SYLWAN nr 7: 40-52, 2003

JAROSŁAW ZAWADZKI, CHRIS J. CIESZEWSKI, MICHAŁ ZASADA

Semiwariancje tekstury obrazów satelitarnych Landsat TM obszarów leśnych

Semivariances of Landsat TM satellite imagery texture of forested areas

ABSTRACT

The paper presents selected applications of the geostatistical methods for remote sensing studies of forest ecosystems. The texture of the remote sensing images of the forests can be highly complex, but at the same time it is very useful for interpretation of these images. We explored differences on semivariances calculated from transects of the Landsat TM images associated with images of young, middle-aged, old, and natural versus planted stands, as well as compared semivariances for loblolly pine (*Pinus taeda* L.) and longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) in Georgia, USA. We analyzed the imagery data in conjunction with ground measurements. The results showed that in spite of the relatively low Landsat TM resolution (30m), the semivariances might give useful additional information about the above-mentioned classes. The semivariances for loblolly pine depend on the age as well as on the origin of the forest stand (natural vs. planted). On the other hand, because of the low-resolution, the classical parameters of a range of semivariances are rather difficult for classification. However, we found important differences for sill values as well as for semivariance values for the distances of a few lags. These parameters seem to be useful for forest stand discrimination. Significant differences were also found between semivariances calculated from loblolly pine and longleaf pine stands.

KEY WORDS

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

Wstęp

Z powodu dużego znaczenia ekonomicznego i ekologicznego lasy podlegają nieustannemu monitorowaniu. Pomiary terenowe stanowią najdokładniejszy sposób zbierania szczegółowych informacji na temat cech i stanu lasów. Pomiary takie są jednak często bardzo kosztowne i czasochłonne zwłaszcza w przypadku, gdy są przeprowadzane w dużej skali. Obserwacje satelitarne stanowią skuteczną i tanią alternatywną metodę analizowania 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 Zawiła-Niedźwiecki 1995, Mozgawa 2000]. Dodatkową zaletą danych pochodzących z obserwacji satelitarnych jest łatwość ich przetwarzania za pomocą różnorodnych narzędzi informatycznych (systemy informacji geograficznej, bazy danych, programy do obróbki obrazów, pro-

JAROSŁAW ZAWADZKI
Instytut Systemów Inżynierii Środowiska, Zakład Metod Matematycznych, Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 20
00-661 Warszawa
jarek97@yahoo.com

CHRIS J. CIESZEWSKI
Fiber Supply Assessment
School of Forest Resources
The University of Georgia
Athens GA 30602 USA
www.growthandyield.com/chris

MICHAŁ ZASADA
Samodzielny Zakład Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu, Wydział Leśny SGGW
ul. Rakowiecka 26/30
02-578 Warszawa
zasada@delta.sggw.waw.pl

gramy statystyczne, itp.). Wymienione atuty powodują, że obserwacje satelitarne są najbardziej odpowiednie do inwentaryzacji wielkoobszarowych. Istotnym ograniczeniem badań obszarów zalesionych dokonywanych za pomocą technik satelitarnych jest ich określona zdolność rozdzielcza powodująca, że obrazy pochodzące z danego satelity są odpowiednie tylko do konkretnego rodzaju pomiarów, na przykład do inwentaryzacji wielkoobszarowej.

Badania zdjęć satelitarnych obszarów zalesionych oparte są zarówno na analizie ich własności spektralnych, jak i tekstury. Wykorzystanie informacji spektralnej zawartej w zdjęciach satelitarnych w postaci wartości jasności spektralnych pikseli tworzących te zdjęcia stanowiło do niedawna główną technikę analizy zdjęć satelitarnych. Z powodu stosunkowo niskiej zdolności rozdzielczej sond satelitarnych informacja przestrzenna traktowana była do tej pory jako mniej istotna. Jednakże jasność spektralna poszczególnych pikseli nie jest niezależna od jasności pikseli sąsiednich. Wprost przeciwnie: najczęściej istnieje miedzy nimi bardzo wyraźna korelacja, która może być precyzyjnie wyznaczona, a następnie wykorzystana np. w procedurach klasyfikacyjnych. Uwzględnienie informacji przestrzennej pozwala na znacznie bardziej precyzyjną analizę zdjęć satelitarnych. Z tego właśnie powodu współcześnie obserwuje się gwałtownie rosnące zainteresowanie badaniami korelacji przestrzennych w analizie obrazów satelitarnych obszarów leśnych. 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.

W celu efektywnego wykorzystania informacji przestrzennej istniejącej w zdjęciach satelitarnych rozwinięto wiele różnorodnych technik analitycznych. Szczególne miejsce pomiędzy nimi zajmują metody geostatystyczne, które pozwalają na najbardziej elastyczne podejście do analizy korelacji przestrzennych. Struktura przestrzenna zdjęć satelitarnych obszarów leśnych może być wysoce skomplikowana i wykazuje zazwyczaj znacznie większą zmienność, niż na zdjęciach satelitarnych innych obiektów (jak np. utwory geologiczne, temperatura oceanów, itp.). Dlatego badania satelitarne obszarów leśnych przy zastosowaniu metod geostatystycznych charakteryzują się dużą złożonością oraz wieloma specyficznymi cechami [Cohen i in. 1990, Wulder 1998].

Niniejsza praca stanowi wprowadzenie do metod geostatystycznych stosowanych do badania ekosystemów leśnych technikami satelitarnymi. Do ilustracji tych zagadnień wykorzystano obrazy satelitarne otrzymane za pomocą skanera Landsat TM [ERDAS Field Guide 1990, Vogelmann i in. 1998]. W pracy omówione zostały sposoby obliczania i charakterystyczne własności podstawowych geostatystycznych miar ciągłości przestrzennej na podstawie zdjęć satelitarnych obszarów leśnych. Dokładne zrozumienie własności omawianych miar ciągłości przestrzennej jest konieczne do wykorzystania metod geostatystycznych w zastosowaniach praktycznych takich, jak klasyfikacja obszarów leśnych czy wyznaczanie parametrów biofizycznych drzewostanów. Zagadnień tych ze względu na swoją rozległość i specyfikę nie można było omówić w niniejszym artykule. Autorzy planują zaprezentować je szczegółowo w kolejnych pracach.

Podstawowe pojęcia i metody geostatystyczne

Badania ciągłości przestrzennej wykonuje się najczęściej wykorzystując jej podstawową miarę geostatystyczną – semiwariancję, której wykres nosi nazwę semiwariogramu, oraz semiwariancję wzajemną (krzyżową), której wykres nazywa się semiwariogramem wzajemnym (krzyżowym). Semiwariancja jest również powiązana z innymi miarami ciągłości przestrzennej, jak funkcja kowariancji lub funkcja korelacji [korelogram, Deutch i Journel 1998].

Podstawą do wyznaczenia semiwariancji i innych miar ciągłości przestrzennej są tzw. wykresy rozrzutu *h*. Pokazują one w prostokątnym układzie współrzędnych wszystkie możliwe pary pomiarów (danych) jednakowo odległych w danym kierunku (ryc. 1). Wykres rozrzutu otrzymujemy odkładając na osi odciętych układu współrzędnych wartości $v(t_i)$ analizowanej zmiennej *V* w punktach wyznaczonych przez wektory t_i (indeks „i" dla wszystkich punktów zbioru danych), zaś na osi rzędnych wartości $v(t_i+h)$ tej zmiennej w punktach wyznaczonych przez wektory t_i+h. Wektor *h* nazywany jest wektorem przesunięcia lub separacji. Ponieważ punkty pomiarowe bardzo rzadko tworzą regularną siatkę prostokątną, przy obliczeniach wariogramu za jednakowo odległe uważamy punkty, które leżą w pewnym zakresie tolerancji długości wektora $h\pm\Delta h$ oraz w pewnym zakresie tolerancji kierunku tego wektora $\Phi\pm\Delta\Phi$.

Semiwariancję definiuje się, jako średnią kwadratów różnic pomiędzy odpowiednimi parami danych:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)\mathbf{h}_{ij}=\mathbf{h}} (v_i - v_j)^2 \qquad [1]$$

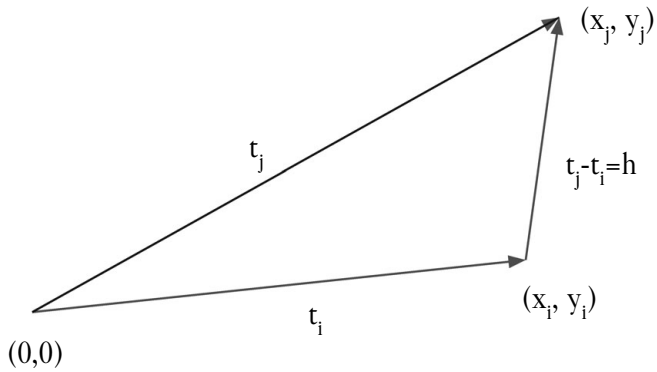
gdzie $N(h)$ oznacza liczbę par punktów wyznaczonych w opisany powyżej sposób, *h* jest wektorem przesunięcia, „t" odległością punktów o współrzędnych (x_i, y_i) i (x_j, y_j) od początku układu współrzędnych, „i" oraz „j" indeksami punktów zbioru danych, zaś „v" – wartościami badanej zmiennej w punktach odległych o t_i i t_j od początku układu współrzędnych (ryc. 1). Obliczone wartości semiwariancji dla różnych odległości między punktami można przedstawić na wykresie noszącym nazwę semiwariogramu (ryc. 2). Wartości semiwariancji zależą od długości i kierunku wektora *h*. Niekiedy oblicza się semiwariancje i wykreśla semiwariogramy biorąc do obliczeń pary danych położonych względem siebie w określonych odległościach $|h|$ bez względu na kierunek wektora *h*. Uzyskane w ten sposób semiwariogramy nazywamy izotropowymi, czyli niezależnymi od kierunku. Semiwariancje zależne od kierunku (obliczane dla różnych kierunków wektora *h*) noszą nazwę semiwariancji anizotropowych (kierunkowych. W wielu wypadkach wykonuje się mapy semiwariancji, na których przedstawia się wartości semiwariancji obliczone dla wszystkich możliwych wektorów *h* (dla wszystkich kierunków i zwrotów). Mapa semiwariancji jest zatem zbiorem semiwariancji anizotropowych dla wszystkich możliwych wektorów *h*.

Inną często używaną miarą geostatystyczną są krzyżowe wykresy rozrzutu *h* i semiwariancje wzajemne. Otrzymuje się je w analogiczny sposób, jak opisane tutaj wykresy rozrzutu *h*. Jedyna różnica polega na tym, że w przypadku wykresów krzyżowych zamiast łączenia w pary wartości tej samej zmiennej w punktach odległych o wektor *h*, łączy się w pary wartości dwóch różnych zmiennych *U* i *V* w tych punktach (np. wartości jasności spektralnej pikseli otrzymanych dla dwóch różnych pasm na obrazach satelitarnych tego samego obszaru). Semiwariancja wzajemna (krzyżowa) obliczana jest za pomocą równania:

$$\gamma_{uv}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)\mathbf{h}_{ij}=\mathbf{h}} (v_i - v_j)(u_i - u_j) \qquad [2]$$

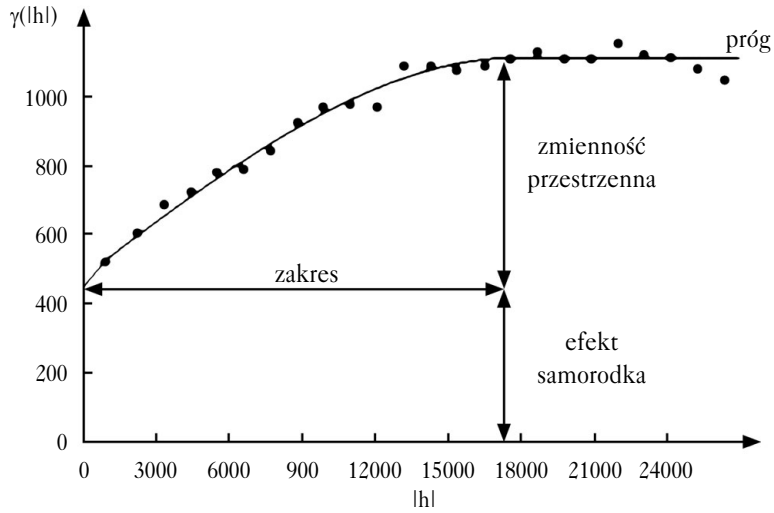
Oznaczenia w równaniu [2] są analogiczne do oznaczeń stosowanych do opisu semiwariancji w równaniu [1]. Alternatywne miary ciągłości przestrzennej, jak funkcja kowariancji, funkcja korelacji, oraz ich graficzne reprezentacje są szczegółowo opisane w literaturze geostatystycznej [np. Isaaks i Srivastava 1989, Deutch i Journel 1998].

W zastosowaniu technik geostatystycznych do analizy obrazów satelitarnych ważną rolę odgrywać może również madogram, który pełni podobną rolę jak semiwariancja wzajemna tzn. opisuje ciągłość wzajemną. Madogram jest jednak znacznie łatwiejszy do obliczenia, co w przy-



Ryc. 1.

Wykres rozrzutu h w notacji wektorowej
A „h" dispersion graph in the vectoral notation



Ryc. 2.

Klasyczny wykres semiwariancji (semiwariogram). Punkty oznaczają wartości eksperymentalne semiwariancji γ(|h|) dla różnych wartości wektora przesunięcia |h|, zaś linia ciągła przedstawia przykładowy model semiwariogramu (Zawadzki 2002)

Classical semivariance (semivariogram). Points denote semivariance empirical values γ|h|) for different lag vector value |h|, and the solid line denotes an example model of semivariogram (Zawadzki 2002)

padku zdjęć satelitarnych zawierających zazwyczaj ogromną liczbę danych, jest sprawą zasadniczą. Madogram określony jest wzorem:

$$\gamma_{uv}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{(i,j)\mathbf{h}_{ij}=\mathbf{h}} (v_i - u_j)^2 \qquad [3]$$

Semiwariogram (ryc. 2) można scharakteryzować za pomocą trzech parametrów:

– Zakres oddziaływania (ang. „range"), zwany również zakresem; jest to odległość mierzona wzdłuż osi odciętych od początku układu współrzędnych do punktu, w którym wariogram uzyskuje nasycenie.

– Efekt samorodka (ang. „nugget" lub „nugget effect"), zwany również efektem losowym; jest to odległość mierzona wzdłuż osi rzędnych pomiędzy początkiem układu odniesienia, a przecięciem semiwariogramu z osią rzędnych. Efekt samorodka jest sumą zmienności wynikającej z błędu pomiarowego oraz zmienności, która ma miejsce w odległościach krótszych niż wartość kroku, z jakim jest wyznaczana semiwariancja.
– Próg (ang. „sill"); jest to wartość nasycenia semiwariogramu mierzona na osi rzędnych. Próg jest sumą efektu samorodka oraz zmienności pochodzącej z istnienia korelacji przestrzennych na dużych odległościach (większych niż wartość kroku z jakim jest wyznaczana semiwariancja, a mniejszych niż zakres oddziaływania).

Semiwariogramy stanowią efektywną charakterystykę ciągłości przestrzennej występującej w badanym zbiorze danych. Niestety, w wielu sytuacjach trudno jest wykorzystać semiwariogramy empiryczne. Przykładem może być estymacja metodą krigingu, należąca do podstawowych metod estymacji w geostatystyce [Journel 1978]. Metoda ta wymaga znajomości wartości semiwariancji dla wielu długości i kierunków wektora $\mathbf{h}$. Dane doświadczalne w wielu wypadkach nie pozwalają na wyliczenie wszystkich niezbędnych wartości semiwariancji (np. ze względu na rozmieszczenie punktów pomiarowych), pozwalają one jednak na zbudowanie modelu semiwariogramu i określenie jego parametrów.

Funkcje używane do modelowania semiwariancji nie mogą być dowolne. Muszą to być funkcje określone dodatnio [Deutch i Journel 1998], gdyż jedynie dodatnio określony model semiwariogramu zapewnia, że równania krigingu dają jedno, stabilne rozwiązanie. Najprostszą, a jednocześnie najbardziej praktyczną metodą otrzymywania dodatnio określonych semiwariancji, jest używanie do ich budowy kilku funkcji, o których wiadomo, że są dodatnio określone (tzw. modeli podstawowych). Kombinacja liniowa funkcji określonych dodatnio jest również funkcją określoną dodatnio (przy założeniu, że wszystkie wagi tej kombinacji w_i są nieujemne):

$$\gamma(|\mathbf{h}|) = \sum_{i=1}^{n} w_i \gamma_i (|\mathbf{h}|) \qquad [4]$$

Najczęściej używanymi modelami podstawowymi są: model samorodków, model sferyczny, wykładniczy, gaussowski oraz liniowy [Isaaks i Srivastava 1989, Deutch i in. 1989]. Przykładowy model semiwariogramu wraz z empirycznymi wartościami semiwariancji przedstawiono na ryc. 2.

Zastosowanie semiwariancji do interpretacji zdjęć satelitarnych obszarów leśnych

Obrazy satelitarne mogą być również źródłem danych do wykonania obliczeń geostatystycznych miar ciągłości przestrzennej. Miary te obliczane są w opisany tutaj sposób, gdzie wartości jasności spektralnych pikseli użyte są jako wartości zmiennych V i U we wzorach [1]-[3]. Często obliczenia semiwariancji wykonuje się na podstawie tzw. wskaźników wegetacyjnych, jak np. znormalizowanego wskaźnika wegetacyjnego NDVI [Rouse 1973, De Fries 1994], skorygowanego wskaźnika wegetacyjnego NDVIc [Nemani i in. 1993] czy stosunku współczynników odbicia dla pasma średniej podczerwieni i widzialnego pasma czerwonego [Jordan 1969].

Poszczególne charakterystyki semiwariogramów obrazów satelitarnych obszarów leśnych mają swoją określoną interpretację oraz potencjalne zastosowanie. Zakres oddziaływania wskazuje na odległość, powyżej której wartości jasności spektralnej pikseli nie są skorelowane przestrzennie. Parametr ten określa więc odległość wokół wybranego punktu, na jakiej interpolacja wykorzystująca informację przestrzenną (np. kriging) może być efektywnie przeprowadzana.

Z tego względu odległość równa zakresowi może stanowić naturalną jednostkę odległości w badanym ekosystemie. Zakres wskazuje również na optymalną zdolność rozdzielczą sondy satelitarnej, właściwą do obserwacji obiektów występujących na zdjęciu [Curran 1998, Woodcock i in. 1988 a,b]. W celu ustalenia optymalnej rozdzielczości sondy satelitarnej, zakres zmienności na badanym obszarze leśnym wyznacza się na drodze pomiarów naziemnych lub lotniczych [Atkinson 1993, 1997]. Ponadto zakres określa optymalny wymiar ruchomego okna służącego do wyznaczania miar statystycznych charakteryzujących teksturę badanego zdjęcia satelitarnego, jak np. średniej ruchomej, ruchomego odchylenia standardowego, itp. [Treitz i Howarth 2000]. Miary statystyczne obliczone metodą ruchomego okna mogą być następnie zastosowane do klasyfikacji (segmentacji) zdjęcia satelitarnego lub jego obróbki graficznej. Zakres jest związany z wielkością największych obiektów występujących na zdjęciu, wykazujących korelacje przestrzenne [Jupp i in. 1988, 1989].

Próg stanowi miarę zmienności jasności spektralnej tych pikseli, między którymi nie występuje korelacja przestrzenna. Jasność spektralna pikseli zależy od intensywności odbitej fali elektromagnetycznej rejestrowanej przez czujniki satelity. Dlatego też wartość progu nie opisuje wyłącznie własności badanego lasu, ale raczej złożony proces oddziaływania fali elektromagnetycznej ze środowiskiem leśnym. Wartości progu semiwariogramu obliczanego z obrazów satelitarnych zależą silnie od długości fali elektromagnetycznej stosowanej do obserwacji. Na przykład obserwacje lasów sosnowych prowadzone przez satelitę Landsat TM w paśmie promieniowania widzialnego (pasmo czerwone RED: 0,63-0,69 μm) prowadzą do innych wartości progu, niż obserwacje prowadzone w pasmach promieniowania podczerwonego (pasmo bliskiej podczerwieni NIR: 0,76-0,90 μm lub pasmo średniej podczerwieni MIR: 1,55-1,75 μm). Wynika to z różnego stopnia pochłaniania i odbijania promieniowania widzialnego i podczerwonego przez korony drzew [Curran 1988].

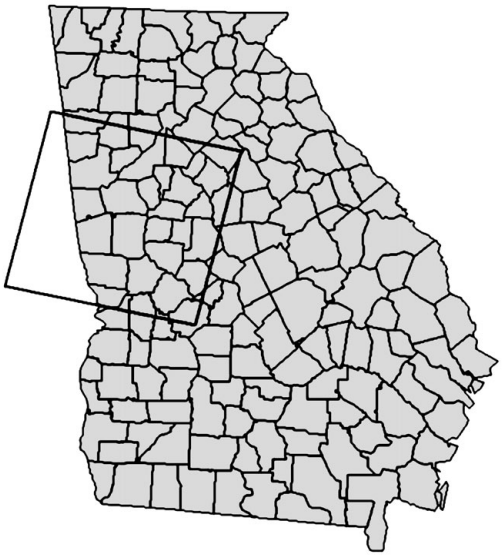
Efekt samorodka reprezentuje zmienność niezależną od odległości, która wynika z błędu pomiarowego oraz zmienności na niewielkich odległościach [Journel i Huibregts 1978]. W przypadku obserwacji satelitarnych wiąże się on z faktem, że pojedynczy pomiar, odpowiadający jednemu pikselowi, nie jest punktowy, lecz obejmuje określony obszar powierzchni lasu. W związku z tym efekt samorodka rośnie wraz ze zmniejszaniem się przestrzennej zdolności rozdzielczej sondy satelitarnej. Zbyt duży efekt samorodka może więc wskazywać na konieczność zwiększenia zdolności rozdzielczej sondy satelitarnej użytej do rozwiązywania danego problemu.

Najczęściej obserwowanymi odmianami semiwariancji występujących na obrazach satelitarnych środowiska naturalnego lub obszarów zmienionych przez działalność gospodarczą człowieka to semiwariancja klasyczna, forma periodyczna oraz forma nie posiadająca struktury przestrzennej. Podstawowe formy semiwariancji mogą również występować w różnych odmianach [Curran 1988]. Semiwariancje periodyczne obserwuje się, gdy na zdjęciu satelitarnym istnieją powtarzające się wzory pochodzące na przykład od pól uprawnych, regularnie powtarzających się utworów geologicznych czy regularnie rozłożonych pastwisk. Semiwariancje nie posiadające struktury przestrzennej obserwuje się w przypadku zdjęć satelitarnych posiadających teksturę nie wykazującą wyraźnych korelacji przestrzennych.

Metodyka i dane

Semiwariancje przedstawione w niniejszym artykule obliczone zostały na podstawie zdjęć satelitarnych drzewostanów sosny łuczywowej (*Pinus taeda* L.) i sosny długolistnej (*Pinus palustris*

Mill.)[1] położonych w zachodniej części stanu Georgia, USA. Obszar badań objęty był przez scenę 19/37 zarejestrowaną przez skaner TM satelity Landsat 5 w listopadzie 1997 roku (ryc. 3). Naziemne dane pomiarowe pochodziły z dostępnych danych inwentaryzacyjnych i obejmowały informacje o położeniu drzewostanu, wieku, składzie gatunkowym, sposobie odnowienia, przeciętnej pierśnicy, pierśnicowym polu przekroju, zadrzewieniu, zagęszczeniu, itp. W celu sprawdzenia czy semiwariancje mogą służyć jako sygnatury (wzorce) przestrzenne dla różnych typów lasów, wykonano obliczenia semiwariancji dla różnych klas badanych drzewostanów. Drzewostany analizowano w trzech umownych kategoriach wiekowych: „młode" (6-15 lat), „średniowiekowe" (16-30 lat) oraz „stare" (starsze niż 30 lat). Tego typu podział pozwalał na wykonanie obliczeń semiwariancji dla wystarczająco dużych i jednorodnych obszarów o powierzchni od kilku do kilkuset hektarów. Dodatkowo obliczone zostały semiwariancje kierunkowe (anizotropowe) dla znacznie mniejszych drzewostanów sosny łuczywowej. Obliczenia wykonane zostały przy użyciu programu GS+ [Robertson 2000].



Ryc. 3.

Obszar badań (zachodnia część stanu Georgia, USA) objęty przez scenę 19/37 zarejestrowaną przez skaner TM satelity Landsat 5 w listo-padzie 1997 roku

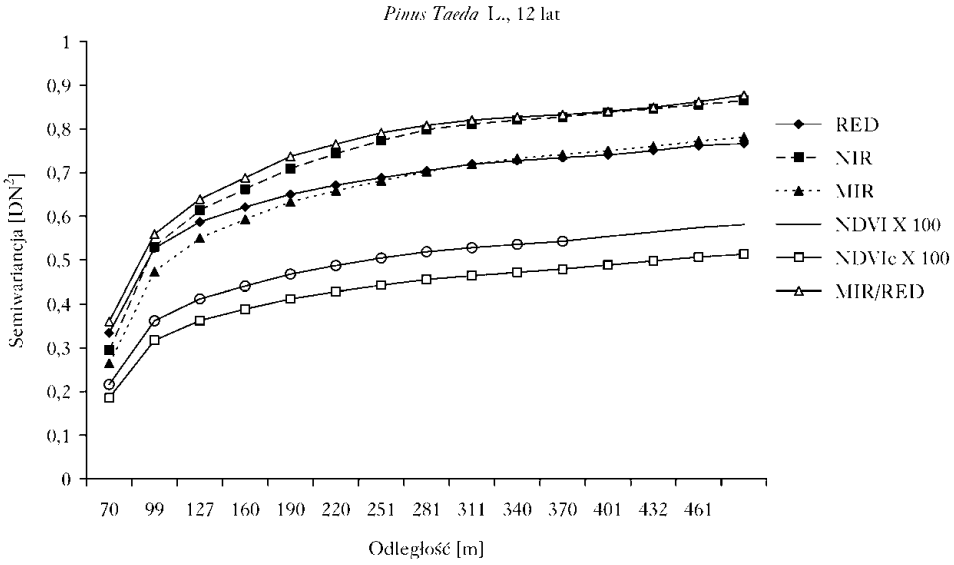
Study site (western part of Georgia, USA) image 19/37 registered by the TM scanner of a Landsat 5 satellite in November 1997

Wyniki

Typowe wykresy standaryzowanych (dzielonych przez wariancję) semiwariancji obliczanych ze zdjęć satelitarnych obszarów leśnych (sosna łuczywowa, powierzchnia około 200 ha) przedstawione zostały na rycinie 4. Dla małych odległości semiwariogramy wzrastają bardzo szybko. Następnie, w miarę wzrostu odległości, wykresy te łagodnie zakrzywiają się i stają się praktycznie liniowe.

Rycina 5 przedstawia wykresy semiwariancji anizotropowych obliczanych z tolerancją kątową $\Delta\Phi$=22,5 na podstawie wielokrotnie mniejszej liczby danych (z obszaru o powierzchni 80 ha). Charakter semiwariogramów w odległościach do około 200 m nie uległ zasadniczej zmianie w stosunku do semiwariogramów izotropowych prezentowanych na rycinie 4. Jednakże w większych odległościach semiwariancje kierunkowe zaczynają się istotnie różnić od siebie. Wynika to stąd, że w odległościach tych zaczyna być widoczny wpływ większych obiektów,

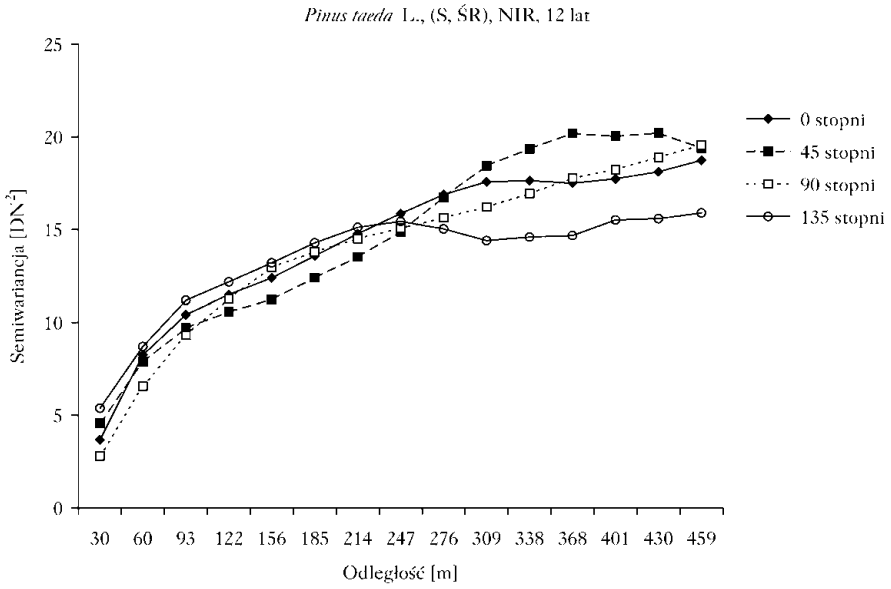
[1] Nazwy pochodzą z ksiażki Czerwiakowskiego (1859). *Pinus taeda* nazywana jest tam sosną łuczywną. Ze względu na brak takiego słowa we współczesnym języku polskim, zaproponowano tutaj nową formę „łuczywowa" (przymiotnik od „łuczywo"), pochodzącą ze słownika Doroszewskiego (1962, Słownik języka polskiego, tom 4, str. 327, Państwowe Wyd. Wiedza Powszechna, Warszawa). Sosna długolistna figuruje w książce Czerwiakowskiego również jako *Pinus longifolia* Mill. i *Pinus palustris* Ait. Autorzy artykułu serdecznie dziękują Panu Profesorowi Jerzemu Zielińskiemu z Zakładu Systematyki i Geografii Instytutu Dendrologii PAN w Kórniku za pomoc okazaną w odnalezieniu tych informacji i bezcenne konsultacje.



Ryc. 4.

Izotropowe semiwariancje obliczone ze zdjęć satelitarnych 12-letniego odnawianego sztucznie drzewostanu *Pinus taeda* L. o powierzchni 200 ha

Isotropic semivariances calculated from satellite images of a 12-year -old artificially regenerated stand of *Pinus taeda* L. (area of 200 ha)



Ryc. 5.

Anizotropowe semiwariancje (tolerancja kątowa $\Delta\Phi$=22,5°) obliczone ze zdjęć satelitarnych średniowiekowego (ŚR), odnawianego sztucznie (S) drzewostanu o powierzchni 80 ha (dane z pasma bliskiej podczerwieni 0,76-0,90 µm – NIR)

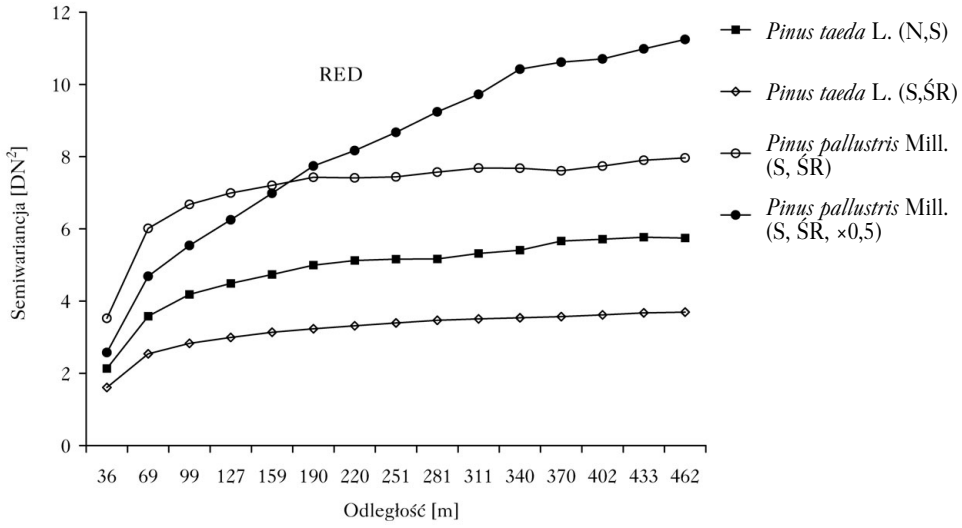
Anisotropic semivariances (angle tolerance $\Delta\Phi$=22.5°) calculated from satellite images of a medium-age (ŚR) artificially regenerated (S) stand in an area of 80 ha (data from near infrared band 0.76-0.90 µm NIR)

np. małych drzewostanów czy większych grup drzew, które ze względu na ich mniejszą liczebność nie wykazują wyraźnych korelacji, pojawiają się natomiast efekty związane z granicami tych obszarów.

Rycina 6 przedstawia przykładowe semiwariogramy jasności spektralnej pikseli pasma promieniowania widzialnego (pasmo czerwone RED: 0,63-0,69 μm) skanera TM dla naturalnych (N) oraz odnawianych sztucznie (S) drzewostanów sosny łuczywowej (*Pinus taeda* L.) i sosny długolistnej (*Pinus palustris* Mill.). Semiwariancje te obliczono dla drzewostanów „starych" (ST) oraz „średniowiekowych" (ŚR). Drzewostany naturalne mają wyraźnie większe wartości semiwariancji niż drzewostany pochodzące z sadzenia. Można to wyjaśnić większym zróżnicowaniem struktury drzewostanów naturalnych. Ponadto można zauważyć silną zależność semiwariancji od gatunku sosny dla drzewostanów odnawianych różnymi sposobami. Wartości semiwariancji w przypadku sosny długolistnej są wyraźnie wyższe niż w przypadku sosny łuczywowej. Oznacza to, że semiwariancje mogą stanowić dobre sygnatury przestrzenne badanych lasów. Najbardziej odpowiednie do tego celu są wartości semiwariancji obliczane dla kilku długości wektora przesunięcia.

Dyskusja

Lasy są skomplikowanym ekosystemem, posiadającym złożoną strukturę przestrzenną. Zazwyczaj w poszczególnych drzewostanach występują różnorodne gatunki drzew i podszytu. Dlatego też spektralna i przestrzenna zmienność wewnętrzna (występująca w wybranym drzewostanie) jest zazwyczaj bardzo wysoka, często większa niż zmienność zewnętrzna (występująca pomiędzy rożnymi drzewostanami). Jest to sytuacja charakterystyczna dla zdjęć satelitarnych obszarów leśnych, rzadko występująca na zdjęciach satelitarnych na przykład terenów rol-



Ryc. 6.

Przykładowe semiwariancje izotropowe obliczone dla naturalnych (N) oraz odnawianych sztucznie (S) drzewostanów *Pinus taeda* L. i *Pinus palustris* Mill. obliczone dla drzewostanów starych (ST) i średniowiekowych (ŚR) o jednakowej powierzchni ok.150 ha

Examples of isotropic semivariances calculated for natural (N) and artificially regenerated stands (S) of *Pinus taeda* L. and *Pinus palustris* Mill. calculated for old (ST) and medium-age stands in the same areas of 150 ha

niczych, powierzchni oceanów czy utworów geologicznych. Dlatego obserwacje satelitarne obszarów leśnych wymagają szczególnie dokładnej znajomości wielu czynników wpływających na proces tworzenia zdjęcia satelitarnego lasów. Problemy te dyskutowane były szczegółowo w literaturze [Tucker 1986].

Semiwariogramy wykreślane na podstawie danych ze zdjęć satelitarnych obszarów zalesionych różnią się wyraźnie swoim charakterem od przedstawionej w niniejszej pracy podstawowej (klasycznej) ich formy. Najbardziej charakterystyczne formy semiwariogramów obszarów leśnych to formy nieograniczone oraz periodyczne. Początkowy szybki wzrost semiwariancji wynika z szybkiego spadku korelacji przestrzennej dla małych odległości. Liniowy wzrost semiwariancji dla większych odległości oraz brak nasycenia wynika z wolno zanikających, słabych korelacji występujących na większych odległościach. Takie „nieklasyczne", nieograniczone semiwariogramy są bardzo trudne do modelowania, szczególnie w przypadku posługiwania się techniką ruchomego okna w celach segmentacji zdjęcia satelitarnego. W przypadku stosowania technik satelitarnych o średnich zdolnościach rozdzielczych (20-30m), wzory widoczne na semiwariogramach o formie periodycznej najczęściej odpowiadają powtarzającym się układom drzewostanów i nie są związane z właściwościami pojedynczego drzewostanu.

Z drugiej jednak strony parametry semiwariogramów (zakres oddziaływania, próg oraz efekt samorodka) są ściśle związane z takimi cechami drzewostanu, jak skład gatunkowy, wiek i sposób odnowienia. Dzięki temu wyznaczone semiwariancje można wykorzystać jako sygnatury przestrzenne w celu odróżnienia różnych rodzajów obserwowanych lasów. O ile nieklasyczne kształty semiwariogramu powodują, że jego podstawowe parametry nie są szczególnie przydatne w celu klasyfikacji, w celu tym można jednak wykorzystać wartości semiwariancji obliczane dla odległości rzędu kilku długości wektora przesunięcia h (100-200m). Drzewostany naturalne mają zazwyczaj wyższe semiwariancje niż drzewostany odnawiane sztucznie, co wynika to z większej zmienności przestrzennej drzewostanów naturalnych. Przy tym samym sposobie odnowienia wartości semiwariancji uzyskane z obrazów drzewostanów sosny długolistnej są wyraźnie wyższe niż w przypadku sosny łuczywowej (ryc. 6).

Podsumowanie i wnioski

Obserwacje satelitarne stanowią skuteczną i tanią metodę prowadzenia obserwacji lasów w krótkim czasie na dużych obszarach. Badania zdjęć satelitarnych obszarów zalesionych mogą być oparte zarówno na analizie ich własności spektralnych, jak i tekstury. Analiza spektralna, wykorzystująca wartości jasności spektralnej pikseli tworzących te zdjęcia, stanowiła do niedawna główną technikę analizy zdjęć satelitarnych. Postęp w technice satelitarnej powoduje jednak, że coraz częściej wykorzystywana jest również informacja przestrzenna, szczególnie korelacje przestrzenne pomiędzy sąsiednimi pikselami. Badania ciągłości przestrzennej przeprowadza się najczęściej wykorzystując semiwariancję i semiwariancję wzajemną przy użyciu wartości jasności spektralnej pikseli lub wskaźników wegetacyjnych jako wartości zmiennych.

Parametry semiwariancji (zakres oddziaływania, próg oraz efekt samorodka) są ściśle związane z takimi cechami drzewostanu, jak skład gatunkowy, wiek i sposób odnowienia. Ułatwiają one ustalenie optymalnego sposobu zbierania informacji satelitarnej i sposobu przetwarzania otrzymanych obrazów. Wartości progu semiwariancji obliczanej ze zdjęć satelitarnych zależą silnie od długości fali elektromagnetycznej stosowanej do obserwacji. Zakres oddziaływania wyznacza optymalną zdolność rozdzielczą sondy satelitarnej oraz optymalny wymiar ruchomego okna służącego do wyznaczania różnorodnych miar statystycznych charakteryzujących teksturę badanego zdjęcia satelitarnego. Efekt samorodka reprezentuje

niezależny od odległości udział do wariancji, który wynika z błędu pomiarowego oraz zmienności na niewielkich odległościach.

Semiwariancje przedstawione w niniejszym artykule obliczane były na podstawie zdjęć drzewostanów sosny łuczywowej (*Pinus taeda* L.) i sosny długolistnej (*Pinus palustris* Mill.), wykonanych przez skaner TM satelity Landsat 5 w zachodniej części stanu Georgia, USA (ryc. 3). Najbardziej charakterystyczne formy wariogramów obszarów leśnych dla przestrzennej zdolności rozdzielczej tej sondy (30 m) to formy nieograniczone oraz periodyczne. Semiwariogramy nieograniczone (ryc. 4) związane są ze zmiennością przestrzenną w obrębie jednego drzewostanu, natomiast semiwariancje periodyczne odzwierciedlają uporządkowanie różnych drzewostanów w przestrzeni.

Pomimo stosunkowo niewielkiej zdolności rozdzielczej skanera TM satelity Landsat, wyznaczone semiwariancje można wykorzystać jako sygnatury przestrzenne w celach klasyfikacji obserwowanych lasów. Nieklasyczne kształty semiwariogramu sprawiają jednak, że jego podstawowe parametry (próg, zakres, efekt samorodka) nie są szczególnie przydatne w celu klasyfikacji. W celu tym można jednak wykorzystać wartości semiwariancji obliczane dla odległości rzędu kilku długości wektora przesunięcia h (100-200m). Porównując te wartości stwierdzono, że naturalne drzewostany mają zazwyczaj wyższe semiwariancje niż drzewostany odnawiane sztucznie (ryc. 6). Wynika to z większej zmienności przestrzennej drzewostanów naturalnych. Ponadto zauważono silną zależność semiwariancji od gatunku sosny dla drzewostanów odnawianych w podobny sposób. Wartości semiwariancji w przypadku sosny długolistnej są wyraźnie większe niż w przypadku sosny łuczywowej (ryc. 6).

Użyteczność informacji przestrzennej staje się szczególnie istotna w nierzadkich sytuacjach, gdy charakterystyki spektralne badanych lasów są podobne. Rolę semiwariancji w badaniach lasów technikami satelitarnymi zwiększa dodatkowo fakt, że można je wyliczać dla różnych pasm promieniowania oraz wyznaczać semiwariancje wzajemne pomiędzy wartościami jasności spektralnych pikseli z różnych pasm. W ten sposób zwiększa się wydatnie liczba posiadanych informacji przestrzennych.

Literatura

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.

Cambell J.B. 1994. Introduction to Remote Sensing. Guilford Press. New York.

Ciołkosz A., Kęsik A. 1989. Teledetekcja satelitarna. PWN, Warszawa

Curran P.J. 1988. The semivariances in remote sensing: an introduction. Remote Sensing of Environment. 24: 493-507.

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.

Czerwiakowski I. 1859. Botanika szczególna. Opisanie roślin dwulistnych. 3. Kraków. Pp. 821-1543. (842)

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.

ERDAS Field Guide. 1990. Fifth Edition. Erdas Inc., Atlanta, Georgia.

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 Hardbound, pp. 345-355.

Jordan C.F. 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, 50: 663-666.

Journel A.G., Huibregts C.J. 1978. Mining Geostatistics. Academic Press. London.

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.
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 biogeocenoz Białowieskiego Parku Narodowego na zdjęciach satelitarnych TM. Fotointerpretacja w Geografii. Tom 24: 90-99.
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.
Popławski Z.F., Zawiła-Niedźwiecki T. 1995. System informacji przestrzennej w analizie stanu lasu Sudetów z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych. Sylwan 8: 73-86.
Ramstein G., Raffy M. 1989. Analysis of the structure of radiometric remotely-sensed images. International Journal of Remote Sensing 17: 3523-3529.
Robertson G.P. 2000. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences, Gamma Design Software. Plainwell, Michigan USA.
Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Proceedings, Third ERTS Symposium, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, 1, pp.309-317.
St-Onge B.A., Cavayas F. 1995. Estimating forest stand structure from high resolution imagery using the directional semivariogram. International Journal of Remote Sensing 16: 1999-2001.
Tucker C.J., Fung I.Y., Keeling C.D., Gammon R.H. 1986. Relationship between atmospheric CO2 variations and a satellite-derived vegetation index. Nature 319: 195-199.
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.
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.
Woodcock C.E., Strahler A.H., Jupp D.B. 1988a. The use of semivariograms 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 semivariograms in remote sensing. II Real digital images. Remote Sensing of Environment 25: 349-379.
Wulder M. 1998. Optical remote-sensing techniques for assessment of forest inventory and biophysical parameters, Progress in Physical Geography 22: 449-476.
Wynne R.H., Oderwald R.G., Reams G.A., Scrivani J.A. 2000. Optical remote sensing for forest area estimation. Journal of Forestry. 98(5): 31-36.
Zawadzki J. 2002. Badania korelacji przestrzennych zawartości pierwiastków śladowych w glebach Warszawy i jej okolic. Ochrona Środowiska 4 (87).

SUMMARY

Semivariances of Landsat TM satellite imagery texture of forested areas

Use of remote sensing is an efficient approach to data acquisition over large areas. It is frequently used in large area forest inventories, where it proofs to be effective and cost efficient. Especially, due to recent advances in satellite techniques, spatial information becomes more and more important in both inventories and other fields. Processing of remotely sensed images can be based on analyses of spectral characteristics and textural information. The most commonly used methods for image classification of remotely sensed images is applied using individual pixel analysis, on pixel-by-pixel basis, without considering potentially useful spatial information about correlations among neighboring pixels.

Spatial continuity is usually analyzed using semivariances and cross-semivariances with pixel digital numbers or vegetation indices as variables. Semivariance parameters (range, sill, and nugget effect) are closely related to such forest characteristics, as species composition, age, and stand origin, and facilitate determination of the best methods for data collection and processing of resulting images.

The semivariogram sill values depend strongly on the wavelength used by the satellite sensor that gathers the information. The range indicates optimal resolution of the satellite

sensors and optimal size of the moving window used for determination of various statistical characteristics of the image texture. The nugget effect represents distance-independent part of the variance, which comes from measurement errors and variability over short distances.

Semivariances presented in this paper were calculated using satellite images of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) and longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) stands located in western part of Georgia, USA, obtained from the TM-scanner of the Landsat 5 satellite. The most characteristic forms of the semivariograms of forested area, which we obtained for the spatial resolution of 30m, were unbounded and periodic ones. Unbounded semivariograms result from the spatial variability within single stands. Periodic semivariances reflect arrangement of various stands in the space. The results showed that in spite of the low Landsat TM spatial resolution (30m), the semivariances might give useful additional information, and can be treated as spatial signatures for classification of the forest stands.

However, non-classic shapes of semivariograms cause that their basic parameters (range, sill, and nugget effect) are not particularly useful for classification of forest stands. Yet, it is possible to use semivariance values calculated for the distance of a few lags (100-200m). When comparing those values we concluded, that natural stands have usually higher semivariance values than planted stands, which is a result of higher spatial variability of natural stands. We noted also a strong relationship between the semivariance and stand species composition for a given stand origin. Semivariances of the longleaf stands are noticeably higher than for those of loblolly pine.