

OPRACOWANIE I OCENA WIARYGODNOŚCI MODELI MATEMATYCZNYCH DO SZACOWANIA OKRESU INKUBACJI RDZY BRUNATNEJ ŻYTA (*PUCCINIA RECONDITA*)

ANDRZEJ WÓJTOWICZ¹, MAREK WÓJTOWICZ², MARIA PASTERNAK¹

¹*Zakład Metod Monitorowania i Sygnalizacji Agrofagów, Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań*

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

Synopsis. Celem pracy było przedstawienie w formie równań matematycznych wpływu temperatury otoczenia na długość okresu inkubacji rdzy brunatnej żyta na dwóch odmianach: Palazzo i Słowiańskie oraz sprawdzenie wiarygodności opracowanych modeli. Przeprowadzone w latach 2013–2014 badania pozwoliły na wyrażenie za pomocą funkcji wykładniczej relacji występujących pomiędzy badanymi cechami. Opracowane modele wyznaczają datę wystąpienia pierwszych objawów chorobowych na podstawie średniej dziennej temperatury powietrza. Ocenę wiarygodności modeli przeprowadzono przez porównanie wyników symulacji z rzeczywistymi terminami wystąpienia objawów chorobowych na roślinach poddanych inokulacji w doświadczeniach realizowanych w warunkach quasi-naturalnych w latach 2015–2017. Wyniki symulacji komputerowych z zastosowaniem opracowanych modeli pokrywały się z rzeczywistymi terminami wystąpienia objawów chorobowych.

Słowa kluczowe: *Puccinia recondita*, żyto, okres inkubacji, model

WSTĘP

Określenie wzajemnych relacji występujących pomiędzy rośliną, patogenem i warunkami środowiska stanowi ważne zagadnienie badań nad infekcyjnymi chorobami roślin uprawnych [Colhoun 1973, Davis i Main 1984, De Vallavieille-Pope 1995, Eversmeyer i Kramer 1998, Subrahmanyam i Smith 1989, Yadav i in. 2016]. Do najważniejszych czynników meteorologicznych decydujących o nasileniu chorób roślin uprawnych należy obok opadów i wilgotności względnej powietrza temperatura, która odgrywa znaczącą rolę w procesie infekcji i decyduje o długości okresu inkubacji. Optymalne warunki dla inkubacji rdzy brunatnej żyta gwarantuje temperatura zbliżona do 20°C a niższe temperatury skutkują wydłużeniem okresu inkubacji [Räder 2007, Wójtowicz 2013]. Z uwagi na decydujące znaczenie okresu inkubacji w rozwoju objawów chorobowych na roślinach uprawnych określenie wpływu warunków środowiskowych na długość tego kluczowego komponentu procesu chorobowego stanowiło podstawowy cel licznych prac naukowych [Danelli i Reis 2016, Eversmeyer i in. 1980, Nopsa i Pfender 2014, Pfender 2001, Shakya i in 2015, Suffert i Thompson 2018, Zearfoss i in. 2011.]. Zwieńczeniem badań prowadzonych w tym zakresie jest opracowanie w formie modeli matematycznych zależności występujących pomiędzy rośliną, patogenem i warunkami środowiska [Broome i in.

¹ Adres do korespondencji – *Corresponding address:* A.Wojtowicz@iorpib.poznan.pl

1995, Eisensmith i Jones 1981, Scherm i van Bruggen 1993]. Modele okresu inkubacji stanowią obok modeli infekcji podstawowy element systemów wspomagających podejmowanie decyzji w ochronie roślin [Racca i Jörg 2007, Räder i in. 2007]. Ponadto znajdują zastosowanie w prognozowaniu, warunkowanego zmianami klimatu, zagrożenia roślin przez patogeny [Wójtowicz i in. 2017].

Celem pracy było przedstawienie w formie równań matematycznych wpływu temperatury otoczenia na długość okresu inkubacji grzyba *Puccinia recondita* powodującego rdzę brunatną żyta na odmianach Palazzo i Słowiańskie oraz sprawdzenie wiarygodności opracowanych modeli.

MATERIAŁY I METODY

Badania realizowano w latach 2013–2017 na odmianach żyta: Palazzo i Słowiańskie różniących się odpornością na porażenie przez *Puccinia recondita* f. sp. *recondita*. W dziewięciostopniowej skali wg której 1 oznacza wysoką podatność a 9 pełną odporność na porażenie przez *Puccinia recondita* f. sp. *recondita* badane odmiany sklasyfikowano na poziomie 6,9 (Palazzo) i 8,1 (Słowiańskie) [Gacek 2010]. Eksperymenty polegały na inokulacji żyta w fazie drugiego liścia (BBCH 12) urediniosporami *P. recondita* f. sp. *recondita* i określeniu terminu wystąpienia objawów chorobowych rdzy brunatnej. Inokulum stanowiła zawiesina urediniospor pozyskiwanych z żyta uprawianego w PSD IOR-PIB Winnej Górze k. Środy Wlkp. w latach 2012–2016. Koncentracja urediniospor w zastosowanym inokulum wynosiła $5,7 \times 10^5$ zarodników/ml. Po inokulacji siewki żyta pozostawały przez 24 godziny w foliowych workach w temperaturze 15°C. Następnie wyjmowano je z worków i przetrzymywano na świeżym powietrzu do momentu wystąpienia pierwszych objawów chorobowych.

Wyniki eksperymentów realizowanych w latach 2013–2014 wykorzystano do opracowania modelu inkubacji rdzy brunatnej żyta a ocenę wiarygodności opracowanego modelu przeprowadzono na podstawie wyników uzyskanych w latach 2015–2017.

Do opracowania modelu inkubacji zastosowano funkcję wykładniczą [Rabiej 2012]. Zależność między temperaturą a długością okresu inkubacji wyrażono następująco:

$$I = a + \exp(b + c \times T)$$

gdzie:

I – okres inkubacji rdzy brunatnej (dni)

T – temperatura (°C)

a, b, c – współczynniki równania.

Następnie model inkubacji przekształcono do postaci 1/I. W tej formie model umożliwia wyliczenie jaka część całego okresu inkubacji jest realizowana przy danej temperaturze. Terminy wystąpienia objawów chorobowych wyznaczano przez dodawanie w interwale dobowym kolejnych wartości 1/I od dnia inokulacji do dnia w którym suma obliczeń osiągała lub przekraczała wartość równą jedności.

Wyniki przeprowadzonych symulacji porównano z wynikami przeprowadzonych doświadczeń a zgodność symulowanego i rzeczywistego okresu inkubacji oceniono na podstawie wyników analizy regresji liniowej.

WYNIKI I DYSKUSJA

W 2013 r. długość okresu inkubacji na odmianie Palazzo mieściła się w zakresie 5–15 dni (tab. 1). W kwietniu okres inkubacji wynosił od 8 do 15 dni przy temperaturze od 8,8–13,6°C. Objawy chorobowe rdzy w maju i czerwcu wystąpiły po 7 do 10 dniach po inokulacji przy

Tabela 1. Wyniki doświadczeń realizowanych w latach 2013–2014
 Table 1. Results of experiences carried out in 2013–2014

Nr/No	Data inokulacji Date of inoculations	Palazzo			Słowiańskie		
		Data wystąpienia objawów rdzy brunatnej Date of occurrence of leaf rust symptoms	Okres inokulacji (dni) Incubation period (days)	Temp. (°C)	Data wystąpienia objawów rdzy brunatnej Date of occurrence of leaf rust symptoms	Okres inokulacji (dni) Incubation period (days)	Temp. (°C)
1	04.04.2013	19.04.2013	15	8,8	18.04.2013	14	8,5
2	18.04.2013	26.04.2013	8	13,6	29.04.2013	11	12,7
3	25.04.2013	05.05.2013	10	12,7	05.05.2013	10	12,7
4	09.05.2013	17.05.2013	8	15,8	17.05.2013	8	15,8
5	16.05.2013	23.05.2013	7	16,0	23.05.2013	7	16,0
6	23.05.2013	02.06.2013	10	14,3	02.06.2013	10	14,3
7	27.05.2013	04.06.2013	8	15,6	04.06.2013	8	15,6
8	06.06.2013	14.06.2013	8	18,3	14.06.2013	8	18,3
9	13.06.2013	20.06.2013	7	20,7	20.06.2013	7	20,7
10	20.06.2013	28.06.2013	8	17,1	28.06.2013	8	17,1
11	27.06.2013	04.07.2013	7	18,0	04.07.2013	7	18,0
12	04.07.2013	10.07.2013	6	19,6	10.07.2013	6	19,6
13	11.07.2013	19.07.2013	8	18,5	18.07.2013	7	18,1
14	18.07.2013	24.07.2013	6	20,4	25.07.2013	7	20,7
15	25.07.2013	31.07.2013	6	23,0	31.07.2013	6	23,0
16	01.08.2013	06.08.2013	5	23,5	06.08.2013	5	23,5
17	12.09.2013	23.09.2013	11	13,2	24.09.2013	12	13,2
18	18.09.2013	30.09.2013	12	11,0	01.10.2013	13	10,7
19	26.09.2013	09.10.2013	13	9,0	10.10.2013	14	9,3
20	02.10.2013	14.10.2013	12	10,8	14.10.2013	12	10,8
21	25.03.2014	07.04.2014	13	9,4	07.04.2014	13	9,4
22	31.03.2014	14.04.2014	14	9,7	14.04.2014	14	9,7
23	09.04.2014	22.04.2014	13	10,5	22.04.2014	13	10,5
24	16.04.2014	25.04.2014	9	14,1	25.04.2014	9	14,1
25	22.04.2014	30.04.2014	8	14,8	30.04.2014	8	14,8
26	28.04.2014	08.05.2014	10	11,3	09.05.2014	11	11,6
27	15.05.2014	23.05.2014	8	17,9	23.05.2014	8	17,9
28	21.05.2014	27.05.2014	6	20,2	28.05.2014	7	18,9
29	04.06.2014	11.06.2014	7	21,0	11.06.2014	7	21,0
30	16.06.2014	24.06.2014	8	14,8	24.06.2014	8	14,8
31	23.06.2014	01.07.2014	8	16,8	30.06.2014	7	16,8
32	30.06.2014	07.07.2014	7	20,9	07.07.2014	7	20,9
33	07.07.2014	14.07.2014	7	20,0	14.07.2014	7	20,0
34	14.07.2014	21.07.2014	7	23,2	21.07.2014	7	23,2
35	21.07.2014	28.07.2014	7	21,4	28.07.2014	7	21,4
36	28.07.2014	04.08.2014	7	21,8	04.08.2014	7	21,8
37	04.08.2014	11.08.2014	7	20,7	11.08.2014	7	20,7
38	11.08.2014	20.08.2014	9	17,0	21.08.2014	10	16,8
39	26.09.2014	04.10.2014	8	13,4	07.10.2014	11	13,0
40	06.10.2014	15.10.2014	9	15,3	15.10.2014	9	15,3
41	10.10.2014	18.10.2014	8	13,9	18.10.2014	8	13,9

temperaturze odpowiednio w zakresie 12,7–16,0°C i 14,3–20,7°C. Okres inkubacji w lipcu przyjmował wartości z zakresu 6–8 dni przy temperaturze 18–23°C. Objawy rdzy w sierpniu wystąpiły po 5 dniach przy temperaturze 23,5°C a we wrześniu po 11 do 12 dniach przy temperaturze 11,0–13,2°C. W październiku przy temperaturze 9,0–10,8°C okres inkubacji wynosił 12–13 dni. Podobne wyniki odnotowano w doświadczeniach z odmianą Słowiańskie. Różnice wystąpiły w kwietniu, lipcu i we wrześniu kiedy okres inkubacji na odmianie Słowiańskie wynosił odpowiednio 11–14, 6–7 i 12 dni.

W 2014 r. długość okresu inkubacji na odmianie Palazzo mieściła się w zakresie 6–14 dni. W kwietniu objawy chorobowe wystąpiły po 8 do 14 dniach po inokulacji przy temperaturze 9,4–14,8°C a w maju po 6 do 10 dniach przy temperaturze 11,3–20,2°C. Okres inkubacji w czerwcu i lipcu wynosił 7 do 8 dni przy temperaturze odpowiednio z zakresu 14,8–21,0°C i 16,8–23,2°C. Objawy rdzy w sierpniu zarejestrowano po 7 do 9 dniach po inokulacji przy temperaturze z zakresu 17,0–21,8°C a w październiku po 8 do 9 dniach przy temperaturze 13,4–15,3°C.

Na odmianie Słowiańskie niewielkie różnice w długości okresu inkubacji odnotowano w maju, lipcu, sierpniu i październiku, kiedy objawy chorobowe rejestrowano odpowiednio po 7–11, 7, 7–10 i 8–10 dniach po inokulacji.

Wyniki doświadczeń realizowanych w latach 2013–2014 potwierdziły silny związek występujący między temperaturą i długością okresu inkubacji (tab. 2). Najkrótszy okres inkubacji wynoszący na odmianie Palazzo 5 dni zarejestrowano przy średniej temperaturze 23,5°C. Wydłużenie okresu inkubacji o 1–2 dni w porównaniu z okresem najkrótszym odnotowano przy temperaturze 20–21°C. W temperaturze około 13°C zarejestrowano wydłużenie okresu inkubacji o 5–6 dni, a w temperaturze 9–10°C okres inkubacji zwiększył się o 8–10 dni. Podobne wyniki odnotowano w doświadczeniach z odmianą Słowiańskie.

Tabela 2. Wpływ temperatury otoczenia na długość okresu inkubacji (Prezentowane dane uzyskano przez obliczenie wartości średnich z danych zgromadzonych w tabeli 1)

Table 2. Influence of ambient temperature on the length of the incubation period (The presented data was obtained by calculating the mean values from the data collected in Table 1)

Okres inkubacji (dni) Incubation period (days)	Palazzo		Słowiańskie	
	Liczba doświadczeń Number of experi- ments	Temperatura Temperature (°C)	Liczba doświadczeń Number of experi- ments	Temperatura Temperature (°C)
5	1	23,5	1	23,5
6	4	20,8	2	21,3
7	10	20,4	14	19,9
8	12	15,9	8	16,0
9	3	15,5	2	14,7
10	3	12,8	3	14,6
11	1	13,2	3	12,4
12	2	10,9	2	12,0
13	3	9,6	3	10,2
14	1	9,7	3	9,2
15	1	8,8	0	–

Zgromadzone w latach 2013–2014 wyniki wykorzystano do opracowania z zastosowaniem funkcji wykładniczej modeli inkubacji rdzy brunatnej na odmianach żyta Palazzo i Słowiańskie:

$$I_{[P]} = a + \exp(b + c \times T) \quad (1)$$

$$I_{[S]} = a + \exp(b + c \times T) \quad (2)$$

gdzie:

$I_{[P]}$ – okres inkubacji rdzy brunatnej na odmianie Palazzo (dni)

$I_{[S]}$ – okres inkubacji rdzy brunatnej na odmianie Słowiańskie (dni)

T – temperatura (°C); a, b, c – współczynniki równania

Wartości współczynników i statystyczne parametry opracowanych modeli opisujących wpływ temperatury na długość okresu inkubacji rdzy brunatnej żyta na odmianach Palazzo i Słowiańskie przedstawiono w tabeli 3. Wysokie wartości współczynników determinacji R^2 charakteryzujących modele inkubacji rdzy brunatnej żyta, opracowane na podstawie wyników eksperymentów realizowanych w latach 2013–2014 na odmianach Palazzo i Słowiańskie wskazują na dobre dopasowanie opracowanych modeli do danych empirycznych.

Tabela 3. Parametry modeli opisujących wpływ temperatury na okres inkubacji rdzy brunatnej żyta na odmianie Palazzo ($I_{[P]}$) i Słowiańskie ($I_{[S]}$)

Table 3. Parameters of models describing the influence of temperature on the incubation period of leaf rust on rye cultivars Palazzo ($I_{[P]}$) and Słowiańskie ($I_{[S]}$)

Nr modelu Number of a model	Odmiana Cultivar	Wartości współczynników Values of coefficients			Parametry statystyczne Values of statistical parameters			
		a	b	c	p			R^2
					a	b	c	
1	Palazzo	5,8831	3,85324	-0,19377	0,00000	0,00000	0,00000	89
2	Słowiańskie	5,0732	3,52664	-0,14626	0,00000	0,00000	0,00001	90

$$I_{[P]} = a + \exp(b + c \times T), I_{[S]} = a + \exp(b + c \times T)$$

W 2015 r. długość okresu inkubacji mieściła się w zakresie 7–12 dni (tab. 4). Na odmianie Palazzo w kwietniu tego roku odnotowano okresy inkubacji wynoszące 11–12 dni przy temperaturze 9,9–11,7°C. W maju minimalna długość okresu inkubacji wynosiła 9 a maksymalna 10 dni przy temperaturze 12,3–13,6. W czerwcu długość okresu inkubacji zawierała się w zakresie 7–11 a w lipcu 7–8 dni przy temperaturze odpowiednio z zakresu 14,7–17,1°C i 17,6–21,8°C. W sierpniu okres inkubacji wynosił 7 przy temperaturze 19,6–24,7°C, a we wrześniu 9 dni przy temperaturze 12,8°C. Podobne wyniki odnotowano w doświadczeniach z odmianą Słowiańskie. Różnice w długości okresu inkubacji wystąpiły jedynie w maju i lipcu kiedy maksymalna liczba dni od inokulacji do wystąpienia objawów chorobowych wyniosła odpowiednio 11 i 9 dni.

W 2016 r. liczba dni od inokulacji do wystąpienia objawów chorobowych wynosiła od 6 do 18 dni. Na odmianie Palazzo najdłuższy okres inkubacji zawierający się w przedziale 12–15 dni odnotowano w kwietniu przy temperaturze z zakresu 8,0–10,7 °C. W maju przy temperaturze 9,0–18,4°C długość okresu inkubacji wynosiła od 7 do 14 dni, a w czerwcu i lipcu od 7 do 8 dni przy temperaturze odpowiednio z zakresu 16,6–20,5°C i 17,5–20,3°C. W sierpniu liczba dni od inokulacji do wystąpienia uredyniów wynosiła 7 dni przy temperaturze 19,3–21,5°C a we

Tabela 4. Porównanie terminów rzeczywistego wystąpienia objawów rdzy brunatnej żyta z wynikami symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modeli opisanych w tabeli 3

Table 4. Comparison of observed occurrence of leaf rust symptoms with the results of simulations carried out using the models described in Table 3

Lp.	Data inokulacji Date of inoculations	Temp. (°C)	Palazzo		Temp. (°C)	Słowiańskie	
			wynik symulacji (dni) results of simulations (days)	wynik obserwacji (dni) results of observations (days)		wynik symulacji (dni) results of simulations (days)	wynik obserwacji (dni) results of observations (days)
1	08.04.2015	9,9	13	12	9,9	13	12
2	16.04.2015	11,7	11	11	11,7	11	11
3	27.04.2015	12,3	10	10	12,3	10	11
4	06.05.2015	13,5	9	9	13,5	9	9
5	11.05.2015	13,6	9	9	13,6	9	9
6	25.05.2015	15,6	8	9	15,6	8	9
7	02.06.2015	17,1	7	7	17,1	7	7
8	11.06.2015	16,2	7	8	16,2	7	8
9	18.06.2015	14,7	9	11	14,7	9	11
10	24.06.2015	17,6	7	8	17,6	8	8
11	02.07.2015	21,8	6	7	21,8	6	7
12	09.07.2015	17,6	7	8	17,6	7	9
13	16.07.2015	21,2	6	7	21,2	6	7
14	22.07.2015	18,0	7	8	18,0	7	8
15	28.07.2015	19,6	7	7	19,6	7	7
16	03.08.2015	24,7	6	7	24,7	5	7
17	21.09.2015	12,8	10	9	12,8	10	9
18	23.03.2016	9,3	14	13	9,5	14	14
19	30.03.2016	10,7	12	12	10,7	12	12
20	06.04.2016	10,3	12	12	10,3	12	12
21	14.04.2016	8,0	16	15	8,6	16	18
22	21.04.2016	9,0	14	14	9,0	14	14
23	28.04.2016	13,5	10	11	13,5	10	11
24	05.05.2016	16,9	7	7	16,9	8	7
25	12.05.2016	14,4	9	11	14,4	9	11
26	18.05.2016	18,4	7	7	18,4	7	7
27	02.06.2016	18,1	7	7	18,1	7	7
28	09.06.2016	16,6	7	8	16,6	7	8
29	16.06.2016	19,5	7	8	19,5	7	8
30	23.06.2016	20,5	6	7	20,5	6	7
31	30.06.2016	18,0	7	8	18,0	7	8
32	07.07.2016	19,2	6	7	19,2	6	7
33	14.07.2016	17,5	7	7	17,5	7	7
34	19.07.2016	20,3	6	7	20,3	6	7
35	28.07.2016	19,3	6	7	19,3	7	7
36	03.08.2016	21,5	6	7	21,5	6	7
37	06.09.2016	20,2	6	6	20,2	6	6
38	15.09.2016	14,6	8	8	14,6	8	8
39	22.09.2016	14,5	9	8	14,5	9	8

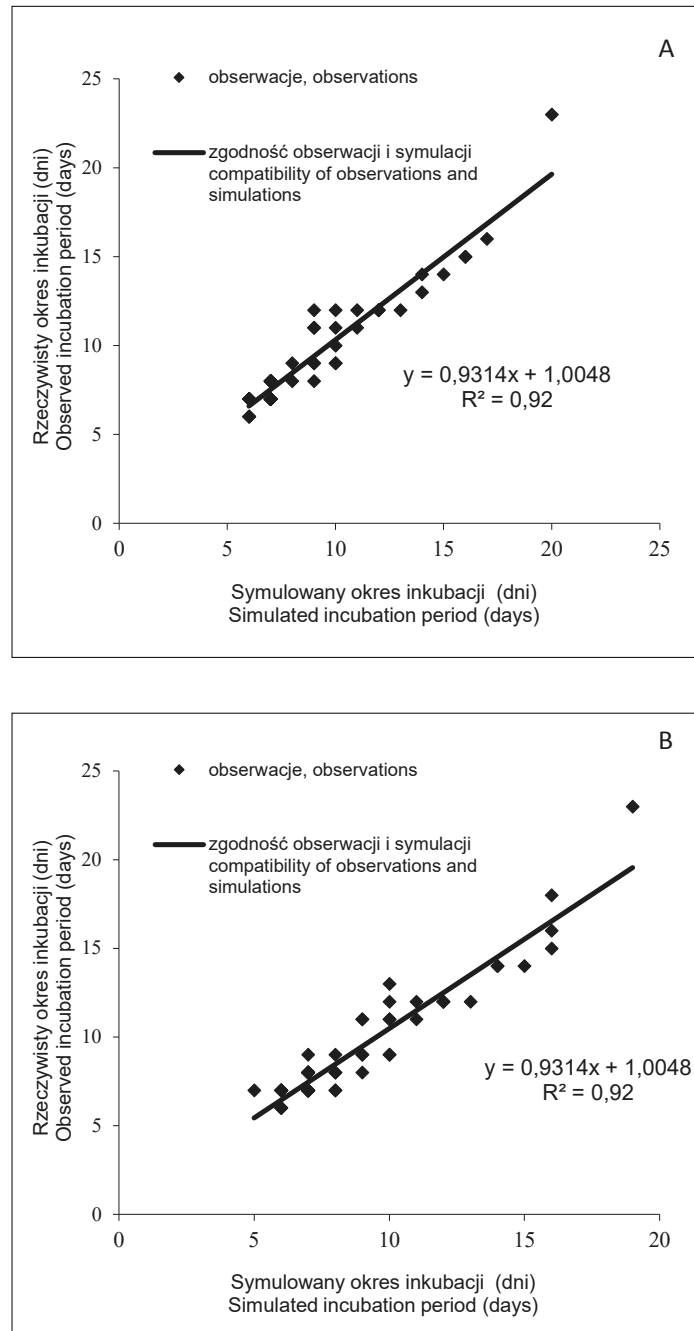
Tabela 4. cd.
Table 4. cont.

40	13.03.2017	8,0	17	16	8,0	16	16
41	22.03.2017	10,7	12	12	10,7	12	12
42	29.03.2017	11,5	11	12	11,5	11	12
43	11.04.2017	6,7	20	23	6,7	19	23
44	20.04.2017	7,9	16	15	7,9	16	15
45	27.04.2017	8,5	15	14	8,5	15	14
46	08.05.2017	13,1	10	9	13,1	10	9
47	15.05.2017	17,0	7	7	17,0	7	7
48	25.05.2017	18,3	7	7	18,3	7	7
49	01.06.2017	16,6	7	7	16,6	8	7
50	06.06.2017	17,8	7	7	17,8	7	7
51	12.06.2017	17,7	7	8	17,7	7	8
52	19.06.2017	18,4	6	7	18,4	7	7
53	29.06.2017	16,3	7	8	16,3	7	8
54	06.07.2017	17,9	7	7	17,9	7	7
55	12.07.2017	17,5	7	7	17,5	7	7
56	20.07.2017	18,5	7	7	18,5	7	7
57	26.07.2017	20,6	6	6	20,6	6	6
58	02.08.2017	19,7	6	6	19,7	6	6
59	13.09.2017	12,8	10	12	12,8	10	12
60	20.09.2017	13,1	9	12	13,1	10	13
59	13.09.2017	12,8	10	12	12,8	10	12
60	20.09.2017	13,1	9	12	13,1	10	13

wrześniu przy temperaturze 14,5–20,2°C zawierała się w przedziale 6–8 dni. Na odmianie Słowiańskie odnotowano podobne wyniki. Różnice w długości okresu inkubacji wystąpiły jedynie w kwietniu i maju kiedy najdłuższy okres inkubacji wynosił odpowiednio 14 i 18 dni.

W 2017 r. długość okresu inkubacji zawierała się w przedziale 6–23 dni. Na odmianie Palazzo w marcu i kwietniu liczba dni od inokulacji do wystąpienia uredyniów wynosiła odpowiednio 16 i 12 dni przy temperaturze wynoszącej odpowiednio 8°C i 10,7–11,5°C. W maju przy temperaturze z zakresu 6,7–17,0°C okres inkubacji zawierał się w przedziale 7–23 dni a w czerwcu przy temperaturze 16,6–18,4°C i lipcu przy temperaturze 16,3–18,5°C, 7–8 dni. W sierpniu liczba dni od inokulacji do wystąpienia objawów rdzy brunatnej wynosiła 6 dni przy temperaturze 19,7–20,6°C a we wrześniu przy temperaturze 12,8°C i październiku przy temperaturze 13,1°C i 12 dni. Różnice w długości okresu inkubacji pomiędzy odmianami wystąpiły jedynie w październiku kiedy od inokulacji do wystąpienia objawów chorobowych rdzy brunatnej na odmianie Słowiańskie odnotowano 13 dni.

Terminy wystąpienia objawów chorobowych rdzy brunatnej pokrywały się z wynikami symulacji komputerowych lub nieznacznie od nich odbiegały (tab. 3, rys 1). Całkowitą zgodność symulacji z wynikami obserwacji na odmianie Palazzo odnotowano dwudziestopięciokrotnie (42%). Jeden dzień różnicy stwierdzono trzydziestokrotnie (50%). Dwa dni różnicy pomiędzy wynikami symulacji i obserwacji zarejestrowano dwukrotnie (3%). Na odmianie Słowiańskie całkowitą zgodność zarejestrowano dwudziestosięmiokrotnie (45%). Jeden dzień różnicy



Rys. 1. Zgodność rzeczywistego i symulowanego okresu inkubacji rdzy brunatnej żyta na odmianie Palazzo (A) i Słowiańskie (B)
 Fig 1. Comparison of observed and simulated incubation period of leaf rust on rye cultivars: Palazzo (A) and Słowiańskie (B)

odnotowano dwudziestopięciokrotnie (42%), a dwa dni różnicy stwierdzono sześciokrotnie (10%). Większe różnice (trzydniowe i czterodniowe) wystąpiły łącznie dwukrotnie (3%).

Relacja pomiędzy rzeczywistym i symulowanym okresem inkubacji na analizowanych odmianach została opracowana z zastosowaniem regresji liniowej [Rabiej 2012] i wyrażona w formie następujących równań:

$$RI_{[P]} = 0,9314 \times SI_{[P]} + 1,0048 \quad (R^2 = 0,92)$$

$$RI_{[S]} = 1,0082 \times SI_{[S]} + 0,3937 \quad (R^2 = 0,91)$$

gdzie:

$RI_{[P]}$ = rzeczywisty okres inkubacji na odmianie Palazzo, $SI_{[P]}$ = symulowany okres inkubacji na odmianie Palazzo.

$RI_{[S]}$ = rzeczywisty okres inkubacji na odmianie Słowiańskie, $SI_{[S]}$ = symulowany okres inkubacji na odmianie Słowiańskie.

Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie rezultatów badań Gäumana [1951], który w doświadczeniach przeprowadzonych w temperaturze 20°C odnotował wystąpienie objawów rdzy brunatnej żyta 6,7 dnia po inokulacji. Obniżenie temperatury do 15°C skutkowało wydłużeniem okresu inkubacji o 2,4 dnia a efektem obniżenia temperatury do 10°C było wydłużenie okresu inkubacji o 8,6 dnia. Przedstawione wyniki badań nad okresem inkubacji rdzy brunatnej żyta na odmianach Palazzo i Słowiańskie są również zgodne z rezultatami badań Rädera [2007] prowadzonych na dwóch odmianach żyta Boresto i Picasso w temperaturze 15–25°C. Natomiast w efekcie obniżenia temperatury z 25°C do 10°C Räder [2007] odnotował znacząco mniejsze wydłużenie (4 dni) okresu inkubacji w porównaniu do wyniku uzyskanego w badaniach prezentowanych w niniejszej pracy (10 dni).

Wyniki badań własnych korespondują także z rezultatami doświadczeń realizowanych przez Klugego i in. [1999], którzy odnotowali najkrótszy czas inkubacji rdzy brunatnej żyta w temperaturze 20–30°C. Informacja o sześciodniowym okresie rozwoju pojedynczej generacji uredyniospor w optymalnych warunkach termicznych przedstawiona przez Nazarową i in. [1988] jest również zgodna z wynikami eksperymentów prezentowanych w niniejszej pracy.

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wiarygodnej symulacji, z zastosowaniem modeli matematycznych, terminów wystąpienia objawów chorobowych rdzy brunatnej żyta. Do opisu wpływu temperatury na długość okresu inkubacji wykorzystano funkcję wykładniczą. Przyjęte rozwiązanie koresponduje z propozycją przedstawioną przez Kolnaara [2006], który zastosował funkcję wykładniczą do opracowania zależności pomiędzy temperaturą i terminem wystąpienia objawów chorobowych w efekcie porażenia starca zwyczajnego przez *Puccinia lagenophorae*. Funkcję wykładniczą zastosowali również Rossi i in [1997] w badaniach nad okresem inkubacji rdzy brunatnej pszenicy oraz Pfender [(2001) który użył jej w połączeniu z funkcją liniową do opisanego wpływu temperatury na okres inkubacji rdzy żdźbłowej zbóż i traw na życicy trwałej i kostrzewie trzcinowej. Natomiast autorzy innych prac poświęconych modelowaniu okresu inkubacji chorób roślin stosowali do tego celu między innymi funkcję wielomianową drugiego stopnia [Becktell i in. 2005, Danelli i Reis 2016, Fisher i in. 2008, King i in. 1997, Pfister i in. 2004, Teng i in. 1980], funkcję logistyczną [Karolewski i in. 2002], funkcję Gomperta [Webb i Nutter 1997] oraz zmodyfikowaną wersję funkcji beta [Räder 2007].

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych w latach 2015–2017 wykazały dużą zbieżność rzeczywistych i symulowanych terminów wystąpienia objawów rdzy brunatnej żyta. Na odmianie Palazzo łączna liczba symulacji komputerowych pokrywających się z wynikami obserwacji lub różniących się od nich nie więcej niż jeden dzień wynosiła 92%. Zbliżone wyniki odnotowano przy porównaniu rzeczywistych i symulowanych terminów wystąpienia rdzy na odmianie Słowiańskie. W tym przypadku liczba symulacji nie różniących się od wyników obserwacji więcej niż jeden dzień osiągnęła wartość 88%. Potwierdzeniem wiarygodności zaproponowa-

nych modeli inkubacji są wysokie wartości współczynników determinacji równań regresji liniowej, opisujących związek między rzeczywistą i symulowaną długością okresu inkubacji.

Ścisły związek długości okresu inkubacji z temperaturą oraz duża wiarygodność opracowanych modeli matematycznych udowodniona na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń wskazują na możliwość zastosowania zaprezentowanych w niniejszej pracy modeli inkubacji rdzy brunatnej do szacowania zagrożenia żyta przez *Puccinia recondita* f. sp. *recondita*, indukowanego przewidywanymi zmianami klimatu.

PIŚMIENNICTWO

- Becktell M.C., Daughtrey M.L., Fry W.E. 2005. Temperature and leaf wetness requirements for pathogen establishment, incubation period, and sporulation of *Phytophthora infestans* on *Petunia × hybrida*. *Plant Dis.* 89: 975–979.
- Broome J.C., English J.T., Marois J.J., Latorre B.A., Aviles J.C. 1995. Development of an infection model for *Botrytis* bunch rot of grapes based on wetness duration and temperature. *Phytopathology* 85: 97–102.
- Colhoun J. 1973. Effects of environmental factors on plant disease. *Ann. Rev. Phytopathol.* 11: 343–364.
- Danelli A.L.D., Reis E.M. 2016. Quantification of incubation, latent and infection periods of *Phakopsora pachyrhizi* in soybean, according to chronological time and degree-days. *Summa Phytopathologica* 42(1): 11–17.
- Davis J.M., Main C.E. 1984. A regional analysis of the meteorological aspects of the spread and development of blue mold on tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Bound. Layer Meteorol.* 28: 271–304.
- De Vallavieille-Pope C, Huber L, Leconte M., Goyeau H. 1995. Comparative effects of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration and infection of *P. recondita* f. sp. *tritici* and *P. striiformis* on wheat seedlings. *Phytopathology* 85: 409–415.
- Eisensmith S.P., Jones A.L. 1981. A model for detecting infection periods of *Coccomyces hiemalis* on sour cherry. *Phytopathology* 71: 728–732.
- Eversmeyer M.G., Kramer C.L. 1998. Models of early spring survival of wheat leaf rust in the Central Great Plains. *Plant Dis.* 82: 987–991.
- Eversmeyer M.G., Kramer C.L., Browder I.E. 1980. Effect of temperature and host :parasite combination on the latent period of *Puccinia recondita* in seedling wheat plants. *Phytopathology* 70: 938–941.
- 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.
- Gacek E. 2010. Lista Opisowa Odmian. COBORU Słupia Wielka, ss. 142.
- Gäumann E. 1951. Pflanzliche Infektionslehre. Verlag Birkhäuser, Basel, pp. 681.
- 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.
- King W.T., Madden L.V., Ellis M.A., Wilson L.L. 1997. Effects of temperature on sporulation and latent period of *Colletotrichum* spp. infecting strawberry fruit. *Plant Dis.* 81: 77–84.
- Kluge E., Enizian S., Gutshe V. 1999. Befallsatlas, Atlas der potentialen Befallsgefährdung durch wichtige Schadorganismen im Ackerbau Deutschlands. SaphirVerlag, Ribbesbüttel, pp. 160.
- Kolnaar R.W. 2006. Influence of rust epidemics on interspecific plant competition (<http://ethesis.unifr.ch/theses>).
- Nazarova L.N., Polityko P.M., Fochenkova T.V. 1988. Rye protection against rust in intensive cultivation technology. Moscow: State Agroprom. Com., pp. 7 (In Russian).
- Nopsa H., Pfender W. 2014. A latent period duration model for wheat stem rust. *Plant Dis.* 98: 1358–1363.
- 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.

- Pfister S.E., Halik S., Bergdahl D.R. 2004. Effect of temperature on *Thekopsora minima* urediniospores and uredinia. *Plant Dis.* 88: 359–362.
- Rabiej M. *Statystyka z programem statystyka* 2012. Helion, Gliwice, ss. 345.
- Racca P., Jörg E. 2007. CERCBET 3 – a forecaster for epidemic development of *Cercospora beticola*. *OEPP/EPPO* 37(2): 344–349.
- Räder T. 2007. Entwicklung eines Prognose- und Entscheidungsmodells zur Braunrostbekämpfung in Winterroggen und Winterweizen. Universität Hannover, pp. 135 (<http://d-nb.info/983880298/34>).
- Räder T., Racca P., Jörg E., Hau B. 2007. PUCREC/PUCTRI – a decision support system for the control of leaf rust of winter wheat and winter rye. *Bull. OEPP/EPPO Bull.* 37(2): 378–382.
- Rossi V., Racca P., Pancaldi D., Alberti I. 1997. A simulation model for the development of brown rust epidemics in winter wheat. *Europ. J. Phytopathol.* 103: 453–465.
- Scherm H., van Bruggen A.H.C. 1993. Response surface models for germination and infection of *Bremia lactucae*, the fungus causing downy mildew of lettuce. *Ecol. Model.* 65: 281–296.
- Shakya, S. K., Goss, E. M., Dufault, N. S., van Bruggen, A. H. C. 2015. Potential effects of diurnal temperature oscillations on potato late blight with special reference to climate change. *Phytopathology* 105: 230–238.
- Subrahmanyam P., Smith D.H. 1989. Influence of temperature, leaf wetness period, leaf maturity, and host genotype on web blotch of peanut. *Oleagineux* 44: 27–31.
- Suffert F., Thompson R.N. 2018. Some reasons why the latent period should not always be considered constant over the course of a plant disease epidemic. *Plant Pathology* 67: 1831–1840.
- 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: 85–103.
- Webb D.H., Nutter F.W. Jr. 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. 2013. Opracowanie i zastosowanie modeli matematycznych do przewidywania ryzyka porażenia żyta ozimego przez *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *recondita* Roberger. *Rozpr. Nauk. IOR-PIB* 27, ss. 85.
- Wójtowicz A., Wójtowicz M., Sigvald R., Pasternak M. 2017. Predicting the effects of climate change on latency period of wheat leaf rust in western Poland. *Acta Agric. Scand., Sect. B – Soil Plant Sci.* 67: 223–234.
- Yadav S, Lalm M., Singh B, Kaushik S., Sanjeev S. 2016. Evaluation of fungicides against phytophthora infestans at elevated temperature. *Potato J.* 43(1): 98–102
- Zearfoss A.D., Cowger C., Ojiambo P.S. 2011. A degree-day model for the latent period of *Stagonospora nodorum* blotch in winter wheat. *Plant Disease* 95: 561–567.

A. Wójtowicz, M. Wójtowicz, M. PASTERNAK

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE INCUBATION PERIOD OF LEAF RUST IN RYE (*PUCCINIA RECONDITA*)

Summary

The aim of the study was to present, in the form of mathematical equations, the influence of ambient temperature on the incubation period of the leaf rust on two rye cultivars: Palazzo and Słowiańskie and to validate the models developed. The experiments carried out in 2013–2014 allowed for expressing relations between the examined features using the exponential function. The developed models determine the date of occurrence of disease symptoms based on the temperature course. The assessment of the reliability of the models was carried out by comparing the results of the simulation with the actual dates of occurrence of

disease symptoms on plants subjected to inoculation in experiments performed in quasi-natural conditions in the years 2015–2017. The results of computer simulations using the developed models coincided well with the actual dates of occurrence of disease symptoms.

Key words: *Puccinia recondita*, rye, incubation period, model

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print*: 23.01.2019

Do cytowania – *For citation*

Wójtowicz A., Wójtowicz M., Pasternak M. 2019. Opracowanie i ocena wiarygodności modeli matematycznych do szacowania okresu inkubacji rdzy brunatnej żyta (*Puccinia recondita*). *Fragm. Agron.* 36(1): 88–99.