

Wpływ rdzy brunatnej na uprawy pszenicy w kontekście zmian klimatu

The impact of leaf rust on wheat crops in the context of climate change

Aleksandra Pietrusińska-Radzio[✉] , Monika Żurek 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy

✉ a.pietrusinska@ihar.edu.pl

W dobie zmieniającego się klimatu rdza brunatna stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń dla upraw pszenicy na całym świecie. Pszenica, będąca jednym z kluczowych zbóż dla globalnego bezpieczeństwa żywnościowego, jest szczególnie narażona na straty plonów spowodowane przez tę chorobę. Zmiany klimatu, charakteryzujące się wzrostem temperatury, zmiennością opadów oraz ekstremalnymi warunkami pogodowymi, mają istotny wpływ na rozwój i rozprzestrzenianie się rdzy brunatnej. Wzrastające średnie temperatury sprzyjają zmianie cyklu życiowego patogena, a opady mogą prowadzić do powstawania warunków bardziej sprzyjających infekcjom. W konsekwencji rolnicy muszą stawić czoła nie tylko zwiększonej częstotliwości występowania choroby, ale także jej potencjalnie większej agresywności. Niniejsza publikacja ma na celu przedstawienie, w jaki sposób zmieniające się warunki klimatyczne wpływają na rdzę brunatną oraz jakie metody zwalczania tej choroby mogą być skuteczne w minimalizowaniu strat w uprawach pszenicy. Przedstawimy również aktualne badania i technologie mające na celu ograniczenie niekorzystnego wpływu globalnego ocieplenia oraz omówimy perspektywy dla rolnictwa w kontekście globalnych zmian klimatycznych.

Słowa kluczowe: modelowanie matematyczne, *Puccinia recondita*, rdza brunatna, zasoby genowe, zmiany klimatu

In the era of changing climate, brown rust poses one of the most serious threats to wheat crops worldwide. Wheat, one of the key grains for global food security, is particularly vulnerable to yield losses caused by this disease. Climate changes, characterized by rising temperatures, variable rainfall, and extreme weather conditions, significantly impact the development and spread of brown rust. Rising average temperatures favor changes in the pathogen's life cycle, while rainfall can create conditions more conducive to infections. As a result, farmers must face an increased frequency of the disease and its potentially higher aggressiveness. The purpose of this publication is to demonstrate the effect of changing climatic conditions on brown rust and the effective management strategies for minimizing losses in wheat crops. We will also present current research and technologies meant to mitigate the adverse effects of global warming and discuss the prospects for agriculture in the context of global climate change

Key words: climate change, genetic resources, leaf rust, mathematical modeling, *Puccinia recondita*

Wprowadzenie

Pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* L.) jest jedną z najważniejszych roślin uprawnych na świecie i odgrywa kluczową rolę w zapewnianiu bezpieczeństwa żywnościowego dla ludzi. Pszenica jest jednym z najczęściej uprawianych zbóż o powierzchni produkcyjnej 240 mln ha na całym świecie (Caubel i in., 2017). Uprawa tego zboża ma znaczenie wielowymiarowe i obejmuje aspekty żywieniowe, ekonomiczne, społeczne oraz kulturowe. Pszenica jest jednym z najbardziej produktywnych zbóż, co sprawia, że jest kluczowym elementem w zapewnieniu stabilności żywnościowej na całym świecie. Zdolność do adaptacji na zmieniające się warunki klimatyczne pozwala na uprawę pszenicy w różnych regionach świata, co jest istotne dla zrównoważonego zaopatrzenia ludności w żywność.

Integrowana Ochrona Roślin (IOR) to strategia zarządzania ochroną upraw, która łączy różne metody i środki ochrony roślin w celu minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko oraz zdrowie ludzi i zwierząt. Głównym celem IOR jest zmniejszenie zależności od chemicznych środków ochro-

ny roślin poprzez promowanie zrównoważonych i ekologicznych metod. Jednym z kluczowych wyzwań dla dzisiejszej hodowli odpornościowej jest stosowanie odmian roślin odpornych na choroby i szkodniki, aby minimalizować konieczność użycia chemicznych środków ochrony roślin. Dobór odpornych odmian pozwala na ograniczenie presji patogenów i zmniejsza ryzyko rozwoju oporności na środki chemiczne, wspierając tym samym zrównoważone rolnictwo i ochronę środowiska (Savary i in., 2011, Morgounov i in., 2012). Patogeny grzybowe zbóż powodują straty w plonach sięgające do 40% globalnej produkcji rolniczej, a tym samym zagrażają bezpieczeństwu żywnościowemu na świecie (Savary i in., 2011). W kontekście globalnych zmian klimatycznych, rosnące temperatury, zmieniona cyrkulacja atmosferyczna oraz częstsze i bardziej intensywne opady deszczu stwarzają sprzyjające warunki dla rozwoju rdzy brunatnej pszenicy (*Puccinia triticina*). W Europie Zachodniej i Południowej, a także w Ameryce Południowej, rdza brunatna była drugą najczęściej występującą chorobą grzybową w ciągu ostatnich dziesięcioleci, z wyraźną tendencją do zwiększo-

nego występowania w ostatnich latach (Morgounov i in., 2012).

Obecnie, zmiany klimatu mają istotny wpływ na uprawy pszenicy na całym świecie. Ryzyko utraty plonów wzrasta z powodu zmian klimatu i bardziej zmiennych warunków pogodowych. Dlatego, konieczne jest zminimalizowanie strat w uprawach. Strategie adaptacji do zmian klimatu, zapewniające swego rodzaju „bufor” przed nieprzewidywalnymi zjawiskami pogodowymi. Ponadto, obejmować mogą lepsze dopasowanie fizjologii roślin do dostępności wody, zwiększony dostęp do zestawu odmian o różnej długości okresu wegetacji oraz hodowlę roślin odpornych (Gouache i in., 2012).

W niniejszym manuskrypcie skoncentrujemy się na analizie wpływu zmian klimatycznych na dynamikę występowania rdzy brunatnej pszenicy. Prześledzimy zmiany warunków atmosferycznych sprzyjających rozprzestrzenianiu się tego patogenu. Ponadto, omówione zostaną potencjalne skutki globalnego ocieplenia i zmienności klimatu dla praktyk rolniczych oraz możliwe strategie zaradcze, które mogą pomóc w zminimalizowaniu negatywnych skutków rdzy brunatnej pszenicy na plony i bezpieczeństwo żywnościowe.

W miarę, jak nasze środowisko staje się coraz bardziej zmiennym, zrozumienie wpływu klimatu na zdrowie roślin staje się niezbędne dla zapewnienia stabilności i zrównoważonego rozwoju sektora rolniczego.

Czynniki biotyczne

Globalne ocieplenie może bezpośrednio i pośrednio wpływać na patogeny grzybowe i odpowiadające im choroby (Juroszek i Tiedeman, 2013). Czynniki biotyczne, takie jak rośliny, zwierzęta, patogeny grzybowe, są ściśle związane z warunkami środowiskowymi, w tym z temperaturą, wilgotnością, dostępnością pożywienia i innymi czynnikami klimatycznymi.

Zmiany temperatury i innych warunków klimatycznych, takich jak zmiany w ilości opadów, prowadzą do różnorodnych modyfikacji związanych z patogenami pszenicy. Te zmiany obejmują głównie trzy aspekty: (1) zasięg geograficzny, czyli rozszerzenie lub kurczenie się obszarów występowania oraz wzrost ryzyka inwazji nowych patogenów, (2) sezonowy cykl życia, czyli synchronizację cyklu życiowego patogena z etapami wzrostu rośliny żywicielskiej oraz z naturalnymi wrogami lub sprzymierzeńcami, (3) dynamikę populacji, czyli zdolność do przetrwania zimy, skuteczność infekcji, czas trwania okresu utajenia oraz zmienną liczbę generacji patogenów (Miedaner i Juroszek, 2021).

Globalne ocieplenie wpływa na rozprzestrzenianie się chorób grzybowych zbóż. Wzrost temperatury i zmiany opadów sprzyjają rozwojowi chorób o podłożu grzybowym, bakteryjnym oraz

wirusowym. Warunki sprzyjające mogą zwiększyć liczbę infekcji oraz zakres geograficzny występowania patogenów, co może prowadzić do spadku plonów i jakości zbiorów. Organizmy biotyczne mogą aklimatyzować się do zmieniających się warunków klimatycznych poprzez zmiany w cechach fenotypowych lub migrację do bardziej odpowiednich dla siebie środowisk. Jednakże, tempo zmian klimatycznych może przekraczać zdolność adaptacji niektórych gatunków, co może prowadzić do spadku różnorodności biologicznej.

W ostatnich latach coraz większy nacisk kładzie się na tzw. *resilience*, czyli cechę określającą zdolność roślin do powrotu do równowagi fizjologicznej po wystąpieniu czynnika stresowego (abiotycznego i/lub biotycznego). Odporność roślin na stropy abiotyczne i biotyczne (*resilience*) jest kluczowym czynnikiem w badaniach dotyczących zarządzania ekosystemami, zrównoważonego rolnictwa w kontekście zmian klimatu (Raza i in., 2019).

Aby określić strategie adaptacyjne stosowane przez przemysł rolniczy, konieczne jest przedstawienie wpływu zmian klimatu na skalę epidemii chorób upraw (Chaloner i in., 2021). W odpowiedzi na te zmiany, przemysł rolniczy stosuje różne strategie adaptacyjne, aby minimalizować ryzyko epidemii chorób upraw i inne negatywne skutki zmian klimatu. Strategie adaptacji do zmian klimatu, zapewniają swego rodzaju „bufor” przed nieprzewidywanymi zmianami klimatu. Dopasowanie fenologii roślin poprzez odpowiedni dobór odmian roślin pod kątem dostępności wody i innych warunków klimatycznych może zmniejszyć ryzyko wystąpienia chorób grzybowych. Regionalizacja upraw może również umożliwić uprawę odmian lepiej dostosowanych do konkretnych warunków klimatycznych w danej lokalizacji. Posiadanie szerokiego zakresu odmian roślin o różnych długościach okresu wegetacji może umożliwić rolnikom reagowanie na zmienne warunki klimatyczne i minimalizowanie ryzyka strat związanych z wystąpieniem chorób grzybowych. Ponadto, prognozowanie występowania chorób grzybowych poprzez monitorowanie środowiska, systemów wczesnego ostrzegania oraz modelowania matematycznego może pomóc w prognozowaniu i zapobieganiu pojawieniu się chorób grzybowych oraz innych szkodników (Gouache i in., 2012).

Wdrażanie tych strategii adaptacyjnych może pomóc rolnikom w zmniejszeniu ryzyka strat związanych z wystąpieniem epidemii chorób upraw oraz zwiększeniu odporności systemów rolniczych na zmiany klimatu. Jednakże, aby skutecznie reagować na dynamicznie zmieniające się warunki klimatyczne i ich wpływ na zdrowie roślin i plony rolnicze, konieczne są dalsze badania i rozwój nowych technologii (Gouache i in., 2012).

Potencjalny wpływ zmian klimatu na choroby grzybowe pszenicy

Patogeny grzybowe stanowią do 80% wszystkich chorób atakujących rośliny uprawne, niszcząc tym samym jedną trzecią globalnych plonów rocznie. Choroby grzybowe pszenicy są głównym czynnikiem ograniczającym globalną produkcję tej uprawy (Morgounov i in., 2012). W warunkach sprzyjających rozwojowi patogenów, choroby mogą ograniczyć od 20% do 40% światowej produkcji rolniczej i stanowić poważne zagrożenie dla zachowania bezpieczeństwa żywnościowego (Caubel i in., 2017). Dlatego też, choroby grzybowe uważane są za większe zagrożenie dla upraw rolniczych niż choroby wirusowe.

Zmiany klimatu mają istotny wpływ na dynamikę występowania chorób grzybowych pszenicy, w tym także na rozprzestrzenianie się i nasilenie się chorób. Wzrost temperatury oraz zmiany w opadach mogą stworzyć bardziej korzystne warunki dla rozwoju i rozprzestrzeniania się patogena *Puccinia triticina*. Wyższa temperatura może skrócić okres inkubacji choroby, a większa wilgotność sprzyjać rozwojowi grzyba, co z kolei zwiększa ryzyko infekcji roślin pszenicy. Zmiany klimatyczne zmieniają częstość występowania i wirulencję patogenów grzybowych, co może negatywnie wpłynąć na prawidłowy wzrost roślin. Na podstawie dostępnej literatury nie do końca wyjaśniona jest złożona interakcja między reakcjami roślin na biotyczne i abiotyczne warunki stresowe, co ma kluczowe znaczenie dla hodowli odpornościowej w dobie zmian klimatu w przyszłości (Leisner i in., 2023).

Odporność odmian na choroby grzybowe zbóż może zostać przełamana, na skutek zmiany temperatury i wilgotności powietrza. Wzrost temperatury i poziomu dwutlenku węgla w atmosferze skutkuje wzrostem intensywności chorób grzybowych upraw oraz migracją roślin żywicielskich na nowe obszary. Oznacza to, że nowe rasy patogenów mogą pojawiać się na nowych obszarach upraw, na których do tej pory nie występowały (Wheeler i Braun, 2013). Ponadto, ekstremalne zjawiska pogodowe mogą wywoływać epidemie patogenów grzybowych (Xiao i in., 2022).

Migracja patogenów grzybowych w kierunkach regionów chłodniejszych i wilgotnych (Kocmánková i in., 2009) związana jest z emisją dwutlenku węgla do atmosfery, która stymuluje produkcję biomasy przez roślinę żywicielską, na której zimują i namnażają się zarodniki (Caubel i in., 2012). Dwutlenek węgla w powietrzu jest ważnym źródłem węgla dla roślin. Niestety, z powodu niekorzystnej działalności człowieka, poziom CO₂ nadmiernie wzrasta, co ma wpływ na zużycie warstwy ozonowej oraz negatywnie wpływa na rośliny uprawne. Zaobserwowano, że wzrost poziomu dwutlenku węgla zwiększa tempo fotosyntezy, wydajność transpiracji i wysoką do-

stępność składników odżywczych (Long i in., 2004). W roślinach C3 wzrost poziomu CO₂ stymuluje tempo fotosyntezy, ale nie zwiększa to plonu ani biomasy rośliny. Natomiast wzrost atmosferycznego dwutlenku węgla zwiększa biomasa pszenicy i plon ziarna, ale zmniejsza jego wartość odżywczą. Może prowadzić to do zmiany tempa metabolizmu oraz rozwoju patogenów. Nie jest jednak jasne, w jaki sposób podwyższony poziom dwutlenku węgla (CO₂) i azotu (N₂O) wpływają na biologię patogenów poprzez zmiany we wzroście plonów pszenicy i zawartości N w roślinie (Navarro i in., 2020).

Rdza brunatna pszenicy

Rdza brunatna pszenicy powodowana przez grzyb *Puccinia triticina* f. sp. *tritici* (syn. *P. recondita* Roberge ex Desmaz. f. sp. *tritici*) jest jedną z najpoważniejszych chorób liści pszenicy jarej i ozimej. Jest to bezwzględny, wyspecjalizowany patogen, który co roku powoduje znaczne straty w ilości i jakości plonów. Choroba ta, występuje powszechnie na wszystkich obszarach uprawy pszenicy na całym świecie. Warunki pogodowe sprzyjające rozwojowi tego patogena to dłuższe okresy słonecznej i suchej pogody wiosną i wczesnym latem. Optymalne warunki do rozwoju *P. triticina* to gdy temperatura i wilgotność w nocy przewidywać okres rosy lub/oraz gdy zbliża się deszcz (Kolmer 2013). Kiełkowanie zarodników następuje po 4-8 godzinach w temperaturze 20°C i pod 100% wilgotność powietrza (Hu i Rijkenberg, 1998, Zhang i in., 2003, Rodríguez-Moreno i in., 2020).

Występowanie rdzy brunatnej pszenicy jest również związane z wysoką intensywnością upraw, przy jednoczesnym wysokim nawożeniu azotem i dużej ilości rosy gromadzącej się na roślinach. W zainfekowanych kłosach ziarniaki są mniejsze. Szkodliwość choroby zależy głównie od nasilenia jej występowania. Przy silnym porażeniu straty powodowane przez tę chorobę wynoszą od 40% do 80%. W Polsce straty w plonie powodowane przez tę chorobę wynoszą 15%, ale w sprzyjających warunkach do rozwoju patogena mogą sięgać nawet od 30% do 60% (Strzembicka i in., 2013).

Występowanie rdzy brunatnej pszenicy stanowi poważne zagrożenie w dobie zmieniającego się klimatu. W ostatnich dziesięcioleciach rdza brunatna pszenicy była drugą najczęściej występującą chorobą grzybową w uprawach pszenicy po mączniaku prawdziwym zbóż i traw. Wpływ zmian klimatu na okres inkubacji rdzy brunatnej pszenicy w zachodniej Polsce został przedstawiony przez Wójtowicz i współpracowników (Wójtowicz i in., 2017). Model przedstawia zależność pomiędzy temperaturą a długością okresu inkubacji dla dwóch badanych odmian: Ostrogi (model 1) i Turni (model 2). W badaniach tych wykazano wysoką

zależność między symulacjami a obserwowanymi długościami okresu inkubacji rdzy brunatnej pszenicy. Wyniki te sugerują wzrost częstości infekcji przez *P. triticina*, a tym samym na wcześniejszy i znaczący wzrost występowania tej choroby w wyniku przewidywanej wyższej temperatury w XXI wieku (Wójtowicz i in., 2017). Podobne badania przeprowadził Caubel i współpracownicy (Caubel i in., 2017), który stworzył model STICS-MILA, symulujący zarówno dynamikę upraw w relacji do lokalnego mikroklimatu, w połączeniu ze zmianami patologicznymi powodowanymi przez patogena *P. triticina* (Caubel i in., 2017). Eksperymenty były prowadzone przez wiele lat w różnych regionach Francji. Wykazano wcześniejsze występowanie objawów rdzy brunatnej pszenicy z około miesięcznym wyprzedzeniem w porównaniu z poprzednimi dekadami. Wyższe wartości temperatury powietrza, przy wilgotności powietrza bliskiej 100%, stwarzają odpowiednie warunki do wcześniejszego rozwoju tego patogena na młodych częściach roślin. Czynniki te zwiększają liczbę cykli infekcyjnych w sezonie, prowadząc do znacznych strat w plonach (Caubel i in., 2017). Gouache ze współpracownikami (Gouache i in., 2012), przeprowadzili symulację wpływu zmian klimatycznych we Francji na rdzę brunatną pszenicy w odniesieniu do plonów pszenicy. Stwierdzono, że straty plonów we Francji spowodowane przez *P. triticina* z powodu globalnego ocieplenia zmniejszą się średnio o 15% (Gouache i in., 2012).

Skutki zmian klimatycznych dotyczą również Serbię, która zmagą się z ekstremalnymi wahaniami warunków klimatycznych. W latach 2017-2020 temperatury w styczniu i lutym wahały się od prawie 10°C (od -5°C do +5°C w styczniu) do 7°C (od 1,2°C do 7,5°C w lutym). Odnotowano również różnicę w całkowitym zakresie opadów. Przy ciepłych zimach i wysokich temperaturach w okresie wegetacji roślin, rdza brunatna pszenicy będzie występowała w dużym lub bardzo dużym nasileniu w Serbii (Jevtić i in., 2020).

W zmieniającym się klimacie, modelowanie zbiorów danych pogodowych, terenowych i prognozowanie stanowi podstawę zintegrowanej ochrony przez patogenami grzybowymi. Kluczowy element osiągnięcia sukcesu zapobiegania stratom powodowanym przez rdzę brunatną pszenicy polega na ciągłym dostępie do prognoz pogodowych z wykorzystaniem serwisów internetowych oraz urządzeń mobilnych (Rodríguez-Moreno i in., 2020). Zespół Rodríguez (2020) zaproponował model oparty na zmiennych temperaturowych zebranych podczas trzyletnich doświadczeń. Zapisy pomiarowe z 88 stacji meteorologicznych posłużyły do wypracowania modelu prognozującego rozwój i występowanie rdzy brunatnej pszenicy. Analiza bezpośrednich danych pogodowych pokazała związek nasilenie się rdzy brunatnej pszenicy

przy temperaturze punktu rosy powietrza niższej niż 13,7°C i średnią temperaturę poniżej 19,06°C. Analiza wyników wykazała, że wysoka wilgotność atmosferyczna, zwłaszcza w okresach deszczowych lub podczas porannych ros, sprzyjają infekcji i rozprzestrzenianiu się zarodników rdzy brunatnej. Komponenty meteorologiczne stanowią podstawę systemu wczesnego ostrzegania przed patogenem *P. triticina* (Rodríguez-Moreno i in., 2020).

Prognozowanie zmian klimatu a produkcja pszenicy na świecie/plony pszenicy

Prognozy dotyczące zmian klimatu sugerują, że w ciągu kolejnych dekad możemy spodziewać się wzrostu temperatury, zmian w opadach atmosferycznych oraz częstszego występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych. Te zmiany mogą mieć istotny wpływ na produkcję pszenicy, stanowiącej kluczowy składnik diety ludzkiej na całym świecie.

Dane literaturowe wskazują, że zmiany klimatu mogą mieć zarówno pozytywne, jak i negatywne skutki dla produkcji pszenicy. W niektórych regionach wzrost temperatury może wydłużyć okres wegetacyjny pszenicy, co potencjalnie przyczyni się do zwiększenia plonów. Jednakże, zwiększone ryzyko występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych, jak susze, upały lub burze, może prowadzić do znaczących strat w plonach pszenicy.

Zmiany klimatu i zasoby genowe

W kontekście zmian klimatycznych istotne jest również wykorzystanie zasobów genowych i hodowla roślin odpornych na choroby grzybowe. Wprowadzenie nowych odmian pszenicy, które są odporne na rdzę brunatną, może znacznie zmniejszyć ryzyko strat w plonach i poprawić stabilność produkcji rolniczej.

Zmiany klimatyczne mają istotny wpływ na gatunki dzikie, zarówno rośliny, jak i zwierzęta. Te zmiany mogą prowadzić do przesunięć geograficznych, zmian w fenologii (czyli sezonowych zdarzeniach w cyklach życiowych organizmów), a także do zmian w dostępności zasobów i interakcjach międzygatunkowych. Niektóre gatunki mogą mieć trudności w dostosowaniu się do nowych warunków klimatycznych, co może prowadzić do spadku populacji, a nawet do zagrożenia ich wyginięciem. Jednak niektóre gatunki mogą także wykazywać zdolność do przystosowania się do nowych warunków, np. poprzez migrację do bardziej odpowiednich środowisk lub poprzez ewolucję nowych cech przystosowawczych. W każdym razie, zrozumienie wpływu zmian klimatu na gatunki dzikie jest kluczowe dla ochrony różnorodności biologicznej i ekosystemów.

Zmiany klimatu stwarzają zagrożenie dla wielu upraw i związanych z nimi gatunków. Analiza dostępnej literatury naukowej wskazuje, że poten-

cialnie zagrożone są również gatunki o znaczącej wartości rolniczej, odporności na choroby oraz innych istotnych cechach dla rolnictwa. Na podstawie danych dotyczących około 1100 gatunków dzikich roślin, Thomas i współpracownicy (2004) szacują, że od 15% do 37% z nich jest zagrożonych wymarciem. Według Jarvisa i in. (2008), od 16% do 22% wszystkich dzikich krewnych gatunków posiadających bezpośrednią wartość rolniczą może być zagrożonych wyginięciem. Dzikie gatunki oraz lokalne populacje mogą pełnić istotną rolę w zachowaniu bioróżnorodności i stanowić źródło odporności na stresy abiotyczne i biotyczne (Hajjar i Hodgkin, 2007). Banki genów, zapewniające ochronę zasobów genetycznych *ex-situ* i *in-situ*, odgrywają kluczową rolę w zabezpieczeniu różnorodności genetycznej gatunków roślin uprawnych. Z tego względu obecnie przykładana się dużą wagę do tego obszaru badań (Singh i in., 2015).

Pszenica odgrywa niezwykle istotną rolę jako roślina uprawna na skalę globalną, co znajduje swoje odzwierciedlenie w imponującej liczbie akcesji pszenicy przechowywanych w bankach genów na całym świecie. Według danych Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (FAO) z 2010 roku, pszenica posiada największą liczbę akcesji (856 000), wyprzedzając ryż (774 000) i jęczmień (467 000). W banku genów IPK w Gatersleben przeprowadza się badania selekcyjne w kierunku oceny odporności/podatności na choroby grzybowe oraz tolerancji na stresy abiotyczne. Przeprowadzono testy na mączniaka prawdziwego zbóż i traw oraz rdzę brunatną pszenicy na 10 348 akcesjach należących do 21 gatunków z rodzaju *Triticum* oraz 489 akcesjach z 20 gatunków z rodzaju *Aegilops*. Wyniki tych badań różnicowały materiał roślinny pod względem chorób grzybowych i reakcji na stres abiotyczny (Börner i in., 2006). Niniejsze badania podkreślają kluczową rolę pszenicy w kontekście globalnej bezpieczeństwa żywnościowego oraz potrzebę ciągłych wysiłków mających na celu ochronę różnorodności genetycznej tej rośliny. Badania nad odpornością na choroby i tolerancją na stres abiotyczny są niezbędne dla utrzymania wydajności upraw pszenicy wobec zmieniających się warunków środowiskowych.

Wykorzystanie zasobów genowych i hodowla roślin odpornych na choroby grzybowe stanowią kluczowy element strategii adaptacyjnych w kontekście zmian klimatycznych. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie ryzyka strat w plonach, poprawa stabilności produkcji rolniczej oraz ochrona bezpieczeństwa żywnościowego na świecie.

Podsumowanie

Zmiany klimatyczne mają istotny wpływ na uprawy pszenicy i występowanie chorób grzybowych, takich jak rdza brunatna. Wzrost temperatury, zmiany w ilości opadów oraz inne czynniki klimatyczne sprzyjają rozwojowi patogenów grzybowych i zwiększają ryzyko strat w plonach. W odpowiedzi na te wyzwania, przemysł rolniczy stosuje różnorodne strategie adaptacyjne, takie jak modelowanie matematyczne, hodowla roślin odpornych oraz wykorzystanie zasobów genowych. Wdrażanie tych strategii może pomóc w zmniejszeniu ryzyka strat związanych z wystąpieniem epidemii chorób upraw oraz zwiększeniu odporności systemów rolniczych na zmiany klimatu. Jednakże, dalsze badania i rozwój nowych technologii są niezbędne, aby skutecznie reagować na dynamicznie zmieniające się warunki klimatyczne i ich wpływ na zdrowie roślin i plony rolnicze. Wymogi Integrowanej Produkcji (IP) oraz Europejskiego Zielonego Ładu (EZŁ) kładą nacisk na ograniczanie zużycia chemicznych środków ochrony roślin poprzez stosowanie takich strategii jak dobór odmian odpornych. Integracja tych praktyk w rolnictwie jest kluczowa dla zmniejszenia negatywnego wpływu na środowisko oraz zdrowie ludzi i zwierząt. Dobór odmian odpornych pozwala na naturalną obronę roślin przed chorobami i szkodnikami, co redukuje konieczność stosowania pestycydów. Taka strategia wspiera zrównoważone rolnictwo, które jest mniej zależne od chemicznych środków ochrony roślin, a bardziej skoncentrowane na ekologicznych i bezpiecznych metodach uprawy. Dzięki temu możliwe jest zwiększenie bioróżnorodności oraz poprawa jakości gleby i wód, co przyczynia się do lepszego zarządzania zasobami naturalnymi. Implementacja tych wymogów jest zatem nie tylko krokiem w kierunku zrównoważonego rolnictwa, ale również istotnym elementem ochrony środowiska i dążenia do bardziej ekologicznej przyszłości.

Literatura

- Börner, A., Freytag, U., Sperling, U., 2006. Analysis of wheat disease resistance data originating from screenings of Gatersleben Genebank accessions during 1933 and 1992. *Genet. Resour. Crop Evol.* 53, 453–465. <https://doi.org/10.1007/s10722-004-1158-8>
- Caubel, J., Launay, M., Lannou, C., Brisson, N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecol. Modell.* 242, 92–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.05.012>
- Caubel, J., Launay, M., Ripoche, D., Gouache, D., Buis, S., Huard, F., Huber, L., Brun, F., Bancal, M.O., 2017. Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop-disease model in a French regional application. *Eur. J. Agron.* 90, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.004>
- Chaloner, T.M., Gurr, S.J., Bebbler, D.P., 2021. Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 11, 710–715. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01104-8>

- Gouache, D., Le, Bris, D., Bogard, M., Deudon, O., Page, C., Gate, P., 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *Eur. J. Agron.* 39, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.009>
- Hajjar, R., Hodgkin, T., 2007. The use of wild relatives in crop improvement: a survey of developments over the last 20 years. *Euphytica* 156, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9363-0>
- Hu, G., Rijkenberg, F.H., 1998. Subcellular localization of beta-1,3-glucanase in *Puccinia recondita* f sp *tritici*-infected wheat leaves. *Planta* 204, 324–334.
- Jarvis, A., Lane, A., Hijmans R., 2008. The effect of climate change on crop wild relatives. *Agric. Ecosyst. Environ.* 126, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.013>
- Jevtić, R., Župunski, V., Lalošević, M., Jacković B., Orbović B., Ilin S., 2020. Diversity in susceptibility reactions of winter wheat genotypes to obligate pathogens under fluctuating climatic conditions. *Sci. Rep.* 10, 19608. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76693-z>
- Juroszek, P., Tiedemann, A., 2013. Climate change and potential future risks through wheat diseases: A review. *Eur. J. Plant Pathol.* 136, 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0144-9>
- Kocmánková, E., Trnká, M., Juroch, J., Dubrovský, M., Semerádová, D., Možný, M., Žalud, Z., 2009. Impact of climate change on the occurrence and activity of harmful organisms. *Plant Prot. Sci.* 45, 48–52.
- Kolmer, J., 2013. Leaf rust of wheat: pathogen biology, variation and host resistance. *Forests* 4, 70–84. <https://doi.org/10.3390/f4010070>
- Leisner, C.P., Potnis, N., Sanz-Saez, A., 2023. Crosstalk and trade-offs: Plant responses to climate change-associated abiotic and biotic stresses. *Plant Cell Environ.* 46(10): 2946–2963. <https://doi.org/10.1111/pce.14532>
- Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A., Ort, D.R., 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. *Annu Rev Plant Biol.* 55: 591–628. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141610>
- Miedaner, T., Juroszek, P., 2021. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theor. Appl. Genet.* 134, 1771–1785. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Morgounov, A., Tufan, H.A., Sharma, R., Akin, B., Bagci, A., Braun, H.J., Kaya, Y., Keser, M., Payne, T.S., Sonder, K., McIntosh R., 2012. Global incidence of wheat rust and powdery mildew during 1969–2010 and durability of resistance of winter wheat variety Bezostaya 1. *Eur. J. Plant Pathol.* 132, 323–340. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9879-y>
- Navarro, J.C., Centeno, M.A., Laguna, O.H., Odriozola, J.A., 2020. Ru–Ni/MgAl₂O₄ structured catalyst for CO₂ methanation. *Renewable Energy*, 161: 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.055>
- Raza, A., Razaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J., 2019. Impact of climate change on Crops adaptation and Strategies to tackle Its outcome: A Review. *Plants (Basel)* 8(2): 34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>
- Rodríguez-Moreno, V.M., Jiménez-Lagunes, A., Estrada-Avalos, J., Mauricio-Ruvalcaba, J.E., Padilla-Ramírez, J.S., 2020. Weather-data-based model: an approach for forecasting leaf and stripe rust on winter wheat. *Meteorol Appl.* 27:e1896. <https://doi.org/10.1002/met.1896>
- Savary, S., Nelson, A., A.H., Willcoquet, L., Duveiller, E., Mahuku, G., Forbes, G., Garrett, K.A., Hodson, D., Padgham, J., Pande, S., Sharma, M., Yuen, J., A., 2011. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. *Plant Dis.* 95, 1204–1216. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-11-0316>
- Savary, S., Willcoquet, L., Elazegui, F.A., Teng, P.S., Du, P.V., Zhu D., Tang, O., Huang, S., Lin X., Singh, H.M., Srivastava, R.K., 2011. Rice pest constraints in tropical Asia: characterization of injury profiles in relation to production situations. *Plant Disease* 85(3), 208–215. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2000.84.3.341>
- Singh, R.P., Prasad, P.V.V., Reddy, K.R., 2015. Climate change: implications for stakeholders in genetic resources and seed sector. *Adv. Agron.* 129, 117–180. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.09.002>
- Strzembicka, A., Czajowski, G., Karska, K., 2013. Characteristic of the winter wheat breeding materials in respect of resistance to leaf rust *Puccinia triticina*. *Bull. Plant Breed. Acclim. Inst.* 268, 7–14.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., Ferreira De Siqueira, M., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., Van Jaarsveld, A.S., Midgley, G.F., Miles, L., Ortega-Huertas, M.A., Peterson, A.T., Phillip, S.O.L., Williams, S.E., 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427, 145–148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Wheeler, T., Braun, J., 2013. Climate change impacts on global food security. *Science* 341, 508–513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Wójtowicz, A., Wójtowicz, M., Ratajkiewicz, H., Pasternak, M., 2017. Prognoza zmian czasu inkubacji sprawcy rdzy brunatnej pszenicy w reakcji na przewidywane ocieplenie klimatu. *Fragm. Agron.* 34(4), 197–207.
- Xiao, Y., Wang, M., Song, Y., 2022. Abiotic and biotic stress cascades in the era of climate change pose a challenge to genetic improvements in plants. *Forests* 13(5): 780. <https://doi.org/10.3390/f13050780>
- Zhang, L., Meakin, H., Dickinson, M. 2003. Isolation of genes expressed during compatible interactions between leaf rust (*Puccinia triticina*) and wheat using cDNA-AFLP. *Mol. Plant Pathol.* 4 469–477.