

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI, EMILIA WIŚNIEWSKA

Ocena zasięgu gradacji owadzi na podstawie zdjęć satelitarnych

The use of satellite imagery in assessing the extent of insect outbreaks

ABSTRACT

The paper focuses on the use of Landsat-Thematic Mapper satellite images for assessing the extent of sawfly (*Diprionidae*) feeding in the Koziennicka Forests. The geographic information system used in the study allowed for the integration of the inventory and imagery data, as well as image processing, photointerpretation, classification and spatial analyses.

KEY WORDS

satellite remote sensing, insect outbreak

Wstęp

Gwałtowne zmiany środowiska powodują potrzebę monitorowania jego stanu w sposób szybki i powtarzalny. Teledetekcja, zarówno lotnicza, jak i satelitarna spełnia warunki stawiane narzędziom monitoringu: dostarcza danych obiektywnych i powtarzalnych.

Szczególnie leśnictwo powinno wykazywać zainteresowanie teledetekcją. Istniejący już System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP), zawierający pełną informację opisową o lasach oraz tworzone obecnie mapy numeryczne nadleśnictw, relacyjnie połączone z SILP, stwarzają nowe jakościowo narzędzie, które ułatwia zastosowanie teledetekcji w praktyce leśnej.

W opisywanej pracy (wykonanej ze środków KBN w ramach grantu nr 9 T12E 02514) podjęto próbę wykorzystania zdjęć satelitarnych, wykonanych w 1994 r. przez satelitę Landsat do monitorowania żerów boreczników (*Diprionidae*) w Puszczy Koziennickiej.

Analizy były wykonywane przy zastosowaniu systemu informacji przestrzennej, który posłużył do zintegrowania danych inwentaryzacyjnych i obrazowych oraz umożliwił wykonanie przetworzeń, klasyfikacji, interpretacji zdjęć satelitarnych, a także analiz przestrzennych.

Zintegrowanie, w systemie informacji przestrzennej, danych obrazowych, kartograficznych i opisowych, pozwoliło na wykonanie analiz statystycznych określających możliwość wydzielenia dzięki klasyfikacji na podstawie zdjęć satelitarnych drzewostanów sosnowych o różnym stopniu defoliacji.

Zgromadzone materiały opisujące Puszcę Koziennicką, oprócz zdjęć satelitarnych i danych urzędniowych zawierają również dane terenowe z oceną defoliacji w wybranych trzystu drzewostanach sosnowych [Grzyb, Borecki 1994].

TOMASZ ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI

Institut Geodexji i Kartografii w Warszawie oraz
University of Applied Sciences, Faculty of Forestry
Alfred-Möller-Str. 1
D-16225 Eberswalde
tzawila@fh-eberswalde.de

EMILIA WIŚNIEWSKA

Institut Geodexji i Kartografii
ul. Modzelewskiego 27
02-679 Warszawa
emiwis@igik.edu.pl

Poszukiwanie kanałów spektralnych przydatnych do rozróżniania klas defoliacji

W pierwszym etapie analiz wykonano jednoczynnikową analizę wariancji w celu ustalenia czy między kilkoma grupami (czynniki) istnieją różnice statystycznie istotne. W tych analizach grupami tymi były 20% klasy defoliacji: 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, powyżej 80%. Jednoczynnikowe analizy wariancji zostały wykonane dla siedmiu kanałów surowych i kanałów wagowanych Landsat TM, w których badano równość średnich dla przyjętych klas defoliacji. Kanałami wagowanymi były: TM4/TM3 zwany wskaźnikiem biomasy, TM5/TM4 – wskaźnik uszkodzeń

$$BR = \sqrt{(TM3)^2 + (TM4)^2}$$

zwany wskaźnikiem jasności oraz wskaźnik roślinności

$$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$$

Zanim jednak przystąpiono do jednoczynnikowej analizy wariancji, poddano ocenie powierzchni testowe pod względem ich jednorodności, a więc reprezentatywności. Pikselowa budowa zdjęcia rastrowego powoduje, że średnia odbicia spektralnego wyliczona dla danego wydzielenia nie zawsze jest reprezentatywna, gdyż jest ona wyliczona ze zróżnicowanych wartości pikseli reprezentujących na przykład gniazda, albo domieszki innych gatunków, wchodzących w skład jednego wydzielenia drzewostanowego. Po przeanalizowaniu wartości odchyleń standardowych, a także ocenie wizualnej wybrano do analizy 109 jednorodnych spektralnie wydzieleni.

Wyniki jednoczynnikowych analiz wariancji określiły kanały pozwalające na wyróżnienie poszczególnych klas defoliacji, a także ich wartości średnich w danym zakresie, przedziałów ufności, błędów standardowych oraz dolnych i górnych granic odbić spektralnych. Wykonując analizę wariancji stawiano hipotezę zerową głoszącą, że klasa defoliacji nie ma wpływu na średnie wartości odbić spektralnych. Obliczano wartość poziomu istotności ze statystyki testowej Fishera-Snedecora F-Ratio. W przypadku, gdy wartość F-Ratio była większa od tablicowej wartości krytycznej F_{tab} odrzucano hipotezę zerową i przyjmowano hipotezę alternatywną o występowaniu znaczących różnic między średnimi dla wariantów (klas defoliacji) (F-Ratio jest większe od F_{tab} , gdy poziom istotności P-value jest mniejszy od 0,05).

We wszystkich wypadkach wartość statystyki F-Ratio była większa od tablicowej wartości krytycznej F_{tab} . Hipotezy zerowe zostały więc odrzucone i przyjęto hipotezy alternatywne o występowaniu znaczących różnic między średnimi dla klas defoliacji.

Analizy spektralne zdjęć Landsat TM pozwoliły wyróżnić homogeniczne klasy defoliacji w poszczególnych kanałach spektralnych oraz kanałach wagowanych. Wagowania kanałów stosowano do obliczenia wskaźników biomasy, uszkodzeń, roślinności i jasności. Wyniki wykonanych jednoczynnikowych analiz wariancji przedstawia tabela 1, z której wynika, że:

- Kanał TM1, rejestrujący zakres promieniowania niebieskiego, umożliwia wydzielenie dwóch grup: klasy agregującej drzewostany o ubytku aparatu asymilacyjnego z zakresu 0-39,9% (klasa 10+30) i klasy z defoliacją wynoszącą powyżej 40% (klasa 50+70+80).
- W kanale TM2 (promieniowanie zielone) średnia wartość klasy 80 jest zawarta między klasami 10 i 30 a klasami 50 i 70, a więc nastąpił spadek zarejestrowanej wartości. Z tego względu klasa ta nie tylko jest trudna do wydzielenia w tym zakresie, ale także utrudnia wydzielenie klas 10+30 i 50+70.
- W kanale TM3 (promieniowanie z zakresu czerwieni) każda z kolejnych klas defoliacji

Tabela 1.

Zestawienie wyników jednoczynnikowej analizy wariancji
Specification of results of one-way analysis of variance

Defoliacja [%]	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	Wskaźnik biomasy	Wskaźnik uszkodzeń	Wskaźnik roślinności	Wskaźnik jasności
0-19							x				
20-39	x	x	x	x	x	x	x	x			x
40-59				x	x	x	x		x	x	
60-79			x						x		
pow. 80	x	x		x	x	x	x	x	x		x

została zarejestrowana z wyższą wartością odbicia, tym niemniej zasięgi wartości poszczególnych klas zachodzą na siebie i możliwe jest rozróżnienie dwóch grup ubytku aparatu asymilacyjnego (jak w kanale TM1): klasy 10+30 oraz klasy 50+70+80.

- Również dwie grupy dają się wyróżnić się w kanale TM4 (odbicie bliskiej podczerwieni), ale tutaj do pierwszej grupy zaliczają się drzewostany z klasy 10, 30, 50, 70, a do drugiej drzewostany z klasy 80, a więc o bardzo wysokim stopniu zdefoliowania. W klasie 80 średnia wartość odbicia spektralnego ulega dużemu obniżeniu.

- Podobnie jak w kanale TM3, także w kanale TM5 (promieniowanie bliskiej podczer-

wieni) każdej kolejnej klasie defoliacji przyporządkował wyższą wartość średnią odbicia. Rozróżnialność klas jest tu jednak znacznie wyższa i możliwe jest wydzielenie 4 klas: klasy 10, klasy 30, klasy 50 oraz klasy 50+80.

- Kanał TM6 (daleka podczerwień), pomimo że rejestruje piksele 120 x 120 m, umożliwia wydzielenie 3 grup: klasy 10+30, klasy 50+70 oraz klasy 80.

- Kolejny kanał - TM7 (promieniowanie średniej podczerwieni) każdej kolejnej klasie przyporządkował większą wartość średnią odbicia. Test na homogeniczność grup wyróżnił każdą z klas jako osobną grupę, tym niemniej średnie wartości klas 10 i 30 są klasami blisko siebie położonymi, a więc są możliwe do wydzielenia tylko w sprzyjających warunkach, z punktu widzenia spektralnej rozróżnialności klas.

- W wagowanym kanale będącym wskaźnikiem biomasy wydzielona została jedynie klasa 80, choć możliwa jest do zaobserwowania pewna prawidłowość: klasy z defoliacją do 40% przyjmują wartości w podobnych, wyższych wartościach, a kolejne klasy, drzewostany o większym ubytku aparatu asymilacyjnego, posiadają mniejsze wartości wskaźnika biomasy.

- Kanałem, w którym wyraźnie rozróżnione zostały wyższe klasy defoliacji, jest kanał wagowany zwany wskaźnikiem uszkodzeń. Klasa 10 i 30 tworzą wspólną grupę, ale każda kolejna klasa (50, 70, 80) została wydzielona jako osobna grupa.

- Wskaźnik roślinności, podobnie jak wskaźnik biomasy, wyróżnił jako osobną grupę klasę o defoliacji powyżej 80%. Także sama tendencja rozkładu wartości średnich wskaźnika w klasach defoliacji jest podobna do wartości średnich wskaźnika biomasy: początkowo wartości wskaźnika w klasie 10 i 30 są wysokie i zbliżone (występuje nawet niewielki wzrost wartości średniej klasy 30 w stosunku do klasy 10), a później następuje spadek wartości wskaźnika w kolejnych klasach.

- Wskaźnik jasności, podobnie jak wcześniej omawiany wskaźnik, wyróżnia jako osobną grupę od pozostałych klas defoliacji drzewostany o defoliacji powyżej 80%.

Kanałem, w którym jest najlepsze rozróżnienie klas defoliacji jest kanał TM7 i kanał TM5 (kanały średniej podczerwieni) oraz kanał wagowany – wskaźnik uszkodzeń, który także w opracowaniach dotyczących oceny ubytku aparatu asymilacyjnego drzewostanów świerkowych, na podstawie analiz zdjęć satelitarnych, był przyjmowany jako wskaźnik defoliacji drzewostanów.

Ocena związku między odbiciem spektralnym, a defoliacją drzewostanów

W celu stwierdzenia czy między odbiciami spektralnymi rejestrowanymi skanerem Landsat Thematic Mapper a defoliacją istnieje zależność i jak silna, wykonano analizę regresji i korelacji. Celem teorii korelacji jest rozwiązanie zależności między dwiema lub więcej wielkościami, a także określenie ścisłości (miary) zależności i wiarygodności (prawdopodobieństwa) otrzymanych charakterystyk.

Zależność pomiędzy cechami charakteryzuje współczynnik korelacji R, przyjmujący wartości z przedziału [-1,1]. Określa on siłę związku między zmiennymi. Jednak miarą dopasowania linii regresji do danych empirycznych jest współczynnik determinacji R², przyjmujący wartości w przedziale [0,1] lub [0%, 100%]. Jeżeli zależność między zmiennymi jest liniowa, wartość R² równa się 1 (lub 100%). Gdy nie występuje żaden związek między zmiennymi R² wynosi zero. Wartość statystyki t-Studenta służy do sprawdzenia istotności ocen parametrów oraz poziomu prawdopodobieństwa, przy którym stwierdza się brak podstaw do odrzucenia hipotezy o braku wpływu zmiennej niezależnej na zależną. Jeżeli więc P-value < 0,05, to hipotezy zerowe H: a=0 i b=0 muszą zostać odrzucone na korzyść hipotez alternatywnych: a≠0 i b≠0.

Regresję pojedynczą defoliacji wykonano dla poszczególnych kanałów surowych oraz wagowanych (tab. 2).

Największą zależność z defoliacją drzewostanów sosnowych mają: kanał TM7 (68,78%), wskaźnik uszkodzeń (60,05%) oraz kanał TM5 (59,56%). Dla wymienionych kanałów współczynniki korelacji są większe od 0,77, a wartości standardowych błędów oceny – najmniejsze. Poniżej przedstawione są wyniki analiz regresji pojedynczej dla tych trzech kanałów, najbardziej skorelowanych z defoliacją drzewostanów.

REGRESJA POJEDYNCZA DEFOLIACJI I TM 5. Równanie regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej (y) i wartości odbicia spektralnego TM5 jako wartości niezależnej (x) przyjmuje postać:

Tabela 2.

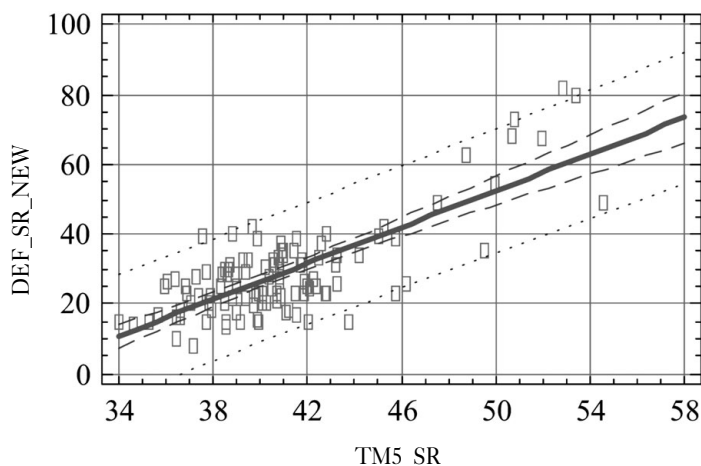
Zestawienie wyników regresji pojedynczej
Specification of results of a single regression

Kanał	Współczynnik korelacji R	Współczynnik determinacji R ²	Standardowy błąd oceny SE
TM1	0,34	11,56 %	12,99
TM2	0,49	23,66 %	12,06
TM3	0,56	31,54 %	11,42
TM4	-0,20	4,25 %	13,51
TM5	0,77	59,56 %	8,78
TM6	0,58	33,66 %	11,25
TM7	0,83	68,78 %	7,72
Wskaźnik biomasy	-0,37	13,37 %	12,85
Wskaźnik uszkodzeń	0,775	60,05 %	8,73
Wskaźnik jasności	-0,150	2,26 %	13,65
Wskaźnik roślinności	-0,411	16,91 %	12,59

$$DEF = -78,1734 + 2,6131 \cdot TM5$$

Ponieważ wartość P-value jest mniejsza od 0,01 istnieje statystycznie znaczący związek między defoliacją a wartością odbicia TM5 na poziomie ufności 99%, a odpowiednie wskaźniki przyjmują wartości: $R=0,77$; $R^2=59,55\%$; $SE=8,78$.

Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje, że równanie regresji ze zmienną niezależną TM5 w 59,56% wyjaśnia zmienność zależnej DEF (defoliacji), a współczynnik korelacji wynoszący 0,77 wskazuje na umiarkowanie silną zależność między zmiennymi. Standardowy błąd oceny SE opisuje, że odchylenie standardowe rozkładu zmiennej defoliacji wynosi 8,78. Wyrażenie to określa dyspersję defoliacji w stosunku do linii regresji, a więc jest miarą zmienności czynnika losowego. Znając tę wartość, poziom istotności oraz liczbę stopni swobody można wyznaczyć dla poszczególnych wartości defoliacji przedziały ufności dla nowych wartości obserwacji TM5.



Ryc. 1.

Wykres linii regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej i wartości TM5 jako zmiennej niezależnej wraz z zaznaczonym obszarem ufności linii regresji oraz obszaru ufności dla predykcji (wartości przewidywanych)

Single regression line for defoliation as a dependent variable and TM5 value as an independent variable with marked confidence area for regression line and confidence area for prediction (anticipated values)

REGRESJA POJEDYNCZA DEFOLIACJI I TM 7. Równanie regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej (y) i wartości TM7 jako wartości niezależnej (x) przyjmuje postać:

$$DEF = -43,0745 + 4,99709 \cdot TM7$$

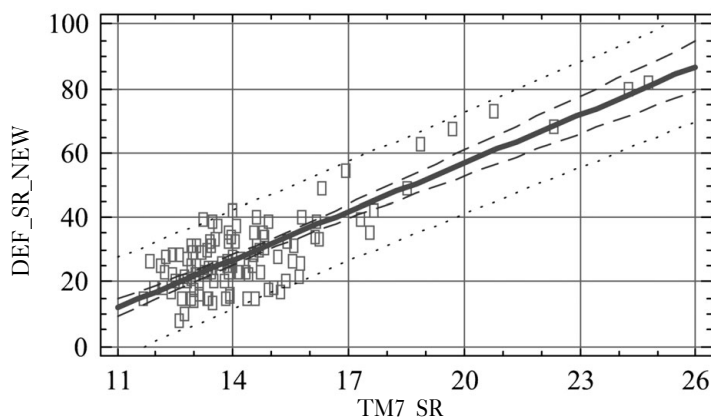
Ponieważ wartość P-value jest mniejsza od 0,01 istnieje statystycznie znaczący związek między defoliacją a wartością odbicia TM7 na poziomie ufności 99%, a odpowiednie wskaźniki przyjmują wartości: $R=0,83$, $R^2=68,78\%$, $SE=7,72$.

Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje, że równanie regresji ze zmienną niezależną TM7 w 68,78% wyjaśnia zmienność zależnej DEF (defoliacji), a współczynnik korelacji wynoszący 0,83 wskazuje na umiarkowanie silną zależność między zmiennymi. Standardowy błąd oceny SE opisuje, że odchylenie standardowe rozkładu zmiennej defoliacji wynosi 7,72. Wyrażenie to określa dyspersję defoliacji w stosunku do linii regresji, a więc jest miarą zmien-

ności czynnika losowego. Znając tę wartość, poziom istotności oraz liczbę stopni swobody można wyznaczyć dla poszczególnych wartości defoliacji przedziały ufności dla nowych wartości obserwacji TM7.

REGRESJA POJEDYNCZA DEFOLIACJI I WSKAŹNIKA USZKODZEŃ. Równanie regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej (y) i wskaźnika uszkodzeń jako wartości niezależnej (x) przyjmuje postać:

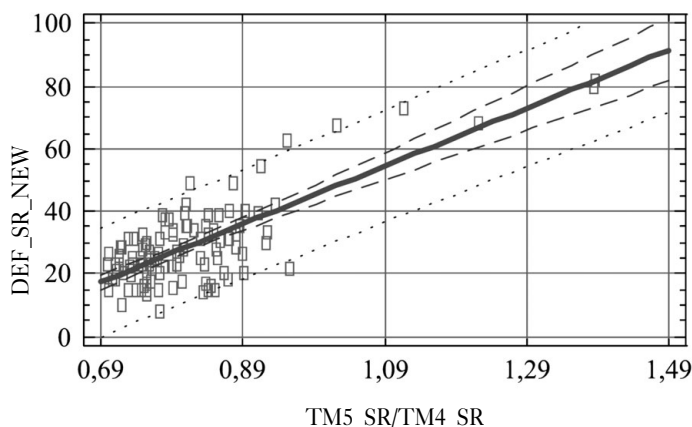
$$\text{DEF} = -47,0289 + 93,0731 \cdot \text{wskaźnik uszkodzenia}$$



Ryc. 2.

Wykres linii regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej i wartości TM7 jako zmiennej niezależnej wraz z zaznaczonym obszarem ufności linii regresji oraz obszaru ufności dla predykcji (wartości przewidywanych)

Single regression line for defoliation as a dependent variable and TM7 value as an independent variable with marked confidence area for regression line and confidence area for prediction (anticipated values)



Ryc. 3.

Wykres linii regresji pojedynczej defoliacji jako zmiennej zależnej i wskaźnika uszkodzenia jako zmiennej niezależnej wraz z zaznaczonym obszarem ufności linii regresji oraz obszaru ufności dla predykcji (wartości przewidywanych)

Single regression line for defoliation as a dependent variable and damage index as an independent variable with marked confidence area for regression line and confidence area for prediction (predicted values)

Ponieważ wartość P-value jest mniejsza od 0,01 istnieje statystycznie znaczący związek między defoliacją a wskaźnikiem uszkodzenia na poziomie ufności 99%, a odpowiednie wskaźniki przyjmują wartości: $R=0,77$, $R^2=60,05\%$, $SE=8,73$.

Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje, że równanie regresji ze wskaźnikiem uszkodzenia jako zmienną niezależną w 60,05% wyjaśnia zmienność zależnej DEF (defoliacji), a współczynnik korelacji wynoszący 0,77 wskazuje na umiarkowanie silną zależność między zmiennymi. Standardowy błąd oceny SE opisuje, że odchylenie standardowe rozkładu zmiennej defoliacji wynosi 8,73. Wyrażenie to określa dyspersję defoliacji w stosunku do linii regresji, a więc jest miarą zmienności czynnika losowego. Znając tę wartość, poziom istotności oraz liczbę stopni swobody można wyznaczyć dla poszczególnych wartości defoliacji przedziały ufności dla nowych wartości obserwacji wskaźnika uszkodzenia.

Określenie defoliacji na podstawie wielokanałowej analizy zdjęcia satelitarnego

Określono również regresję i korelację dla regresji wielokrotnej, która bada zależność między więcej niż dwiema zmiennymi mierzalnymi. Celem tej analizy było powiązanie zmiennej zależnej (defoliacji) funkcją regresji z wieloma naraz innymi zmiennymi mierzalnymi (wartościami odbić spektralnych). Oprócz równania regresji wielokrotnej był również obliczony kwadrat współczynnika korelacji wielokrotnej R^2 z uwzględnieniem stopni swobody, określającego siłę związku między zmienną zależną i zmiennymi niezależnymi, a także poziomy istotności współczynników korelacji poszczególnych zmiennych niezależnych.

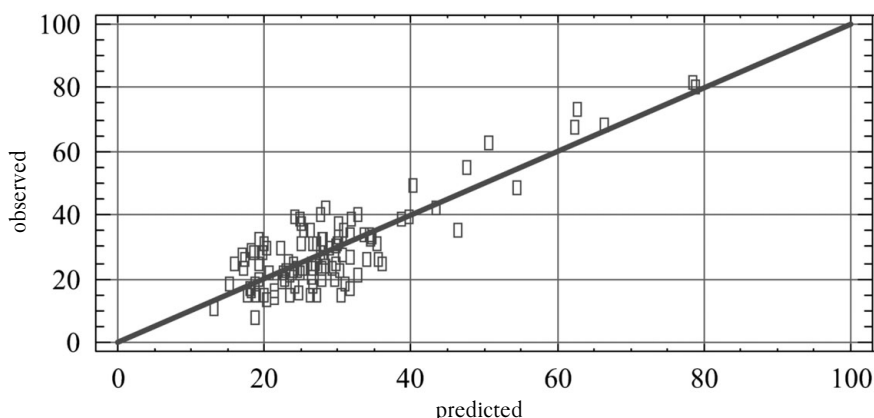
Równanie regresji wielokrotnej między defoliacją jako zmienną zależną, a siedmioma kanałami TM jako zmiennymi niezależnymi przedstawia się następująco:

$$DEF = 161,626 - 0,885156 \cdot TM1 + 3,59979 \cdot TM2 - 3,21512 \cdot TM3 - 1,57094 \cdot TM4 + 3,1199 \cdot TM5 - 1,06739 \cdot TM6 + 0,658071 \cdot TM7$$

Ponieważ wartość P-value jest mniejsza od 0,01 istnieje statystycznie znaczący związek między defoliacją a wartościami kanałów TM na poziomie ufności 99%, a odpowiednie wskaźniki przyjmują wartości: $R^2=73,08\%$, R^2 (z uwzględnieniem liczby swobody)=71,20%, $SE=7,38$, $MAE=5,73$.

Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje, że równanie regresji wyjaśnia zmienność defoliacji w 73,08%, a współczynnika determinacji R^2 poprawionego o liczbę stopni swobody (bardziej odpowiedni do porównania z modelami o innej liczbie niezależnych zmiennych) wynosi 71,20%. Standardowy błąd oceny SE wyraża, że odchylenie standardowe rozkładu zmiennej defoliacji wynosi 7,38%. Wyrażenie to określa dyspersję defoliacji w stosunku do linii regresji, a więc jest miarą zmienności czynnika losowego. Znając tę wartość, poziom istotności oraz liczbę stopni swobody można wyznaczyć dla poszczególnych wartości defoliacji przedziały ufności dla wartości przewidywanych.

Średni błąd absolutny MAE, obliczany dla wyznaczanego równania regresji wielokrotnej, jest wartością średnią residuów (składowików resztowych $[Y_i - \hat{Y}_i]$, gdzie Y_i jest wartością pomierzoną, a \hat{Y}_i wartością obliczoną z równania regresji dla poszczególnych wartości X_i). Im mniejsza jest wartość średniego błędu absolutnego MAE, tym model regresji w bardziej precyzyjny sposób podaje przewidywane wartości \hat{Y} . Wartość średniego błędu absolutnego MAE w tym przypadku określa średnią różnicę między wartością defoliacji pomierzonej, a wartością obliczoną na podstawie równania regresji wielokrotnej, w której zmiennymi niezależnymi były wartości odbić spektralnych TM.



Ryc. 4.

Wykres wartości przewidywanych przedstawiający zależność wartości defoliacji obserwowanej od wartości defoliacji obliczonych z równania regresji wielokrotnej (wykorzystującej jako zmienne niezależne wartości odbić spektralnych 7 kanałów TM)

Diagram of predicted values illustrating the relationship between the observed defoliation and defoliation calculated from the multiple regression equation (using spectral reflections of 7 TM channels as independent variables)

W równaniu regresji, gdzie zmiennymi niezależnymi było 7 kanałów TM błąd MAE wynosi 5,73, a więc wartość defoliacji pomierzonej i obliczonej różni się średnio o 5,7 % ubytku aparatu asymilacyjnego.

Analizę regresji wielokrotnej przeprowadzono również dla różnych kombinacji kanałów. Okazało się, że współczynnik determinacji R^2 poprawiony o liczbę stopni swobody w regresji wielokrotnej defoliacji mającej za zmienne niezależne kanały TM4, TM5, TM6 wynosi 71,56%.

Równanie regresji wielokrotnej między defoliacją jako zmienną zależną, a kanałami TM4, TM5, TM6 jako zmiennymi niezależnymi przedstawia się następująco:

$$DEF = 123,717 - 1,41305 \cdot TM4 + 3,2391 \cdot TM5 - 1,07399 \cdot TM6$$

gdzie:

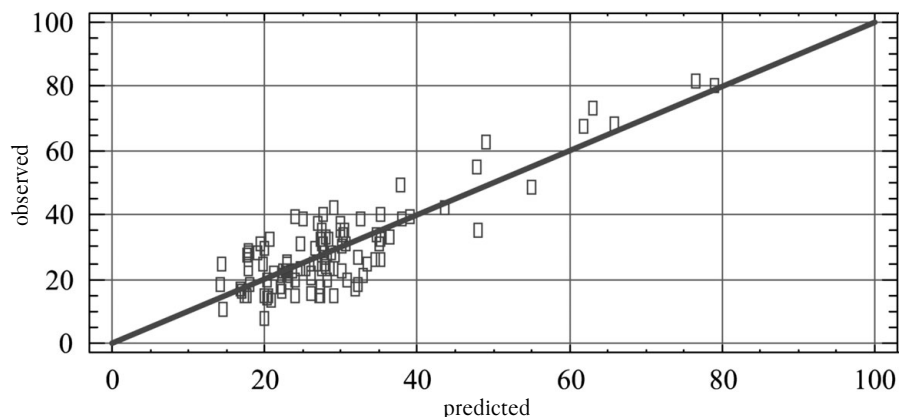
$$R^2=72,36\%, R^2 \text{ (z uwzględnieniem liczby swobody)}=71,56\%, SE=7,33, MAE=5,8.$$

Wartość współczynnika determinacji R^2 wskazuje, że równanie regresji wyjaśnia zmienność defoliacji w 72,36%, a współczynnika determinacji R^2 poprawiony o liczbę stopni swobody (bardziej odpowiedni do porównania z modelami o innej liczbie niezależnych zmiennych) wynosi 71,56%. Standardowy błąd oceny SE wyraża, że odchylenie standardowe rozkładu zmiennej defoliacji wynosi 7,33%. Wyrażenie to określa dyspersję defoliacji w stosunku do linii regresji, a więc jest miarą zmienności czynnika losowego. Znając tę wartość, poziom istotności oraz liczbę stopni swobody można wyznaczyć dla poszczególnych wartości defoliacji przedziały ufności dla wartości przewidywanych.

W równaniu regresji, gdzie zmiennymi niezależnymi były kanały TM4, TM5, TM6 średni błąd absolutny MAE wynosi 5,81, a więc wartość defoliacji pomierzonej i obliczonej różni się średnio o 5,8 % ubytku aparatu asymilacyjnego.

Podsumowanie

Przedstawione analizy wykazują, iż odbicie spektralne, rejestrowane zarówno w kanałach surowych, jak i wagowanych jest wysoko skorelowane z defoliacją drzewostanów. Jak wynika



Ryc. 5.

Wykres wartości przewidywanych przedstawiający zależność wartości defoliacji obserwowanej od wartości defoliacji obliczonych z równania regresji wielokrotnej (wykorzystującej jako zmienne niezależne wartości odbić spektralnych TM4, TM5, TM6)

Diagram of predicted values illustrating the relationship between the observed defoliation and defoliation calculated from the multiple regression equation (using spectral reflections of TM4, TM5, TM6)

z tych analiz zdjęcia satelitarne mogą służyć do określania klas defoliacji drzewostanów sosnowych, do czego najbardziej przydatne są kanały TM 4, 5 i 7 oraz wskaźnik uszkodzeń.

Teoretyczne rozważania wykazały, że TM 7 pozwala na wydzielenie klas o defoliacji: 0-19%, 20-39%, 40-59%, 60-79%, 80-100%. Jednakże fakt, iż na średnią wartość spektralną, rejestrowaną przez skaner satelity, wpływa nie tylko stan igliwia, ale także inne elementy drzewostanu, każe zmodyfikować to teoretyczne podejście. W praktyce, jak wykazują zaprezentowane analizy, możliwe jest (w optymalnych warunkach) wydzielenie trzech klas defoliacji: 0-50%, 50-70% i powyżej 70%.

Znajomość charakterystyk spektralnych poszczególnych klas defoliacji, a także kanałów, najsilniej skorelowanych z defoliacją, pozwoliły na wykonanie klasyfikacji zdjęcia satelitarne pod kątem wydzielenia klas drzewostanów sosnowych nieuszkodzonych oraz zdefoliowanych. Jak już uprzednio wspomniano, w wyniku przetworzeń wydzielono drzewostany sosnowe z pozostałej części lasów Puszczy Kozienickiej. Wśród drzewostanów sosnowych dokonano podziału na drzewostany sosnowe nieuszkodzone oraz drzewostany sosnowe, których charakterystyki spektralne kwalifikują je do klasy defoliacji od 50% do 70% oraz drzewostany o defoliacji większej od 70%.

W wyniku klasyfikacji, aż w 540 wydzieleniach drzewostanowych, na całkowitą liczbę 6626 wydzieleni (występujących według danych inwentaryzacyjnych na analizowanym terenie Puszczy Kozienickiej), znalazły się piksele (jeden lub więcej) o wartościach spektralnych charakterystycznych dla defoliacji. Wśród tych 540 wydzieleni, w 522 – znalazły się piksele wskazujące na defoliację od 50% do 70%, a w 98 wydzieleniach – powyżej 70%. Wydzielenia o defoliacji od 50% do 70% określano jako drzewostany osłabione, natomiast wydzielenia, reprezentujące klasę defoliacji powyżej 70% nazwano drzewostany silnie osłabione.

Drzewostany uszkodzone występowały przede wszystkim w obrębach Jedlnia (Nadl. Radom), Kozienice (Nadl. Kozienice), Zwolen (Nadl. Zwolen) i Garbatka (Nadl. Zwolen). Największa powierzchnia drzewostanów uszkodzonych (żery boreczników) występowała w obrębie Jedlnia. Następnym obrębem zajmującym przez drzewostany uszkodzone również dużą powierzchnię jest obręb Kozienice, położony najbliżej elektrowni Kozienice.

Drzewostany silnie osłabione występowały podobnie jak drzewostany osłabione głównie w obrębach Jedlnia i Kozienice, a także w obrębie Zwoleń. Na niewielkiej powierzchni (1,48 ha) zostały sklasyfikowane drzewostany silnie uszkodzone w obrębie Garbatka. W obrębach Pionki i Zagożdżon natomiast, powierzchni takich nie odnotowano.

W wyniku odpowiednich przetworzeń zdjęć satelitarnych, bazujących na przedstawionych tutaj analizach statystycznych, możliwe stało się rozpoznanie drzewostanów o różnym stopniu defoliacji.

Zastosowanie systemu informacji przestrzennej pozwoliło na kartograficzną prezentację rozkładu uszkodzeń drzewostanów na tle mapy leśnej, a także na wykonanie analiz przestrzennych, które pozwoliły scharakteryzować drzewostany osłabione i silnie osłabione.

Parametry drzewostanów osłabionych i silnie osłabionych, wyróżnionych na zdjęciach satelitarnych są również przedstawione w zbiorczym zestawieniu (tab. 3), w którym znajdują się ich wartości średnie, jak również średnie wartości dla wszystkich analizowanych w Puszczy Kozienickiej. Jak wynika z tej tabeli średnie parametry drzewostanów uszkodzonych, z wyjątkiem zwarcia, nie odbiegają od wartości średnich dla drzewostanów całej Puszczy Kozienickiej.

Tabela 3.

Średnie wartości parametrów wszystkich drzewostanów Puszczy Kozienickiej oraz drzewostanów uszkodzonych

Mean values for parameters of all stands in Kozienicka Forests and damaged stands

Parametr		Wartości średnie dla drzewostanów sosnowych Puszczy Kozienickiej	Wartości średnie dla drzewostanów osłabionych	Wartości średnie dla drzewostanów silnie osłabionych
Wiek	[lata]	50	54	49
Pierśnica	[cm]	19	19,5	16
Wysokość	[m]	16	16	14
Zasobność drzewostanu	[m ³ /ha]	190	209	176
Dominujące zwarcie		przerwane (44%) umiarkowane (42%)	umiarkowane (58%) przerwane (27%)	umiarkowane (73%) pełne (8%)
Powierzchnia	[ha]	23180,69	273,11	45,94
Procentowy udział powierzchni		100%	1,20%	0,20%

Wnioski

Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy wskazują na to, że techniki teledetekcji mogą być operacyjnym narzędziem monitorowania obszarów pokłeskowych w lasach. Użyteczność technik teledetekcji nie ogranicza się jedynie do zdjęć lotniczych, już teraz dosyć popularnych w monitorowaniu środowiska. Rosnąca dostępność do wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych oraz specjalistycznych oprogramowań do numerycznego przetwarzania zdjęć, pozwalają na coraz powszechniejsze ich stosowanie. A jak wykazały przedstawione badania, zdjęcia satelitarne mogą być stosowane do lokalizacji lasów uszkodzonych/zdefoliowanych (jako skutek degradacji w wyniku przemysłowych zanieczyszczeń powietrza, choroby łańcuchowej, pożaru czy gradacji szkodników owadzi).

Przedstawione w tej pracy wyniki badań wskazują, że w przypadku monitorowania defoliacji drzewostanów sosnowych możliwe jest wydzielenie klas kondycji lasu opisywanych defoliacją: 0-50%, 50-70% i powyżej 70%.

Stratyfikacja kondycji lasów przez ocenę ich defoliacji na podstawie danych satelitarnych możliwa jest jedynie wtedy, gdy zastosuje się zdjęcia wykonane w zakresach średniej i bliskiej podczerwieni. Takie wymagania spełniają jedynie: skaner Thematic Mapper, zainstalowany na satelitach serii Landsat oraz skaner HRVIR, zainstalowany na najnowszych satelitach serii SPOT.

Literatura

- Bruchwald A. 1994. Statystyka matematyczna dla leśników. SGGW, Warszawa.
- Grzyb M., Borecki T. 1994. Dokumentacja oceny uszkodzenia drzewostanów sosnowych w nadleśnictwach: Zwoleni, Koziernice, Radom, wykonanej w ramach grantu KBN Nr 9 S605 025 06.
- Lasy Państwowe. 1998. Sprawozdanie z działalności za rok 1997.
- PIOS. 1994. Ocena wpływu zagrożeń biotycznych (szkodników leśnych i chorób infekcyjnych) na stan lasów w Polsce w latach 1970-1992. Warszawa.

SUMMARY

The use of satellite imagery in assessing the extent of insect outbreaks

The paper focuses on the use of Landsat-Thematic Mapper satellite images to monitor the feeding of sawflies (*Diprionidae*) in the Koziernicka Forests in 1994 (KBN grant no. 9 T12E 02514). The geographic information system used in the study allowed for the integration of the inventory and imagery data, as well as image processing, photo-interpretation, classification and analysis of spatial information.

The integration of images, cartographic and descriptive data using the geographic information system allowed to carry out statistical analyses defining the potential of identification of pine stands with different defoliation degree in accordance with the satellite image-based classification.

The analyses were made for seven Landsat TM channels to find the equality of the means for the adopted defoliation classes as well as the ratio channels: TM4/TM3 so called biomass index, TM5/TM4 – damage index, $BR = \sqrt{(TM3)^2 + (TM4)^2}$ britness index and $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$ – vegetation index.

The results presented in this paper indicate that there is possibility to stratify pine stands into stand condition classes measured by the defoliation level: 0-50%, 50-70% and above 70%.

The stratification of stand condition classes by their defoliation level is possible only when using mid- and near-infrared ranges of electromagnetic spectrum. Only the Thematic Mapper scanner mounted on Landsat-series satellites and the HRVIR scanner mounted on the most recent SPOT-series satellites meet this requirement.