoum, 2007). Istniejące sprzężenia genów odporności z genami warunkującym te cechy powodują, że hodowcy europejscy dość niechętnie włączają ją do programów hodowlanych pszenicy (Buerstmayr i in. 2019).

Liczba komercyjnych odmian z genem *Fhb1* jest ograniczona. Gen ten znajduje się głównie w odmianach pszenicy jarej uprawianych w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie i Chinach (Buerstmayr i in., 2019; Hao i in., 2020). Jak podają Steiner i in. (2017) 50% odmian pszenicy jarej z programu hodowlanego Uniwersytetu w Minnesocie zawierało gen *Fhb1*. Od roku 1999 ponad 20 odmian pszenicy jarej z genem *Fhb1* pochodzącym z Sumai 3 zostało zarejestrowanych w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie (Buerstmayr i in. 2019). Genu tego brak jednakże w odmianach pszenicy ozimej, zarówno europejskich jak i chińskich (Li et al., 2019). Jedyna europejska odmiana ozima z *Fhb1* Jaceo (Francja) została wycofana z rynku (Steiner i in., 2017; Zhu i in., 2019). Obecnie w uprawie jest jedna odmiana pszenicy ozimej z genem *Fhb1* MS INTA 416 wyhodowana

i uprawiana w Argentynie (Bainotti i in., 2017). W związku z tym konieczne jest również tworzenie materiałów wyjściowych dla hodowli, aby bardziej zaawansowane formy pszenicy ozimej były odporne na fuzariozę kłosów. Jednak przy użyciu konwencjonalnych technik krzyżowania proces ten może być bardzo powolny. Selekcja wspomagana markerami (MAS) przyspieszyła proces wprowadzania genów odporności z egzotycznych źródeł (Anderson, 2007). Wyniki, które dotychczas zostały opublikowane, pokazują, że ta metoda selekcji jest skuteczna w selekcji genu *Fhb1* zlokalizowanego na krótkim ramieniu chromosomu 3B (Hu i in., 2023; Radecka-Janusik i in., 2022).

Alternatywą może być zastosowanie zidentyfikowanych, europejskich źródeł odporności posiadających geny o niskim efekcie (Holzapfel i in., 2008). Przykładowo wyhodowana przez rumuńskich hodowców odmiana pszenicy ozimej Fundulea 210R jest wysoko odporna na fuzariozę kłosów i nie posiada w rodowodzie chińskich źródeł odporności (Shen i in., 2003). Kumuluje ona odporność pochodzącą z odmiany NS 732 z dawnej Jugosławii oraz odmiany amerykańskiej Amigo (Ittu i in., 2001). Podobnie odporność na fuzariozę kłosów wykazały linie SVP wytworzone w latach 90. w Holandii (Snijders, 1990b). W ich rodowodzie znajdują się jedynie europejskie odmiany pszenicy ozimej np. Marzotto, Dippes Triumph, Mironovskaja 808.

Pochodząca z Chin odmiana Sumai 3 i genotypy jej pokrewne są z sukcesem używane, jako źródła odporności w niektórych regionach uprawy pszenicy (Chiny, Kanada, Stany Zjednoczone), głównie pszenicy jarej. Konieczne jest znalezienie również innych genów odporności, w celu zapobieżenia uzależnieniu od kilku genów z jednego źródła. Co więcej poziom odporności na fuzariozę kłosa nie jest na tyle wysoki, żeby zabezpieczyć przed stratami w przypadku dużej presji chorobowej. Dlatego identyfikacja nowych źródeł odporności na fuzariozę kłosa jest niezbędna dla dalszej poprawy odporności pszenicy. Genotypy pszenicy o wysokiej odporności na fuzariozę kłosa zostały zidentyfikowane dzięki systematycznie prowadzonej ocenie kolekcji genotypów pszenicy (Góral i in., 2019, 2018; Ochodzki i in., 2021). Do identyfikacji genów (loci cech ilościowych QTL) odporności o niskim efekcie wykorzystana może być technika mapowania asocjacyjnego (GWAS) (Kollers i in., 2013; Mirdita i in., 2015). Genotypy ze zidentyfikowaną obecnością QTL warunkujących odporność na fuzariozę kłosów mogą być wykorzystane w programach hodowli odpornościowej.

Literatura

- Accensi, F., Pinton, P., Callu, P., Abella-Bourges, N., Guelfi, J.F., Grosjean, F., Oswald, I.P., 2006. Ingestion of low doses of deoxynivalenol does not affect hematological, biochemical, or immune responses of piglets. *J. Anim. Sci.* 84, 1935–1942. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-355>
- Alassane-Kpembi, I., Puel, O., Pinton, P., Cossalter, A.M., Chou, T.C., Oswald, I.P., 2017. Co-exposure to low doses of the food contaminants deoxynivalenol and nivalenol has a synergistic inflammatory effect on intestinal explants. *Arch. Toxicol.* 91, 2677–2687. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1902-9>
- Alexander, N.J., McCormick, S.P., Waalwijk, C., van der Lee, T., Proctor, R.H., 2011. The genetic basis for 3-ADON and 15-ADON trichothecene chemotypes in *Fusarium*. *Fungal Genet. Biol.* 48, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2011.01.003>
- Amarasinghe, C., Sharanowski, B., Dilantha Fernando, W.G., 2019. Molecular phylogenetic relationships, trichothecene chemotype diversity and aggressiveness of strains in a global collection of *Fusarium graminearum* species. *Toxins* 11, 263. <https://doi.org/10.3390/toxins11050263>
- Anderson, J.A., 2007. Marker-assisted selection for Fusarium head blight resistance in wheat. *Int. J. Food Microbiol.* 119, 51–3. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.025>
- Argyris, J., Van Sanford, D., TeKrony, D., 2003. *Fusarium graminearum* infection during wheat seed development and its effect on seed quality. *Crop Sci.* 43, 1782–1788. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1782>
- Astolfi, P., Reynoso, M.M., Ramirez, M.L., Chulze, S.N., Alves, T.C.A., Tessmann, D.J., Del Ponte, E.M., 2012. Genetic population structure and trichothecene genotypes of *Fusarium graminearum* isolated from wheat in southern Brazil. *Plant Pathol.* 61, 289–295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02515.x>
- Backhouse, D., 2014. Global distribution of *Fusarium graminearum*, *F. asiaticum* and *F. boothii* from wheat in relation to climate. *Eur. J. Plant Pathol.* 139, 161–173. <https://doi.org/10.1007/S10658-013-0374-5/FIGURES/3>
- Bainotti, C.T., Lewis, S., Campos, P., Alberione, E., Salines, N., Gomez, D., Frascina, J., Salines, J., Formica, M.B., Donaire, G., Vanzetti, L.S., Lombardo, L., Nisi, M.M., Cuniberti, M.B., Mir, L., Conde, M.B., Helguera, M., 2017. MS INTA 416: A new Argentinean wheat cultivar carrying *Fhb1* and *Lr47* resistance genes. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 17, 274–280. <https://doi.org/10.1590/1984-70332017v17n3e42>
- Bakker, M.G., Brown, D.W., Kelly, A.C., Kim, H.S., Kurtzman, C.P., McCormick, S.P., O'Donnell, K.L., Proctor, R.H., Vaughan, M.M., Ward, T.J., 2018. *Fusarium* mycotoxins: a trans-disciplinary overview. *Can. J. Plant Pathol.* 40, 161–171. <https://doi.org/10.1080/07060661.2018.1433720>
- Beccari, G., Arellano, C., Covarelli, L., Tini, F., Sulyok, M., Cowger, C., 2019. Effect of wheat infection timing on Fusarium head blight causal agents and secondary metabolites in grain. *Int. J. Food Microbiol.* 290, 214–225. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.10.014>
- Bilska, K., Jurczak, S., Kulik, T., Ropelewska, E., Olszewski, J., Żelechowski, M., Zapotoczny, P., 2018. Species composition and trichothecene genotype profiling of *Fusarium* field isolates recovered from wheat in Poland. *Toxins* 10, 325. <https://doi.org/10.3390/toxins10080325>
- Bottalico, A., 1998. *Fusarium* diseases of cereals: Species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *J. Plant Pathol.* 80, 85–103. <https://doi.org/10.4454/jpp.v80i2.807>
- 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. <https://doi.org/10.1023/A:1020635214971>
- Boutigny, A.-L., Ward, T.J., Van Coller, G.J., Flett, B., Lamprecht, S.C., O'Donnell, K., Viljoen, A., 2011. Analysis of the *Fusarium graminearum* species complex from wheat, barley and maize in South Africa provides evidence of species-specific differences in host preference. *Fungal Genet. Biol.* 48, 914–920. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2011.05.005>
- 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). *Theor. Appl. Genet.* 104, 84–91. <https://doi.org/10.1007/s001220200009>
- Buerstmayr, M., Steiner, B., Buerstmayr, H., 2019. Breeding for Fusarium head blight resistance in wheat – Progress and challenges. *Plant Breed.* 1–26. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3674-9_45
- Carter, J.P., Rezanoor, H.N., Holden, D., Desjardins, A.E., Plattner, R.D., Nicholson, P., 2002. Variation in pathogenicity associated with the genetic diversity of *Fusarium graminearum*. *Eur. J. Plant Pathol.* 108, 573–583. <https://doi.org/10.1023/A:1019921203161>
- Chen, Y., Zhou, M.-G., 2009. Characterization of *Fusarium graminearum* isolates resistant to both carbendazim and a new fungicide JS399-19. *Phytopathology* 99, 441–6. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0441>
- Cowger, C., Arellano, C., 2010. Plump kernels with high deoxynivalenol linked to late *Gibberella zeae* infection and marginal disease conditions in winter wheat. *Phytopathology* 100, 719–28. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-100-7-0719>
- Cowger, C., Patton-Ozkurt, J., Brown-Guedira, G., Perugini, L., 2009. Post-anthesis moisture increased Fusarium head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. *Phytopathology* 99, 320–7. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-4-0320>
- Daamen R.A., Langerak C.J., Stol W., 1991. Surveys of cereal diseases and pests in the Netherlands. 3. *Monographella nivalis* and *Fusarium* spp. in winter wheat fields and seed lots. *Neth. J. Pl. Path.* 97, 105–114.
- Del Ponte, E.M., Fernandes, J.M.C., Bergstrom, G.C., 2007. Influence of growth stage on Fusarium head blight and deoxynivalenol production in wheat. *J. Phytopathol.* 155, 577–581. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2007.01281.x>
- Del Ponte, E.M., Moreira, G.M., Ward, T.J., O'Donnell, K., Nicolli, C.P., Machado, F.J., Duffeck, M.R., Alves, K.S., Tessmann, D.J., Waalwijk, C., van der Lee, Theo, Zhang, H., Chulze, S.N., Stenglein, S.A., Pan, D., Vero, S., Vaillancourt, L.J., Schmale, D.G., Esker, P.D., Moretti, A., Logrieco, A.F., Kistler, H.C., Bergstrom, G.C., Viljoen, A., Rose, L.J., van Coller, G.J., Lee, Theresa, 2022. *Fusarium graminearum* species complex: a bibliographic analysis and web-accessible database for global mapping of species and trichothecene toxin chemotypes. *Phytopathology* 112, 741–751. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-21-0277-RVW>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00122-007-0592-3>

- Duan, Y., Tao, X., Zhao, H., Xiao, X., Li, M., Wang, J., Zhou, M., 2019. Activity of demethylation inhibitor fungicide metconazole on Chinese *Fusarium graminearum* species complex and its application in carbendazim-resistance management of fusarium head blight in wheat. *Plant Dis.* 103, 929–937. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1592-RE>
- Duan, Y., Lu, F., Zhou, Z., Zhao, H., Zhang, J., Mao, Y., Li, M., Wang, J., Zhou, M., 2020. Quinone outside inhibitors affect DON biosynthesis, mitochondrial structure and toxosome formation in *Fusarium graminearum*. *J. Hazard. Mater.* 398, 122908. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122908>
- Dweba, C.C., Figlan, S., Shimelis, H.A., Motaung, T.E., Sydenham, S., Mwadzingeni, L., Tsilo, T.J., 2017. Fusarium head blight of wheat: Pathogenesis and control strategies. *Crop Prot.* 91, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.10.002>
- Escrivá, L., Font, G., Manyes, L., 2015. In vivo toxicity studies of *Fusarium* mycotoxins in the last decade: A review. *Food Chem. Toxicol.* <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.02.005>
- Eudes, F., Comeau, A., Collin, S.R., 2000. Phytotoxicité de huit mycotoxines associées à la fusariose de l'épi chez le blé. *Can. J. Plant Pathol.* 22, 286–292. <https://doi.org/10.1080/07060660009500477>
- Foroud, N.A., Baines, D., Gagkaeva, T.Y., Thakor, N., Badea, A., Steiner, B., Bürstmayr, M., Bürstmayr, H., 2019. *Trichothecenes* in cereal grains - An update. *Toxins* 11, 634. <https://doi.org/10.3390/toxins11110634>
- Foroud, N.A., McCormick, S.P., MacMillan, T., Badea, A., Kendra, D.F., Ellis, B.E., Eudes, F., 2012. Greenhouse studies reveal increased aggressiveness of emergent Canadian *Fusarium graminearum* chemotypes in wheat. *Plant Dis.* 96, 1271–1279. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-11-0863-RE>
- Freije, A.N., Wise, K.A., 2015. Impact of *Fusarium graminearum* inoculum availability and fungicide application timing on Fusarium head blight in wheat. *Crop Prot.* 77, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.016>
- Góral, T., 2005. Źródła odporności pszenicy na fuzariozę kłosa powodowaną przez *Fusarium culmorum* (W. G. Smith) Sacc. *Biul. IHAR* 235, 115–131.
- Góral, T., Ochodzki, P., 2017. Fusarium head blight resistance and mycotoxin profiles of four Triticum species genotypes. *Phytopathol. Mediterr.* 56, 175–186. https://doi.org/10.14601/phytopathol_mediterr-20288
- Góral, T., Ochodzki, P., Nielsen, L.K., Walentyn-Góral, D., 2021. Species of the genus *Fusarium* and *Fusarium* toxins in the grain of winter and spring wheat in Poland. *Biul. Inst. Hod. i Aklim. Roślin* 296, 25–42. <https://doi.org/10.37317/biul-2021-0011>
- Góral, T., Wiśniewska, H., Czembor, P., Ochodzki, P., Radecka-Janusik, M., Majka, M., Przetakiewicz, J., 2019. Poszukiwanie oraz wykorzystanie markerów fenotypowych, metabolicznych i molekularnych do badania typów odporności na fuzariozę kłosów u form pszenicy o zróżnicowanej podatności. *Biul. IHAR* 286, 13–20.
- Góral, T., Wiśniewska, H., Ochodzki, P., Walentyn-Góral, D., Grzeszczak, I., Belter, J., Majka, M., Bogacki, J., Drzazga, T., Ługowska, B., Matysik, P., Witkowski, E., Rubrycki, K., Woźna-Pawlak, U., 2017. Fuzarioza kłosów oraz akumulacja toksyn fuzaryjnych w ziarnie rodów hodowlanych pszenicy ozimej. *Biul. Inst. Hod. i Aklim. Roślin* 282, 17–39. <https://doi.org/10.37317/biul-2017-0012>
- Goswami, R.S., Kistler, H.C., 2005. Pathogenicity and in planta mycotoxin accumulation among members of the *Fusarium graminearum* species complex on wheat and rice. *Phytopathology* 95, 1397–1404. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1397>
- Goswami, R.S., Kistler, H.C., 2004. Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. *Mol. Plant Pathol.* 5, 515–525. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2004.00252.X>
- Gromadzka, K., Lenc, L., Sadowski, C., Baturo-Ciesniewska, a., Chełkowski, J., Goliński, P., Bocianowski, J., 2012. Effects of fungicidal protection programs on the development of Fusarium head blight and the accumulation of mycotoxins in winter wheat. *Cereal Res. Commun.* 40, 518–531. <https://doi.org/10.1556/CRC.2012.0019>
- Gunupuru, L.R., Perochon, A., Doohan, F.M., 2017. Deoxynivalenol resistance as a component of FHB resistance. *Trop. Plant Pathol.* 42, 175–183. <https://doi.org/10.1007/s40858-017-0147-3>
- György, A., Tóth, B., Varga, M., Mesterhazy, A., 2020. Methodical considerations and resistance evaluation against *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* head blight in wheat. part 3. Susceptibility window and resistance expression. *Microorganisms* 8, 627. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050627>
- Haidukowski, M., Pascale, M., Perrone, G., Pancaldi, D., Campagna, C., Visconti, A., 2005. Effect of fungicides on the development of Fusarium head blight, yield and deoxynivalenol accumulation in wheat inoculated under field conditions with *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum*. *J. Sci. Food Agric.* 85, 191–198. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1965>
- Haile, J.K., N'Diaye, A., Walkowiak, S., Nilsen, K.T., Clarke, J.M., Kutcher, H.R., Steiner, B., Buerstmayr, H., Pozniak, C.J., 2019. Fusarium head blight in durum wheat: recent status, breeding directions, and future research prospects. *Phytopathology* 109, 1664–1675. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-19-0095-RVW>
- Hallen-Adams, H.E., Wenner, N., Kulda, G.A., Trail, F., 2011. Deoxynivalenol biosynthesis-related gene expression during wheat kernel colonization by *Fusarium graminearum*. *Phytopathology* 101, 1091–6. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-11-0023>
- Hao, Y., Rasheed, A., Zhu, Z., Wulff, B.B.H., He, Z., 2020. Harnessing wheat Fhb1 for Fusarium resistance. *Trends Plant Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.10.006>
- Holzappel, J., Voss, H.-H., Miedaner, T., Korzun, V., Häberle, J., Schweizer, G., Mohler, V., Zimmermann, G., Hartl, L., 2008. Inheritance of resistance to Fusarium head blight in three European winter wheat populations. *Theor. Appl. Genet.* 117, 1119–28. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0850-z>
- Hu, W.J., Fu, L.P., Gao, D.R., Li, D.S., Liao, S., Lu, C.B., 2023. Marker-assisted selection to pyramid Fusarium head blight resistance loci *Fhb1* and *Fhb2* in the high-quality soft wheat cultivar Yangmai 15. *J. Integr. Agric.* 22, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.057>
- Ioos, R., Belhadj, A., Menez, M., Faure, A., 2005. The effects of fungicides on *Fusarium* spp. and *Microdochium nivale* and their associated trichothecene mycotoxins in French naturally-infected cereal grains. *Crop Prot.* 24, 894–902. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.01.014>
- Ittu, M., Saulescu, N.N., Ittu, G., 2001. Progress in breeding for scab resistance in Romania on wheat. 183–187. W: National Fusarium Head Blight Forum Proceedings, Cincinnati, KY, USA, 8–10 grudnia 2001.
- Iwaniuk, P., Konecki, R., Snarska, K., Łozowicka, B., 2018. Quantitative evaluation of *Fusarium* species and crop quality traits in wheat varieties of northeastern Poland. *J. Plant Prot. Res.* 58, 413–419. <https://doi.org/10.24425/jppr.2018.125882>
- Janssen, E.M., Liu, C., Van Der Fels-Klerx, H.J., 2018. *Fusarium* infection and trichothecenes in barley and its comparison with wheat. *World Mycotoxin J.* 11, 33–46. <https://doi.org/10.3920/WMJ2017.2255>

- Jennings, P., Coates, M.E., Turner, J.A., Chandler, E.A., Nicholson, P., 2004. Determination of deoxynivalenol and nivalenol chemotypes of *Fusarium culmorum* isolates from England and Wales by PCR assay. *Plant Pathol.* 53, 182–190. <https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.00985.x>
- Ji, F., He, D., Olaniran, A.O., Mokoena, M.P., Xu, J., Shi, J., 2019. Occurrence, toxicity, production and detection of *Fusarium* mycotoxin: a review. *Food Prod. Process. Nutr.* 1, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s43014-019-0007-2>
- Jia, H., Zhou, J., Xue, S., Li, G., Yan, H., Ran, C., Zhang, Y., Shi, J., Jia, L., Wang, X., Luo, J., Ma, Z., 2018. A journey to understand wheat *Fusarium* head blight resistance in the Chinese wheat landrace Wangshuibai. *Crop J.* 6, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.09.006>
- Jiang, G.L., Huang, D.C., Shen, Q.Q., Yang, Z.L., Lu, W., Shi, J., Zhu, H., Chen, Z., Ward, R., 2006. Registration of wheat germplasm CJ W14 and CJ 9306 highly resistant to *Fusarium* head blight. *Crop Sci.* 46, 2326–2328.
- Kang, Z., Buchenauer, H., 2000. Cytology and ultrastructure of the infection of wheat spikes by *Fusarium culmorum*. *Mycol. Res.* 104, 1083–1093.
- Kazan, K., Gardiner, D.M., 2018. *Fusarium* crown rot caused by *Fusarium pseudograminearum* in cereal crops: recent progress and future prospects. *Mol. Plant Pathol.* 19, 1547–1562. <https://doi.org/10.1111/MPP.12639>
- Kazan, K., Gardiner, D.M., Manners, J.M., 2012. On the trail of a cereal killer: Recent advances in *Fusarium graminearum* pathogenomics and host resistance. *Mol. Plant Pathol.* 13, 399–413. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00762.x>
- Klem, K., Vánová, M., Hajšlová, J., Lancová, K., Sehnalová, M., 2007. A neural network model for prediction of deoxynivalenol content in wheat grain based on weather data and preceding crop. *Plant, Soil Environ.* 53, 421–429.
- Kollers, S., Rodemann, B., Ling, J., Korzun, V., Ebmeyer, E., Argillier, O., Hinze, M., Plieske, J., Kulosa, D., Ganal, 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057500>
- Kosová, K., Chrpová, J., Šíp, V., 2009. Cereal resistance to *Fusarium* head blight and possibilities of its improvement through breeding. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 45, 87–105. <https://doi.org/10.17221/63/2009-cjgpb>
- Kubo, K., Kawada, N., Fujita, M., 2013. Evaluation of *Fusarium* head blight resistance in wheat and the development of a new variety by integrating type I and II resistance. *Jircas.Affrc.Go.Jp* 47, 9–19.
- Kuzdraliński, A., Nowak, M., Szczerba, H., Dudziak, K., Muszyńska, M., Leśniowska-Nowak, J., 2017. The composition of *Fusarium* species in wheat husks and grains in south-eastern Poland. *J. Integr. Agric.* 16, 1530–1536. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61552-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61552-6)
- Lacey, J., Bateman, G.L., Mirocha, C.J., 1999. Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium* spp. in wheat. *Ann. Appl. Biol.* 134, 277–283. <https://doi.org/10.1111/J.1744-7348.1999.TB05265.X>
- Langevin, F., Eudes, F., Comeau, A., 2004. Effect of trichothecenes produced by *Fusarium graminearum* during *Fusarium* head blight development in six cereal species. *Eur. J. Plant Pathol.* 110, 735–746. <https://doi.org/10.1023/B:EJPP.0000041568.31778.ad>
- Laraba, I., Busman, M., Geiser, D.M., O'Donnell, K., 2022. Phylogenetic diversity and mycotoxin potential of emergent phytopathogens within the *Fusarium tricinctum* species complex. *Phytopathology* 112, 1284–1298. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-21-0394-R>
- Latham, R.L., Boyle, J.T., Barbano, A., Loveman, W.G., Brown, N.A., 2023. Diverse mycotoxin threats to safe food and feed cereals. *Essays Biochem.* <https://doi.org/10.1042/EBC20220221>
- Lemmens, M., Buerstmayr, H., Krska, R., Schuhmacher, R., Grausgruber, H., Ruckebauer, P., 2004. The effect of inoculation treatment and long-term application of moisture on *Fusarium* head blight symptoms and deoxynivalenol contamination in wheat grains. *Eur. J. Plant Pathol.* 110, 299–308. <https://doi.org/10.1023/B:EJPP.0000019801.89902.2a>
- 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. <https://doi.org/10.1556/CRC.36.2008.Suppl.B.36>
- Li, T., Zhang, H., Huang, Y., Su, Z., Deng, Y., Liu, H., Mai, C., Yu, G., Li, Huili, Yu, L., Zhu, T., Yang, L., Li, Hongjie, Zhou, Y., 2019. Effects of the *Fhb1* gene on *Fusarium* head blight resistance and agronomic traits of winter wheat. *Crop J.* 7, 799–808. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.03.005>
- Liu, X., Han, Q., Xu, J., Wang, J., Shi, J., 2015. Acetylhydroxyacid synthase FgHv2 and FgHv6 are involved in BCAA biosynthesis, mycelial and conidial morphogenesis, and full virulence in *Fusarium graminearum*. *Sci. Rep.* 5, 16315. <https://doi.org/10.1038/srep16315>
- Liu, Y.Y., Sun, H.Y., Li, W., Xia, Y.L., Deng, Y.Y., Zhang, A.X., Chen, H.G., 2017. Fitness of three chemotypes of *Fusarium graminearum* species complex in major winter wheat-producing areas of China. *PLoS One* 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174040>
- Ma, L.-J., Geiser, D.M., Proctor, R.H., Rooney, A.P., O'Donnell, K., Trail, F., Gardiner, D.M., Manners, J.M., Kazan, K., 2013. *Fusarium* pathogenomics. *Annu. Rev. Microbiol.* 67, 399–416. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155650>
- Machado, F.J., de Barros, A. V., McMaster, N., Schmale, D.G., Vaillancourt, L.J., Del Ponte, E.M., 2022. Aggressiveness and mycotoxin production by *Fusarium meridionale* compared with *F. graminearum* on maize ears and stalks in the field. *Phytopathology* 112, 271–277. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-21-0149-R>
- Maier, F.J., Miedaner, T., Haderl, B., Felk, A., Salomon, S., Lemmens, M., Kassner, H., Schäfer, W., 2006. Involvement of trichothecenes in fusarioses of wheat, barley and maize evaluated by gene disruption of the trichodiene synthase (*Tri5*) gene in three field isolates of different chemotype and virulence. *Mol. Plant Pathol.* 7, 449–461. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2006.00351.x>
- Maiorano, A., Blandino, M., Reyneri, A., Vanara, F., 2008. Effects of maize residues on the *Fusarium* spp. infection and deoxynivalenol (DON) contamination of wheat grain. *Crop Prot.* 27, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.05.004>
- Marzec-Schmidt, K., Börjesson, T., Supronienė, S., Jędrzycka, M., Janavičienė, S., Góral, T., Karlsson, I., Kochiėru, Y., Ochodzki, P., Mankevičienė, A., Piikki, K., 2021. Modelling the effects of weather conditions on cereal grain contamination with deoxynivalenol in the Baltic Sea region. *Toxins* 13, 737. <https://doi.org/10.3390/toxins13110737>
- Mesterházy, Á., 2014. Breeding for resistance to *Fusarium* head blight in wheat. w: *Mycotoxin Reduction in Grain Chains: A Practical Guide*, Leslie J.F., Logrieco A.F. (Red.), Wiley, Hoboken, NJ, ss. 189–208. <https://doi.org/10.1002/9781118832790.CH13>

- Mesterhazy A., Bartok T., 1993. Resistance and pathogenicity influencing toxin (DON) contamination of wheat varieties following *Fusarium* infection. *Hod. Rośl. Aklim. Nasien.* (Special Edition) 37, 9-16.
- Mesterházy, Á., Bartók, T., Kászonyi, G., Varga, M., Tóth, B., Varga, J., 2005. Common resistance to different *Fusarium* spp. causing Fusarium head blight in wheat. *Eur. J. Plant Pathol.* 112, 267–281. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-2853-9>
- Mesterházy, Á., Bartók, T., Lamper, C., 2003. Influence of wheat cultivar, species of *Fusarium*, and isolate aggressiveness on the efficacy of fungicides for control of Fusarium head blight. *Plant Dis.* 87, 1107–1115. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.9.1107>
- 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 Breed.* 118, 97–110. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.1999.118002097.x>
- Mesterházy, Á., György, A., Lehoczki-Krsjak, S., Tóth, B., Varga, M., 2018. The role of adapted and non-adapted resistance sources in breeding resistance of winter wheat to Fusarium head blight and deoxynivalenol contamination. *World Mycotoxin J.* 11, 539–557. <https://doi.org/10.3920/wmj2017.2297>
- Mesterhazy, A., Gyorgy, A., Varga, M., Toth, B., 2020. Methodical considerations and resistance evaluation against *F. graminearum* and *F. culmorum* head blight in wheat. The influence of mixture of isolates on aggressiveness and resistance expression. *Microorg.* 8, 1036. <https://doi.org/10.3390/microorganismS8071036>
- Mesterházy, Varga, M., Tóth, B., Kótai, C., Bartók, T., Véha, A., Acs, K., Vágvölgyi, C., Lehoczki-Krsjak, S., 2018. Reduction of deoxynivalenol (DON) contamination by improved fungicide use in wheat. Part 1. Dependence on epidemic severity and resistance level in small plot tests with artificial inoculation. *Eur. J. Plant Pathol.* 151, 39–55. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1350-2>
- Miedaner, T., Reinbrecht, C., 2001. Trichothecene content of rye and wheat genotypes inoculated with a deoxynivalenol- and a nivalenol-producing isolate of *Fusarium culmorum*. *J. Phytopathol.* 149, 245–251. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2001.00608.x>
- 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. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.2001.00580.x>
- Miller, J.D., Greenhalgh, R., Wang, Y., Lu, M., 1991. Trichothecene chemotypes of three *Fusarium* species. *Mycologia* 82, 121–130.
- Miller, S.S., Chabot, D.M.P., Ouellet, T., Harris, L.J., Fedak, G., 2004. Use of a *Fusarium graminearum* strain transformed with green fluorescent protein to study infection in wheat (*Triticum aestivum*). *Can. J. Plant Pathol.* 26, 453–463. <https://doi.org/10.1080/07060660409507165>
- Minervini, F., Dell'Aquila, M.E., Aquila, M.E.D., 2008. Zeaxerone and reproductive function in farm animals. *Int. J. Mol. Sci.* 9, 2570–84. <https://doi.org/10.3390/ijms9122570>
- Mirdita, V., He, S., Zhao, Y., Korzun, V., Bothe, R., Ebmeyer, E., Reif, J.C., Jiang, Y., 2015. Potential and limits of whole genome prediction of resistance to Fusarium head blight and Septoria tritici blotch in a vast Central European elite winter wheat population. *Theor. Appl. Genet.* 128, 2471–2481. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2602-1>
- Moonjely, S., Ebert, M., Paton-Glassbrook, D., Noel, Z.A., Roze, L., Shay, R., Watkins, T., Trail, F., 2023. Update on the state of research to manage Fusarium head blight. *Fungal Genet. Biol.* 169, 103829. <https://doi.org/10.1016/j.FGB.2023.103829>
- Munkvold, G.P., 2017. *Fusarium* Species and Their Associated Mycotoxins, w: Moretti, A., Susca, A. (Red.), *Mycotoxigenic Fungi: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology.* Humana Press, New York, NY, ss. 51–105. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6707-0>
- Munkvold, G.P., 2003. Epidemiology of *Fusarium* diseases and their mycotoxins in maize ears. *Eur. J. Plant Pathol.* 109, 705–713. <https://doi.org/10.1023/A:1026078324268>
- Muthomi, J., Schütze, A., Dehne, H.-W., Mutitu, E.W., Oerke, E.-C., 2000. Characterization of *Fusarium culmorum* isolates by mycotoxin production and aggressiveness to winter wheat. *J. Plant Dis. Prot.* 107, 113–123.
- Nakajima, T., 2010. Fungicides application against Fusarium head blight in wheat and barley for ensuring food safety, w: Carisse, O. (Red.), *Fungicides.* InTech Europe, Rijeka, Croatia, ss. 140–156. <https://doi.org/10.5772/13680>
- O'Donnell, K., Kistler, H.C., Tacke, B.K., Casper, H.H., 2000. Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 97, 7905–7910. <https://doi.org/10.1073/pnas.130193297>
- O'Donnell, K., Rooney, A.P., Proctor, R.H., Brown, D.W., McCormick, S.P., Ward, T.J., Frandsen, R.J.N., Lysøe, E., Rehner, S.A., Aoki, T., Robert, V.A.R.G., Crous, P.W., Groenewald, J.Z., Kang, S., Geiser, D.M., 2013. Phylogenetic analyses of RPB1 and RPB2 support a middle Cretaceous origin for a clade comprising all agriculturally and medically important fusaria. *Fungal Genet. Biol.* 52, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2012.12.004>
- Ochodzki, P., Twardawska, A., Wiśniewska, H., Góral, T., 2021. Resistance to Fusarium head blight, kernel damage, and concentrations of *Fusarium* mycotoxins in the grain of winter wheat lines. *Agronomy* 11, 1690. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11091690>
- Oliver, R.E., Cai, X., Friesen, T.L., Halley, S., Stack, R.W., Xu, S.S., 2008. Evaluation of Fusarium head blight resistance in tetraploid wheat (*Triticum turgidum* L.). *Crop Sci.* 48, 213. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.03.0129>
- Parikka, P., Hakala, K., Tiilikkala, K., 2012. Expected shifts in *Fusarium* species' composition on cereal grain in Northern Europe due to climatic change. *Food Addit. Contam. Part A. Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.* 29, 1543–55. <https://doi.org/10.1080/19440049.2012.680613>
- Placinta, C.M., D'Mello, J.P.F., MacDonald, A.M.C., 1999. A review of worldwide contamination of cereal grains and animal feed with *Fusarium* mycotoxins. *Anim. Feed Sci. Technol.* 78, 21–37. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(98\)00278-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(98)00278-8)
- Prat, N., Buerstmayr, M., Steiner, B., Robert, O., Buerstmayr, H., 2014. Current knowledge on resistance to Fusarium head blight in tetraploid wheat. *Mol. Breed.* 34, 1689–1699. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0184-2>
- Proctor, R.H., Desjardins, A. E., McCormick, S.P., Plattner, R.D., Alexander, N.J., Brown, D.W., 2002. Genetic analysis of the role of trichothecene and fumonisin mycotoxins in the virulence of *Fusarium*. *Eur. J. Plant Pathol.* 108, 691–698. <https://doi.org/10.1023/A:1020637832371>

- Qu, B., Li, H.P., Zhang, J.B., Huang, T., Carter, J., Liao, Y.C., Nicholson, P., 2008. Comparison of genetic diversity and pathogenicity of *Fusarium* head blight pathogens from China and Europe by SSCP and seedling assays on wheat. *Plant Pathol.* 57, 642–651. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2008.01824.x>
- Quarta, A., Mita, G., Haidukowski, M., Santino, A., Mulè, G., Visconti, A., 2005. Assessment of trichothecene chemotypes of *Fusarium culmorum* occurring in Europe. *Food Addit. Contam.* 22, 309–315. <https://doi.org/10.1080/02652030500058361>
- Radecka-Janusik, M., Piechota, U., Piaskowska, D., Góral, T., Czembor, P., 2022. Evaluation of *Fusarium* head blight resistance effects by haplotype-based genome-wide association study in winter wheat lines derived by marker backcrossing approach. *Int. J. Mol. Sci.* 23, 14233. <https://doi.org/10.3390/IJMS232214233>
- Reis, E.M., Boareto, C., Danelli, A.L.D., Zoldan, S.M., 2016. Anthesis, the infectious process and disease progress curves for *Fusarium* head blight in wheat. *Summa Phytopathol.* 42, 134–139. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2075>
- Ribichich, K.F., Lopez, S.E., Vegetti, A.C., 2000. Histopathological spikelet changes produced by *Fusarium graminearum* in susceptible and resistant wheat cultivars. *Plant Dis.* 84, 794–802. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.7.794>
- Saharan, M.S., 2020. Current status of resistant source to *Fusarium* head blight disease of wheat: a review. *Indian Phytopathol.* 73, 3–9. <https://doi.org/10.1007/s42360-019-00186-x>
- Sallam, A.H., Haas, M., Huang, Y., Tandukar, Z., Muehlbauer, G., Smith, K., Steffenson, B.J., 2023. Meta-analysis of the genetics of resistance to FHB in barley and considerations for breeding. *Crop Sci.* in press. <https://doi.org/10.1111/pbr.13121>
- Sarver, B.A.J., Ward, T.J., Gale, L.R., Broz, K., Corby Kistler, H., Aoki, T., Nicholson, P., Carter, J., O'Donnell, K., 2011. Novel *Fusarium* head blight pathogens from Nepal and Louisiana revealed by multilocus genealogical concordance. *Fungal Genet. Biol.* 48, 1096–1107. <https://doi.org/10.1016/J.FGB.2011.09.002>
- Savary, S., Ficke, A., Aubertot, J.N., Hollier, C., 2012. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food Secur.* 4, 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
- Schiwek, S., Alhoussein, M., Rodemann, C., Budraghcha, T., Beule, L., von Tiedemann, A., Karlovsky, P., 2022. *Fusarium culmorum* produces NX-2 toxin simultaneously with deoxynivalenol and 3-acetyl-deoxynivalenol or nivalenol. *Toxins* 14. <https://doi.org/10.3390/toxins14070456>
- Shen, X., Ittu, M., Ohm, H.W., 2003. Quantitative trait loci conditioning resistance to *Fusarium* head blight in wheat line F201R. *Crop Sci.* 43, 850–857. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0850>
- 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 Breed.* 129, 149–155. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2009.01731.x>
- Snijders, C.H.A., 1990a. Genetic variation for resistance to *Fusarium* head blight in bread wheat. *Euphytica* 50, 171–179. <https://doi.org/10.1007/BF00023642>
- Snijders, C.H.A., 1990b. Diallel analysis of resistance to head blight caused by *Fusarium culmorum* in winter wheat. *Euphytica* 50, 1–9. <https://doi.org/10.1007/BF00023154>
- Snijders, C.H.A., Perkowski, J., 1990. Effects of head blight caused by *Fusarium culmorum* on toxin content and weight of wheat kernels. *Phytopathology* 80, 566–570. <https://doi.org/10.1094/Phyto-80-566>
- Spolti, P., Del Ponte, E.M., Dong, Y., Cummings, J.A., Bergstrom, G.C., 2014. Triazole sensitivity in a contemporary population of *Fusarium graminearum* from New York wheat and competitiveness of a tebuconazole-resistant isolate. *Plant Dis.* 98, 607–613. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-13-1051-RE>
- Starkey, D.E., Ward, T.J., Aoki, T., Gale, L.R., Kistler, H.C., Geiser, D.M., Suga, H., Tóth, B., Varga, J., O'Donnell, K., 2007. Global molecular surveillance reveals novel *Fusarium* head blight species and trichothecene toxin diversity. *Fungal Genet. Biol.* 44, 1191–204. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2007.03.001>
- Steiner, B., Buerstmayr, M., Michel, S., Schweiger, W., Lemmens, M., Buerstmayr, H., 2017. Breeding strategies and advances in line selection for *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Trop. Plant Pathol.* 42, 165–174. <https://doi.org/10.1007/s40858-017-0127-7>
- Strange, R.N., Smith, H., 1971. A fungal growth stimulant in anthers which predisposes wheat to attack by *Fusarium graminearum*. *Physiol. Plant Pathol.* 1, 141–150. [https://doi.org/10.1016/0048-4059\(71\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0048-4059(71)90023-3)
- Talas, F., Parzies, H.K., Miedaner, T., 2011. Diversity in genetic structure and chemotype composition of *Fusarium graminearum* sensu stricto populations causing wheat head blight in individual fields in Germany. *Eur. J. Plant Pathol.* 131, 39–48. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9785-3>
- Tekle, S., Dill-Macky, R., Skinnes, H., Tronsmo, A.M., Bjørnstad, Å., 2011. Infection process of *Fusarium graminearum* in oats (*Avena sativa* L.). *Eur. J. Plant Pathol.* 132, 431–442. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9888-x>
- Tini, F., Beccari, G., Onofri, A., Ciavatta, E., Gardiner, D.M., Covarelli, L., 2020. Fungicides may have differential efficacies towards the main causal agents of *Fusarium* head blight of wheat. *Pest Manag. Sci.* 76, 3738–3748. <https://doi.org/10.1002/ps.5923>
- Tóth, B., Mesterházy, Á., Nicholson, P., Téren, J., Varga, J., 2004. mycotoxin production and molecular variability of European and American isolates of *Fusarium culmorum*. *Eur. J. Plant Pathol.* 110, 587–599. <https://doi.org/10.1023/B:EJPP.0000032398.74570.ab>
- van Eeuwijk, F.A., Mesterházy, A., Kling, C.I., Ruckebauer, P., Saur, L., Buerstmayr, H., Lemmens, M., Keizer, L.C.P., Maurin, N., Snijders, C.H.A., 1995. Assessing non-specificity of resistance in wheat to head blight caused by inoculation with European strains of *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* and *F. nivale* using a multiplicative model for interaction. *Theor. Appl. Genet.* 90, 221–228. <https://doi.org/10.1007/BF00222205>
- Varga, E., Wiesenberger, G., Hametner, C., Ward, T.J., Dong, Y., Schöfbeck, D., McCormick, S., Broz, K., Stückler, R., Schuhmacher, R., Krška, R., Kistler, H.C., Berthiller, F., Adam, G., 2015. New tricks of an old enemy: Isolates of *Fusarium graminearum* produce a type A trichothecene mycotoxin. *Environ. Microbiol.* 17, 2588–2600. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12718>
- Vaughan, M., Backhouse, D., Del Ponte, E.M., 2016. Climate change impacts on the ecology of *Fusarium graminearum* species complex and susceptibility of wheat to *Fusarium* head blight: A review. *World Mycotoxin J.* 9, 685–700. <https://doi.org/10.3920/WMJ2016.2053>

- Ward, T.J., Clear, R.M., Rooney, A.P., O'Donnell, K., Gaba, D., Patrick, S., Starkey, D.E., Gilbert, J., Geiser, D.M., Nowicki, T.W., 2008. An adaptive evolutionary shift in *Fusarium* head blight pathogen populations is driving the rapid spread of more toxigenic *Fusarium graminearum* in North America. *Fungal Genet. Biol.* 45, 473–84. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2007.10.003>
- West, J.S., Holdgate, S., Townsend, J.A., Edwards, S.G., Jennings, P., Fitt, B.D.L., 2012. Impacts of changing climate and agronomic factors on *Fusarium* ear blight of wheat in the UK. *Fungal Ecol.* 5, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.03.003>
- Wong, L.S.L., Tekauz, A., Leisle, D., Abramson, D., McKenzie, R.I.H., 1992. Prevalence, distribution, and importance of *Fusarium* head blight in wheat in Manitoba. *Can. J. Plant Pathol.* 14, 233–238.
- Xu, X.M., Parry, D.W., Nicholson, P., Thomsett, M. a., Simpson, D., Edwards, S.G., Cooke, B.M., Doohan, F.M., Brennan, J.M., Moretti, a., Tocco, G., Mule, G., Hornok, L., Giczey, G., Tatnell, J., 2005. Predominance and association of pathogenic fungi causing *Fusarium* ear blight in wheat in four European countries. *Eur. J. Plant Pathol.* 112, 143–154. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-2446-7>
- Yli-Mattila, T., Rämö, S., Hietaniemi, V., Hussien, T., Carlobos-Lopez, A.L., Cumagun, C.J.R., 2013. Molecular quantification and genetic diversity of toxigenic *Fusarium* species in northern Europe as compared to those in southern Europe. *Microorganisms* 1, 162–174. <https://doi.org/10.3390/microorganisms101016>
- Yang, Z., Gilbert, J., Procuier, J.D., 2006. Genetic diversity of resistance genes controlling *Fusarium* head blight with simple sequence repeat markers in thirty-six wheat accessions from east Asian origin. *Euphytica* 148, 345–352. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-9047-6>
- Wang, R., Hua, C., Hu, Y., Li, L., Sun, Z., Li, T., 2021. Two different inoculation methods unveiled the relative independence of DON accumulation in wheat kernels from disease severity on spike after infection by *Fusarium* head blight. *Toxins* 13, 353. <https://doi.org/10.3390/toxins13050353>
- Zhang, G., Mergoum, M., 2007. Molecular mapping of kernel shattering and its association with *Fusarium* head blight resistance in a Sumai3 derived population. *Theor. Appl. Genet.* 115, 757–766. <https://doi.org/10.1007/S00122-007-0606-1>
- Zhu, Z., Hao, Y., Mergoum, M., Bai, G., Humphreys, G., Cloutier, S., Xia, X., He, Z., 2019. Breeding wheat for resistance to *Fusarium* head blight in the Global North: China, USA, and Canada. *Crop J.* <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.003>