

Adam Dawidziuk, Małgorzata Jędrzycka  
Instytut Genetyki Roślin, Polska Akademia Nauk, Poznań

## Modelowanie matematyczne cykli życiowych mikroorganizmów chorobotwórczych jako narzędzie ochrony rzepaku przed chorobami grzybowymi

### Mathematical modeling of life cycles of pathogenic microorganisms as a tool to protect oilseed rape against fungal diseases

Słowa kluczowe: cykl życiowy, modelowanie matematyczne, dojrzewanie owocników, uwalnianie zarodników, systemy wspierania decyzji

W niniejszej pracy przeglądowej przedstawiono podstawowe zasady tworzenia modeli matematycznych, a także szczegółowe założenia modeli Blackleg Sporacle, Improved Blackleg Sporacle, Sporacle Ezy oraz modułu SimCanker modelu SIPPOM\_WOSR, wykorzystywanych w systemach wspierania decyzji dotyczących ochrony rzepaku przed suchą zgnilizną kapustnych. Opisano także podstawowe założenia modelu PASSWORD dotyczącego prognozowania nasilenia cylindrosporiozy na rzepaku oraz systemy PRO\_PLANT i DORIS związane ze zwalczaniem szkodników rzepaku. W pracy skupiono się na modelach dotyczących prognozowania cyklu życiowego grzybów chorobotwórczych. Modele te obliczają szybkość dojrzewania owocników oraz uwalniania zarodników dzięki czemu można odpowiednio wcześniej podejmować działania prewencyjne i ochronne na plantacjach rzepaku. Wykorzystując wiedzę o aktualnym stężeniu zarodników w powietrzu można wskazać optymalny okres zabiegów preparatami grzybobójczymi. Celem takich programów jest dostarczanie rolnikom danych dotyczących aktualnego stadium dojrzałości owocników oraz terminów uwalniania zarodników workowych. Znajomość tych parametrów umożliwi wykonanie zabiegu grzybobójczego w optymalnym terminie. Rozwiązania takie dotyczą przypadków, w których monitorowane zarodniki stanowią inokulum pierwotne lub wtórne, przenoszone z prądami powietrza na rośliny uprawne w tym samym lub w kolejnym sezonie wegetacyjnym. W opracowaniu przedstawiono założenia oraz skuteczność kompleksowego modelu SimAsco, prognozującego dojrzewanie pseudotecjów i uwalnianie askospor grzybów *Leptosphaeria maculans* i *L. biglobosa*, powodujących suchą zgniliznę kapustnych na rzepaku ozimym w Polsce.

Key words: life cycle, mathematical modeling, maturation of fruiting bodies, release of ascospores, Decision Support Systems

This scientific review presents basic principles of developing mathematical models and detailed assumptions of the models Sporacle Blackleg, Improved Blackleg Sporacle, Sporacle Ezy and SimCanker module of SIPPOM\_WOSR, used in decision support systems for the protection of oilseed rape against stem canker of brassicas. This paper also describes the basic assumptions of the model PASSWORD — associated with the predicting of the severity of light leaf spot and PRO\_PLANT and DORIS systems associated with control of various insects on oilseed rape. This

paper focuses on models forecasting life cycles of pathogenic fungi. Mathematical models mentioned above can predict maturation of fruiting bodies and the release of spores and allow to take preventive and protective measures for oilseed rape plants. Using knowledge of the actual concentration of spores in the air, the optimal time for fungicidal treatment can be found. The aim of such programs is to provide farmers with actual data on predicted maturation of fruiting bodies and the mass release of ascospores. Knowledge about these parameters allows to perform chemical treatments at optimal time. Such solutions relate to cases in which the monitored spores formed as a primary or secondary inoculum are transferred with air currents to crops in the same or the next vegetative season. This paper also presents the assumptions and the effectiveness of the comprehensive predictive model SimAsco, used for the forecasting of maturation of fruiting bodies and ascospore release of *Leptosphaeria maculans* and *L. biglobosa*, causing stem canker on winter oilseed rape in Poland.

### **Założenia modelowania matematycznego organizmów patogenicznych**

---

Modelowanie matematyczne polega na zastosowaniu metod matematycznych do opisanego zachowania danego układu. Praktyka często wymaga wykonania analizy zachowania danego układu biologicznego, np. zachowania się i zmian danej populacji organizmów w określonych warunkach. W takich sytuacjach narzędziem prognozowania jest modelowanie matematyczne. Opracowuje się wtedy opisowy model układu będący hipotezą odnośnie sposobu jego działania. Na takiej podstawie można wnioskować, jaki wpływ mają potencjalne zakłócenia lub zmiana warunków otoczenia na stan danego układu. Model matematyczny opisuje układ za pomocą zmiennych powiązanych ze sobą grupą funkcji i w ten sposób ukazuje powiązania między wielkościami w tym układzie.

Odmienne podejścia do modelowania matematycznego często klasyfikuje się jako „czarne skrzynki” (black-box) lub „białe skrzynki” (white-box), w zależności od liczby dostępnych informacji (Karplus 1983). Model „czarnej skrzynki” przedstawia układ, o którym wcześniej nie posiadamy żadnych informacji, podczas gdy „biała skrzynka” przedstawia układ, o którego działaniu mamy pełną wiedzę. W rzeczywistości wszystkie układy plasują się pomiędzy tymi dwoma skrajnymi podejściami.

Najczęściej preferowane jest wykorzystanie możliwie dużej ilości informacji *a priori*, aby uzyskana prognoza była dokładniejsza. Często informacja posiadana wcześniej o układzie ukazuje nam rodzaj zależności pomiędzy zmiennymi układu. Mamy wówczas matematyczne informacje o działaniu elementów układu, ale nie posiadamy reszty informacji. Taki model nie jest uważany w pełni za „białą skrzynkę”, ponieważ brakujące elementy muszą zostać oszacowane. Inną podstawową sprawą jest jego złożoność. Idealny model powinien składać się z jak największej liczby elementów, dzięki czemu nawet najmniejszy element układu byłby brany pod uwagę. Jednak koszt obliczeniowy dodania tylu drobnych szczegółów praktycznie uniemożliwiłby korzystanie z takiego modelowania. Wynika stąd, że celowe jest wprowadzanie pewnych przybliżeń i uproszczeń, aby utrzymać stopień złożoności modelu na rozsądnym poziomie (Kleijnen 1995a i b).

Ważną częścią procesu modelowania jest ocena wykonanego modelu, czyli określenie czy dobrze opisuje on rzeczywisty układ. Zazwyczaj badacze posiadają zbiór pomiarów wielkości w układzie, zastosowany przy konstruowaniu modelu i gdy jest on prawidłowo zbudowany, wykazuje zależności odpowiednie dla znanego zestawu pomiarów. Należy wtedy określić, czy użyty zestaw pomiarów jest reprezentatywny dla wszystkich możliwych sytuacji. Często spotykanym podejściem jest podział posiadanych wyników pomiarów na dwie grupy: dane treningowe i dane do weryfikacji modelu. Danych treningowych używamy do zbudowania modelu i wyznaczenia jego parametrów. Pozostałe dane są stosowane do oszacowania zgodności modelu z rzeczywistością. Zakładając, że dane treningowe i dane do weryfikacji były różne, a model jest zgodny z nimi wszystkimi, możemy uznać, że model będzie dobrze opisywał rzeczywistość (Kleijnen 1995 a i b). Innym podejściem jest zastosowanie danych treningowych i danych do weryfikacji przy użyciu odpowiednich technik statystycznych, np. crossing-over (Wallach 2006). Ten sposób wykorzystania informacji jest dużo bardziej efektywny, gdyż nie tracimy wartościowych danych.

Specyficznym podejściem do modelowania matematycznego jest prognozowanie procesu chorobowego. Choroby roślin są wynikiem interakcji trzech elementów układu: patogen, gospodarz oraz środowisko. Interakcje te są często ilustrowane graficznie przez trójkąt chorobowy (rys. 1).



Rys. 1. Schemat trójkąta chorobowego — *Disease triangle* (Stevens 1960)

Jeżeli któregośkolwiek z wierzchołków trójkąta brakuje, to proces chorobowy nie może wystąpić (Lucas 1998). Przykładowo, gdy zabraknie czynnika chorobotwórczego, gospodarz jest odporny lub gdy pogoda jest niekorzystna dla rozwoju patogena, choroba nie występuje. Ta sama koncepcja może być wyrażona jako funkcja:

$$\text{Choroba} = F(\text{Patogen}, \text{Gospodarz}, \text{Środowisko})$$

Trójkąt chorobowy oraz funkcję choroby można traktować jako modele koncepcyjne epidemii choroby. Takie przedstawienie procesu umożliwia proste odzwierciedlenie interakcji różnych elementów prowadzących do powstania procesu chorobowego. Należy zaznaczyć, że epidemia jest to pojawienie się choroby w dużym nasileniu, w określonym miejscu i czasie. Pierwszy, konceptualny model może zawierać każdy proces zaistniały podczas rozwoju choroby i wpływ warun-

ków środowiskowych na każdy z etapów (Francel 2001). W trakcie prac następuje uproszczenie modelu i pozostawienie tylko tych elementów, które są niezbędne do prawidłowej prognozy.

### **Modele matematyczne wykorzystywane do prognozowania zasięgu przenoszenia zarodników**

---

Zarówno nasiona roślin, jak też różne mikroorganizmy mogą być przenoszone z prądami powietrza na różne odległości (Knudsen 1989, Tackenberg 2003, Kuparinen i in. 2009). Transport za pośrednictwem powietrza umożliwia także nawiązanie interakcji pomiędzy organizmami, które dotychczas były odseparowane pod względem geograficznym (Bohrer i in. 2005, Nathan i in. 2005). Z kolei przenoszenie zarodników grzybów chorobotwórczych za pośrednictwem powietrza odgrywa istotną rolę w rozszerzaniu terytorium występowania danej choroby. Zasięg przenoszenia zarodników z prądami powietrza w dużej mierze zależy od nasilenia porywów wiatru oraz temperatury powietrza w czasie uwalniania zarodników (Kuparinen i in. 2007). W najnowszych badaniach wykazano, iż większe prawdopodobieństwo przeniesienia na dużą odległość mają zarodniki uwalniane w cieplejsze dni lub pory dnia (Savage i in. 2011). Przyczyną takiego stanu rzeczy są prądy wznoszące, zdecydowanie wyższe podczas występowania wyższych temperatur (Hurley i in. 2005). W badaniach nad wpływem parametrów meteorologicznych na zasięg transportu zarodników grzybów chorobotwórczych wykorzystano modelowanie matematyczne z zastosowaniem symulacji stochastycznych. Model stochastyczny, oprócz wpływu poszczególnych zmiennych objaśniających, bada również wpływ zakłóceń losowych, których nie można traktować jako przyczyn głównych. W przypadku modeli stochastycznych poszczególne elementy czy parametry pobierane są z rachunku prawdopodobieństwa. W badaniach transportu zarodników zastosowano metodę mnożników Lagrange'a, pozwalających na obliczenie ekstremalnych wartości funkcji opisujących zasięg transportu zarodników (Savage i in. 2011).

### **Modele matematyczne wykorzystywane do ochrony rzepaku**

---

Rozwój niemal wszystkich patogenów roślinnych zależy od warunków środowiskowych w czasie uprawy roślin. Najważniejsze zmienne środowiskowe wykorzystywane w modelowaniu to temperatura i wilgotność, a następnie opady deszczu i wiatr. Temperatura jest ważnym czynnikiem, ponieważ określa tempo wzrostu oraz okresy rozprzestrzeniania się patogenów roślinnych. Podziały komórkowe u bakterii, szybkość rozwoju grzybnii i zarodników grzybów są silnie

uzależnione od temperatury otoczenia. Dla wszystkich patogenów roślinnych można określić optymalny zakres temperatur, w których rosną i rozmnażają się najlepiej. W temperaturach powyżej i poniżej tej wartości optymalnej, ich wzrost i rozmnażanie zachodzą wolniej; może też dojść do całkowitego zahamowania wzrostu i rozwoju lub do unicestwienia patogena (Lucas 1998).

Przykładem modelu opartego na powyższych tezach jest część systemu wspierającego podejmowanie decyzji w dziedzinie ochrony rzepaku ozimego przed szkodnikami o nazwie PRO\_PLANT (Johnen i Meier 2000). Moduł służący do zwalczania szkodników rzepaku ozimego opracowano na podstawie doświadczeń nad wpływem warunków meteorologicznych, wykonanych w różnych rejonach Niemiec. Model dotyczy rozwoju takich szkodników jak: pchełka rzepakowa (*Psylliodes chrysocephala* L.), słodyszek rzepakowiec (*Meligethes aeneus* F.), chowacz podobnik (*Ceutorhynchus assimilis* Payk.), chowacz brukwiaczek (*Ceutorhynchus napi* Gyll.), chowacz czterozębny (*Ceutorhynchus quadridens* Panz.), przyszczarek kapustnik (*Dasineura brassicae* Winn.). Optymalne terminy zwalczania wymienionych szkodników wyznaczone w systemie PRO\_PLANT zależą od warunków meteorologicznych, fazy rozwojowej rośliny i wyników oceny zagęszczenia populacji szkodników. Innym przykładem systemu wspierającego podejmowanie decyzji w dziedzinie zwalczania szkodników rzepaku jest system o akronimie DORIS (Decision Oilseed Rape Insects pestS) — pomocny przy podejmowaniu decyzji odnośnie zwalczania następujących szkodników: pchełka rzepakowa (*Psylliodes chrysocephala* L.), słodyszek rzepakowiec (*Meligethes aeneus* F.), chowacz podobnik (*Ceutorhynchus assimilis* Payk.), przyszczarek kapustnik (*Dasineura brassicae* Winn.), mszyca kapuściana (*Brevicoryne brassicae* L.). W ramach projektu PASSWORD (Pest and diseases mAnagement System for Supporting Oilseed Rape) opracowano system obejmujący, oprócz szkodników uwzględnionych w systemie DORIS, również choroby grzybowe rzepaku ozimego (Wójtowicz i Wójtowicz 2003). Gatunki *Leptosphaeria maculans* oraz *Pyrenopeziza brassicae* Sutton et Rawlison — najgroźniejsze patogeny rzepaku ozimego w Wielkiej Brytanii — zostały wzięte pod uwagę jako podstawowe elementy systemu. Oba patogeny są obiektem szczegółowych badań nad wpływem warunków meteorologicznych na ich rozwój (Papastamati i in. 2002, Gilles i in. 2000, 2001, Evans i in. 1999, Souter i in. 1999). Na stronach internetowych: <http://www3.res.bbsrc.ac.uk/leafspot> oraz <http://www3.res.bbsrc.ac.uk/ppi/phoma> można znaleźć informacje na temat prognoz występowania cylindrosporiozy oraz suchej zgnilizny kapustnych rzepaku. W przypadku tej drugiej choroby model matematyczny szacuje odsetek roślin porażonych przez *L. maculans*. Prognoza uzależniona jest od liczby porażonych łuszczyń w roku poprzedzającym postawienie prognozy, temperatury powietrza zarejestrowanej w miesiącach letnich oraz liczby zimowych dni z opadami powyżej średniej wieloletniej charakterystycznej dla danego regionu.

Przykładem modelu prognozującego rozwój choroby rzepaku jest opracowany w Niemczech ScleroPro, który znajduje zastosowanie przy wyznaczaniu optymalnych terminów zwalczania grzyba *Sclerotinia sclerotiorum*, sprawcy zgnilizny twardej (Jörg i in. 2006). ScleroPro określa potrzebę podjęcia chemicznej ochrony rzepaku na podstawie liczby godzin, w których warunki meteorologiczne sprzyjają infekcji roślin przez *S. sclerotiorum*, uwzględniając temperaturę, wilgotność względną powietrza oraz opady.

Modelowanie matematyczne nie zawsze służy jedynie analizie procesu rozwoju patogenów i porażania przez nie roślin. Część opracowań zawiera więcej danych, np. chiński system IDSSRP (Intelligent Decision Support System for Rapeseed Production) (Liao i in. 2007) ułatwia podejmowanie decyzji zarówno w systemie uprawy polegającym na przesadzaniu sadzonek z rozsadnika na pole produkcyjne, jak i na siewie bezpośrednim. System ten wyznacza optymalne terminy siewu, normę wysiewu i dawki nawozów. Zawiera modele do przeciwdziałania chorobom i szkodnikom oraz ułatwia podejmowanie decyzji w przypadku niedoboru składników pokarmowych. Ponadto umożliwia przewidywanie plonów i oblicza opłacalność produkcji (Liao i in. 2007, Wójtowicz 2007).

Modelem odnoszącym się do kompleksu grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa*, a dotyczącym bardziej skutków choroby niż cyklu życiowego patogenów, jest system opisany przez Evans'a i in. w 2008 roku. Model ten składa się z trzech elementów. Pierwszą częścią modelu jest prognoza daty występowania objawów choroby na 10% roślin ( $DI_p$ ). Niniejszy parametr jest oznaczany na podstawie warunków meteorologicznych panujących latem oraz jesienią. W kroku drugim przewidywana jest data wystąpienia objawów choroby na 10% łodyg ( $Dc_p$ ). Drugi parametr jest obliczany na podstawie daty pojawienia się objawów chorobowych na liściach ( $DI_p$ ) oraz wartości stopnio-dni ( $^{\circ}C$  degree-days) wpływających na szybkość wzrostu grzybów wewnątrz roślin rzepaku (Sun i in. 2000). Krok trzeci to prognoza wzrostu objawów porażenia suchą zgnilizną kapustnych ( $Sc$ ) do dnia żniw ( $Sc$ , skala porażenia 0–4). Etap ten obliczono na podstawie daty pojawienia się objawów chorobowych na łodygach ( $Dc_p$ ) oraz skumulowanych dni termalnych ( $^{\circ}C$ -days) wpływających na rozwój patogena w łodydze rośliny.

## **Modele matematyczne prognozujące suchą zgniliznę kapustnych**

---

Pierwszym kompleksowym modelem opisującym cykl życiowy grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* był Blackleg Sporacle, który został opracowany dla warunków klimatycznych Zachodniej Australii (Salam i in. 2003). W modelu tym wszystkie dni po żniwach rzepaku są objęte klasyfikacją jako dni sprzyjające bądź niesprzyjające dojrzewaniu pseudotecjów, a następnie uwalnianiu askospor. Uznanie danego dnia jako sprzyjającego dojrzewaniu owocników jest uzależnione od

warunków pogodowych. Dane literaturowe wskazują, że do najważniejszych czynników zalicza się wilgotność i temperaturę, pomijając wilgotność względną i inne dane pogodowe (Xu i in. 1987, Toscano-Underwood i in. 2003). W modelu Blackleg Sporacle przyjęto, że każdy kolejny dzień po zbiorach jest klasyfikowany jako sprzyjający dojrzewaniu pseudotecjów (day Favorable for Pseudothecia Maturity — FPM), jeżeli średnia dzienna temperatura w ciągu poprzedzających go dziesięciu dni jest mniejsza niż wartość progowa ( $T_{\text{threshold}}$ ) i jeżeli sumaryczne opady ostatnich siedmiu dni są większe lub równe wartości progowej ( $R_{\text{threshold}}$ ). Dla dojrzewania owocników stadium workowego niezbędne jest zachowanie ciągłości dni FPM. Data, kiedy osiągnięta jest odpowiednia liczba dni FPM używana jest jako wskaźnik początku dojrzałości pseudotecjów ( $PM_{\text{begin}}$ ). Przewidywane uwalnianie zarodników ma miejsce, gdy pseudotecja są już dojrzałe, a opady przekraczają pewien próg ( $RAD_{\text{threshold}}$  — Amount of Daily Rainfall threshold). Dla modelu Blackleg Sporacle ustalono następujące warunki:  $T_{\text{threshold}}$ : 22°C,  $R_{\text{threshold}}$ : 4 mm,  $PM_{\text{begin}}$ : 43 dni,  $RAD_{\text{threshold}}$ : 0,20 mm. Model ten funkcjonuje w warunkach australijskich i jest uważany za skuteczny w prognozowaniu dojrzewania pseudotecjów (Salam i in. 2003).

Bezpośrednie przeniesienie modelu Blackleg Sporacle na grunt europejski i kanadyjski nie jest możliwe bez dokonania poprawek. W swojej najnowszej pracy (Salam i in. 2007) autorzy proponują dodanie jeszcze jednej zmiennej  $T_{\text{threshold-low}}$ , która jest niezbędna dla zobrazowania wpływu niskich temperatur na dojrzewanie pseudotecjów. Ze względu na brak niskich temperatur, które mogą doprowadzić do obumierania owocników, wskaźnik ten nie był użyteczny w Australii, natomiast okazał się konieczny przy tworzeniu modelu dla Wielkiej Brytanii, Francji, Kanady i Polski (West i in. 2004). Po wprowadzeniu tego parametru model nazwany Improved Blackleg Sporacle sprawdził się dobrze we wszystkich krajach poza Polską (Salam i in. 2007).

W modelowaniu matematycznym ważne jest oznaczenie możliwości porażania roślin rzepaku ozimego przez askospory nie tylko w okresie jesiennym, ale także na wiosnę po ruszeniu wegetacji. Na tym etapie badań niezbędne stało się oznaczenie wpływu mrozu na przeżywalność i funkcjonalność owocników. Badania nad zdolnością pseudotecjów do uwalniania zarodników, po poddaniu ich długotrwałemu działaniu ujemnych temperatur wykazały bardzo duży wpływ mrozu na przebieg cyklu życiowego grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* (Dawidziuk 2011). Udowodniono, że mróz uszkadza mechanizm uwalniania zarodników z owocników stadium workowego. Przykładowo 3-tygodniowa ekspozycja słomy rzepakowej na -20°C powodowała redukcję liczby funkcjonalnych pseudotecjów mających zdolność do uwalniania askospor o 15%, a w kolejnym tygodniu już prawie do połowy. Było to pierwsze tego typu doniesienie, gdyż wcześniejsze badania dotyczyły jedynie negatywnego wpływu mrozu na powstawanie nowych pseudotecjów gatunku *L. maculans* (Petrie 1994). Na podstawie doświadczeń nad wpływem ujemnych

temperatur na pseudotecja klasy D, tzn. owocniki zawierające w pełni dojrzałe askosporo zdolne do porażania roślin, Dawidziuk (2011) opracował równanie regresji umożliwiające obliczenie wpływu mrozu w okresie zimowym, liczonym od początku grudnia do końca marca, na przeżywalność funkcjonalnych pseudotecjów. Równanie to pozwala na obliczenie jaka część owocników jest nadal zdolna do uwalniania zarodników infekujących rośliny rzepaku w okresie wczesnowiosennym.

Kolejnym modelem, który przetestowano w krajach zachodniej i centralnej Europy oraz w Kanadzie był model *SporacleEzy* (Salam i in. 2007). Jest to uproszczona wersja *Improved Blackleg Sporacle*. W modelu tym początek uwalniania askospor to data, kiedy dni FPM osiągną wartość SAR-on (onset of Seasonal Ascospore Release). W modelu tym dzień FPM oznaczony jest liczbą 0 albo 1. FPM osiąga wartość 1, kiedy dzienne opady są większe lub równe progowi opadów (Rain\_threshold), a przeciętna temperatura dzienna jest niższa niż górny próg temperaturowy (T-upper-threshold) i wyższa lub równa jak dolny próg temperaturowy (T-lower-threshold). Model ten jest mniej złożony od poprzedniego, ponieważ są w nim tylko cztery parametry, czyli o dwa mniej niż w *Improved Blackleg Sporacle*. Nie ma w nim parametrów związanych z liczbą dni przekraczających górny i dolny próg temperaturowy (T\_threshold\_duration oraz R\_threshold\_duration). Model *SporacleEzy* działa poprawnie we wszystkich krajach poza Francją, gdzie zanotowano znaczne różnice pomiędzy danymi otrzymanymi z badań empirycznych a wskazaniem modelu *SporacleEzy*. Żaden z powyższych modeli nie był w stanie przewidzieć z wystarczająco dużą dokładnością terminu uwalniania askospor w Polsce, a wskazania modelu były zgodne z rzeczywistością tylko w przypadku niektórych sezonów wegetacyjnych (Salam i in. 2007).

W 2004 roku stworzono nowe narzędzie prognozujące wpływ praktyk rolniczych na rozwój suchej zgnilizny kapustnych i straty plonu, o nazwie *SimCanker* (Aubertot i in. 2004). Narzędzie to składa się z trzech modułów: pierwszy przewiduje straty plonu w zależności od porażenia grzybem *L. maculans*, drugi — nasilenie suchej zgnilizny kapustnych jako funkcji objawów obserwowanych na liściach jesienią, klimatu i rozwoju rośliny, a trzeci przewiduje infekcję liści w zależności od klimatu, zmian stężenia zarodników workowych i szybkości rozwoju roślin. Zmienne wyjściowe prognozowane przez *SimCanker* to objawy wywołane przez suchą zgnilizną kapustnych oraz straty plonu. Zmienne wejściowe zebrano w trzy grupy: zmienne opisujące pierwotne inokulum (tzn. stężenie askospor w powietrzu), klimat (średnia dzienna temperatura i suma opadów deszczu) i praktyki rolnicze: termin siewu, zagęszczenie roślin, gospodarka azotem w uprawie, podatność odmian na chorobę i stosowanie fungicydów. Liczba askospor rozwijających się na liściach zależy od ich stężenia w powietrzu oraz od powierzchni liści. Stężenie zarodników workowych w powietrzu zależy nie tylko od klimatu, ale także od rozmieszczenia porażonych resztek rzepaku na polach uprawnych (Salam i in. 2003). Kiełkowanie zarodników, a następnie porażenie liści, jest uzależnione



także od temperatury i wilgotności, fazy rozwojowej rośliny, wrażliwości odmiany i zastosowania środka grzybobójczego. Infekcje prowadzą do wtórnego porażenia przez piknidiospory i do rozwoju suchej zgnilizny kapustnych, uzależnionego od typu odmiany i etapu rozwojowego rośliny, na której wystąpiło zakażenie (McGee i Petrie 1978, Hammond i Lewis 1987). Ostatnia część wyżej wymienionego modelu nie została opracowana.

Model SimCanker został użyty jako część symulatora zintegrowanego zarządzania populacją patogenów wywołujących suchą zgniliznę kapustnych w rzepaku SIPPOM-WOSR (Lô-Pelzer i in. 2010). Poprzez powiązanie modułów — epidemiologicznego, populacyjnego i hodowlanego — prognozuje zmiany ilościowe i jakościowe w strukturze gatunku *L. maculans* w różnych systemach uprawy. Obejmuje on pięć podmodeli: (a) tworzenie się inokulum pierwotnego, (b) rozprzestrzenianie zarodników workowych, (c) uprawa roślin, (d) nasilenie objawów choroby u roślin i straty plonu oraz (e) zmiany struktury genetycznej populacji patogenów w czasie. Zmiennymi wejściowymi są dane pogodowe, właściwości gleby, opis technologii uprawy (płodozmian, używane odmiany, termin siewu, zastosowane preparaty fungicydowe) oraz początkowy rozmiar i struktura genetyczna populacji patogenów. Model ten prognozuje porażenie roślin rzepaku przez grzyb *L. maculans* oraz strukturę genetyczną populacji patogenów, w uzupełnieniu o straty plonu spowodowane przez chorobę.

Modelem prognozującym cykl życiowy grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* był także SimMat. Moduł ten prognozował szybkość dojrzewania pseudotecjów grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* w warunkach klimatycznych Polski i Francji. Model SimMat zawierał pięć następujących parametrów: liczba dni sprzyjających dojrzewaniu pseudotecjów ( $N_{FD}$ ), odchylenie standardowe od liczby dni sprzyjających dojrzewaniu pseudotecjów ( $\sigma_{FD}$ ), temperatura progowa ( $T_{max}$ ), opady progowe ( $r_{min}$ ) oraz skumulowana liczba dni z opadami powyżej wartości progowej ( $n_r$ ) (Aubertot i in. 2006). Model zawierał trzy zmienne wejściowe: przeciętny termin żniw, średnią temperaturę dzienną i sumaryczny dzienny opad deszczu. Początkowo model ten testowano stosując wartości parametrów ustalonych dla warunków australijskich (Blackleg Sporacle) stosując dodatkowo odchylenie standardowe, przy którym 95% pseudotecjów osiągnie dojrzałość po upływie liczby dni zdefiniowanych przez model Blackleg Sporacle ( $\pm 10$  dni). Zgodnie z przewidywaniami warunki ustalone dla Australii nie były właściwe dla prawidłowego prognozowania terminu dojrzewania pseudotecjów w Polsce. Następną parametryzacja w warunkach polskich nie przyniosła zamierzonego efektu, a zatem zaistniała potrzeba przebudowania lub całkowitej zmiany modelu, specjalnie dla warunków klimatycznych panujących w Polsce. Ponadto zaistniała potrzeba opracowania modułu prognozowania terminu uwalniania zarodników workowych. Niezbędne stało się także uwzględnienie zmienności genetycznej patogenów w Polsce, gdyż wszystkie pozostałe systemy były opracowywane w krajach z wyraźnie dominującym gatunkiem *L. maculans*.

Konsekwentną kontynuacją poprzedniego projektu było opracowanie kompleksowego modelu (SimAsco) prognozującego dojrzewanie owocników i uwalnianie zarodników workowych grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa*, powodujących suchą zgniliznę kapustnych na rzepaku ozimym tylko dla specyficznych warunków klimatycznych panujących w Polsce (Dawidziuk 2011). W opracowaniu uwzględniono zarówno procesy biologiczne związane z uzyskiwaniem poszczególnych stadiów cyklu rozwojowego grzybów, jak też strukturę populacji tych patogenów w poszczególnych regionach klimatycznych kraju. Do opracowania modelu matematycznego wykorzystano dane na temat szybkości dojrzewania owocników oraz terminów uwalniania zarodników workowych grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* w latach od 1998 do 2008. Badania obejmowały łącznie 153 punkty pomiarowe przyporządkowane do różnych regionów klimatycznych. Dane meteorologiczne uzyskiwano ze stacji meteorologicznych umieszczonych średnio w odległości 11,1 km od punktów obserwacyjnych uwalniania zarodników oraz dojrzewania owocników grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa*. Łącznie, baza danych zastosowana do analiz zawierała ponad 100 tys. wpisów na temat szybkości dojrzewania owocników, prawie 5 tys. rekordów dotyczących stężenia zarodników w powietrzu oraz 30 tys. wpisów z danymi meteorologicznymi odnoszącymi się do punktów badawczych (tab. 1).

Model SimAsco składa się z dwóch modułów. Pierwszy z nich dotyczy szybkości dojrzewania pseudotecjów i zakłada, że dzień sprzyja dojrzewaniu owocników, jeśli średnia dzienna temperatura nie przekracza wartości krytycznej, a powierzchnia gleby jest wystarczająco wilgotna. Następnie założono, że dojrzewanie pseudotecjów zależy od sumy dni sprzyjających dojrzewaniu owocników po zbiorach, a ich suma potrzebna do uzyskania stadium dojrzałości ma rozkład krzywej Gaussa. Drugi moduł modelu SimAsco dotyczy prognozowania terminu uwalniania zarodników workowych grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa*. Wykonuje on obliczenia w oparciu o przewidywaną dynamikę rozwoju owocników oraz bierze pod uwagę dzienną sumę opadów. Moduł ten wylicza prawdopodobieństwo występowania pustych pseudotecjów jako funkcji opadów. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż współczynnik korelacji Spearmana pomiędzy prognozą terminu pierwszej detekcji zarodników dokonaną za pomocą modelu SimAsco a obserwacją wynosił 0,94 — gdy uwzględniano wyniki uzyskane w poszczególnych miejscowościach w latach 2005–2008 oraz 0,83 — gdy brano pod uwagę wszystkie miejscowości w danym roku badawczym. W przypadku terminu maksymalnego uwalniania zarodników współczynnik ten wynosił 0,65 — gdy uwzględniano poszczególne miejscowości w latach 2005–2008 oraz 0,55 — gdy brano pod uwagę wszystkie miejscowości w danym roku badawczym. Błąd prognozowania w tym modelu wynosił 6–7 dni. Powyższy model skutecznie prognozuje terminy uwalniania zarodników workowych grzybów *L. maculans* i *L. biglobosa* (rys. 2).

Tabela 1

Zawartość bazy danych służących do opracowania kompleksowego modelu SimAsco, prognozującego dojrzewanie owocników i uwalnianie zarodników workowych chorobotwórczych grzybów *Leptosphaeria maculans* i *L. biglobosa* w Polsce — *The content of the database for the development of complex prognostic model SimAsco, for the forecasting of pseudothecia maturation and ascospore release of pathogenic fungi Leptosphaeria maculans and L. biglobosa in Poland*

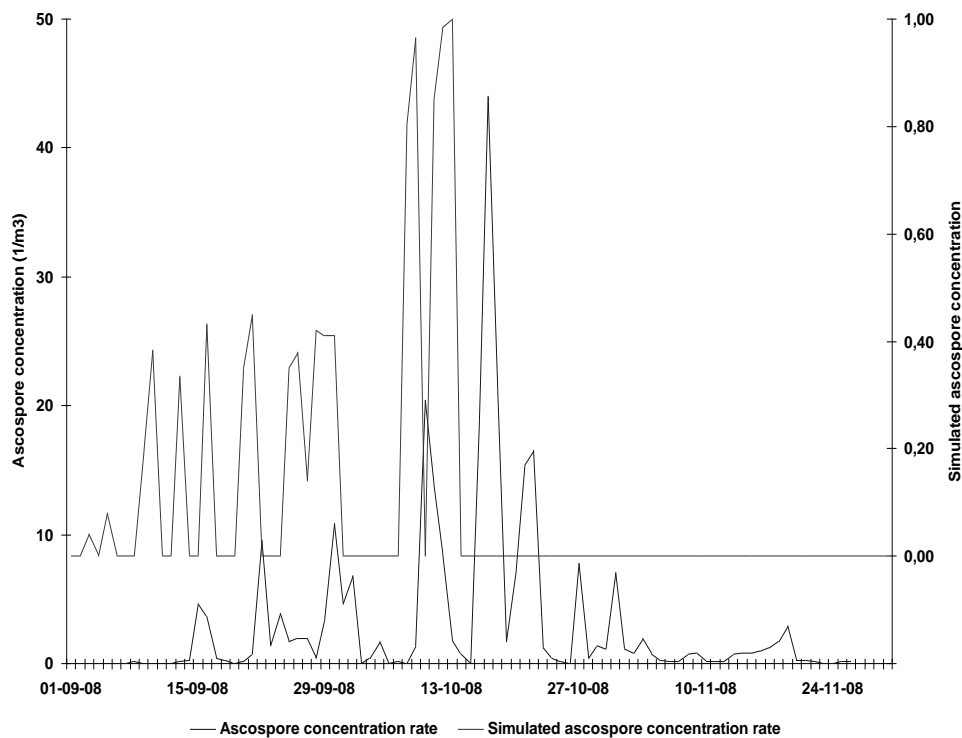
Rok Year	Liczba stanowisk pomiarowych Number of measurement sites			Źródło danych (nazwa projektu badawczego) Source of data (name of the research project)
	dojrzałość owocników maturity of fruiting bodies	stężenie askospor ascospore concentration	opady i temperatura rainfall and temperature	
1998	1	1	1	IMASCORE
1999	1	1	1	
2000	1	1	1	
2001	1	1	1	
2004	5	5	5	SECURE, SPEC
2005	44	10	44	SPEC
2006	45	10	45	
2007	45	10	45	
2008	10	10	10	

IMASCORE (Integrated strategies for the management of stem canker in Europe) — EU funded project

SECURE (Stem canker of oilseed rape: molecular tools and mathematical modelling to deploy durable resistance) — EU funded project

SPEC (System Prognozowania Epidemii Chorób) — national project

Opisany model matematyczny służy jako uzupełnienie systemu wspierającego decyzję rolników w podejmowaniu decyzji o zastosowaniu fungicydów (SPEC, [www.spec.edu.pl](http://www.spec.edu.pl)) i jest przykładem zastosowania aparatu matematycznego do zwiększenia skuteczności ochrony upraw rzepaku w Polsce przed chorobami grzybowymi.



Rys. 2. Przykładowy wynik modelowania matematycznego terminu uwalniania zarodników workowych grzybów *Leptosphaeria maculans* i *L. biglobosa* dla miejscowości Rarwino (Pomorze) w roku 2008, OY1 stężenie askospor ( $1/m^3$ ) — dolna linia, OY2 prognozowane stężenie askospor — górna linia — *Exemplary result of the modeling of Leptosphaeria maculans and L. biglobosa ascospore release dynamics calculated for Rarwino site (Pomerania region, north Poland) in 2008, ascospore concentration OY1 — lower line, OY2 — forecasted ascospore concentration — upper line*

## Literatura

- Aubertot J.N., Pinochet X., Reau R., Doré T. 2004. SimCanker: a simulation model for containing phoma stem canker of oilseed rape through cultural practices. In: Proceeding of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
- Aubertot J.N., Salam M.U., Diggle A.J., Dakowska S., Jedryczka M. 2006. SimMat, a new dynamic module of blackleg sporacle for the prediction of pseudothecial maturation of *L. maculans*/*L. biglobosa* species complex. Parameterisation and evaluation under Polish conditions. Integrated Control in Oilseed Crops. Bulletin IOBC, 29: 277-285.

- Bohrer G., Nathan R., Volis S. 2005. Effects of long distance dispersal for metapopulation survival and genetic structure at ecological time and spatial scales. *J. Ecol.*, 93: 1029-1041.
- Dawidziuk A. 2011. Matematyczny model cyklu rozwojowego oraz molekularna detekcja gatunków *Leptosphaeria maculans* i *L. biglobosa*. Praca doktorska. Instytut Genetyki Roślin PAN, Poznań.
- Evans N., Baier A., Semenov M.A., Gladders P., Fitt B.D.L. 2008. Range and severity of a plant disease increased by global warming. *J.R. Soc. Interface*, 5: 525-531.
- Evans N., Fitt B.D.L., Welham S.J. 1999. Forecasting light leaf spot of winter oilseed rape in the UK. *Phytopathol.*, 89: 24.
- Francel L.J. 2001. The Disease Triangle: A plant pathological paradigm revisited. *The Plant Health Instructor*. DOI: 10.1094/PHI-T-2001-0517-01.
- Gilles T., Evans N., Fitt B.D.L., Jeger M.J. 2000. Epidemiology in relation to methods for forecasting light leaf spot (*Pyrenopeziza brassicae*) severity on winter oilseed rape (*Brassica napus*) in the UK. *Europ. J. Plant Pathol.*, 106: 593-605.
- Gilles T., Fitt B.D.L., Welham S.J., Evans N., Steed J.M., Jeger M.J. 2001. Modelling the effects of temperature and wetness duration on development of light leaf spot on oilseed rape leaves inoculated with *Pyrenopeziza brassicae* conidia. *Plant. Pathol.*, 50: 42-52.
- Hammond K.E., Lewis B.G. 1987. The establishment of systemic infection in leaves of oilseed rape by *Leptosphaeria maculans*. *Plant Pathol.*, 36: 135-147.
- Hurley P.J., Physick W.L., Luhar A.K. 2005. TAPM: A practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling. *Environ Modell Softw.*, 20: 737-752.
- Johnen A., Meier H. 2000. A weather-based decision support system for managing oilseed rape pests. British Crop Protection Council (BCPC) Conference: Pests and Diseases 2000, Brighton, UK: 793-800.
- Jörg E., Wójtowicz A., Roehrig M., Kleinhenz B. 2006. Development and application of Internet-based Decision Support System for Plant Protection in Germany and its use for control of *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary in oilseed rape. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXVII: 64-69.
- Karplus W.J. 1983. The spectrum of mathematical models. *Perspectives in Computing*, 3: 4-13.
- Kleijnen J.P.C. 1995a. Case study: Statistical validation of simulation models. *Eur. J. Oper. Res.*, 87: 21-34.
- Kleijnen J.P.C. 1995b. Verification and validation of simulation models. *Eur. J. Oper. Res.*, 82: 145-162.
- Knudsen G.R. 1989. Model to predict aerial dispersal of bacteria during environmental release. *Appl. Environ. Mikrob.*, 55: 2641-2647.
- Kuparinen A., Katul G., Nathan R., Schurr F. 2009. Increases in air temperature can promote wind-driven dispersal and spread of plants. *Proc. Biol. Sci.*, 276: 3081-3087.
- Kuparinen A., Markkanen T., Riikonen H., Vesala T. 2007. Modeling air-mediated dispersal of spores, pollen and seeds in forested areas. *Ecol. Model.*, 208: 177-188.
- Liao G., Guna C., Chen F. 2007. Intelligent decision support system for rapeseed production: Abstracts of the 12th International Rapeseed Congress, Wuhan.
- Lô-Pelzer E., Bousset L., Jeuffroy M.H., Salam M.U., Pinochet X., Boillot M., Aubertot J.N. 2010. SIPPOM-WOSR: A Simulator for Integrated Pathogen Population Management of phoma stem canker on Winter Oilseed Rape. I. Description of the model. *Field Crop. Res.*, 118: 73-81.
- Lucas J.A. 1998. *Plant Pathology and Plant Pathogens*. Blackwell Science, Cambridge.

- McGee D.C., Petrie G.A. 1978. Variability of *Leptosphaeria maculans* in relation to blackleg of oilseed rape. *Phytopathol.*, 68: 625-630.
- Nathan R., Sapir N., Trakhtenbrot A., Katul G. 2005. Long-distance biological transport processes through the air: Can nature's complexity be unfolded *in silico*. *Divers. Distrib.*, 11: 131-137.
- Papastamati K., van den Bosch F., Welham S.J., Fitt B.D.L., Evans N., Steed J.M. 2002. Modelling the daily progress of light leaf spot epidemics on winter oilseed rape (*Brassica napus*), in relation to *Pyrenopeziza brassicae* inoculum concentrations and weather factors. *Ecol. Model.*, 148: 169-189.
- Petrie G.A., Séguin-Swartz G., Gugel R.K. 1994. Latent infection of *Brassicaceae* in the field by *Leptosphaeria maculans* (blackleg). *Can. J. Plant. Pathol.*, 17: 75-81.
- Salam M.U., Khangura R.K., Diggle A.J., Barbetti M.J. 2003. Blackleg Sporacle: A model for predicting onset of pseudothecia maturity and seasonal ascospore showers in relation to blackleg of canola. *Phytopathol.*, 93: 1073-1081.
- Salam M.U., Fitt B.D.L., Aubertot J.-N., Diggle A.J., Huang Y.J., Barbetti M.J., Gladders P., Jedryczka M., Khangur A.R.K., Wratten N., Fernando W.G.D., Pinochet X., Penaud A., Sivasithamparan K. 2007. Two weather-based models for predicting the onset of seasonal release of ascospores of *Leptosphaeria maculans* or *L. biglobosa*. *Plant Pathol.*, 56: 412-423.
- Savage D., Barbetti M., MacLeod W.J., Salam M.U., Renton M. 2011. Seasonal and diurnal patterns of spore release affect the probability that long-distance wind-assisted dispersal will occur. *Microbial Ecology* (w druku).
- Souter S.D., Castells-Brooke N.I.D., Antoniw J.F., Welham S.J., Fitt B.D.L., Evans N. 1999. Forecasting light leaf spot (*Pyrenopeziza brassicae*) of winter oilseed rape (*Brassica napus*) on the Internet. *Information technology for crop protection. Aspects Appl. Biol.*, 55: 37-42.
- Stevens R.B. 1960. *Plant Pathology, an Advanced Treatise*, Vol. 3. J.G. Horsfall and A.E. Dimond, eds. Academic Press, NY, 357-429.
- Sun P., Fitt B.D.L., Gladders P., Welham S.J. 2000. Relationships between phoma leaf spot and development of stem canker (*Leptosphaeria maculans*) on winter oilseed rape (*Brassica napus*) in southern England. *Ann. Appl. Biol.*, 137: 113-125.
- Tackenberg O. 2003. Modeling long-distance dispersal of plant diaspores by wind. *Ecol. Monogr.*, 73: 173-189.
- Toscano-Underwood C., Huang Y.J., Fitt B.D.L., Hall A.M. 2003. Effects of temperature on maturation of pseudothecia of *Leptosphaeria maculans* and *L. biglobosa* on oilseed rape stem debris. *Plant Pathol.*, 52: 726-36.
- Wallach D., Makowski D., Jones J. 2006. *Working with Dynamic Crop Models – Evaluation, Analysis, Parameterization and Applications*. Elsevier.
- Wójtowicz A., Wójtowicz M. 2003. Zastosowanie systemów wspierających podejmowanie decyzji do optymalizacji ochrony rzepaku ozimego. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXIV: 167-171.
- Wójtowicz M. 2007. Postęp w technologii uprawy rzepaku w różnych rejonach świata. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops*, XXVIII: 272-277.
- Xu X.H., Hill C.B., Williams P.H. 1987. Environmental conditions for the production of pseudothecia of *Leptosphaeria maculans*. *Acta Mycol. Sin.*, 6: 236-41.