

MARTA ALEKSANDROWICZ-TRZCIŃSKA, STANISŁAW DROZDOWSKI

Model klasyfikacyjny prognozowania wystąpienia mikoryzy u jednorocznych siewek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zrębie zupełnym*

Classification model for the prediction of mycorrhiza development of one-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings on clear-cut

ABSTRACT

Aleksandrowicz-Trzcńska M., Drozdowski S. 2012. Model klasyfikacyjny prognozowania wystąpienia mikoryzy u jednorocznych siewek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zrębie zupełnym. Sylwan 156 (12): 883-894.

The aim of this study was to build the models describing the relationships between mycorrhiza development in one-year-old Scots pine seedlings and site preparation method, place of growth of seedlings on the clear-cut area and their biometric parameters. A logistic regression was used to study.

KEY WORDS

logistic regression, natural regeneration, microhabitat, ectomycorrhiza, biometric parameters.

ADDRESSES

Marta Aleksandrowicz-Trzcńska ⁽¹⁾ – e-mail: marta_aleksandrowicz_trzcinska@sggw.pl

Stanisław Drozdowski ⁽²⁾ – e-mail: stanislaw_drozdowski@sggw.pl

⁽¹⁾ Katedra Ochrony Lasu i Ekologii; SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Katedra Hodowli Lasu; SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa

Wstęp

Sposób przygotowania gleby pod odnowienie naturalne może mieć wpływ na wzrost, jakość i stopień zmikoryzowania siewek [Drozdowski 2002; Jones i in. 2003; Andrzejczyk, Augustyniak 2007]. Drzewka rosnące na różnych mikrosiedliskach (bruzda, skiba, pas przygotowany frezem, nieskaryfikowana gleba) czy w różnej odległości od ściany drzewostanu różnią się zarówno wielkością cech biometrycznych, jak i poziomem zmikoryzowania korzeni [Hagerman i in. 1999a, b; Baier i in. 2006]. Dotychczasowe badania prowadzone w odnowieniach naturalnych pokazały pewne zależności występowania mikoryz od mikrosiedliska oraz różnych cech charakteryzujących siewki sosny [Jones i in. 2003].

Do określania związku pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) a zmienną zależną (objaśnianą) służą metody regresji. Regresja logistyczna jest przykładem modelu nieliniowego ze zmienną objaśnianą, która może być typu dychotomicznego (przyjmując wartości 0 lub 1). Zaletą regresji logistycznej jest możliwość wykorzystania zmiennych objaśniających w różnej skali pomiarowej, np. nominalnej, porządkowej lub interwałowej. Do oszacowania parametrów równania regresji logistycznej nie wykorzystuje się metody najmniejszych kwadratów (stosowanej w regresji liniowej). Zamiast niej używa się metody największej wiarygodności,

* Badania zostały sfinansowane przez Rektora SGGW w Warszawie w ramach grantu 504-10-03040016.

która polega na maksymalizacji funkcji wiarygodności. Logarytm naturalny z funkcji wiarygodności pomnożony przez współczynnik -2 jest definiowany jako dewiancja ($DEV = -2 \ln(L)$), która przyjmuje wartości dodatnie i jest tym mniejsza, im lepsze dopasowanie modelu. Nie wszystkie zmienne objaśniające mogą być użyte w modelu regresyjnym ze względu na ich współliniowość. Analizę współliniowości w przypadku regresji logistycznej przeprowadza się analogicznie jak w przypadku regresji liniowej [Menard 1995]. Efekt współliniowości wyraża się przez współczynnik VIF (ang. variance inflation factor), który wskazuje, o ile wariancje współczynników są zawyżone z powodu zależności liniowych w testowanym modelu. VIF dla zmiennej X_i jest definiowany jako: $VIF_i = 1/(1-R_i^2)$, gdzie R_i^2 jest współczynnikiem determinacji dla regresji liniowej i -tej zmiennej z pozostałymi zmiennymi objaśniającymi zawartymi w modelu [Belsley i in. 1980]. Wartości VIF wyższe bądź równe 4 wskazują na obecność problemu współliniowości [Larose 2006]. Niektóre ze zmiennych objaśniających charakteryzują się większą zdolnością predykcyjną od innych. Optymalny podzbiór zmiennych objaśniających jest podzbiorem zawierającym jak najmniejszą liczbę zmiennych niezależnych dobranych tak, aby model charakteryzował się jak największą jakością klasyfikacji. Jedną z metod wyboru optymalnego modelu jest przeszukanie wszystkich możliwych kombinacji zmiennych ($n=2^w$, gdzie w – liczba zmiennych objaśniających, np. dla cech biometrycznych siewek w naszych badaniach $n=256$). W celu ograniczenia pracochłonności w doborze optymalnego podzbioru zmiennych można wykorzystać algorytm heurystyczny, który jest metodą twórczego rozwiązywania problemów logicznych i matematycznych przez eksperyment, metodą prób i błędów bądź odwołanie się do analogii [Rutkowski 2006]. Do oceny jakości równania logistycznego jest używany iloraz szans (OR). Jest to liczba, która informuje, ile razy zwiększa się szansa poprawnego zaliczenia spostrzeżenia (np. siewki) do właściwej grupy (np. z mikoryzą lub bez) przy zastosowywaniu modelu w stosunku do szansy zakwalifikowania losowego.

Celem pracy było opracowanie modeli opisujących zależność wystąpienia mikoryz od mikrosiedliska i cech charakteryzujących siewki sosny, jak również ich objaśnienie.

Materiały i metody

Materiał empiryczny do analiz i opracowania modelu stanowiły jednoroczne siewki sosny, pochodzące z czterech zrębów zupełnych w Nadleśnictwie Ostrów Mazowiecka (RDLP Warszawa). Zręby znajdowały się na siedlisku BMśw. Każdy z nich podzielono na trzy działki, różniące się sposobem przygotowania gleby. Przygotowanie gleby trzema narzędziami (pług leśny dwuodkładnicowy LPz 75, pług aktywny jednotalerzowy U-162 i frez leśny FAO-FAR FV 4088) pozwoliło uzyskać sześć mikrosiedlisk (MS): bruzdy wykonane pługiem leśnym (LPzb), skiby odłożone pługiem leśnym (LPzs), bruzdy wykonane pługiem aktywnym (PAb), skiby wykonane pługiem aktywnym (PAs), pasy wykonane frezem (Fp) i nienaruszona gleba między pasami (Fpp). Różniły się one warunkami troficznymi, wilgotnością, dostępnością inokulum i obecnością polifenoli. Mikrosiedliskom nadano rangi w skali porządkowej: 1 – LPzb, 2 – PAb, 3 – Fp, 4 – Fpp, 5 – PAs, 6 – LPAs. Przyjęto, że im wyższa ranga, tym większa zasobność i dostępność biogenów [Lunmark-Thelin, Johansson 1997; Malik, Hu 1997; Andrzejczyk 2000; Andrzejczyk, Drozdowski 2003].

Do pomiarów pobrano łącznie 384 siewki ze skraju zrębu – do 5 m od ściany drzewostanu (SK) i ze środka zrębu – 25-30 m od ściany drzewostanu (SR). Dla każdej siewki określono cechy biometryczne i jakościowe: grubość w szyjce korzeniowej (PG), długość pędu (PD), suchą masę części nadziemnej (PSM), suchą masę korzeni (SMK), liczbę pędów bocznych (PB), długość korzeni (DK), wskaźnik rozgałęzienia – liczba korzeni krótkich z mikoryzą lub bez przy-

padająca na 1 cm długości korzenia (WR) oraz obecność pączka szczytowego (PS). Poziom zmikoryzowania korzeni określono na podstawie próby. Dla każdej siewki liczono i analizowano 100 korzeni krótkich. Wierzchołki mikoryzowe identyfikowano na podstawie braku włóśników, obecności mufki grzybniowej, występowania strzępek i sznurów grzybniowych, hipertrofii korzeni oraz przekształcenia ich w charakterystyczne formy mikoryzowe. Na podstawie ostatnich cechy do analiz przyjęto następujący podział: mikoryzy pojedyncze (M1), dychotomiczne (M2) oraz wielokrotnie dychotomiczne i koralowate (M3).

Do zbadania zależności między wystąpieniem mikoryzy u rocznych siewek sosny a sposobem przygotowania gleby, miejscem wzrostu siewki na zrębie oraz jej cechami biometrycznymi wykorzystano regresję logistyczną. Do wyszukiwania optymalnego modelu w niniejszych analizach wykorzystano jedną z często stosowanych heurystyk, tj. metodę eliminacji wstecznej, której zaletą jest pełny wgląd we wszystkie zmienne objaśniające. Proces eliminacji wstecznej zaczyna się od pełnego modelu, po czym kolejno usuwane są te zmienne, których brak prowadzi do najmniejszego możliwego wzrostu dewiancji (oznacza to usuwanie zmiennych nieistotnych statystycznie). Procedurę powtarza się do momentu uzyskania optymalnego modelu, który różni się istotnie od poprzedniego przy założonym poziomie istotności (różnica dewiancji obydwu modeli ma rozkład χ^2 , o 1 stopniu swobody, w analizach założono poziom istotności $\alpha=0,05$). Do oceny jakości równania logistycznego użyto ilorazu szans. Dla zmiennych objaśniających jakościowych jego wartość określono przez porównanie do wariantu referencyjnego, tj. szansy wystąpienia mikoryzy u siewek w wariantcie przygotowania gleby LPzs, a w przypadku położenia na zrębie w odniesieniu do szansy wystąpienia mikoryzy u siewek na środku zrębu.

Wyniki

ANALIZA WSPÓLLINIOWOŚCI ZMIENNYCH OBJAŚNIAJĄCYCH. W tabeli 1 przedstawiono wartości współczynnika *VIF* dla wszystkich zmiennych objaśniających, które wskazują, o ile wariancja szacowanego współczynnika regresji jest podwyższona z powodu współliniowości (wielowspółliniowości) danej zmiennej niezależnej z pozostałymi zmiennymi niezależnymi. Dla suchej masy korzeni (SMK) i suchej masy części nadziemnej (PSM) przekroczona jest wartość krytyczna współczynnika *VIF*. W praktyce oznacza to konieczność usunięcia z analiz jednej z pary zmiennych silnie skorelowanych. W tym przypadku usunięto zmienną SMK, a w następnej analizie, gdzie była silna współzależność liniowa pomiędzy grubością w szyi korzeniowej (PG) i suchą masą części nadziemnej (PSM), usunięto PG. Ostatecznie do predykcji wystąpienia mikoryzy u rocznych siewek sosny na zrębie pełnym wykorzystano 6 zmiennych objaśniających, dla których współczynnik *VIF* nie przekroczył wartości krytycznej.

WPLYW MIKROSIEDLISKA I MIEJSCA WZROSTU NA ZRĘBIE NA SYMBIOZĘ Z GRZYBAMI MIKORYZOWYMI. Wystąpienie mikoryzy u rocznych siewek zależało istotnie od mikrosiedliska (całkowita strata =73,56; $\chi^2=37,79$; $P<0,001$). Iloraz szans wystąpienia mikoryzy wzrastał wielokrotnie wraz ze

Tabela 1.

Wartości współczynników *VIF* dla zmiennych objaśniających
VIF values for descriptors

	PG	PD	PSM	SMK	PB	WR	DK	PS
<i>VIF</i>	3,759	1,953	5,714	6,024	1,704	1,085	2,915	1,550
<i>VIF</i> bez SMK i PG	–	1,842	3,175	–	1,684	1,036	1,639	1,082

PG – grubość w szyjce korzeniowej; PD – długość pędu; PSM – sucha masa części nadziemnej; SMK – sucha masa korzeni; PB – liczba pędów bocznych; WR – wskaźnik rozgałęzienia; DK – długość korzeni; PS – obecność pączka szczytowego

PG – root collar diameter; PD – shoot length; PSM – aboveground dry biomass; SMK – belowground dry biomass; PB – number of side shoots; WR – branching index; DK – roots length; PS – top bud presence

zmniejszaniem się zasobności i dostępności biogenów w glebie (tab. 2). Równanie opisujące wpływ mikrosiedliska na wystąpienie mikoryz w postaci logitowej przyjęło postać: $\text{Logit } Y = 7,253 - 1,009MS$. Ujemna wartość współczynnika przy zmiennej MS oznacza zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryz wraz z zwiększaniem się wartości rangi nadanej mikrosiedlisku, czyli wraz ze zwiększaniem się zawartości i dostępności substancji mineralnych w przygotowanym podłożu. Podobnie kształtowały się zależności w przypadku analizowanych morfotypów mikoryz: (M1: całkowita strata = 82,73; $\chi^2 = 35,08$; $P < 0,001$; $\text{Logit } Y = 6,370 - 0,865MS$; M2: całkowita strata = 127,27; $\chi^2 = 38,67$; $P < 0,001$; $\text{Logit } Y = 4,572 - 0,639MS$; M3: całkowita strata = 225,87; $\chi^2 = 26,82$; $P < 0,001$; $\text{Logit } Y = 2,051 - 0,346MS$). W każdym przypadku prawdopodobieństwo wystąpienia mikoryzy u rocznych siewek sosny zwyczajnej na zrębie malało wraz ze wzrostem zawartości i dostępności substancji mineralnych w glebie. Wystąpienie mikoryz nie zależało istotnie od miejsca wzrostu siewki na zrębie (całkowita strata = 91,92; $\chi^2 = 1,07$; $P = 0,304$). Brak zależności wystąpił również w przypadku poszczególnych morfotypów mikoryz (M1: całkowita strata = 99,96; $\chi^2 = 0,61$; $P = 0,434$; M2: całkowita strata = 146,32; $\chi^2 = 0,58$; $P = 0,445$; M3: całkowita strata = 239,22; $\chi^2 = 0,11$; $P = 0,742$). Szansa wystąpienia mikoryz poszczególnych morfotypów u rocznych siewek sosny jest nieznacznie wyższa przy ścianie lasu niż na środku zrębu (tab. 2).

WPLYW SYMBIOZY MIKORYZOWEJ NA CECHY BIOMETRYCZNE SIEWEK SOSNOWYCH. Wstępna analiza danych wykonanych testem nieparametrycznym U (test Shapiro-Wilka odrzucił hipotezę zerową mówiącą, że próbki pochodzą z populacji o rozkładzie normalnym dla wszystkich zmiennych z prawdopodobieństwem $P < 0,001$) pokazuje, że siewki sosny żyjące w symbiozie z grzybami różnią się od siewek bez mikoryz pod względem: grubości w szyi korzeniowej, suchej masy części nadziemnej, suchej masy korzeni i wskaźnika rozgałęzienia (tab. 3).

MODEL PREDYKCJI WYSTĄPIENIA MIKORYZ U ROCZNYCH SIEWEK SOSNY. Pełny model, opisujący wystąpienie mikoryz u rocznych siewek sosny, w którym występują zmienne nieistotne statystycznie, nie jest modelem optymalnym, mimo że charakteryzuje się dużymi wartościami trafności klasyfikowania (94,27%) oraz niską wartością dewiancji (148,54) (tab. 4). W wyniku zastosowania metody eliminacji wstecznej w kolejnych iteracjach usuwano następujące zmien-

Tabela 2.

Iloraz szansy wystąpienia mikoryz u rocznych siewek sosny w zależności od mikrosiedliska i miejsca wzrostu na zrębie

Odds ratio for mycorrhiza occurrence in one-year-old Scots pine seedlings with regard to microhabitat and location on the clear-cut

	M	M1	M2	M3
LPZs	1	1	1	1
PAs	5,43	4,61	2,46	2,44
Fp	11,23	12,11	6,70	2,80
Fpp	22,83	24,61	11,55	3,50
PAb	22,83	24,61	17,61	8,37
LPZb	36,23	24,61	11,55	5,37
Środek	1	1	1	1
Skraj	1,54	1,36	1,26	1,08

LPZs – skiby wykonane pługiem leśnym; PAs – skiby wykonane pługiem aktywnym; Fp – pasy wykonane frezem; Fpp – nieskaryfikowana gleba poza pasami; PAb – bruzdy wykonane pługiem aktywnym; LPZb – bruzdy wykonane pługiem leśnym; M – wszystkie formy wierzchołków mikoryzowych; M1 – mikoryzy pojedyncze; M2 – mikoryzy dychotomiczne, M3 – mikoryzy wielokrotnie dychotomiczne i koralowate

LPZs – forest plough ridges; PAs – active plough ridges; Fp – forest cutter strips; Fpp – non-scarified soil; PAb – active plough furrows; LPZb – forest plough furrows; M – all types of mycorrhiza tips; M1 – single mycorrhiza; M2 – dichotomous mycorrhiza; M3 – multiple dichromous and corral mycorrhiza

Tabela 3.

Średnie wartości zmiennych opisujących cechy biometryczne sosny w zależności od wystąpienia symbiozy z grzybami mikoryzowymi (0 – brak mikoryzy, 1 – mikoryzy) i ocena istotności ich różnic

Mean values of variables describing biometrical features of Scots pine with regard to mycorrhiza (0 – absent, 1 – present) and assesment of difference significance

Parametr	0	1	U	P
M				
PG	1,80	1,54	2921,5	0,003*
PD	6,87	6,34	3631,0	0,111
PSM	0,59	0,40	2640,0	0,001*
SMK	0,08	0,06	3103,0	0,010*
PB	2,44	2,08	3603,0	0,092
WR	4,46	5,06	3491,5	0,063
DK	71,01	73,97	4294,5	0,720
PS	0,28	0,19	4068,5	0,254
M1				
PG	1,77	1,54	3486,5	0,008*
PD	6,83	6,34	4075,5	0,108
PSM	0,57	0,40	3235,5	0,002*
SMK	0,08	0,06	3779,5	0,033*
PB	2,25	2,09	4424,5	0,312
WR	4,38	5,07	3685,5	0,022*
DK	68,54	74,19	4515,0	0,407
PS	0,25	0,19	4676,0	0,426
M2				
PG	1,72	1,53	6105,5	0,004*
PD	6,93	6,30	6656,0	0,033*
PSM	0,55	0,39	5174,0	<0,001*
SMK	0,07	0,06	6516,0	0,020*
PB	2,33	2,07	7198,0	0,155
WR	4,36	5,12	5698,5	0,001*
DK	78,83	73,04	7997,5	0,773
PS	0,22	0,19	7908,5	0,547
M3				
PG	1,63	1,52	13331,0	0,011*
PD	6,57	6,29	14291,0	0,109
PSM	0,48	0,38	12331,5	<0,001*
SMK	0,06	0,06	15253,5	0,515
PB	2,25	2,03	14691,0	0,216
WR	4,63	5,20	12436,5	0,018
DK	76,84	72,37	15534,0	0,709
PS	0,17	0,21	15274,5	0,356

* istotne przy $p \leq 0,05$, oznaczenia jak w tabeli 1; * significant at $p \leq 0,05$, denotes as in table 1

ne: obecność pączka szczytowego (PS), długość pędów (PD), liczba pędów bocznych (PB) i wskaźnik rozgałęzienia (WR, zmienna ta została odrzucona przy $\alpha=0,073$). W modelu optymalnym pozostały długość korzeni (DK) i sucha masa części nadziemnej (PSM), które miały największą zdolność dyskryminacji. Poziom istotności pozostałych w modelu zmiennych był bardzo niski, co oznacza, że wpływ tych parametrów jest bardzo istotny statystycznie (tab. 5). Model zapisany w postaci logitowej przyjmuje postać: $\text{Logit } Y = 3,116 - 5,558\text{PSM} + 0,031\text{DK}$. Model optymalny przewiduje poprawnie 93,75% przypadków, a iloraz szans poprawnie zakwali-

Tabela 4.

Wyniki analizy logistycznej z wszystkimi zmiennymi objaśniającymi wystąpienie mikoryzy u rocznych siewek sosny zwyczajnej

Logistic regression of mycorrhiza abundance and all descriptors included

N=384	Całkowita strata =74,27; $\chi^2=36,37$; $P<0,001$						
	Stała BO	PD	PSM	PB	WR	DK	PS
Ocena	-0,542	0,317	-7,673	0,266	0,387	0,034	-0,315
Błąd stand.	1,421	0,188	1,703	0,215	0,181	0,010	0,554
Poziom P	0,703	0,092	<0,001	0,217	0,033	0,001	0,570
Iloraz szans z jednością (OR)	0,582	1,373	0,0005	1,305	1,472	1,035	0,729

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Tabela 5.

Wyniki analizy logistycznej objaśniającej wystąpienie mikoryzy u rocznych siewek sosny zwyczajnej – model optymalny

Logistic regression of mycorrhiza abundance and all descriptors – optimal model

N=384	Całkowita strata =78,42; $\chi^2=28,10$; $P<0,001$		
	Stała BO	PSM	DK
Ocena	3,116	-5,558	0,031
Błąd stand.	0,528	1,098	0,009
Poziom P	<0,001	<0,001	0,001
Iloraz szans z jednością (OR)	22,557	0,004	1,031

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

fikowanych do niepoprawnie zakwalifikowanych przypadków wynosi 31,1, co oznacza, że ta klasyfikacja jest o wiele lepsza od tej, której można oczekiwać przez przypadek. Zmienną o największej sile dyskryminacyjnej okazała się PSM, której wzrost powoduje zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryzy u siewki, w przeciwieństwie do długości korzeni (DK), która pozytywnie wpływa na obecność mikoryzy.

MODEL PREDYKCJI WYSTĄPIENIA U ROCZNYCH SIEWEK SOSNY MIKORYZ POJEDYNCZYCH (M1). W pełnym modelu opisującym wystąpienie u rocznych siewek sosny mikoryz typu M1 trafność klasyfikowania wyniosła 93,49%, a dewiancja 160,58 (tab. 6). W wyniku stosowania metody eliminacji wstecznej w kolejnych iteracjach usuwano: obecność pączka szczytowego (PS), długość pędów (PD) i liczbę pędów bocznych (PB). W modelu optymalnym pozostały zmienne: wskaźnik rozgałęzienia (WR), długość korzeni (DK) i sucha masa części nadziemnej (PSM), które miały największą zdolność dyskryminacji (tab. 7). Model w postaci logitowej przyjmuje postać: $\text{Logit } Y=0,689-5,402\text{PSM}+0,441\text{WR}+0,033\text{DK}$. Model optymalny przewiduje poprawnie 93,23% przypadków, a iloraz szans wynosi 42,6. Zmienną o największej sile dyskryminacyjnej okazała się ponownie PSM, której wzrost powoduje zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryzy u siewki w przeciwieństwie do DK i WR, które na tę cechę wpływają pozytywnie.

MODEL PREDYKCJI WYSTĄPIENIA U ROCZNYCH SIEWEK SOSNY MIKORYZ DYCHOTOMICZNYCH (M2). W pełnym modelu opisującym wystąpienie mikoryz typu M2 u 1-rocznych siewek sosny trafność klasyfikowania wyniosła 86,98%, a dewiancja 245,62 (tab. 8). W kolejnych iteracjach usuwano zmienne: obecność pączka szczytowego (PS), długość pędów (PD) i liczba pędów bocznych (PB). W modelu optymalnym (tab. 9) pozostały zmienne: wskaźnik rozgałęzienia (WR), długość korzeni (DK) i sucha masa części nadziemnej (PSM). Model zapisany w postaci logitowej przyjmuje

Tabela 6.

Wyniki analizy logistycznej z wszystkimi zmiennymi objaśniającymi wystąpienie mikoryz typu M1 u rocznych siewek sosny

Logistic regression of M1 mycorrhiza abundance and all descriptors included

N=384	Całkowita strata =80,29; $\chi^2=39,95$; $P<0,001$						
	Stała BO	PD	PSM	PB	WR	DK	PS
Ocena	-1,164	0,310	-7,922	0,377	0,449	0,035	-0,130
Błąd stand.	1,338	0,178	1,702	0,215	0,175	0,010	0,547
Poziom P	0,385	0,083	<0,001	0,081	0,011	<0,001	0,812
Iloraz szans z jednością (OR)	0,312	1,364	0,0004	1,459	1,567	1,036	0,877

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Tabela 7.

Wyniki analizy logistycznej objaśniającej wystąpienie mikoryz typu M1 u rocznych siewek sosny zwyczajnej – model optymalny

Logistic regression of M1 mycorrhiza abundance and all descriptors – optimal model

N=384	Całkowita strata =82,78; $\chi^2=34,96$; $P<0,001$			
	Stała BO	PSM	WR	DK
Ocena	0,689	-5,402	0,441	0,033
Błąd stand.	0,885	1,094	0,175	0,009
Poziom P	0,436	<0,001	0,012	<0,001
Iloraz szans z jednością (OR)	1,992	0,005	1,554	1,033

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Tabela 8.

Wyniki analizy logistycznej z wszystkimi zmiennymi objaśniającymi wystąpienie mikoryz typu M2 u rocznych siewek sosny zwyczajnej

Logistic regression of M2 mycorrhiza abundance and all descriptors included

N=384	Całkowita strata =127,31; $\chi^2=38,60$; $P<0,001$						
	Stała BO	PD	PSM	PB	WR	DK	PS
Ocena	-0,273	0,113	-4,935	0,202	0,475	0,013	0,146
Błąd stand.	1,030	0,133	1,182	0,146	0,141	0,006	0,430
Poziom P	0,791	0,395	<0,001	0,168	0,001	0,025	0,735
Iloraz szans z jednością (OR)	0,761	1,120	0,007	1,224	1,607	1,013	1,156

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

postać: $\text{Logit } Y=0,406-3,787\text{PSM}+0,476\text{WR}+0,013\text{DK}$. Model optymalny przewiduje poprawnie 87,24% przypadków, a iloraz szans wynosi 7,22. Zmienną o największej sile dyskryminacyjnej okazała się ponownie PSM, której wzrost powoduje zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryzy u siewki w przeciwieństwie do DK i WR, które wpływają pozytywnie. Niższe średnie wartości DK dla siewek zmikoryzowanych niż dla siewek bez mikoryz (tab. 3) wynikają z rozkładu tej zmiennej. Mediana DK dla siewek zmikoryzowanych jest wyższa (66,39) niż dla siewek bez mikoryz (61,28), stąd pozytywny wpływ DK na wystąpienie mikoryz.

MODEL PREDYKCJI WYSTĄPIENIA U ROCZNYCH SIEWEK SOSNY MIKORYZ WIELOKROTNIENIE DYCHOTOMICZNYCH I KORALOWATYCH (M3). W pełnym modelu opisującym wystąpienie mikoryz typu M3 u rocznych siewek sosny trafność klasyfikowania wyniosła 70,57%, a dewiancja 439,62 (tab. 10).

W kolejnych iteracjach usuwano zmienne: obecność pęczka szczytowego (PS), długość pędów (PD) i liczba pędów bocznych (PB). W modelu optymalnym (tab. 11) pozostały zmienne: wskaźnik rozgałęzienia (WR), długość korzeni (DK) i sucha masa części nadziemnej (PSM). Model w postaci logitowej przyjmuje postać: $\text{Logit } Y = -0,239 - 2,629\text{PSM} + 0,310\text{WR} + 0,008\text{DK}$. Model optymalny przewiduje poprawnie 70,57% przypadków, a iloraz szans wynosi 3,82. Zmienną o największej sile dyskryminacyjnej okazała się również PSM, której wzrost powoduje zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryzy u siewki, w przeciwieństwie do DK i WR, które wpływają pozytywnie. Podobnie jak w przypadku siewek z mikoryzami dychotomicznymi, niższe średnie wartości DK dla siewek z mikoryzowanymi niż dla siewek bez mikoryz (tab. 3) wynikają z rozkładu tej zmiennej. Mediana DK dla siewek z mikoryzowanymi jest wyższa (66,39) niż dla siewek bez mikoryz (65,61).

Tabela 9.

Wyniki analizy logistycznej objaśniającej wystąpienie mikoryz typu M2 u rocznych siewek sosny zwyczajnej – model optymalny

Logistic regression of M2 mycorrhiza abundance and all descriptors – optimal model

N=384	Całkowita strata =128,47; $\chi^2=36,29$; P<0,001			
	Stała BO	PSM	WR	DK
Ocena	0,406	-3,787	0,476	0,013
Błąd stand.	0,718	0,826	0,140	0,006
Poziom P	0,573	<0,001	0,001	0,020
Iloraz szans z jednością (OR)	1,500	0,023	1,609	1,013

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Tabela 10.

Wyniki analizy logistycznej z wszystkimi zmiennymi objaśniającymi wystąpienie mikoryzy typu M3 u rocznych siewek sosny zwyczajnej

Logistic regression of M3 mycorrhiza abundance and all descriptors included

N=384	Całkowita strata =219,81; $\chi^2=38,93$; P<0,001						
	Stała BO	PD	PSM	PB	WR	DK	PS
Ocena	-1,167	0,168	-4,117	0,156	0,322	0,008	0,510
Błąd stand.	0,747	0,100	0,946	0,101	0,091	0,004	0,325
Poziom P	0,119	0,093	0,000	0,125	0,000	0,049	0,117
Iloraz szans z jednością (OR)	0,311	1,183	0,016	1,169	1,380	1,008	1,666

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Tabela 11.

Wyniki analizy logistycznej objaśniającej wystąpienie mikoryz typu M3 u rocznych siewek sosny zwyczajnej – model optymalny

Logistic regression of M3 mycorrhiza abundance and all descriptors – optimal model

N=384	Całkowita strata =223,32; $\chi^2=31,90$; P<0,001			
	Stała BO	PSM	WR	DK
Ocena	-0,239	-2,629	0,310	0,008
Błąd stand.	0,515	0,643	0,089	0,004
Poziom P	0,644	0,000	0,001	0,042
Iloraz szans z jednością (OR)	0,788	0,072	1,364	1,008

oznaczenia jak w tabeli 1; denotes as in table 1

Dyskusja

Na tworzenie i funkcjonowanie symbiozy mikoryzowej wpływa wiele czynników. Do najistotniejszych, opisanych w tzw. teoriach funkcjonowania mikoryz [Rudawska 1993], należą względnie niska dostępność substancji pokarmowych w glebie, obecność cukrów w korzeniach niezbędnych dla partnera grzybowego oraz synteza hormonów przez symbionty grzybowe. Niemniej ważne są czynniki związane ze środowiskiem glebowym, takie jak wilgotność i zawartość tlenu, dostępność inokulum, obecność polifenoli i mikroorganizmów stymulujących lub inhibujących tworzenie mikoryz [Conn, Dighton 2000; Rudawska 2000]. Uzyskane przez nas wyniki potwierdzają najstarszą z teorii funkcjonowania mikoryz, tzw. teorię mineralną, mówiącą, że mikoryza jest manifestacją gleb ubogich w składniki mineralne [Rudawska 1993]. Nadanie rangi poszczególnym mikrosiedliskom pozwoliło wykazać, że wraz ze zmniejszaniem się zasobności i dostępności składników mineralnych w podłożu wzrasta ogólny poziom zmikoryzowania siewek i udział poszczególnych morfotypów (tab. 2). Iloraz szans wystąpienia mikoryz był większy u siewek rosnących poza pasami (Fpp) przygotowanymi frezem niż na pasach (Fp) – odwrotnie niż nadane rangi mikrosiedliskom. Wynik ten pokazuje, że na kształtowanie poziomu zmikoryzowania siewek i udziału poszczególnych morfotypów wpływ poza dostępnością substancji mineralnych mają również inne czynniki. W tym przypadku mogła to być dostępność inokulum. Przygotowanie gleby w pasy frezem powoduje wymieszanie poziomu organicznego gleby z mineralnym i pozostawienie inokulum w zasięgu rozrastających się korzeni siewek z pionowym przemieszczeniem (do 35 cm). Takie przygotowanie gleby może zmniejszyć gęstość inokulum dostępnego dla młodych roślin. Wykazano bowiem, że liczba żywych i martwych mikoryz nie zmienia się do głębokości 15 cm profilu glebowego. Poniżej tego poziomu obserwuje się drastyczne zmniejszenie liczby mikoryz, szczególnie żywych [Thapar, Rehill 1984]. Inne badania pokazały, że 90% mikoryz znajduje się w górnych 10 cm profilu glebowego [Dahlberg i in. 1997].

Czas przelegiwania zrębu i związana z tym dostępność inokulum jest istotnym czynnikiem wpływającym na stan mikoryz siewek. Uważa się, że między pierwszym i drugim rokiem po wykonaniu cięcia następuje szybka utrata aktywności korzeni mikoryzowych obecnych w glebie i związanych z nimi strzępek grzybni [Harvey i in. 1980; Parsons i in. 1994; Hagerman i in. 1999a]. Zjawisko to może być powodem słabszego zmikoryzowania i mniejszej różnorodności mikoryz na korzeniach siewek odnawiających się w środkowych częściach przelegujących zrębów w porównaniu z siewkami rosnącymi w zasięgu korzeni otaczającego drzewostanu [Jones i in. 2003]. Nasze badania pokazały, że poziom zmikoryzowania i udział poszczególnych morfotypów sosen rosnących na skraju zrębu był wprawdzie wyższy od pochodzących ze środka zrębu (tab. 2), ale różnice okazały się nieistotne statystycznie. Można przypuszczać, że krótki okres (jeden rok), jaki upłynął od wycięcia drzewostanu, nie spowodował jeszcze utraty inokulum w środkowych częściach zrębu. Najprawdopodobniej dotyczyło to nie tylko inokulum w postaci zarodników i sklerocjów, które mogą przetrwać w glebie zrębu nawet kilka lat [Hagerman i in. 1999b], ale przede wszystkim strzępek grzybni połączonych z aktywnymi metabolicznie mikoryzami.

W naszych badaniach wyniki testu Manna-Whitneya pokazały, że sosny pozbawione mikoryz były istotnie większe w porównaniu z siewkami, których korzenie weszły w symbiozę mikoryzową (tab. 3). Zjawisko takie, uważane za fizjologiczne, występuje często u drzew do 2-3 roku życia [Stenström, Ek 1990]. Wynika ono z konieczności żywienia przez roślinę partnera grzybowego. Wykazano, że nawet do około 25% zasymilowanego przez roślinę węgla przekazywane jest do partnera grzybowego [Högberg, Högberg 2002; Högberg i in. 2007].

Na kształtowanie cech wzrostowych siewek, oprócz poziomu zmikoryzowania, wpływa cały szereg innych czynników związanych z warunkami świetlnymi, termicznymi, wilgotnościami i troficznymi [Gorzela 1986]. Optymalny model prognozowania wystąpienia mikoryz u jednorocznych siewek sosny pokazał, że cechą biometryczną o największej sile dyskryminacyjnej jest sucha masa części nadziemnej. Wielu autorów badających mikoryzy wybiera do analiz objętość pędu jako cechę najsilniej skorelowaną z poziomem zmikoryzowania drzew [Hilszczańska 2001]. Szabla [2004] uważa, że cechami biometrycznymi najlepiej charakteryzującymi sadzonki poddane zabiegowi sterowanej mikoryzacji, oprócz grubości w szyi korzeniowej, jest średnia suma długości pędów bocznych i ciężar igieł, a więc cechy decydujące o masie części nadziemnej. Wydaje się, że uzyskane przez nas wyniki, wskazujące na zmniejszanie się prawdopodobieństwa wystąpienia mikoryzy wraz ze wzrostem suchej masy części nadziemnej siewek, są potwierdzeniem fizjologicznych (żywieniowych) zależności między grzybem i rośliną. Masa części nadziemnej siewki jest cechą najmocniej związaną z poziomem symbiozy mikoryzowej, w przeciwieństwie do np. długości pędu, silniej reagującej na warunki świetlne.

Uważa się, że długość korzeni i wskaźnik rozgałęzienia najczęściej są kształtowane przez warunki wilgotnościowe. Doświadczenia wykazały, że okresy suszy sprzyjają rozgałęzianiu się systemu korzeniowego siewek, a nawadnianie stymuluje wydłużanie się korzeni [Kottke, Agarar 1983; Feil i in. 1988]. Obie cechy weszły do modeli optymalnych prognozowania wystąpienia poszczególnych morfotypów mikoryz (M1, M2, M3). Jednak ich wpływ jest daleko mniejszy niż suchej masy części nadziemnej. Najmniejsze znaczenie we wszystkich tych modelach, jak również w modelu predykcji ogólnego zmikoryzowania siewek, ma długość korzeni.

Dychotomia korzeni mikoryzowych jest cechą charakterystyczną sosny i rzadko lub wcale nie występuje u innych gatunków drzew [Rudawska 1993]. Można przypuszczać, że formy złożone mikoryz skuteczniej zaopatrują roślinę w wodę i substancje mineralne w porównaniu z mikoryzami pojedynczymi, ale wymagają od rośliny większych nakładów energetycznych. Potwierdzeniem tego stwierdzenia są wyniki uzyskane w naszych badaniach. Siewki zaopatrzone w mikoryzy wielokrotnie dychotomiczne i koralowate (M3) charakteryzowały się mniejszymi parametrami biometrycznymi od sosen posiadających mikoryzy dychotomiczne (M2), a te z kolei były mniejsze od siewek, na korzeniach których stwierdzono wyłącznie mikoryzy pojedyncze (M1). Występowanie stresów biotycznych lub abiotycznych może ograniczać dychotomię korzeni mikoryzowych [Aleksandrowicz-Trzcńska 1999]. W naszych badaniach na żadnym z sześciu analizowanych mikrosiedlisk nie występowały czynniki ograniczające dychotomię korzeni krótkich. Szansa wystąpienia form złożonych mikoryz na poszczególnych mikrosiedliskach wzrastała wraz z ogólnym poziomem zmikoryzowania, czyli zmniejszania się zasobności i dostępności składników mineralnych w glebie. Na bruzdach przygotowanych plugiem aktywnym iloraz szans wystąpienia mikoryz dychotomicznych, wielokrotnie dychotomicznych i koralowatych był najwyższy w porównaniu z pozostałymi mikrosiedliskami (tab. 2). Może wskazywać to na obecność lub dominację na korzeniach siewek tam rosnących pewnych gatunków grzybów. Mikoryzy tworzone przez poszczególne gatunki grzybów wykazują bowiem różne tendencje do rozgałęziania się korzeni krótkich. Dla przykładu *Cenococcum geophilum* tworzy wyłącznie mikoryzy proste i dychotomicznie rozgałęzione, natomiast grzyby z rodzaju *Suillus* bardzo często tworzą formy złożone.

Wnioski

✦ W warunkach opisywanego doświadczenia poziom zmikoryzowania sosny oraz dychotomia korzeni krótkich wykazują bardzo silną zależność od zasobności i dostępności substancji mine-

ralnych w glebie. Stopień zmikoryzowania i rozgałęziania się korzeni mikoryzowych siewek wzrasta wraz ze zmniejszaniem się zasobności i dostępności biogenów.

- ✚ Sosny rosnące na skraju zrębu nie różnią się poziomem zmikoryzowania od siewek pochodzących z jego centrum. Powodem braku różnic jest najprawdopodobniej krótki okres, jaki upłynął od wycięcia drzewostanu i zachowanie w glebie, w centralnej części zrębu, wysokiego poziomu wszystkich form inokulum.
- ✚ Wielkość cech biometrycznych siewek sosny jest silnie zależna od poziomu ich zmikoryzowania. Na wzrost zmikoryzowania i dychotomii korzeni mikoryzowych siewki najsilniej reagują ograniczeniem biomasy części nadziemnej, wyrażonej jej suchą masą.
- ✚ Sosny o większej sumarycznej długości korzeni i wyższym wskaźniku rozgałęzienia są lepiej zmikoryzowane, a ich mikoryzy charakteryzują się wyższą dychotomią.

Podziękowania

Serdecznie dziękujemy Nadleśniczemu Nadleśnictwa Ostrów Mazowiecka Panu Piotrowi Uścian-Szaciłowskiemu za przygotowanie gleby na zrębach i pomoc w pracach terenowych.

Literatura

- Aleksandrowicz-Trzcńska M. 1999. Wpływ fungicydów stosowanych w ochronie szkółek leśnych na rozwój mikoryz siewek sosny. Część II. Udział korzeni mikoryzowych i autotroficznych. Sylwan 143 (11): 37-46.
- Andrzejczyk T. 2000. Wpływ odległości od ściany drzewostanu na zagęszczenie i przeżywalność nalotów sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) na zrębach zupełnych i gniazdach. Sylwan 144 (1): 27-42.
- Andrzejczyk T., Augustyniak G. 2007. Wpływ przygotowania gleby na wzrost sosny zwyczajnej w pierwszych latach uprawy. Sylwan 151 (8): 3-8.
- Andrzejczyk T., Drozdowski S. 2003. Rozwój naturalnego odnowienia sosny zwyczajnej na powierzchni przygotowanej plugiem dwuodkładnicowym. Sylwan 147 (5): 28-35.
- Baier R., Ettl R., Hahn Ch., Göttlein A. 2006. Early development and nutrition of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings on different seedbeds in the Bavarian limestone Alps – a bioassay. Ann. For. Sci. 63: 339-348.
- Belsley D. A., Kuh E., Welsch R. E. 1980. Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity. Wiley, New York.
- Conn C., Dighton J., 2000. Litter quality influences on decomposition, ectomycorrhizal community structure and mycorrhizal root surface acid phosphatase activity. Soil Biol. Biochem. 32: 489-496.
- Dahlberg A., Jonsson L., Nylund J-E. 1997. Species diversity and distribution of biomass above- and below ground among ectomycorrhizal fungi in an old-growth Norway spruce forest in south Sweden. Can. J. Bot. 75: 1323-1335.
- Drozdowski S. 2002. Wpływ różnych sposobów przygotowania gleby na wyniki naturalnego odnowienia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Acta Sci. Pol., Silvorum Colendarum Ratio et Industria Lignaria 1 (1): 27-34.
- Feil W., Kottke I., Oberwinkler F. 1988. The effect of drought on mycorrhizal production and very fine root system development of Norway spruce under natural and experimental conditions. Plant and Soil 108: 221-231.
- Gorzela A. 1986. Badania warunków wzrostu i produkcji siewek niektórych gatunków drzew leśnych w namiotach foliowych. Prace IBL 653: 1-84.
- Hagerman S. M., Jones M. D., Bradfield G. E., Gillespie M., Durall D. M. 1999a. Effects of clear-cut logging on the diversity and persistence of ectomycorrhizae at a subalpine forest. Can. J. For. Res. 29: 124-134.
- Hagerman S. M., Jones M. D., Bradfield G. E., Sakakibara S. M. 1999b. Ectomycorrhizal colonization of *Picea engelmannii* × *Picea glauca* seedlings planted across cut blocks of different sizes. Can. J. For. Res. 29: 1856-1870.
- Harvey A. E., Jurgensen M. F., Larsen M. J. 1980. Clearcut harvesting and ectomycorrhizae: survival of activity on residual roots and influence on a bordering forest stand in western Montana. Can. J. For. Res. 10, 300-303.
- Hilszczańska D. 2001. Wpływ wilgotności podłoża na rozwój mikoryz siewek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Rozprawa doktorska, Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Högberg M. N., Högberg P. 2002. Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated root, half the dissolved organic carbon in a forest soil. New Phytologist 154: 791-795.
- Högberg P., Högberg M. N., Göttlicher S. G., Betson N. R., Keel S. G., Metcalfe D. B., Campbell C., Schindlbacher A., Hurry V., Lundmark T., Linder S., Näsholm T. 2008. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms. New Phytologist 177: 220-228.
- Jones M. D., Durall D. M., Cairney J. W.G. 2003. Ectomycorrhizal fungal communities in young forest stands regenerating after clearcut logging. New Phytol. 157: 399-422.

- Kottke I., Agarer R. 1983. Untersuchungen zur Bedeutung der Mykorrhiza in ältern Laubund Nadelwaldbeständen des Südwestdeutschen Keuperberglandes. Mitt. Verein Forstl. Standortskd. Forstpfl. 30: 30-39.
- Larose D. T. 2006. Data mining methods and models. Wiley, New York.
- Lundmark-Theelin A., Johansson M. B. 1997. Influence of mechanical site preparation on decomposition and nutrient dynamics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needle litter and slash needles. For. Ecol. Manage. 96: 101-110.
- Mallik A. U., Hu D. 1997. Soil respiration following site preparation in boreal mixedwood forest. For. Ecol. Manage. 97: 265-275.
- Menard S. 1995. Applied Logistic Regression Analysis. Sage Publications Series: Quantitative Applications In the Social Sciences 106.
- Parsons W. F. J., Miller S. L., Knight D. H. 1994. Root-gap dynamics in a lodgepole pine forest: ectomycorrhizal and nonmycorrhizal fine root activity after experimental gap formation. Can. J. For. Res. 24: 1531-1538.
- Rudawska M. 1993. Mikoryza. W: Białobok S., Boratyński A., Bugała W. [red.]. Biologia sosny zwyczajnej. Sorus, Poznań-Kórnik. 137-182.
- Rudawska M. [red.]. 2000. Ektomikoryza jej znaczenie i zastosowanie w leśnictwie. Instytut Dendrologii PAN, Kórnik.
- Rutkowski L. 2006. Metody i techniki sztucznej inteligencji. WN PWN.
- Stenström E., Ek M. 1990. Field growth of *Pinus sylvestris* following nursery inoculation with mycorrhizal fungi. Can. J. For. Res. 20: 914-918.
- Szabla K. 2004. Wpływ biopreparatów z grzybami ektomikoryzowymi na kształtowanie się mikoryz, wzrostu i rozwoju sadzonek wybranych gatunków drzew leśnych w szkółce kontenerowej i w uprawach w różnych warunkach środowiskowych. Praca doktorska wykonana na Wydziale Leśnym Akademii Rolniczej im. Hugona Kołłątaja w Krakowie.
- Thapar H. S., Rehill P. S. 1984. Studies on vertical distribution of mycorrhiza in soil attrition rate for predicting site quality. Journal of Tree Science 3: 89-92.

SUMMARY

Classification model for the prediction of mycorrhiza development of one-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings on clear-cut

The aim of this study was to show the relationships between the characteristics of microhabitats (furrows and ridges made by forest and active ploughs, strips prepared by a forest cutter and non-scarified soil), position of seedlings in the clear-cut area (edge, centre), biometric parameters of seedlings and their mycorrhization level. The empirical material consisted of Scots pine seedlings established by natural regeneration on four clear-cut areas located in the territory of the Ostrów Mazowiecka Forest District. A logistic regression analysis was used to study the relationships. The level of mycorrhization and dichotomy of mycorrhizal roots of seedlings increased with the decrease of the abundance and availability of nutrients in the soil associated with microhabitats. No difference was found in the mycorrhization level of seedlings growing on the edge and in the centre of the clear-cut area. The strongest response of seedlings to the increase of the mycorrhization level and dichotomy of mycorrhizal roots was manifested in the reduction of the dry mass of shoots. Pines with higher total root length and higher branching index were characterised by a considerably higher mycorrhization level and higher dichotomy of their mycorrhizae.