

**JAROSŁAW ZAWADZKI, CHRIS J. CIESZEWSKI, MICHAŁ ZASADA**

## Zastosowanie metod geostatystycznych do wyznaczania cech taksacyjnych i parametrów biofizycznych lasów technikami teledetekcyjnymi

The use of geostatistical methods for remote-sensing based determination of inventory measures and biophysical parameters of forests

### ABSTRACT

Despite constant advances in geostatistics and its many successful applications in remote sensing and forestry, it remains a relatively unknown field in Poland. The main aim of this paper is to show applicability of various geostatistical techniques in estimation of inventory measures and biophysical parameters of forests. We show examples of practical applications without going into the complex theoretical bases of the described methods. We also present a wide selection of the most important papers in the subject.

### KEY WORDS

semivariance, semivariogram, textural classification, remote sensing, Landsat TM

### Wstęp

Teledetekcja lotnicza lub satelitarna stanowi efektywną i stosunkowo tanią metodę badania lasów w krótkim czasie na dużych obszarach [Ciołkosz i Kęsik 1989; Cambell 1994; Wynne i in. 2000], stosowaną coraz częściej również w polskim leśnictwie [Mozgawa i in. 1994; Popławski i Zawila-Niedźwiecki 1995; Mozgawa 2000]. Ważną zaletą danych teledetekcyjnych jest łatwość ich przetwarzania za pomocą różnorodnych narzędzi informatycznych, takich jak systemy informacji przestrzennej, bazy danych, programy do obróbki obrazów, programy statystyczne, itp. Badania zdjęć lotniczych i satelitarnych obszarów zalesionych oparte są zarówno na analizie ich własności spektralnych, jak i informacji przestrzennej (tekstury). Struktura przestrzenna zdjęć lotniczych czy satelitarnych obszarów leśnych wykazuje zazwyczaj znacznie większy stopień skomplikowania niż struktura zdjęć innych obiektów, np. utworów geologicznych, pomiarów temperatury oceanów, itp. Dlatego teledetekcja obszarów leśnych przy zastosowaniu metod geostatystycznych charakteryzuje się dużą złożonością oraz wieloma specyficznymi cechami

[Cohen i in. 1990; Wulder 1998a].

W celu efektywnego wykorzystania informacji przestrzennej istniejącej w zdjęciach lotniczych i satelitarnych rozwinięto wiele różnorodnych technik analitycznych. Szczególnie ważne miejsce pomiędzy nimi zajmują metody

#### JAROSŁAW ZAWADZKI

Zakład Metod Matematycznych  
Instytut Systemów Inżynierii Środowiska PW  
ul. Nowowiejska 20  
00-661 Warszawa  
jarek97@yahoo.com

#### CHRIS J. CIESZEWSKI

D.B. Warnell School of Forest Resources  
University of Georgia  
Athens, GA 30602 USA  
biomat@uga.edu

#### MICHAŁ ZASADA

Samodzielny Zakład Dendrometrii i Nauki  
o Produkcyjności Lasu, Wydział Leśny SGGW  
ul. Nowoursynowska 159  
02-787 Warszawa  
zasada@delta.sggw.waw.pl

geostatystyczne, które pozwalają na elastyczne podejście do analizy korelacji przestrzennych. Do podstawowych zagadnień, którymi zajmują się metody geostatystyczne, należą interpretacja oraz przewidywanie rozkładów przestrzennych badanych zjawisk. Teoretyczne podstawy metod geostatystycznych, zilustrowane przykładami wykorzystującymi zdjęcia niskorozdzielczej sondy satelitarnej Landsat TM [ERDAS Field Guide 1990; Vogelmann i in. 1998], zostały zaprezentowane w artykule Zawadzkiego i in. [2003]. W pracy tej szczegółowo opisano parametry semiwariogramów obrazów satelitarnych obszarów leśnych oraz ich interpretację. Niniejszy artykuł stanowi kontynuację wspomnianej pracy i prezentuje zagadnienie wykorzystania metod geostatystycznych w celu określania cech taksacyjnych drzewostanów i parametrów biofizycznych lasów technikami zdalnymi. Pomimo ciągłego rozwoju i wielu udanych zastosowań, również w leśnictwie, geostatystyka ciągle pozostaje w Polsce stosunkowo słabo poznana dziedziną wiedzy. Celem autorów było zaprezentowanie zastosowania metod geostatystycznych do inwentaryzacji lasów oraz do estymacji ich parametrów biofizycznych oraz przedstawienie wybranych przykładów praktycznych bez zagłębiania się w złożone aspekty teoretyczne tych metod. W niniejszej pracy zaprezentowano również szeroki wybór najważniejszych prac z tej dziedziny z podziałem tematycznym. Ze względu na złożoność zagadnienia, w poniższym przeglądzie pominięto prace związane z zastosowaniami symulacji geostatystycznych.

### **Interpretacja semiwariancji obliczanych na podstawie zdjęć lotniczych i satelitarnych obszarów leśnych**

Sens matematyczny klasycznych parametrów semiwariancji takich jak zakres, próg oraz efekt samorodka, został opisany w języku polskim m.in. w pracy Zawadzkiego i in. [2003]. W pracy tej opisano również czynniki wpływające na postać semiwariancji obliczanych ze zdjęć satelitarnych obszarów leśnych, omówiono proces modelowania semiwariancji empirycznej, oraz zaprezentowano takie miary ciągłości przestrzennej, jak korelogram, semiwariancję krzyżową i madogram. Czytelnika zainteresowanego szczegółami odsyłamy do wspomnianej pracy lub do obszernych monografii w języku angielskim [np. Isaaks i Srivastava 1989].

Ze względu na powszechność stosowania, w niniejszej pracy skoncentrowano się prawie wyłącznie na analizie semiwariancji. Zależność pomiędzy parametrami semiwariancji, a cechami taksacyjnymi drzewostanów obserwowanych na zdjęciach uzyskanych technikami zdalnymi związana jest ze złożonymi własnościami badanych ekosystemów, jak również z warunkami przeprowadzania obserwacji (zamgleniem w czasie wykonywania zdjęcia, wysokością na jakiej znajduje się sonda, kątem obserwacji, kątem nachylenia terenu, itp.) W początkowym okresie badań semiwariancji zdjęć lotniczych i satelitarnych obszarów zalesionych starano się znaleźć teoretyczne zależności pomiędzy parametrami semiwariancji a własnościami lasów [np. Atkinson 1993, 1997; Curran 1988; Cohen i in. 1990; Jakomulska i Clarke 2001]. Rezultatem tych wysiłków stało się powszechne zrozumienie, że parametry semiwariancji nie opisują wyłącznie własności badanego lasu, ale raczej złożony proces oddziaływania fali elektromagnetycznej ze środowiskiem leśnym. Główne wnioski z tych prac, dotyczące semiwariancji zdjęć satelitarnych obszarów zalesionych, można streścić następująco:

1. Jedynie w bardzo prostych (np. modelowych) sytuacjach można znaleźć nieskomplikowane, analityczne zależności pomiędzy parametrami biofizycznymi lasów a parametrami semiwariancji.
2. Badając wymienione tutaj zależności należy oprócz własności badanego lasu uwzględnić czynniki zewnętrzne wpływające na semiwariancję. Czynniki te mogą zależeć od warunków obserwacji czy takich parametrów aparatury pomiarowej, jak długość fali elektromagnetycznej rejestrowanej przez sondę satelitarną.

3. Wielkością podstawową do zrozumienia charakteru semiwariancji jest zdolność rozdzielcza wpływająca na wielkość kroku (wektora jednostkowego) z jaką następuje próbkowanie przestrzenne badanych lasów.
4. Najczęściej można znaleźć jedynie statystyczną zależność między badanymi własnościami lasu a parametrami semiwariancji.
5. Modelowanie semiwariancji może być niecelowe oraz praktycznie niemożliwe. W niektórych sytuacjach dokładne parametry modelu uzyskuje się zbyt dużym kosztem czasu obliczeniowego. W tym wypadku lepiej jest określić parametry semiwariancji w sposób przybliżony oraz wyznaczyć błędy szacunku.
6. Oprócz klasycznych parametrów semiwariancji takich jak próg, efekt samorodka oraz zakres, można dodatkowo stosować inne parametry semiwariancji, jak wartości lub nachylenie semiwariancji w poszczególnych krokach, średnie wartości semiwariancji, różnorodne miary związane z kształtem semiwariancji, itd.

### Cechy taksacyjne a parametry biofizyczne lasu

Lasy są skomplikowanym ekosystemem o niezwykle różnorodnej strukturze przestrzennej będącej wynikiem konkurencji roślin o wodę, światło oraz czynniki pokarmowe [Kozłowski i in. 1991]. Zrozumienie wpływu różnorodnych czynników środowiskowych na strukturę lasu pozwala również analizować te czynniki podczas badań struktury przestrzennej lasów. W ten sposób, badając strukturę lasów, można uzyskać stosunkowo dokładne informacje na temat chemizmu gleb, hydrologii terenu, itp. Zrozumienie struktury lasu pozwala monitorować, modelować i przewidywać takie procesy, jak wzajemne oddziaływanie lasu i atmosfery, produktywność lasów oraz ich stan zdrowotny. Zmiany struktury przestrzennej lasów mogą dostarczać cennej informacji na temat zanieczyszczenia środowiska naturalnego, zmian klimatycznych, inwazji szkodników, itp. [Fabiszewski i Żołnierz 1993; Gillis i Leckie 1996; Grabczyński 2000; Orzel i Rutkowska 2000; Rymer-Dudzińska 2001, itp.].

Lasy mogą być charakteryzowane przy użyciu różnorodnych cech i parametrów. Typowymi danymi taksacyjnymi gromadzonymi podczas inwentaryzacji lasu są na przykład miąższość, pierścicowe pole przekroju, skład gatunkowy, liczba drzew na jednostkę powierzchni, przeciętna wysokość, wiek, zwarcie koron, biomasa, itp. Z kolei parametry biofizyczne lasu to wskaźniki, które dostarczają pewnej sumarycznej informacji na temat produktywności, struktury czy wielkości zasobów. Parametry biofizyczne lasu powstały jako wynik dążeń do syntetycznego opisu lasów za pomocą niewielkiej liczby parametrów. Typowymi parametrami biofizycznymi są na przykład powierzchnia projekcyjna aparatu asymilacyjnego czy produkcja pierwotna [Wulder i in. 1996a, 1996b; Wulder 1998a, 1998b; Wulder i in. 1998a, 1998b, 1999, 2000; Holmgren i in. 2000]. Parametry biofizyczne lasu można stosować do różnych typów lasu oraz można je wykorzystywać do modelowania lasów w skali regionalnej. Parametry te pozwalają zatem opisać skomplikowaną strukturę lasu za pomocą pojedynczej miary lub kilku miar, które są najczęściej stosunkowo dobrze skorelowane z bardziej szczegółowymi charakterystykami lasów, lub które dobrze opisują zjawiska zachodzące w środowisku leśnym. Jedną z głównych zalet parametrów biofizycznych lasu jest to, że można je wyznaczyć w sposób zdalny znacznie łatwiej niż szczegółowe cechy taksacyjne. Wynika to z faktu, że parametry biofizyczne są najczęściej dobrze skorelowane z wielkościami możliwymi do obserwacji za pomocą różnorodnych środków technicznych, np. przy użyciu technik lotniczych lub satelitarnych. Na przykład powierzchnia projekcyjna aparatu asymilacyjnego jest ściśle związana ze stosowanymi bardzo często w teledetekcji wskaźnikami wegetacyjnymi, czyli nieskomplikowanymi funkcjami współczynników odbicia

pasem promieniowania elektromagnetycznego wykorzystanych w danej sondzie satelitarnej. Jednym z najbardziej znanych jest znormalizowany współczynnik wegetacyjny [Normalized Difference Vegetation Index, NDVI], obliczany na podstawie współczynnika odbicia dla pasma bliskiej podczerwieni i widzialnego pasma czerwonego [Rouse 1973; Tucker 1986; De Fries 1994; Eldvige i Chen 1996]. Często stosowanymi współczynnikami wegetacyjnymi są również skorygowany wskaźnik wegetacyjny NDVIc [Nemani i in. 1993] czy stosunek współczynnika odbicia dla pasma średniej podczerwieni i widzialnego pasma czerwonego [Jordan 1969].

Wraz z rozwojem technik satelitarnych i wzrostem ich dokładności pojawia się możliwość coraz dokładniejszego wyznaczania cech taksacyjnych i parametrów biofizycznych przez uwzględnienie informacji przestrzennej (tekstury) obecnej na zdjęciach lotniczych lub satelitarnych. Informacja przestrzenna staje się niezwykle cenna zwłaszcza w przypadku, gdy spektralne charakterystyki poszczególnych grup pikseli reprezentujących różne drzewostany są bardzo zbliżone. Podobna sytuacja istnieje w przypadku, kiedy piksele przedstawiające poszczególne drzewostany wykazują bardzo dużą zmienność jasności spektralnej. Typowym sposobem uwzględnienia informacji przestrzennej jest stosowanie parametrów semiwariancji jako kolejnych parametrów w regresji wielokrotnej lub jako parametrów w procedurach klasyfikacyjnych.

### **Planowanie pomiarów terenowych w celu wyznaczenia parametrów semiwariancji**

Powiązanie szczegółowych cech drzewostanu oraz parametrów biofizycznych badanego obszaru z parametrami semiwariancji przebiega najczęściej w trzech etapach. Etap pierwszy polega na wykonaniu w terenie, na ustalonym obszarze próbnym, dokładnych pomiarów rozkładu przestrzennego badanych cech czy parametrów biofizycznych. Etap drugi polega na wykonaniu obserwacji satelitarnej obszaru próbnego oraz obliczeniu semiwariancji na danym obszarze przy użyciu jasności spektralnych pikseli zdjęcia satelitarnego lub wskaźników wegetacyjnych jako wartości zmiennych. Etap trzeci polega na znalezieniu analitycznych lub statystycznych zależności pomiędzy parametrami semiwariancji a badanymi parametrami biofizycznymi lasu. Znalezione w ten sposób zależności wykorzystuje się do analizy zdjęć satelitarnych na większych obszarach, np. techniką ruchomego okna. Powiązanie cech drzewostanu oraz parametrów biofizycznych lasu z parametrami semiwariancji przebiega zatem podobnie jak w przypadku wykorzystania informacji spektralnej do klasyfikacji nadzorowanej. Dokładne obliczenia semiwariancji wymagają jednak bardziej precyzyjnego zaplanowania wielkości i kształtu powierzchni pomiarowych, gęstości próbkowania, itp., niż ma to miejsce w przypadku użycia tylko informacji spektralnej. Optymalna sytuacja z punktu widzenia dokładności obliczeń ma miejsce wówczas, gdy parametry semiwariancji wyznaczamy z obszaru próbnego specjalnie zaplanowanego w tym celu. Należy przy tym uwzględnić następujące czynniki:

1. Stosowaną zdolność rozdzielczą sondy, która decyduje o dokładności obserwacji. Zdolność rozdzielcza ma wpływ na wiele parametrów semiwariancji, np. na wielkość efektu samorodka. Efekt samorodka rośnie wraz ze zmniejszaniem się przestrzennej zdolności rozdzielczej sondy satelitarnej [Woodcock i in. 1988a, 1988b; Atkinson 1993]. Zbyt duży efekt samorodka może więc wskazywać na konieczność zwiększenia zdolności rozdzielczej sondy satelitarnej użytej do rozwiązywania danego problemu.
2. Wielkość kroku jednostkowego z jakim obliczana jest semiwariancja. W celu ograniczenia kłopotliwych pomiarów naziemnych warto rozważyć stosowanie zmiennego kroku do obliczania semiwariancji [np. Gamma Design Software, instrukcja programowania GS+ 1998].

3. Wielkość zakresu oddziaływania, czyli odległości, powyżej której wartości jasności spektralnej pikseli nie są skorelowane przestrzennie. Obszar próbny nie powinien być mniejszy niż zakres oddziaływania [np. Wallace i in. 2000].
4. Anizotropię przestrzenną badanego parametru, która powinna być uwzględniona przy projektowaniu wymiarów powierzchni próbnej [np. Isaaks i Srivastava 1989].

Najczęściej jednak obliczenia semiwariancji wykonuje się w sposób uproszczony na podstawie jasności spektralnej pikseli (lub wskaźników wegetacyjnych) powiązanych z cechami drzewostanów lub parametrami biofizycznymi na niewielkich obszarach próbnych odpowiadających jednemu lub kilku pikselom [Zawadzki i in. 2003]. Tęgo typu obliczenia semiwariancji mogą być obciążone większymi błędami, gdyż związek pomiędzy jasnością spektralną pikseli na zdjęciu satelitarnym a danym parametrem biofizycznym ma charakter statystyczny. Nie można np. stwierdzić, że danej wartości spektralnej pikseli odpowiada ściśle określona wartość pierśniowego pola przekroju lub ściśle określona liczba drzew na jednostkę powierzchni. Z kolei obliczenia takie są znacznie bardziej ekonomiczne ze względu na łatwiejsze pomiary w terenie.

Warto podkreślić również, że zaprezentowane etapy określania cech lasów mogą się różnić, czasami nawet istotnie, od konkretnych badań w rzeczywistości. Wynikać to może na przykład z wcześniej posiadanych informacji na temat rozkładu przestrzennego badanego parametru, częściowej znajomości zależności pomiędzy cechami drzewostanu a parametrami strukturalnymi semiwariancji, stosowaniu bardziej specyficznych technik geostatystycznych takich jak np. kokriging [Deutch i Journel 1998]. Ostatnio, w związku z rozwojem technik satelitarnych i ich dokładności, możliwe stało się w niektórych sytuacjach uproszczenie pierwszego, uciążliwego etapu związanego z pomiarami terenowymi.

### **Przykłady zastosowania semiwariancji do badania lasów przy użyciu teledetekcji**

Poniżej zaprezentowano dwa opisane w literaturze przykłady zastosowania semiwariancji (w połączeniu z innymi miarami charakteryzującymi teksturę zdjęcia) do badania lasów przy użyciu teledetekcji. Wybór przykładów był dokonany tak, aby podkreślić korzyści ze stosowania metod geostatystycznych oraz ich komplementarność w stosunku do analizy informacji spektralnej. Ponieważ podstawowe pojęcia i metody geostatystyczne zostały dokładnie opisane w pracy Zawadzkiego i in. [2003], w prezentowanych przykładach nie opisano ich ponownie.

**PRZYKŁAD 1. WYKORZYSTANIE METOD GEOSTATYSTYCZNYCH DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW BIOFIZYCZNYCH LASÓW.** Istotne korzyści związane z wykorzystaniem metod geostatystycznych w celu wyznaczenia parametrów biofizycznych zostały zademonstrowane przez Wuldera i in. [1998] na przykładzie wartości LAI. Badania dotyczyły wyznaczenia LAI w lasach liściastych i mieszanych prowincji Nowy Brunswik we wschodniej Kanadzie. Ze względu na dużą powierzchnię badanych lasów (420 000 ha) należało rozwinąć relatywnie tanią technikę wyznaczenia LAI za pomocą technik zdalnych. Ogromny obszar badań oraz pożądana wysoka dokładność metody badań wymagała powiązania precyzyjnych pomiarów terenowych z pomiarami lotniczymi pozwalającymi monitorować duże powierzchnie w krótkim czasie. Badania wykonano za pomocą sondy CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), która gwarantowała odpowiednio dużą zdolność rozdzielczą i spektralną.

Badania terenowe odbywały się na 20 powierzchniach próbnych. Obszar powierzchni próbnych w starych drzewostanach wynosił 400 m<sup>2</sup>, a w młodych 49 m<sup>2</sup> i 100 m<sup>2</sup> (w zależności od zagęszczenia). Dla każdego drzewa rosnącego na powierzchni próbnej notowano gatunek,

pierśnicę oraz współrzędne. Aby dokładnie oszacować LAI w terenie wykorzystano teorię modelu powierzchni przewodzącej drzewa Shinozaki (pipe model theory), która oparta jest na założeniu, że jednostka wagi aparatu asymilacyjnego jest zasilana przez określony przekrój poprzeczny biału gałęzi w koronie drzewa [Shinozaki i in. 1964a, 1964b]. Pole przekroju poprzecznego biału drzewa na pierśnicy oraz wymiary korony były mierzone dla około 10 drzew próbnych ścinanych na każdym badanym stanowisku. Następnie wyznaczono równanie regresji pomiędzy LAI, a polem przekroju poprzecznego biału na pierśnicy:  $LA=0,1418 \cdot SA^{0,9921}$ . Współczynnik determinacji linii regresji był bardzo wysoki i wynosił  $R^2=0,95$ .

Badane stanowiska były fotografowane za pomocą spektrografu CASI przymocowanego do samolotu lecącego na wysokości 700 m. Do badań wykorzystano zakres widzialny – czerwony (640,9-649,8 nm) oraz zakres podczerwony (748,8-752,4 nm), gdyż zakresy te zapewniały najlepszą jakość zdjęć. Zdjęcia lotnicze były poddawane dodatkowej obróbce w celu skorygowania efektów rozpraszania światła w atmosferze, redukcji szumów aparatury itp.

Na podstawie wartości jasności spektralnej pikseli obliczane były wartości NDVI odpowiadające poszczególnym pikselom. Miary związane z teksturą zdjęcia były obliczane dla zdjęć wykonanych w pasmach czerwonym i podczerwonym z wykorzystaniem techniki ruchomego okna o boku równym odpowiednio 9 i 7 pikselom. Rozmiar ruchomego okna został określony na podstawie średniego zakresu semiwariancji. W ruchomym oknie obliczano następujące miary związane z semiwariancją: efekt samorodka, zakres, próg, nachylenie wariacji w kolejnych krokach (aż do osiągnięcia progu) i średnia semiwariancja (aż do osiągnięcia progu). Dodatkowo techniką ruchomego okna obliczono różnorodne statystyczne miary związane z teksturą, jak na przykład: średnia wartość jasności spektralnej pikseli w oknie, odchylenie standardowe wartość jasności spektralnej pikseli w oknie, minimalną i maksymalną wartość w oknie, rozstęp, odmienność, itp. Miary te zostały szczegółowo opisane przez Haralicka [1979]. Wyliczone wartości parametrów semiwariancji (lub ich kombinacji) oraz parametrów teksturalnych wykorzystano jako zmienne niezależne w równaniach regresji liniowej wielokrotnej do wyznaczenia LAI. Następnie badano wartość współczynnika determinacji  $R^2$ , krytyczną wartość współczynnika determinacji i jego błąd standardowy. W tabeli 1 przedstawiono najlepsze otrzymane modele do wyznaczania LAI w lasach mieszanych, wykorzystujące zarówno informację spektralną (w postaci NDVI), jak i informację przestrzenną (parametry semiwariancji oraz statystyczne miary tekstury). Na podstawie danych tabeli 1 widać wyraźnie, że uwzględnienie informacji przestrzennej istotnie poprawia własności modelu. Warto zwrócić uwagę na ogromny wręcz wzrost współczynnika determinacji z 0,01 do 0,44 w momencie uwzględnienia w modelu regresji efektu

**Tabela 1.**

Wyniki regresji liniowej dla lasów mieszanych

Linear regression results for mixed forests

Zmienne	$R^2$	$R^2_{kryt}$	SE	Model do wyznaczania LAI
NDVI	0,01	0,23	1,62	$-5,21NDVI + 8,84$
NDVI + S	0,44	0,22	1,29	$10,83NDVI - 3,937(NUG\_R) - 1,02$
NDVI + 1R	0,11	0,22	1,62	$-1,17NDVI - 0,516(MAX\_R) + 10,04$
NDVI + 2R	0,36	0,22	1,37	$-5,39NDVI + 0,047(DIS\_IR) + 5,07$
NDVI + S + 2R	0,51	0,21	1,29	$11,4NDVI - 0,078(DIS\_IR) - 4,29(NUG\_R) + 0,19$

Oznaczenia:  $R^2$  – współczynnik determinacji (kwadrat współczynnika korelacji);  $R^2_{kryt}$  – wartość krytyczna współczynnika determinacji; NDVI – znormalizowany wskaźnik wegetacyjny; NUG - wartość efektu samorodka; DIS – odmienność; MAX – maksymalna jasność spektralna piksela. Końcówki występujące po podkreśleniu dolnym „\_” oznaczają stosowane pasmo promieniowania: \_R (czerwone) oraz \_IR (podczerwone).

Description:  $R^2$  – coefficient of determination (square of correlation coefficient);  $R^2_{kryt}$  – determination coefficient critical value; NDVI – normalised difference vegetation index; NUG – nugget effect value; DIS – dissimilarity; MAX – maximal spectral clearness of a pixel. Endings occurring after the bottom underlining „\_” indicate radiation band used: \_R (red) and IR (infrared).

samorodka. Można to wyjaśnić tym, że ze względu na występowanie różnych gatunków drzew w lesie mieszanym następuje uśrednienie (ujednorodnienie) informacji spektralnej i spadek jej przydatności do badania lasów. Duża zdolność rozdzielcza powoduje z kolei, że informacja przestrzenna jest bardzo bogata i w tym przypadku bardziej przydatna niż informacja spektralna.

Jak widać z tabeli 2, w przypadku lasów liściastych informacja spektralna jest wyraźniejsza i związek pomiędzy LAI oraz NDVI jest silniejszy ( $R^2=0,42$ ) nawet, gdy zastosujemy tylko prostą regresję jednoczynnikową. Wynika to m.in. z mniejszej liczby klas związanych z gatunkiem, wiekiem, średnią wysokością drzew występujących w lasach liściastych. Jednakże nawet w tym wypadku uwzględnienie tekstury zdjęcia spowodowało poprawę jakości modelu wyrażaną współczynnikiem determinacji  $R^2$  z 0,42 do 0,61, a zatem prawie o 50%. Wyniki tego doświadczenia podsumować można następująco:

1. Wykorzystanie informacji przestrzennej wydatnie poprawiło jakość wyznaczania LAI lasów na podstawie zdjęć lotniczych.
2. Rola informacji przestrzennej rośnie gwałtownie gdy informacja spektralna jest bardzo jednorodna.

Na zakończenie można zwrócić uwagę na jeszcze jeden powód dla którego warto stosować informację przestrzenną. Ogólnie znaną trudnością dotyczącą wyznaczania LAI na podstawie NDVI jest nieliniowa zależność pomiędzy tymi parametrami i nasycaniem się NDVI dla wartości LAI większych od 3 [Asrar i in. 1984; Running i in. 1986; Spanner i in. 1990]. W takich przypadkach zastosowanie informacji przestrzennej staje się bardzo korzystne.

**PRZYKŁAD 2: WYKORZYSTANIE METOD GEOSTATYSTYCZNYCH DO WYZNACZANIA CECH DRZEWOSTANU.** Ciekawy przykład zastosowania semiwariancji do wyznaczania cech drzewostanu, w tym przypadku zmian chorobowych w drzewostanie wywołanych zanieczyszczeniem środowiska, został opisany przez Lévesque'a i in. [1998]. Badania dotyczyły negatywnego oddziaływania systemu drenażu składowisk kopalnianych na środowisko leśne. Jako przedmiot badań wybrano nieczynną od lat siedemdziesiątych kopalnię cynku i miedzi KamKotia w pobliżu Timmis w prowincji Ontario, Kanada. Wokół kopalni rozlokowane było składowisko odpadów o powierzchni ponad 350 ha.

Systemy drenażowe składowisk odpadów mogą wywoływać znaczne szkody w środowisku [Kelley i Tuovinen 1988]. System odwodnienia kopalni może np. wymywać składniki odżywcze z gleby czy powodować uwalnianie się do gleby takich toksycznych substancji, jak metale ciężkie, kwas siarkowy, itd. Symptomy zniszczeń mogą być wyrażane w postaci różnorodnych zmian fizjologicznych i morfologicznych obserwowanych tak na poziomie pojedynczych drzew, jak i całych drzewostanów. Mogą to być na przykład zmniejszenie zagęszczenia drzewostanu, średniej wysokości drzew, czy zwarcia koron, chloroza, wcześniejsze starzenie się drzew czy wreszcie ich śmierć.

**Tabela 2.**

Wyniki regresji liniowej dla lasów liściastych (oznaczenia takie same jak w tabeli 1)

Linear regression results for broadleaved forests (for description see Table 1)

Zmienne	$R^2$	$R^2$ kryt	SE	Model do wyznaczania LAI
NDVI	0,42	0,11	1,01	$-5,21NDVI + 8,84$
NDVI + S	0,48	0,10	0,97	$10,83NDVI - 3,937(NUG-R) - 1,02$
NDVI + 1R	0,52	0,10	0,93	$-1,17NDVI - 0,516(MAX-R) + 10,04$
NDVI + 2R	0,55	0,10	0,91	$-5,39NDVI + 0,047(DIS-IR) + 5,07$
NDVI + S + 2R	0,61	0,09	0,85	$11,4NDVI - 0,078(DIS-IR) - 4,29(NUG-R) + 0,19$

Zniszczenia lasu mogą być obserwowane technikami zdalnymi i są odzwierciedlone w spektralnych i przestrzennych własnościach zdjęć lotniczych lub satelitarnych. W celu precyzyjnego powiązania własności zdjęć satelitarnych z badanymi zniszczeniami lasu wykonano również szczegółowe badania terenowe. Badania te przeprowadzono na 6 powierzchniach próbnych w kształcie kwadratów o boku 50 m, rozmieszczonych w kierunku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. W każdym obszarze próbnym występował inny stopień uszkodzenia lasu, malejący stopniowo w miarę oddalania się od składowisk zanieczyszczeń. W obszarach tych wykonano szczegółowe badania geochemiczne gleby wyznaczając jej pH oraz zawartość różnych zanieczyszczeń.

W celu precyzyjnego określenia stopnia uszkodzenia lasu, na powierzchniach próbnych badano takie zmienne związane ze stanem zdrowotnym drzew i drzewostanu oraz ich cechami strukturalnymi, jak zwarcie koron drzew, stopień pokrycia, zagęszczenie, wielkość korony drzewa i stopień uszkodzenia. Stopień uszkodzenia oceniano wizualnie zgodnie z procedurami określonymi przez Ministerstwo Środowiska prowincji Ontario [McIlveen i in. 1989] zwracając uwagę na morfologię korony, gęstość, wielkość i kolor liści, położenie martwych gałęzi i ich proporcje w stosunku do gałęzi żywych, itp. Zastosowano skalę pomiarową od 1 (drzewo zdrowe) do 5 (drzewo martwe) z odstopniowaniem 0,5.

Obserwacje lotnicze obszarów próbnych wykonano za pomocą sondy zawierającej kamerę pozwalającą uzyskać przestrzenną zdolność rozdzielczą 0,25, 0,5 oraz 1 m. Obserwacje przeprowadzono w kilku pasmach promieniowania: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz bliskiej podczerwieni, które pokrywają typowe pasma absorpcji i odbicia pokrywy roślinności. Pasma bliskiej podczerwieni zostało wybrane do analizy tekstury, gdyż po analizie otrzymanych zdjęć okazało się, że zapewniało ono najlepszą jakość obserwacji.

Z otrzymanych zdjęć lotniczych obliczano semiwariancję. Semiwariancję wyznaczano zarówno na podstawie jednowymiarowych transektów biegnących przez powierzchnie próbne (transect semivariance), jak również na podstawie obszarów wyznaczonych w badanych powierzchniach próbnych (matrix semivariance). Wyniki tych obliczeń potwierdziły, że istnieje bardzo wyraźna statystyczna zależność pomiędzy parametrami semiwariancji obliczonymi na podstawie zdjęć lotniczych a parametrami pokrywy leśnej oraz cechami pojedynczych drzew. Kluczowym problemem okazało się dobranie odpowiedniej zdolności rozdzielczej do obserwacji wybranego parametru. Właściwie dobrana zdolność rozdzielcza powodowała, że związki statystyczne pomiędzy parametrami semiwariancji a badanymi cechami stawały się bardzo wyraźne. W ten sposób parametry semiwariancji mogą być czułymi wskaźnikami stanu zdrowotności lasów. Jako przykład tej tezy mogą świadczyć bardzo wysokie współczynniki korelacji liniowej Pearsona obserwowane w opisywanej pracy. Współczynniki korelacji większe niż 0,8 istotne przy poziomie ufności 0,05 otrzymano m.in. pomiędzy:

- zwarcie koron drzew a zakresem wariogramu: 0,92,
- zagęszczeniem drzew a zakresem: 0,81,
- wielkością korony drzew a zakresem: 0,97,
- wysokością drzew a zakresem i progim: odpowiednio 0,92 i 0,86,
- stopniem uszkodzenia drzew a zakresem: -0,96 oraz progim: 0,86.

## Podsumowanie i wnioski

Przedstawione przykłady pokazują, że podczas zdalnych obserwacji lasów nie można zignorować właściwości przestrzennych zdjęć bez utraty ogromnej liczby informacji. Wraz z rozwojem zaawansowanych technik satelitarnych i ich wykorzystania do obserwacji leśnych powstała pilna

potrzeba właściwego zrozumienia i wykorzystywania informacji przestrzennej. Dlatego bardzo istotne jest propagowanie tych zagadnień w polskiej literaturze.

## Literatura

- Anttila P. 2002. Nonparametric estimation of stand volume using spectral and spatial features of aerial photographs and old inventory data. *Canadian Journal of Forest Research*. 32 (10): 1849-1857.
- Aplin P., Atkinson P. M., Curran P. J. 1999. Fine Spatial Resolution Satellite Sensors for the next decade. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 3873-3881.
- Aplin P., Atkinson P. M., Curran P. J. 1999. Fine Spatial Resolution Simulated Satellite Sensor Imagery for Land Cover Mapping in the United Kingdom. *International Journal of Remote Sensing*. 68: 206-216.
- Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E., Hatfield J. 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*. 76: 300-306.
- Atkinson P. M. 1993. The effect of spatial resolution on the experimental semivariogram of airborne MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 5: 1005-1011.
- Atkinson P. M. 1997. Selecting the spatial resolution of airborne MSS imagery for small-scale agricultural mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 1903-1917.
- Atkinson P. M., Lewis P. 1997. Geostatistical classification for remote sensing: an introduction, *Computers and Geosciences* 26: 361-371.
- Bowers W., Franklin S., Hudak J., McDermid G. 1994. Forest structural damage analysis using semivariance. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 20: 102-115.
- Bruniquel-Pinel V., Gastellu-Etchegorry J. P. 1998. Sensitivity of Texture of High Resolution Images of Forest to Biophysical and Acquisition Parameters. *Remote Sensing of Environment*. 65: 61-85.
- Campbell J. B. 1994. *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Press. New York.
- Ciołkosz A., Kęsik A. 1989. *Teledetekcja satelitarna*. PWN, Warszawa.
- Chen J. M. 1996. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agriculture and Forest Meteorology* 80: 135-163.
- Chica-Olmo M., Abarca-Hernandez F. 2000. Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification. *Computers and Geosciences* 26: 373-383.
- Cohen W. B., Spies T. A., Bradshaw G. A. 1990. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. *Remote Sensing of Environment* 34: 167-178.
- Curran P. J. 1988. The semivariances in remote sensing: an introduction. *Remote Sensing of Environment* 24: 493-507.
- De Bruin S. 2000. Predicting the areal extent of land-cover types using classified imagery and geostatistics. *Remote Sensing of Environment* 74: 387-396.
- De Fries R. S., Townshend J. R. G. 1994. NDVI-derives land cover classifications at a global scale. *International Journal of Remote Sensing*. 15: 3567-3586.
- Deutch C. V., Journel A. G. 1998. *GSLIB Geostatistical Software Library*, Oxford University Press.
- Dungan J. 1998. Spatial prediction of vegetation quantities using ground and image data. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 267-285.
- Elvidge C. D., Chen Z. 1995. Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 54: 38-48.
- ERDAS Field Guide 1990. Fifth Edition. Erdas Inc., Atlanta, Georgia.
- Fabiszewski J., Żołniercz L. 1993. Monitoring leśny w Sudetach i praktyczne jego wykorzystanie. *Sylwan* 11: 49-56.
- Franklin S., Lavigne M., Deuling M., Wulder M., Hunt E. 1997. Estimation of forest leaf area index using remote sensing and GIS data for modeling net primary productivity. *International Journal of Remote Sensing* 18: 3459 -3471.
- Gillis M., Leckie D. 1996. Forest inventory update in Canada. *The Forestry Chronicle* 72: 138-56.
- Grabeżyński S. 2000. Struktura biologiczna drzewostanów sosnowych w regionach przemysłowych. *Sylwan* 8: 71-81.
- Gamma Design Software. 1998. *GS+ Geostatistics for the Environmental Software*.
- Hay G. J., Niemann K. O., McLean G. F. 1996. An object-specific image-texture analysis of H-resolution forest imagery. *Remote Sensing of Environment* 55: 108-122.
- Haralick R. M. 1979. Statistical And Structural Approaches to Texture. *Proceedings Of The IEEE*, 67 (1979) 786-804.
- Holmgren J., Joyce S., Nilsson M., Olsson H. 2000. Estimating Stem Volume and Basal Area in Forest Compartments by Combining Satellite Image Data with Field Data. *Scandinavian Journal of Forest Resources*. 15: 103-111.
- Hudak A. T., Lefsky M. A., Cohen W. B., Berterretche M. 2002. Integration of lidar and Landsat ETM+ data for estimating and mapping forest canopy height. *Remote Sensing of Environment* 82: 397-416.
- Isaaks E. H., Srivastava R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford.

- Jakomulska A., Clarke K. 2001. Semivariogram-derived measures of textural image classification. In: Monestiez P., Allard D., Froidevaux R. (Editors), *Geostatistics for Environmental Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Harbound. 345-355.
- Jordan C. F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50: 663-666.
- Jupp D. L. B., Strahler A. H., Woodcock C. E. 1988. Autocorrelation and regularization in digital images. I. Basic theory. *IEEE Geosciences and Remote Sensing* 26: 467-473.
- Jupp D. L. B., Strahler A. H., Woodcock C. E. 1989. Autocorrelation and regularization in digital images. I. Simple image models. *IEEE Geosciences and Remote Sensing* 27: 247-258.
- Kelley B. C., Tuovinen O. H. 1988. Microbiological oxidation of minerals in mine tailings. In: Salomons W., Forstner U. (Editors), *Chemistry and Biology of Solid Waste*, Springer-Verlag, New York. 33-53.
- Kint V., van Meirvenne M., Nachtergale L., Guedens G., Lust N. 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: A comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. *Forest Science* 49 (1): 26-49.
- Kohl M., Gertner G. 1997. Geostatistics in evaluating forest damage surveys: considerations on methods for describing spatial distributions. *Forest Ecology and Management* 95: 131-140.
- Labowitz M., Masouka E. 1984. The influence of autocorrelation in signature extraction - An example from a geobotanical investigation of Cotter Basin, Montana. *International Journal of Remote Sensing* 5: 315-332.
- Lappi J. 2001. Forest inventory of small areas combining the calibration estimator and a spatial model. *Canadian Journal of Forest Research* 31 (9): 1551-1560.
- Lévesque J., King J. D. 1999. Airborne Digital Camera Image Semivariance for Evaluation of Forest Structural Damage at an Acid Mine Site. *Remote Sensing of Environment* 68: 112-124.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Acker S. A., Parker G. G., Spies T. A., Harding D. 1999. Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests, *Remote Sensing of Environment* 70: 339-361.
- McIlveen W. D., McLaughlin D. L., Arnup R. W. 1989. A survey to document the decline status of the sugar maple forest of Ontario: 1986, Ontario Ministry of Environment Publication. ISBN 0-7729-6253-7,22.
- Marceau D., Howarth P., Gratton D. 1994a. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 1. The scale and spatial aggregation problem. *Remote Sensing of Environment* 49: 93-104.
- Marceau D., Gratton D., Fournier R., Fortin J. 1994b. Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of Environment* 49: 105-117.
- Miranda F. P., MacDonald J., Carr J. R. 1992. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo. *International Journal of Remote Sensing* 13: 2349-2354.
- Miranda F. P., Carr J. R. 1994. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of the Guiana Shield, north-western Brazil. *Remote Sensing Revue* 10: 155-168.
- Miranda F. P., Fonesca L., Carr J. R., Taranik J. 1996. Analysis of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data for vegetation discrimination in northwestern Brazil using the semivariogram textural classifier (STC). *International Journal of Remote Sensing*. 17: 3523-3529.
- Mozgawa J. 2000. Teledetekcja Obszarów Leśnych – powiązania z SIP i zastosowania w LP W: System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych. Podręcznik Użytkownika Leśnej Mapy Numerycznej: 72-82.
- Mozgawa J., Kadlewicz T., Kosiński K., Grudziński T., Botul K. 1994. Odwzorowanie biogeocenozy Białowieżskiego Parku Narodowego na zdjęciach satelitarnych TM. *Fotointerpretacja w Geografii*, Tom 24: 90-99.
- Nanos N., Montero G. 2002. Spatial prediction of diameter distribution models in forestry. *Forest Ecology and Management* 161 (1-3): 147-158.
- Nemani R., Pierce L., Running S. 1993. Forest ecosystem process at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed Leaf Area Index estimates. *International Journal of Remote Sensing* 14: 2519-2539.
- Orzeł S., Rutkowska L. 2000. Struktura grubości drzewostanów sosnowych wzrastających w różnych strefach przemysłowego uszkodzenia. *Sylvan* 7: 55-63.
- Paolo M. J., Stein A., Tome M. 2002. A spatial statistical analysis of cork oak competition in two Portuguese silvopastoral systems. *Canadian Journal of Forest Research* 32 (11): 1893-1903.
- Poplawski Z. F., Zawila-Niedzwiecki T. 1995. System informacji przestrzennej w analizie stanu lasu Sudetów z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych. *Sylvan* 8: 73-86.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. P. 309-317 in *Proc. of Third ERTS Symposium*. NASA SP-351. NASA, Washington, DC.
- Running S., Peterson D., Spanner M., Teuber K. 1986. Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology* 67: 273-76.
- Rymer-Dudzzińska T. 2001. Indykacja skażenia środowiska leśnego na podstawie zróżnicowania wybranych cech dendrometrycznych drzewostanów sosnowych. *Sylvan* 5: 15-31.

- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. 1964a. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analysis. *Japanese Journal of Ecology* 14: 97-105.
- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. 1964b. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology* 14:133-139.
- Song C., Woodcock C. E. 2002. The spatial manifestation of forest succession in optical imagery. The potential of multiresolution imagery. *Remote Sensing of Environment* 82: 271-284.
- St-Onge B. A., Cavayas F. 1995. Estimating forest stand structure from high resolution imagery using the directional variogram. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 1999-2001.
- Strahler A., Woodcock C. E., Smith J. 1986. On the nature of models in remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 20: 121-139.
- Treitz P., Howarth P. 2000. High spatial remote sensing data for forest ecosystem classification: an examination of spatial scale. *Remote Sensing of Environment* 72: 268-289.
- Tucker C. J., Fung I. Y., Keeling C. D., Gammon R. H. 1986. Relationship between atmospheric CO<sub>2</sub> variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature* 319: 195-199.
- Vogelmann J. E., Sohl T. L., Campell P. V., Shaw D. M. 1998. Regional land cover characterization using Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources. *Environmental Monitoring and Assessment* 51: 415-428.
- Wallace C. S. A., Watts J. M., Yool S. R. 2000. Characterizing the spatial structure of vegetation communities in the Mojave Desert using geostatistical techniques. *Computers and Geosciences* 26: 397-410.
- Wallerman J., Joyce S., Vencatasawmy C. P., Olsson H. 2002. Prediction of forest stem volume using kriging adapted to detected edges. *Can. J. Forest Res.* 32: 509-518.
- Woodcock C. E., Strahler A. H., Jupp D. B. 1988a. The use of variograms in remote sensing: I. Scene models and simulated images. *Remote Sensing of Environment* 25: 323-348.
- Woodcock C. E., Strahler A. H., Jupp D. B. 1988b. The use of variograms in remote sensing: II. Real digital images. *Remote Sensing of Environment* 25: 349-379.
- Wulder M. 1998a. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography* 22: 449-476.
- Wulder M. 1998b. The prediction of leaf area index from forest polygons decomposed through then integration of remote sensing, GIS, UNIX and C. *Computers and Geoscience* 24: 151-157.
- Wulder M. 1999. Image spectral and spatial information in the assessment of forest structural and biophysical data. In: *Proceedings of the International Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service. Pacific Forestry Center. Victoria, BC, Canada. 267-281.
- Wulder M., Franklin S., Lavigne M., Deuling M., Hunt E. 1996a. Estimation of the net primary productivity of the Fundy Model Forest. FL, 4-7, 10, 327-332. In: *Proceedings of conference on Global Networks for Environmental Information, Eco-Infoma '96*, Lake Buena Vista. Florida.
- Wulder M., Lavigne M., Franklin S. 1996b. High spatial resolution optical image texture for improved estimation of forest stand leaf area index. *Canadian Journal of Remote sensing* 22: 441-49.
- Wulder M., LeDrew E., Franklin S., Lavigne M. 1998. Aerial image texture information of northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI). *Remote Sensing of Environment* 64: 64-76.
- Wulder M. A., LeDrew E. F., Franklin S. E., Lavigne M. B. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment* 73: 103-114.
- Zawadzki J., Cieszewski C. J., Zasada M. 2003. Semiwariacje tekstury obrazów satelitarnych Landsat TM obszarów leśnych. *Sylwan* 7: 40-52.

## Dodatek: Tematyczny przegląd literatury

Dla ułatwienia osobom zainteresowanym doбором odpowiedniej literatury geostatystycznej w zastosowaniach leśnych, poniżej zestawiono istotne prace z podziałem tematycznym. W poniższym wykazie pominięto prace dotyczące symulacji geostatystycznych:

### Metody geostatystyczne w obserwacjach zdalnych.

Strahler i in. 1986; Atkinson 1993, 1997; Woodcock i in. 1988 a, b; Jupp i in. 1988, 1989.

### Zastosowanie metod geostatystycznych do inwentaryzacji wielkoobszarowych.

Atkinson i Lewis 2000; Miranda i in. 1992, 1994, 1996; Marceau i in. 1994a, b; Lappi 2001; Chica-Olmo i Abarca-Hernandez 2000; De Bruin 2000; Treitz i Howarth 2000.; Jakomulska i Clarke 2001; Anttila 2002; Hudak i in. 2002; Zawadzki i in. 2003.

### Wyznaczanie parametrów inwentaryzacyjnych lasów za pomocą metod geostatystycznych.

Labowitz i Masouka 1984; Curran 1988; Cohen i in. 1990; St-Onge B i Cavayas 1995; Bruniquel-Pinel i Gastellu-Etchegorry 1998; Holmgren i in. 2000; Wallace i in. 2000; Wallerman i in. 2002.

### Wyznaczanie parametrów biofizycznych za pomocą metod geostatystycznych.

Lefsky 1999; Wulder i in. 1996a, b; Wulder 1998 a, b; Wulder i in. 1988; Wulder 1999.

## 62 Jarosław Zawadzki, Chris J. Cieszewski, Michał Zasada

Inne badania lasów, np. ich zdrowotności, struktury, sukcesji, itp.

Bowers i in. 1994; Kohl i Gertner 1997; Lévesque i King 1999; Wallace i in. 2000; Song i in. 2002; Nanos i Montero 2002; Paolo i in. 2002; Kint i in. 2003; Hudak i in. 2002.

### SUMMARY

#### The use of geostatistical methods for remote-sensing based determination of inventory measures and biophysical parameters of forests

Airborne and satellite remote sensing is an effective and relatively inexpensive means of quickly acquiring information about forests across large areas. The advantage of remotely sensed data is that it can be easily processed using various computer tools such as GIS, database systems, image-processing software, statistical packages, etc. Investigation of remotely sensed images of forested areas can be based on the analysis of their spectral attributes as well as spatial (textural) information.

Many diverse analytical techniques have been developed in order to effectively use spatial information in remotely sensed images. However, geostatistical methods, which give a flexible approach to spatial correlation analyses, play an especially important role. The main goal of using geostatistical methods is to interpret and predict the spatial distribution of the investigated phenomena.

Despite constant advances in geostatistics and its many successful applications in remote sensing and forestry, it remains a relatively unknown field in Poland. The main aim of this paper is to show the applicability of various geostatistical techniques in estimation of inventory measures and biophysical parameters of forests and to present examples of practical applications without going into the complex theoretical bases of the described methods.

In this article we discuss the interpretation of semivariance calculated from airborne and satellite images of forests. Next we define differences between inventory measures and biophysical parameters of forests, describe the design of the field measurements meant to assess semivariance parameters, and give a couple of literature-based examples of the use of geostatistics in forestry. Finally, we present a wide selection of the most important papers in the subject.