

## PROGNOZA ZMIAN CZASU INKUBACJI SPRAWCY RDZY BRUNATNEJ PSZENICY W REAKCJI NA PRZEWIDYWANE OCIEPLENIE KLIMATU

ANDRZEJ WÓJTOWICZ<sup>1</sup>, MAREK WÓJTOWICZ<sup>2</sup>, HENRYK RATAJKIEWICZ<sup>3</sup>, MARIA PASTERNAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zespół Informatyki, Ekonomiki i Systemów Decyzyjnych w Ochronie Roślin, Instytut Ochrony Roślin - Państwowy Instytut Badawczy, ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań

<sup>2</sup>Samodzielna Pracownia Technologii Produkcji Roślin Oleistych, Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin - Państwowy Instytut Badawczy Oddział w Poznaniu, ul. Strzeszyńska 36, 60-479 Poznań

<sup>3</sup>Katedra Entomologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Dąbrowskiego 159, 60-594 Poznań

**Synopsis.** Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu przewidywanych zmian warunków termicznych na okres inkubacji rdzy brunatnej pszenicy w zachodniej Polsce. Eksperymenty w warunkach szklarniowych zbliżonych do naturalnych wykorzystano do oceny wiarygodności modeli opisujących wpływ temperatury na długość okresu inkubacji. Potwierdzona statystycznie pozytywna ocena wiarygodności opracowanych modeli zdecydowała o przeprowadzeniu symulacji komputerowych, które umożliwiły oszacowanie czasu inkubacji rdzy brunatnej pszenicy w Szczecinie, Poznaniu i Wrocławiu w efekcie zwiększenia o 1–4°C zarejestrowanej w tych miejscowościach temperatury. Przeprowadzone badania dostarczają informacji o zmianach w jednostce czasu w długości okresu inkubacji rdzy brunatnej w zachodniej Polsce w następstwie przewidywanego wzrostu temperatury w XXI wieku.

**Słowa kluczowe:** Rdza brunatna pszenicy, okres inkubacji, ocieplenie klimatu, modele

### WSTĘP

Z opublikowanego w 2016 r. raportu Europejskiej Agencji Środowiska wynika, że średnia temperatura powietrza odnotowana w latach 2006–2015 była o 0,83–0,89°C wyższa od średniej zarejestrowanej w okresie przedindustrialnym [European Environment Agency Report 2016]. W XXI wieku średnia globalna temperatura ma wzrosnąć o 1,1–6,4°C [IPCC 2007] a w Europie przewiduje się wzrost temperatury o 2,5–5,5°C [European Environment Agency Report 2016]. Takie zmiany na pewno nie pozostaną bez wpływu na rozwój epifitoz. Temperatura bowiem odgrywa znaczącą rolę w regulacji wzajemnych relacji występujących pomiędzy roślinami i patogenami [Analytis 1977]. Potwierdzeniem powyższej tezy są między innymi wyniki badań nad wpływem temperatury na rozwój grzybni różnych gatunków grzybów, w tym rodzaju *Puccinia* [Hubballi i in. 2010, Pose i in. 2009], kiełkowanie zarodników [Elahinia 2000, Hassebrauk i Schroeder 1964, Kramer i Eversmeyer 1992, Manners 1950, Mueller i Buck 2003, Osman-Ghani i Manners 1983, Tapsoba i Wilson 1997] oraz na okres inkubacji [Johnson 1980, Lovell i in. 2004, Pariaud i in. 2012, Shaw 1990, Shearer i Zadoks 1972, Viruega i in. 2011, Xu 1999]. Rezultatem badań nad okresem inkubacji są nierzadko równania matematyczne opisujące związek występujący pomiędzy analizowanymi zmiennymi [Fisher i in. 2008, Karolewski i in. 2002, Kolnaar 2006, Kolnaar and Van den Bosch 2001, Pfender 2001, Teng i in. 1980,

<sup>1</sup> Adres do korespondencji – *Corresponding address:* a.wojtowicz@iorpib.poznan.pl

Webb and Nutter 1997]. Ścisły związek pomiędzy temperaturą i długością okresu inkubacji wykazany z użyciem modeli matematycznych w licznych badaniach wskazuje na możliwość zastosowania takich modeli do opracowania prognoz zagrożenia roślin przez patogeny w efekcie przewidywanych zmian klimatu.

W badaniach zastosowano dwa modele opisujące związek długości okresu inkubacji z temperaturą. Po sprawdzeniu ich wiarygodności w eksperymentach przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do naturalnych modele zastosowano w symulacjach komputerowych ukierunkowanych na określenie wpływu ocieplenia klimatu na zmiany okresu inkubacji.

## MATERIAŁY I METODY

Prognozę wpływu ocieplenia klimatu na okres inkubacji oparto o symulacje komputerowe przeprowadzone z użyciem danych meteorologicznych zarejestrowanych w latach 2010–2014 w Szczecinie, Poznaniu i Wrocławiu oraz danych uzyskanych po podwyższeniu zarejestrowanej temperatury o 1, 2, 3, 4°C. Dla każdego miesiąca od kwietnia do lipca obliczono miesięczne sumy dziennego tempa inkubacji (MSDTI).

Modele inkubacji zastosowane w badaniach:

$$LP1 = 127,778 + \exp(9,87754 - 0,408429) \cdot T \quad (1)$$

$$LP2 = 134,579 + \exp(10,66961 - 0,475776) \cdot T \quad (2)$$

gdzie LP1 = długość okresu inkubacji na odmianie Turnia [h], LP2 = długość okresu inkubacji na odmianie Ostroga [h], T = temperatura [°C].

Model (1) zaproponowany przez Wójtowicza [2012] opisuje związek pomiędzy temperaturą i długością okresu inkubacji na odmianie Turnia. Model (2) opracowany wg metodyki opisanej w badaniach z zastosowaniem odmiany Turnia [Wójtowicz 2012], opisuje związek pomiędzy temperaturą i długością okresu inkubacji na odmianie Ostroga.

Modele inkubacji LP1 i LP2 przekształcono do postaci  $1/LP1$  i  $1/LP2$  wyrażające ułamek całkowitego okresu inkubacji przemijający w jednostce czasu przy danej temperaturze czyli tempo inkubacji. Wartości  $1/LP1$  sumowano, od momentu inokulacji, do momentu w którym wartość sumy była  $\geq 1$ . W taki sam sposób sumowano wartości  $1/LP2$ .

Wiarygodność modeli inkubacji sprawdzono w eksperymentach przeprowadzonych w warunkach zbliżonych do naturalnych z zastosowaniem siewek pszenicy. Doświadczenia przeprowadzono w latach 2012–2014. Siewki pszenicy odmian Turnia i Ostroga infekowano w fazie drugiego liścia (BBCH 12). Do inokulacji używano wodnej zawiesiny urediniospor – zarodników propagacyjnych grzyba *P. recondita* f. sp. *tritici*. Przygotowanie inokulum polegało na przeniesieniu do atomizera z wodą destylowaną urediniospor z siewek liści pszenicy, na których objawy chorobowe w postaci urediniów wystąpiły w wyniku zakażenia przeprowadzonego 10 dni wcześniej. Do tego celu używano skalpela chirurgicznego. Inokulum zastosowane do pierwotnego zakażenia siewek zebrano z pszenicy uprawianej w roku poprzednim w warunkach polowych. Wodną zawiesinę urediniospor наносzono na rośliny za pomocą atomizera. Następnie rośliny wkładano do worków foliowych i przetrzymywano w stanie zwilżenia w temperaturze 15°C. Po upływie 24 godzin wyjmowano je z worków i do momentu wystąpienia objawów chorobowych utrzymywano temperaturę i wilgotność względną powietrza na zaplanowanym poziomie. Terminy wystąpienia objawów chorobowych porównano z wynikami symulacji komputerowych przeprowadzonych z wykorzystaniem modeli inkubacji rdzy brunatnej pszenicy. Zgodność wyników obserwacji i symulacji komputerowych oszacowano statystycznie na podstawie współczynnika determinacji  $R^2$ .

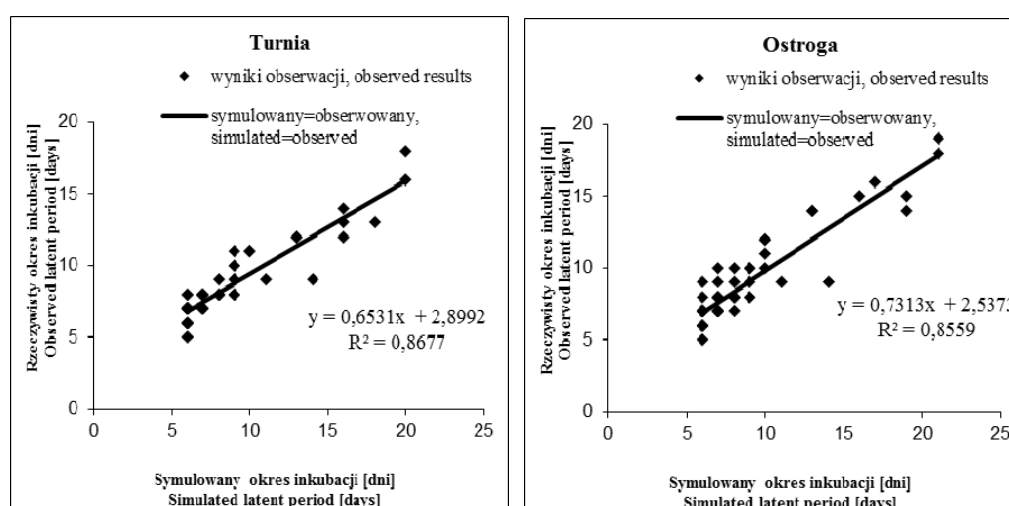
Uzyskane wyniki opracowano statystycznie z wykorzystaniem analizy wariancji.

## WYNIKI BADAŃ

Zastosowane modele inkubacji odznaczały się wysoką wiarygodnością, o czym przekonuje duża zgodność wyników symulacji z wynikami obserwacji (tab. 1, rys 1). Spośród 62 wyników symulacji 51 (82%) nie różniło się więcej niż o jeden dzień od wyników obserwacji na odmianie Turnia. Ośmiokrotnie (13%) symulowany termin wystąpienia uredniniów był wcześniejszy a trzykrotnie (5%) był późniejszy o ponad 1 dzień od odnotowanego na odmianie Turnia. Liczba symulacji nie różniących się więcej niż o jeden dzień od wyników obserwacji na odmianie Ostroga wynosiła 79% (49/62). Sześciokrotnie (10%) wynik symulacji wyprzedził rzeczywisty termin wystąpienia uredniniów na odmianie Ostroga o ponad jeden dzień. Siedmiokrotnie na odmianie Ostroga odnotowano wcześniejsze o ponad jeden dzień od symulowanych objawy obecności grzyba powodującego rdzę brunatną (11%).

Tabela 1. Podsumowanie wyników symulacji  
Table 1. Summary of simulation results

| Odmiana<br>Cultivar | Liczba symulacji generujących okres inkubacji dłuższy od obserwowanego o więcej niż 1 dzień/<br>Number of simulations which generated a latent period >1 day shorter than the observed period | Liczba symulacji generujących okres inkubacji nie różniący się od obserwowanego o więcej niż 1 dzień/<br>Number of simulations which generated a latent period that did not differ by 1 day from the observed period | Liczba symulacji generujących okres inkubacji krótszy od obserwowanego o więcej niż 1 dzień/<br>Number of simulations which generated a latent period >1 day longer than the observed period |
|---------------------|---|--|--|
| Turnia              | 8   | 51   | 3  |
| Ostroga             | 6   | 49   | 7  |



Rys. 1. Porównanie symulowanego i rzeczywistego okresu inkubacji na odmianie Turnia i Ostroga  
Fig. 1. Comparison of simulated and observed latency periods for wheat leaf rust on the wheat cultivars cv. Turnia and cv. Ostroga

Tabela 2. Porównanie miesięcznych sum dziennego tempa inkubacji (MSDTI) rdzy brunatnej pszenicy na odmianie Turnia i Ostroga  
 Table 2. Comparison of monthly sum of the daily incubation rate (MSDIR) of wheat leaf rust on the wheat cultivars Turnia and Ostroga

| Miesiąc<br>Month  | Temperatura<br>Temperature | Turnia        |               |               | Ostroga       |               |               |
|-------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                   |                            | Szczecin      | Poznań        | Wrocław       | Szczecin      | Poznań        | Wrocław       |
| Kwiecień<br>April | zarejestrowana/recorded    | 1,79 a        | 2,09 a        | 2,24 a        | 1,70 a        | 2,00 a        | 2,15 a        |
|                   | +1°C                       | 2,08 a (0,29) | 2,39 a (0,30) | 2,55 a (0,31) | 1,99 a (0,29) | 2,30 a (0,30) | 2,46 a (0,31) |
|                   | +2°C                       | 2,38 a (0,59) | 2,70 a (0,61) | 2,86 a (0,62) | 2,29 a (0,59) | 2,62 a (0,62) | 2,77 a (0,62) |
|                   | +3°C                       | 2,70 a (0,91) | 3,02 a (0,93) | 3,18 a (0,94) | 2,61 a (0,91) | 2,93 a (0,93) | 3,09 a (0,94) |
| Maj<br>May        | +4°C                       | 3,02 a (1,23) | 3,34 a (1,25) | 3,49 a (1,25) | 2,93 a (1,23) | 3,25 a (1,25) | 3,40 a (1,25) |
|                   | zarejestrowana/recorded    | 3,06 a        | 3,52 a        | 3,83 a        | 2,96 a        | 3,43 a        | 3,73 a        |
|                   | +1°C                       | 3,38 a (0,32) | 3,85 a (0,33) | 4,14 a (0,31) | 3,27 a (0,31) | 3,76 a (0,33) | 4,04 a (0,31) |
|                   | +2°C                       | 3,59 a (0,53) | 4,17 a (0,65) | 4,43 b (0,60) | 3,52 a (0,56) | 4,07 a (0,64) | 4,32 a (0,59) |
| Czerwiec<br>June  | +3°C                       | 3,82 a (0,76) | 4,46 a (0,94) | 4,69 b (0,86) | 3,76 a (0,80) | 4,35 a (0,92) | 4,57 b (0,84) |
|                   | +4°C                       | 4,05 a (0,99) | 4,71 a (1,19) | 4,92 b (1,09) | 3,98 a (1,02) | 4,59 a (1,16) | 4,78 b (1,05) |
|                   | zarejestrowana/recorded    | 4,09 a        | 4,47 a        | 4,64 b        | 4,00 a        | 4,37 a        | 4,54 b        |
|                   | +1°C                       | 4,38 a (0,29) | 4,72 a (0,25) | 4,87 b (0,23) | 4,28 a (0,28) | 4,60 a (0,23) | 4,75 b (0,21) |
| Lipiec<br>July    | +2°C                       | 4,64 a (0,55) | 4,93 b (0,46) | 5,06 b (0,42) | 4,52 a (0,52) | 4,80 b (0,43) | 4,92 b (0,38) |
|                   | +3°C                       | 4,86 a (0,77) | 5,10 b (0,63) | 5,21 b (0,57) | 4,73 a (0,73) | 4,95 b (0,58) | 5,05 b (0,51) |
|                   | +4°C                       | 5,04 a (0,95) | 5,24 b (0,77) | 5,33 b (0,69) | 4,89 a (0,89) | 5,07 b (0,70) | 5,14 b (0,60) |
|                   | zarejestrowana/recorded    | 4,95 a        | 5,25 a        | 5,29 a        | 4,82 a        | 5,10 a        | 5,13 b        |
| Lipiec<br>July    | +1°C                       | 5,14 a (0,19) | 5,40 a (0,15) | 5,43 b (0,14) | 5,00 a (0,18) | 5,23 a (0,13) | 5,25 b (0,12) |
|                   | +2°C                       | 5,30 a (0,35) | 5,52 b (0,27) | 5,54 b (0,25) | 5,13 a (0,31) | 5,32 b (0,22) | 5,34 b (0,21) |
|                   | +3°C                       | 5,42 a (0,47) | 5,60 b (0,35) | 5,62 b (0,33) | 5,23 a (0,41) | 5,39 b (0,29) | 5,40 b (0,27) |
|                   | +4°C                       | 5,51 a (0,56) | 5,67 b (0,42) | 5,68 b (0,39) | 5,30 a (0,48) | 5,45 b (0,35) | 5,44 b (0,31) |

Wartości występujące przed literami przedstawiają MSDTI w kwietniu, maju, czerwcu i lipcu na odmianach Turnia i Ostroga uzyskane w symulacjach przeprowadzonych z wykorzystaniem danych rzeczywistych oraz uzyskanych po podwyższeniu zarejestrowanej temperatury w Szczecinie, Poznaniu i Wrocławiu o 1, 2, 3 i 4°C. Wartości w nawiasach przedstawiają rezultaty odejmowania MSDTI uzyskanych w symulacjach przeprowadzonych z uwzględnieniem danych rzeczywistych zarejestrowanych w kwietniu, maju, czerwcu i lipcu oraz uzyskanych po podwyższeniu wartości zarejestrowanej temperatury o 1, 2, 3 i 4°C.

Values placed before the letters show (MSDIR) in April, May, June and July on wheat cultivars Turnia and Ostroga obtained in simulations performed on data registered in Szczecin, Poznań and Wrocław and data obtained by adding 1, 2, 3 or 4°C to the registered temperature. The values in brackets show the results of subtraction (MSDIR) obtained in simulations carried out on the actual data recorded in April, May, June and July and obtained after the increase of the values of recorded temperature by 1, 2, 3 and 4°C.

Wartości w wierszach (dla odmian) oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$ . Values in rows (for varieties) marked with the same letter are not differ significantly at  $\alpha = 0,05$ .

Zgodność pomiędzy symulowanym a rzeczywistym okresem inkubacji grzyba powodującego rdzę brunatną pszenicy na odmianach Turnia i Ostroga określona za pomocą współczynnika determinacji  $R^2$  wynosiła odpowiednio 0,87 i 0,86 (rys. 1).

Analiza wariancji ujawniła istotne zróżnicowanie w tempie rozwoju patogena w okresie inkubacji na obu odmianach (tab. 2). Najmniejsze sumaryczne wartości tempa rozwoju patogena w okresie inkubacji odnotowano w symulacjach przeprowadzonych z wykorzystaniem danych zarejestrowanych w kwietniu. Wartości analizowanego parametru obliczone dla odmiany Turnia i Ostroga wynosiły odpowiednio 1,79 i 1,70 w Szczecinie, 2,09 i 2,00 w Poznaniu oraz 2,24 i 2,15 we Wrocławiu. W następstwie zastosowania danych meteorologicznych zarejestrowanych w maju uzyskano następujące wyniki: 3,06 i 2,96 w Szczecinie, 3,52 i 3,43 w Poznaniu oraz 3,83 i 3,73 we Wrocławiu. Symulacje przeprowadzone z wykorzystaniem danych z czerwca generowały następujące wartości analizowanego parametru: 4,09 i 4,00 w Szczecinie, 4,47 i 4,37 w Poznaniu oraz 4,64 i 4,54 we Wrocławiu. Największe sumaryczne wartości tempa rozwoju patogena w okresie inkubacji wynoszące 4,95 i 4,82 w Szczecinie, 5,25 i 5,10 w Poznaniu oraz 5,29 i 5,13 we Wrocławiu odnotowano w efekcie symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych zarejestrowanych w lipcu.

Podwyższenie temperatury o  $1^{\circ}\text{C}$  skutkowało zwiększeniem MSDTI o 0,12–0,33 (tab. 2). Najmniejszą wartość z tego zakresu generowała symulacja dotycząca odmiany Ostroga przeprowadzona z wykorzystaniem danych zarejestrowanych we Wrocławiu w lipcu a największą zarówno dla odmiany Turnia jak i Ostroga uzyskano w efekcie zastosowania danych zgromadzonych w Poznaniu w maju. Dodanie  $2^{\circ}\text{C}$  skutkowało zwiększeniem tempa o 0,21–0,65. Skrajne wartości tego przedziału odnotowano w symulacjach dotyczących odmiany Ostroga w następstwie zastosowania danych z Wrocławia zarejestrowanych w lipcu i w symulacjach dotyczących odmiany Turnia po zastosowaniu danych z Poznania zarejestrowanych w maju. Najmniejsze zwiększenie MSDTI stwierdzono w rezultacie podwyższenia zarejestrowanej temperatury o  $3^{\circ}\text{C}$  wynoszące 0,27 uzyskano dla odmiany Ostroga w symulacji z użyciem danych z Wrocławia zarejestrowanych w lipcu a największe o wartość 0,94 odnotowano dla odmiany Turnia po zastosowaniu danych z Poznania zarejestrowanych w maju oraz dla danych z Wrocławia dla obu odmian w kwietniu. Podwyższenie temperatury o  $4^{\circ}\text{C}$  skutkowało zmianami MSDTI w zakresie od 0,31 (Ostroga, Wrocław, lipiec) do 1,25 (obie odmiany Poznań, Wrocław, kwiecień).

Symulacje przeprowadzone na danych rzeczywistych zarejestrowanych w czerwcu wykazały istotne różnice w MSDTI na odmianie Turnia w Szczecinie i Wrocławiu. Istotne różnice pomiędzy Szczecinem i Wrocławiem odnotowano również w symulacjach przeprowadzonych w następstwie dodania 2, 3 lub  $4^{\circ}\text{C}$  do temperatury zarejestrowanej w maju oraz 1, 2, 3 lub  $4^{\circ}\text{C}$  do temperatury zarejestrowanej w czerwcu i lipcu. Istotne różnice w MSDTI w Poznaniu i Wrocławiu stwierdzono również w symulacjach przeprowadzonych z zastosowaniem danych rzeczywistych z czerwca oraz po dodaniu  $1^{\circ}\text{C}$  do temperatury zarejestrowanej w czerwcu i lipcu, a także dodaniu 2, 3 lub  $4^{\circ}\text{C}$  do temperatury zarejestrowanej w maju.

Podobne wyniki uzyskano w symulacjach dotyczących odmiany Ostroga. Jedyne różnice między odmianami Turnia i Ostroga stwierdzono przy porównaniu wyników symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych zarejestrowanych w lipcu oraz danych uzyskanych po dodaniu  $2^{\circ}\text{C}$  do temperatury zarejestrowanej w maju. W pierwszym przypadku Wrocław różnił się istotnie od Poznania i Szczecina. W drugim nie wykazano istotnych różnic pomiędzy miejscowościami.

Analiza wariancji umożliwiła również udzielenie odpowiedzi na pytanie o minimalne zwiększenie temperatury warunkujące zrównanie MSDTI w danym miesiącu z tempem charakterystycznym dla miesiąca następnego (tab. 3–5). Brak istotnych różnic w MSDTI na obu

Tabela 3. Porównanie miesięcznych sum dziennego tempa inkubacji (MSDTI) w trzech miejscowościach oszacowanego na podstawie symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych rzeczywistych zarejestrowanych w maju oraz danych uzyskanych przez dodanie 1, 2, 3 lub 4°C do temperatury zarejestrowanej w kwietniu

Table 3. Comparison of monthly sum of the daily incubation rate (MSDIR) at the three sites obtained in simulations performed on actual temperature recorded in May and in simulations using data modified by adding 1, 2, 3 or 4°C to temperature recorded in April

| Odmiana<br>Cultivar | Miejscowość<br>Locality | Maj<br>May | Kwiecień/April<br>+1°C | Kwiecień/April<br>+2°C | Kwiecień/April<br>+3°C | Kwiecień/April<br>+4°C |
|---------------------|-------------------------|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Turnia              | Szczecin                | 3,06 a     | 2,08 b                 | 2,38 a                 | 2,70 a                 | 3,02 a                 |
|                     | Poznań                  | 3,52 a     | 2,39 b                 | 2,70 b                 | 3,02 a                 | 3,34 a                 |
|                     | Wrocław                 | 3,83 a     | 2,55 b                 | 2,86 b                 | 3,18 a                 | 3,49 a                 |
| Ostroga             | Szczecin                | 2,96 a     | 1,99 b                 | 2,29 a                 | 2,61 a                 | 2,93 a                 |
|                     | Poznań                  | 3,43 a     | 2,30 b                 | 2,62 b                 | 2,93 a                 | 3,25 a                 |
|                     | Wrocław                 | 3,73 a     | 2,46 b                 | 2,77 b                 | 3,09 a                 | 3,40 a                 |

Wartości w wierszach oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$   
 Values in rows marked with the same letter are not differ significantly at  $\alpha = 0.05$

Tabela 4. Porównanie miesięcznych sum dziennego tempa inkubacji (MSDTI) w trzech miejscowościach oszacowanego na podstawie symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych rzeczywistych zarejestrowanych w czerwcu oraz danych uzyskanych przez dodanie 1, 2, 3 lub 4°C do temperatury zarejestrowanej w maju

Table 4. Comparison of monthly sum of the daily incubation rate (MSDIR) at the three sites obtained in simulations performed on actual temperature recorded in June and in simulations using data modified by adding 1, 2, 3 or 4°C to temperature recorded in May

| Odmiana<br>Cultivar | Miejscowość<br>Locality | Czerwiec<br>June | Maj/May<br>+1°C | Maj/May<br>+2°C | Maj/May<br>+3°C | Maj/May<br>+4°C |
|---------------------|-------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Turnia              | Szczecin                | 4,09 a           | 3,38 b          | 3,59 a          | 3,82 a          | 4,05 a          |
|                     | Poznań                  | 4,47 a           | 3,85 b          | 4,17 a          | 4,46 a          | 4,71 a          |
|                     | Wrocław                 | 4,64 a           | 4,14 a          | 4,43 a          | 4,69 a          | 4,92 a          |
| Ostroga             | Szczecin                | 4,00 a           | 3,27 b          | 3,52 a          | 3,76 a          | 3,98 a          |
|                     | Poznań                  | 4,37 a           | 3,76 b          | 4,07 a          | 4,35 a          | 4,59 a          |
|                     | Wrocław                 | 4,54 a           | 4,04 a          | 4,32 a          | 4,57 a          | 4,78 a          |

Wartości w wierszach oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$   
 Values in rows marked with the same letter are not differ significantly at  $\alpha = 0.05$

Tabela 5. Porównanie MSDTI w okresie inkubacji w trzech miejscowościach oszacowanego na podstawie symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem danych rzeczywistych zarejestrowanych w lipcu oraz danych uzyskanych przez dodanie 1, 2, 3 lub 4°C do temperatury zarejestrowanej w czerwcu.

Table 5. Comparison of monthly sum of the daily incubation rate (MSDIR) at the three sites obtained in simulations performed on actual temperature recorded in July and in simulations using data modified by adding 1, 2, 3 or 4°C to temperature recorded in June

| Odmiana<br>Cultivar | Miejscowość<br>Locality | Lipiec<br>July | Czerwiec/June<br>+1°C | Czerwiec/June<br>+2°C | Czerwiec/June<br>+3°C | Czerwiec/June<br>+4°C |
|---------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Turnia              | Szczecin                | 4,95 a         | 4,38 b                | 4,64 b                | 4,86 a                | 5,04 a                |
|                     | Poznań                  | 5,25 a         | 4,72 b                | 4,93 b                | 5,10 a                | 5,24 a                |
|                     | Wrocław                 | 5,29 a         | 4,87 b                | 5,06 a                | 5,21 a                | 5,33 a                |
| Ostroga             | Szczecin                | 4,82 a         | 4,28 b                | 4,52 b                | 4,73 a                | 4,89 a                |
|                     | Poznań                  | 5,10 a         | 4,60 b                | 4,80 b                | 4,95 a                | 5,07 a                |
|                     | Wrocław                 | 5,13 a         | 4,75 b                | 4,92 a                | 5,05 a                | 5,14 a                |

Wartości w wierszach oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$   
 Values in rows marked with the same letter are not differ significantly at  $\alpha = 0.05$

odmianach odnotowano w Szczecinie przy porównaniu wyników symulacji na danych rzeczywistych zarejestrowanych w maju oraz zmodyfikowanych w efekcie dodania przynajmniej 2°C do temperatury zarejestrowanej w kwietniu. Dla Szczecina nie stwierdzono również istotnych różnic pomiędzy wynikami symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem danych zarejestrowanych w czerwcu i zmodyfikowanych przez dodanie przynajmniej 2°C do temperatury zarejestrowanej w maju, oraz przy porównaniu wyników symulacji z zastosowaniem rzeczywistych danych z lipca i uzyskanych przez dodanie przynajmniej 3°C do temperatury zarejestrowanej w czerwcu. Podobne wyniki odnotowano dla Poznania. Jedyna różnica pomiędzy Poznaniem i Szczecinem wystąpiła przy porównaniu rezultatów symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem danych z maja oraz uzyskanych w wyniku podwyższenia o 2°C temperatury zarejestrowanej w kwietniu. Dla Wrocławia nie stwierdzono istotnych różnic przy porównaniu wyników symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem danych rzeczywistych z czerwca oraz danych uzyskanych przez dodanie przynajmniej 1°C do temperatury zarejestrowanej w maju lub przy porównaniu symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem danych z lipca i uzyskanych w następstwie dodania przynajmniej 2°C do temperatury zarejestrowanej w czerwcu.

## DYSKUSJA

W badaniach realizowanych w latach 2012–2014 wykazano dużą zgodność pomiędzy symulowanymi i obserwowanymi długościami okresu inkubacji rdzy brunatnej pszenicy. Uzyskane w tych eksperymentach wyniki zdecydowały o wykorzystaniu opracowanych modeli do analizy zróżnicowania przestrzennego tempa inkubacji rdzy brunatnej i prognozowania wpływu zmian klimatycznych na wartość tego parametru.

Rezultaty symulacji przeprowadzonych na danych zgromadzonych we wszystkich analizowanych miesiącach i miejscowościach wskazują, że tempo inkubacji rdzy brunatnej pszenicy wzrośnie w zachodniej Polsce w reakcji na przewidywane zmiany klimatu. Ten pogląd koresponduje zarówno z eksperckimi opiniami na temat reakcji patogenów na zmiany klimatyczne [Gautam i in. 2013, Ghini i in. 2008] jak również z wynikami symulacji rozwoju patogenów przeprowadzonych z zastosowaniem modeli matematycznych [Volk i in. 2010]. Wg Gautama i in. [2013] oraz Ghiniego i in. [2008] zmiany klimatu stworzą lepsze warunki do rozwoju biotrofów takich jak rdze w następstwie intensywniejszego rozwoju roślin gospodarzy. Natomiast Volk [2010] na podstawie symulacji komputerowych wskazuje na zwiększenie ryzyka intensywniejszego rozwoju rdzy w cieplejszym klimacie jako bezpośrednią reakcję patogena na przewidywane zmiany klimatu. Główną zaletą podejścia z zastosowaniem modeli jest ilościowy charakter uzyskanych wyników, które można wykorzystać do analizy przestrzennego zróżnicowania ryzyka występowania patogena.

Porównanie wyników przeprowadzonych symulacji wykazało, że obecnie w kwietniu i maju nie ma różnicowania pomiędzy regionami w tempie inkubacji rdzy brunatnej pszenicy. Ponadto symulacje dotyczące odmiany Turnia ujawniły brak różnic w lipcu. W następstwie podwyższenia temperatury należy zakładać wystąpienie różnic w tempie inkubacji w zachodniej Polsce. W maju wzrost temperatury będzie implikował wystąpienie istotnych różnic w tempie inkubacji rdzy pomiędzy południem oraz pozostałymi regionami zachodniej Polski. Natomiast w czerwcu i lipcu różnice wystąpią pomiędzy północą i pozostałymi regionami. W centralnej i południowej części zachodniej Polski większe zmiany w tempie inkubacji patogena wystąpią w kwietniu i maju niż w czerwcu i lipcu. Jednakże na północy wzrost temperatury spowoduje różnice pomiędzy kwietniem i pozostałymi miesiącami natomiast brak różnic pomiędzy majem i czerwcem. Zwiększenie zróżnicowania pomiędzy regionami w tempie inkubacji w reakcji na przewidywane zmiany klimatu są zgodne z wynikami badań Volka i in. [2010], którzy symulowali ryzyko infekcji pszenicy przez sprawcę rdzy brunatnej w sześciu miejscowościach w Nadrenii Północnej-Westfalii i w efekcie podwyższenia temperatury uzyskali trzy różne klasy analizowanego parametru. Istotne różnice w tempie inkubacji pomiędzy Szczecinem i Poznaniem uzyskane w wyniku podwyższenia temperatury w czerwcu i lipcu wskazują na przesuwanie się w kierunku północnym ryzyka wystąpienia rdzy brunatnej pszenicy. Jest to zgodne z wynikami Treharne [1989], Evansa i in. [2007] oraz Barbera i in. [2013] którzy przewidują zwiększenie występowania chorób roślin w regionach chłodniejszych w następstwie podwyższenia temperatury.

Wyniki przeprowadzonych symulacji dostarczają również informacji o minimalnym podwyższeniu temperatury w danym miesiącu wymaganej do uzyskania charakterystycznego dla miesiąca następnego tempa inkubacji grzyba powodującego rdzę brunatną. Minimalny wzrost temperatury w kwietniu potrzebny do zwiększenia tempa inkubacji patogena do poziomu charakterystycznego dla maja to 2°C (w Szczecinie). W maju minimalne podwyższenie temperatury warunkujące tempo inkubacji typowe dla czerwca to 1°C (we Wrocławiu) a w czerwcu wymagane podwyższenie temperatury do osiągnięcia tempa charakterystycznego dla lipca to 2°C (we Wrocławiu). Uzyskane wyniki wskazują, że w kwietniu pierwsze istotne różnice w tempie inkubacji wystąpią w północnych regionach zachodniej Polski natomiast w maju i czerwcu w południowych.

## WNIOSKI

1. Przewidywane w następstwie zmian klimatu zwiększenie tempa inkubacji rdzy brunatnej pszenicy może skutkować zwiększeniem częstotliwości infekcji, co z kolei spowoduje wcześniejsze i charakteryzujące się większym nasileniem epifitozy.



2. Istotne zmiany w terminie występowania rdzy brunatnej pszenicy w zachodniej Polsce są spodziewane w pierwszej kolejności na północy regionu. Natomiast na południu przewiduje się wcześniejsze niż w pozostałych regionach zwiększenie nasilenia epifityzy.
3. Zróżnicowanie tempa inkubacji rdzy brunatnej pszenicy między analizowanymi miejscowościami, odnotowane w reakcji na podwyższenie temperatury, przemawia za podjęciem wysiłków ukierunkowanych na dostosowanie strategii ochrony roślin do warunków regionalnych.

## PIŚMIENNICTWO

- Analytis S. 1977. Über die Relation zwischen biologischer Entwicklung und Temperatur bei phytopathogenen Pilzen. *J. Phytopathology* 90: 64–76.
- Barber D.P., Ramotowski M.A.T., Gurr S.J. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nat. Clim. Change* 3: 985–988.
- Elahinia S.A. 2000. Assessment of urediniospore germination of *Puccinia striiformis* at various temperatures on agar and detached leaves of wheat. *J. Agric. Sci. Technol.* 2: 41–47.
- European Environment Agency Report. 2016. Climate change, impacts and vulnerability in Europe Summary. EEA Report No 1/2017. ISSN 1977-8449.
- Evans N., Baierl A., Semenov A.M., Gladders P., Fitt B.D.L. 2007. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *J. R. Soc. Interface.* 5: 525–531.
- Fisher A.J., Woods A.J., Smith D.M., Bruckart W.L. 2008. Latent period and viability of *Puccinia jaceae* var. *solstitialis* urediniospores: Implications for biological control of yellow starthistle. *Biol. Control* 45: 146–153.
- Gautam H.R., Bhardwaj M.L., Kumar R. 2013. Climate change and its impact on plant diseases. *Curr. Sci. India* 105: 1685–1691.
- Ghini R., Hamada E., Bettiol W. 2008. Climate change and plant diseases. *Sci. Agr.* 65: 98–107.
- Hassebrauk K., Schroeder J. 1964. Studies on germination of yellow rust spores. Proceedings of the European Cereal Rusts Conferences. Cambridge, 29th June – 4th July, pp: 12–18.
- Hubballi M., Nakkeeran S., Raguchander T., Anand T., Samiyappan R. 2010. Effect of environmental conditions on growth of *Alternaria alternata* causing leaf blight of Noni. *World J. Agric. Sci.* 6: 171–177.
- IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007. Summary for policymakers. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.). Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge, UK, and New York, NY: Cambridge University Press), pp. 18 (<http://ipcc-wg1.ucar.edu>).
- Johnson D.A. 1980. Effect of low temperature on the latent period of slow and fast rusting winter wheat genotypes. *Plant Dis.* 64: 1006–1008.
- Karolewski Z., Evans N., Fitt B.D.L., Todd A.D., Baierl A. 2002. Sporulation of *Pyrenopeziza brassicae* (light leaf spot) on oilseed rape (*Brassica napus*) leaves inoculated with ascospores or conidia at different temperatures and wetness durations. *Plant Pathol.* 51: 654–665.
- Kolnaar RW, Van den Bosch F. 2001. Effect of temperature on epidemiological parameters of *Puccinia lagenophorae*. *Plant Pathol.* 50: 363–70.
- Kolnaar W. 2006. Influence of rust epidemics on interspecific plant competition (<http://ethesis.unifr.ch>).
- Kramer C.L., Eversmeyer M.G. 1992. Effects of temperature on germination and germ-tube development of *Puccinia recondita* and *P. graminis* urediniospores. *Mycol. Res.* 96: 689–693.
- Lovell D.J., Hunter T., Powers S.J., Parker S.R., Van den Bosch F. 2004. Effect of temperature on latent period of septoria leaf blotch on winter wheat under outdoor conditions. *Plant Pathol.* 53: 170–181.
- Manners J.G. 1950. Studies on the physiological specialization of yellow rust *Puccinia glumantm* (Schm.) Erikss and Henn. in Great Britain. *Ann. Appl. Biol.* 37: 187–214.

- Mueller D.S., Buck J.W. 2003. Effects of light, temperature and leaf wetness duration on daylily rust. *Plant Dis.* 87: 442–445.
- Osman-Ghani N., Manners J.G. 1983. Effect of temperature on germination and viability of uredospores of four races of *Puccinia striiformis* from barley. *T. Brit. Mycol. Soc.* 81: 241–245.
- Pariaud B., Goyeau H., Halkett F., Robert C., Lannou C. 2012. Variation in aggressiveness is detected among *Puccinia triticina* isolates of the same pathotype and clonal lineage in the adult plant stage. *Europ. J. Plant. Pathol.* 134: 733–743.
- Pfender W.F. 2001. A temperature-based model for latent-period duration in stem rust of perennial ryegrass and tall fescue. *Phytopathology* 91: 111–116.
- Pose G., Patriarca A., Kyanko V., Pardo A., Pinto V. 2009. Effect of water activity and temperature on growth of *Alternaria alternata* on a synthetic tomato medium. *Int. J. Food Microbiol.* 135: 60–63.
- Shaw M.W. 1990. Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period of *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathol.* 39: 255–268.
- Shearer B.J., Zadoks J.C. 1972. The latent period of *Septoria nodorum* in wheat. I. The effect of temperature and moisture treatments under controlled conditions. *Neth. J. Plant Pathol.* 78: 231–241.
- Tapsoba H., Wilson J.P. 1997. Effects of temperature and light on germination of urediniospores of the pearl millet rust pathogen, *Puccinia substriata* var. *indica*. *Plant Dis.* 81: 1049–1052.
- Teng P.S., Blackie M.J., Close R.C. 1980. Simulation of the barley leaf rust epidemic: structure and validation of BARSIM-I. *Agric. Syst.* 5: 55–73.
- Treharne K. 1989. The implications of the “greenhouse effect” for fertilizers and agrochemicals. In: The “Greenhouse Effect” and UK Agriculture. Bennet R.M. (ed.). No. 19, Center for Agricultural Strategy, University of Reading, Reading, UK, pp. 67–78.
- Viruega J.R., Roca L.F., Moral J., Trapero A. 2011. Factors affecting infection and disease development on olive leaves inoculated with *Fusicladium oleagineum*. *Plant Dis.* 95: 1139–1146.
- Volk T., Epke K., Gerstner V., Leuthner C., Rotterdam A., Johnen A., von Richthofen J.S. 2010. Klimawandel in Nordrhein- Westfalen – Auswirkungen auf Schädlinge und Pilzkrankheiten wichtiger Ackerbaukulturen. Münster: proPlant GmbH. In German ([www.proplant.de](http://www.proplant.de)).
- Webb D.H., Nutter F.W. 1997. Effects of leaf wetness duration and temperature on infection efficiency, latent period, and rate of pustule appearance of rust in alfalfa. *Phytopathology* 87: 946–950.
- Wójtowicz A. 2012. Opracowanie i walidacja modelu szacującego pojawienie się objawów chorobowych powodowanych przez *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*. *Prog. Plant Prot.* 52: 680–683.
- Xu X-M. 1999. Effects of temperature on the latent period of the rose powdery mildew pathogen, *Sphaerotheca pannosa*. *Plant Pathol.* 48: 662–667.

A. WÓJTOWICZ, M. WÓJTOWICZ, H. RATAJKIEWICZ, M. PASTERNAK

#### PREDICTION OF CHANGES IN INCUBATION RATE OF WHEAT LEAF RUST IN RESPONSE TO PROJECTED CLIMATE WARMING

##### Summary

This study examined the influence of predicted temperature increase on the duration of the latent period of wheat leaf rust (*Puccinia recondita*) in western Poland. Experiments in controlled and ambient conditions were performed with the aim of validating models describing the influence of temperature on leaf rust latent period in two wheat cultivars, Turnia and Ostroga. There was good agreement between simulated and observed values in experiments in quasi-natural conditions, indicating high reliability of the models developed. The influence of increasing temperature on leaf rust latent period was then simulated using meteorological data from three weather stations located in western Poland, by adding 1–4°C to the recorded values. The results indicated that an increased rate of development of wheat leaf rust in the latent period can be expected in the study region as a result of predicted climate change.

**Key words:** Wheat leaf rust, latent period, global warming, models

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print*: 27.07.2017

Do cytowania – *For citation*

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.