

TECHNIKI TELEDETEKCYJNE W INWENTARYZACJI URZĄDZENIOWEJ LASU

REMOTE SENSING TECHNIQUES IN FOREST INVENTORY

Grzegorz Zajązkowski*, Piotr Węzyk**

* Zakład Urządzania i Monitoringu Lasu, Instytut Badawczy Leśnictwa

** Laboratorium GIS, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny AR Kraków

Słowa kluczowe: teledetekcja, QuickBird, zarządzanie lasu, inwentaryzacja lasu
Keywords: remote sensing, QuickBird, forest management, forest inventory

Wstęp

Szybki rozwój technologii geoinformatycznych w tym teledetekcyjnych, jaki ma miejsce w ostatnich latach, skłania do ponownego rozważenia celowości zastosowania wybranych metod zdalnego pozyskiwania danych o strukturze drzewostanów i ich stanie zdrowotnym jako elementów wspomagającego tradycyjne metody inwentaryzacji lasu. Dotychczasowe doświadczenia praktycznych zastosowań geodanych w leśnictwie polskim, takich jak zdjęcia lotnicze, obrazy satelitarne czy pomiary GPS, nie dały decydentom wystarczających argumentów do opracowania i wdrożenia do praktyki urzędniowej metod wspomaganych teledetekcją. Coraz szybszy i powszechny dostęp do wysokiej jakości obrazów lotniczych i satelitarnych rejestrujących środowisko przyrodnicze w zakresach promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni (NIR) oraz istotny postęp w technologiach wspomagających interpretację obrazów (np. systemy zorientowane obiektowo) pozwalają przypuszczać, że w niedługiej przyszłości wykorzystanie danych teledetekcyjnych stanie się nie tylko pożądane, ale i konieczne. Wynikać to będzie przede wszystkim z aktualności geodanych i ich wysokiej jakości (np. rozdzielczości terenowej czy spektralnej) oraz stopniowo malejących kosztów ich pozyskania i przetworzenia.

Doświadczenia krajów skandynawskich oraz północnoamerykańskich dowodzą, że już dzisiaj można prowadzić inwentaryzację drzewostanów przy wyłącznym wykorzystaniu zdalnych technik pozyskiwania danych o lesie (Gougeon 2000, Dawson i Gougeon 2000, Leckie i in. 2003a, Leckie i in. 2003b). Na szczególną uwagę zasługuje opracowany przez zespół naukowców z ośrodka Pacific Forest Research Station w Kanadzie system pozyskiwania i przetwarzania danych bazujący na oprogramowaniu ITC (*individual tree recognition*) oferujący możliwość automatycznego wyznaczania geopozycji drzew na obrazach lotniczych, określania wielkości ich koron, półautomatycznej klasyfikacji gatunków w oparciu o

pola treningowe oraz automatycznego wyznaczania i wektoryzacji granic drzewostanów utworzonych jako zbiory poszczególnych drzew. W przypadku wykorzystania dodatkowych laserowych odczytów wysokości, pozwala on również na ocenę miąższości wydzielonych drzewostanów. Wszystkie te operacje wykonywane są z dokładnościami dorównującymi lub przewyższającymi wymagania stawiane w Kanadzie tradycyjnym technikom kombinowanej inwentaryzacji drzewostanów i z tego powodu wielu autorów postuluje zmianę dotychczasowych metod w kierunku tzw. leśnictwa precyzyjnego (*precision forestry*) (m. in. Gougeon 2000, Andersen i in. 2001, Dickson i in. 1999). Trudno jest jednak porównywać polskie lasy, charakteryzujące się dużym rozdrobnieniem kompleksów leśnych oraz dużą zmiennością w składach gatunkowych drzewostanów do rozległych borealnych lasów iglastych Europy Północnej i Ameryki. Trudno więc, bez dodatkowych badań, odpowiedzieć na pytanie, czy opracowane dla tych części świata teledetekcyjne metody opisu drzewostanów można wykorzystać przy inwentaryzacji zasobów leśnych Polski.

Zaprezentowane wstępne wyniki badań są wynikiem projektu prowadzonego w Zakładzie Urządzania i Monitoringu Lasu Instytutu Badawczego Leśnictwa we współpracy z Laboratorium GIS i Teledetekcji Katedry Ekologii Lasu na Wydziale Leśnym Akademii Rolniczej w Krakowie na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

Analizę stanu omawianego zagadnienia w literaturze światowej, w zakresie nieobejmującym wyników badań własnych autorów niniejszego opracowania, przedstawiono na podstawie ekspertyzy wykonanej na zlecenie Zakładu Urządzania Lasu Instytutu Badawczego Leśnictwa (Zajązkowski, 2004).

Celem badań jest ocena przydatności aktualnie dostępnych źródeł pozyskiwania informacji o lesie (alternatywnych w stosunku do tradycyjnych pomiarów naziemnych) pod kątem ich przydatności w inwentaryzacji urzędzeniowej. Ocenie poddano wysokorozdzielcze zobrazowania satelitarne wykonywane przez satelitę QuickBird, panchromatyczne zdjęcia lotnicze w skali 1:13 000, obrazy hiperspektralnego skanera lotniczego AISA, pomiary dokonywane odbiornikami GPS oraz wybrane inne materiały. Przydatność wymienionych źródeł informacji o drzewostanie testowano na bazie pomiarów terenowych wykonanych w okresie letnim 2003 oraz 2004 w lasach Nadleśnictwa Staszów (Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych Radom) oraz Nadleśnictwa Niepołomice (RDLP Kraków). Rejestracji zobrażeń satelitarnych QuickBird dla wybranych obszarów ww. Nadleśnictw wykonano 15 września 2003 roku. Charakteryzowały się one wysoką rozdzielczością terenową wyrażającą się wielkością piksela 0,6 x 0,6 m (w przypadku skanera kanału panchromatycznego) oraz 2,4 x 2,4 m (skaner wielospektralny RGB oraz NIR). Panchromatyczne zdjęcia lotnicze zeskanowane pikselem ok. 0,2 x 0,2 m wykonano późną wiosną 2003 roku. Dane z hiperspektralnego (32 kanały) skanera lotniczego AISA, charakteryzowały się wielkością piksela wynoszącą 1,0 x 1,0 m, a zarejestrowano je 13 sierpnia 2001 roku (w ramach projektu FOREMMS – 5FP UE).

Analiza zakresu prac urzędzeniowych określonych w *Instrukcji urządzania lasu* pozwoliła na wskazanie tych elementów opisu taksacyjnego drzewostanów oraz siedliska, dla których istnieją alternatywne źródła pozyskania informacji, w tym przede wszystkim teledetekcyjne. Zaliczono do tych elementów:

- skład gatunkowy,
- zwarcie,
- zagęszczenie,
- formę zmieszania,

- powierzchnię produkcyjną,
- budowę pionową,
- wysokość drzew,
- nachylenie terenu, oraz
- wystawę stoku.

Dodatkowo analizie poddano przydatność danych teledetekcyjnych w procesie weryfikacji i aktualizacji przebiegu granic wyłączeń drzewostanowych.

Ocena przydatności wybranych źródeł informacji o lesie w inwentaryzacji urządzeniowej

Weryfikacja granic wyłączeń drzewostanowych

Na potrzeby oceny przydatności zobrazowań satelitarnych oraz pomiarów GPS do weryfikacji przebiegu granic wyłączeń drzewostanowych, określono przebieg linii granicznych dla 6 oddziałów w Nadleśnictwie Staszów (34 wyłączenia drzewostanowe) oraz 3 w Nadleśnictwie Niepołomice (23 wyłączenia) przy wykorzystaniu odbiorników kartograficznych GPS Pathfinder ProXRS (Trimble). Otrzymane współrzędne pozycji mierzonych punktów (punkty załamania linii) były wynikiem uśredniania od kilkudziesięciu do ponad dwustu pomiarów pozycji (maska horyzontu 10 stopni, pomiar 2D/3D). Identyfikacja i weryfikacja przebiegu linii granicznych wydzieleń drzewostanowych była możliwa dzięki ich dobremu oznakowaniu w terenie (urządzenie lasu zakończono w roku 2001 i 2002). W przypadku granic oddziałów punkty pomiarowe lokalizowano na środkach skrzyżowań linii oraz dróg. Uzyskane pomiary poddawano korekcji różnicowej (tryb post-processing) na podstawie danych ze stacji korekcyjnych w Krakowie (AR), Puławach (IUNG) i Zakopanem (TPN), przez co średni błąd pomiaru DGPS w tych drzewostanach nie powinien był przekroczyć pod okapem drzew 2,0 m dla współrzędnych płaskich (Szczygielski 2003; Wężyk i in. 2001). Przeciętny czas pomiaru granic w obrębie pojedynczego oddziału przez dwuosobowy zespół pomiarowy wyniósł ok. 6 godzin, przy czym, ze względu na duży udział warstwy podszytu i podrostu w Staszowie i siedlisk wilgotnych w Niepołomicach, mierzone drzewostany należy uznać za trudno dostępne. Uzyskany z pomiaru DGPS przebieg granic porównano z wektorem leśnej mapy numerycznej (LMN). Jako wskaźnik porównawczy wykorzystano powierzchnię poszczególnych wyłączeń. Dysponowano trzema wartościami powierzchni, tj.: zapisaną w bazie SILP (tzw. powierzchnią ewidencyjną), wyznaczoną na podstawie poligonów LMN oraz wyznaczoną na podstawie pomiarów DGPS. Warstwę geometryczną pochodzącą z pomiaru DGPS poddano transformacji do PUWG 1992/19 przy pomocy oprogramowania TraKo (Taxus SI). Przeprowadzone porównanie pozwoliło na wskazanie różnic w przebiegu odpowiadających sobie linii, dzięki czemu określono wartość błędu przeniesienia granic oznakowanych w terenie do warstwy geometrycznej wydzieleń w LMN. Uzyskane z oprogramowania ArcGIS (ESRI) wartości powierzchni poligonów reprezentujących wydzielenia, zestawiono z przypisaną im w SILP powierzchnią ewidencyjną. Zakres wartości różnic wahał się od 1,0 do 38,0%. Różnice pomiędzy powierzchnią ewidencyjną wyłączeń drzewostanowych a wyznaczoną na podstawie DGPS wahały się natomiast od 1,0 aż do 46%, choć w większości przypadków nie przekraczały one 20%. Z kolei różnice w powierzchni pomiędzy pomiarami DGPS w odniesieniu do LMN wahały się od 0,1 do 41%, w większości przypadków nie przekraczając 10% (rys. 1).

Wartości wyliczonych różnic były zależne od rzeczywistej wielkości ich powierzchni. Maksymalne różnice występowały na ogół w małych wyłączeniach (do 3 ha), minimalne zaś w wyłączeniach dużych (7–16 ha).

W pracach podjęto również próbę przeprowadzenia korekty przebiegu granic wydzieleń zastabilizowanych przez urządzenie lasu na pniach w terenie przy wykorzystaniu obrazów satelitarnych z satelity QuickBird oraz pomiarów DGPS. Wyniki interpretacji zasięgu poszczególnych wyłączeń drzewostanowych na obrazie cyfrowym sugerują błędy wyznaczenia granic sięgające w pojedynczych przypadkach nawet 50% powierzchni wyłączeń. W większości jednak różnice te nie przekraczały kilku procent. W kilku przypadkach nie udało się uchwycić przebiegu granicy na obrazie satelitarnym. Z drugiej strony analiza obrazu QuickBird dawała podstawy do wyznaczenia całkiem nowych wyłączeń (rys. 2.).

Wyniki przeprowadzonego doświadczenia dowodzą pilnej potrzeby przeprowadzania aktualizacji granic wyłączeń drzewostanowych w badanych obiektach. Pozwalają również potwierdzić przydatność stosowania obrazów satelitarnych i technik DGPS przy weryfikacji przebiegu wyłączeń taksacyjnych. Przydatność ta dotyczy także obrazów ze skanera lotniczego AISA testowanych na fragmencie lasów Nadleśnictwa Niepołomice.

Zwarcie koron

Stopień zwarcia koron w drzewostanie określany jest podczas prac taksacyjnych. Kryterium oceny jest wzajemna odległość pomiędzy pojedynczymi koronami drzew. Ze względu na zmienność tej cechy w różnych częściach wyłączeń drzewostanowych istnieje możliwość dokonania błędnej oceny stopnia zwarcia przez taksatora. Wykorzystanie zdjęć lotniczych i obrazów ze skanerów lotniczych i satelitarnych może przyczynić się do eliminacji tego błędu dzięki możliwości uwzględnienia przy interpretacji obrazów całych zasięgów wyłączeń. Dotyczy to jednak tylko górnego piętra drzewostanu. Należy bowiem pamiętać o ograniczeniach dotyczących drzewostanów o strukturze dwu- lub wielopiętrowej. Dane teledetekcyjne, z jakich korzystano mają charakter tzw. źródeł optycznych, tzn. nie można oczekiwać wykrywania obiektów (koron) pod sklepieniem drzewostanu lub w zacienionych lukach.

Zagęszczenie drzew

W obowiązującej obecnie *Instrukcji urządzania lasu*, ze względu na stosowaną metodę inwentaryzacji zapasu, znajduje się wymóg określania zagęszczenia drzew w drzewostanie. Wartości tej cechy można pozyskać podczas prac inwentaryzacyjnych na powierzchniach kołowych, jednak przyjęta dla tych prac metodyka nie pozwala na uzyskanie dokładnych wyników na poziomie pojedynczych drzewostanów. Nie przewidziano również oddzielnej metody określania stopnia zagęszczenia drzew. Pewnym rozwiązaniem mogłoby być zastosowanie zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych, na których (w zależności od ich rozdzielczości terenowej) można odczytać informację o liczbie drzew na jednostce powierzchni. Poprawność tej tezy sprawdzono na przykładzie kilkudziesięciu drzewostanów sosnowych, jodłowych i bukowych III i starszych klas wieku, na których podczas prac terenowych policzono wszystkie występujące tam drzewa o pierśnicy powyżej 7 cm z pominięciem warstwy podszytu. W wyniku porównania danych terenowych z danymi uzyskanymi z interpretacji wzrokowej obrazu satelitarnego QuickBird (rys. 3.) zaobserwowano dla drzewostanów:

- sosnowych: stosunkowo dużą zgodność w obrębie III i IV klasy wieku (różnice rzędu 2–16%) i już znacznie mniejszą w V klasie wieku (1–32%);
- jodłowych: duże zróżnicowanie wyników; w drzewostanach o wyraźnym górnym piętrze różnice nie przekraczały 10%, w drzewostanach o strukturze przerębowej różnice te sięgały nawet 68%;
- bukowych: dużą zgodność (różnice 2–7%) w drzewostanach rębnych i bliskorębnych (V i VI klasa wieku), bez względu na czynnik zadrzewienia oraz niższą zgodność (przeciętnie ok. 25%) dla drzewostanów III i IV klasy wieku.

Przeprowadzony eksperyment, ze względu na stosunkowo niewielką próbę jednorodnych drzewostanów uwzględnionych w badaniach, nie może stanowić podstawy do jednoznacznego stwierdzenia przydatności materiałów teledetekcyjnych do określania zagęszczenia drzew w drzewostanie. Pozwala jednak na wskazanie określonych typów drzewostanów, dla których dane te mogą być przydatne. Analiza aktualnej literatury światowej z tego zakresu wskazuje najczęściej na cyfrowe obrazy satelitarne i lotnicze jako najbardziej pożądane w tego typu badaniach. Przydatność tych materiałów warunkowana jest średnicą koron wyrażoną liczbą pikseli obrazu. Wartość ta powinna zamykać się w granicach 2–5 pikseli (Bolduc i in. 1999), choć dla równomiernie zwartych koron dopuszcza się nawet 25 pikseli (Pouliot i in. 2002, Culvenor 2002, Leckie i Gougeon 1998). Z tego względu dla drzewostanów, w których średnica korony waha się w granicach 2–5 metrów powinno się stosować skanery o rozdzielczości nie gorszej niż 1 m (np. AISA, IKONOS), a w przypadku koron mniejszych (młodsze drzewostany) – skanery o rozdzielczości terenowej rzędu 0,1–0,6 m (np. kanał panchromatyczny QuickBirda, cyfrowe kamery lotnicze, skanowane zdjęcia analogowe). Dla koron większych, których średnica przekracza 5 m, można stosować skanery o niższej rozdzielczości rzędu 2–4 m (np. kanały multispektralne QuickBirda lub satelity IKONOS).

Istotnym czynnikiem w tego typu analizach jest subiektywizm interpretatora dokonującego przetworzenia obrazu. W celu wyeliminowania tego czynnika podjęto już wiele prób opracowania specjalistycznych programów wspomagających liczenie obiektów (w tym wypadku drzew) na obrazach cyfrowych (rys. 4). Jednak tylko w nielicznych przypadkach znalazły one zastosowanie w praktyce leśnej (Gougeon 2000, Andersen i in. 2001; Dickson i in. 1999).

Skład gatunkowy oraz formy zmieszania gatunków

Obrazy lotnicze i satelitarne, wykorzystujące do rejestracji pasma widzialne i bliską podczerwień, w zakresie której obserwuje się wyraźne zróżnicowanie odpowiedzi spektralnej poszczególnych gatunków drzew, pozwalają na zdalne określenie ilościowego składu gatunkowego drzewostanów na podstawie udziału powierzchni rzutu koron występujących gatunków drzew, a w pewnych typach drzewostanów, również na podstawie liczby drzew poszczególnych gatunków (patrz rozdział „Zagęszczanie drzew”). Przestrzenne zróżnicowanie położenia poszczególnych gatunków odczytane z obrazu cyfrowego może być jednocześnie podstawą do określenia formy zmieszania gatunków (rys. 5).

W tego typu analizie rozdzielczość terenowa przydatnych do wykorzystania obrazów również zależy od przeciętnej wielkości koron drzew. Wyniki własnych obserwacji autorów sugerują, że zalecana wielkość pojedynczego piksela w drzewostanach III klasy wieku powinna zawierać się w przedziale 0,5–1,0 m, a w starszych 1,0–4,0 m. Zbyt wysoka rozdzielczość, a przez to nadmierna szczegółowość, wpływa bowiem na trudności w poprawnym wyznaczeniu zakresu spektralnego pikseli przypisanych do poszczególnych gatunków drzew (występowanie „podkoron” np. u buka utrudnia dodatkowo kalsyfikację).

Powierzchnia produkcyjna

Tak jak w przypadku określania składu gatunkowego drzewostanów, zastosowanie metod teledetekcyjnych umożliwi lokalizację w drzewostanie większych luk oraz obszarów będących efektem prowadzonego odnowienia lasu w postaci gniazd i pasów (rys. 6). Dzięki takiej analizie można pozyskać informację o powierzchni zajmowanej przez poszczególne fazy rozwojowe drzewostanu oraz powierzchni luk. Im wyższa rozdzielczość terenowa analizowanych obrazów tym wynik wyznaczania powierzchni tych obiektów jest dokładniejszy. Informację o zasięgu gniazd, pasów i luk można również z powodzeniem uzyskać dokonując pomiarów DGPS, gdyż sygnał docierający do odbiornika jest o wiele silniejszy niż w pomiarach w zwartych drzewostanach.

Wysokość drzew, budowa pionowa oraz ukształtowanie terenu

Obecnie do określania wysokości drzew oraz budowy pionowej drzewostanów najczęściej stosuje się skaniny laserowe (Wack, Schardt 2004) (rys. 7, 8), a stosunkowo rzadko jeszcze sensory radarowe. Dla indywidualnych drzew wysokość odczytuje się jako różnicę między odbiciem odpowiadającym wierzchołkowi a odbiciem interpretowanym jako powierzchnia gruntu. Zakłada się, że wierzchołkowi drzewa odpowiada jedno najwyższe odbicie z grupy kilku odbić odpowiadających jednej koronie (Leckie i in. 2003a). Wysokości oszacowane tym sposobem są zwykle niedoszacowane o ok. 0,6–1,0 m (Gaveau i Hill 2003, Wynne i in. 2002, Lefsky i in. 1999, Wack, Schardt 2004). Dokładność informacji o wysokości drzewostanów pozyskana z sensorów radarowych jest nieco niższa i wynosi ok. 2 m. (Hallikainen i in. 1993).

Zasygnalizowane techniki określania wysokości drzew umożliwiają jednocześnie określenie budowy pionowej, dzięki możliwości docierania sygnałów do niższych warstw występujących w drzewostanie (w zależności od rejestracji pierwszego czy ostatniego odbitego sygnału). W niektórych przypadkach daje się wykorzystać technologię skaningu laserowego do pozyskiwania danych o ukształtowaniu terenu (tj. o wysokości n.p.m., nachyleniu stoku oraz wystawie), dzięki czemu możliwe jest generowanie numerycznego modelu terenu (NMT), a raczej pokrycia terenu (NMPT) będącego podstawą poprawnej ortorektifikacji obrazów satelitarnych czy zdjęć lotniczych.

Inne charakterystyki drzewostanu

Błędy szacunku miąższości czy biomasy pojedynczego drzewa na podstawie uzyskanych teledetekcyjnie przestrzennych modeli ich koron pozostają nadal dość wysokie (Holmgren 2002, Popescu i in. 2003). Tym niemniej przeliczenia tych wielkości na jednostkę powierzchni, bazujące np. na maksymalnej wysokości drzew, ich zagęszczeniu i zwarciu koron, osiągają dokładności porównywalne ze statystycznymi metodami inwentaryzacji naziemnej (Hyypäe i in. 2001, Bolduc i in. 1999, Lefsky i in. 2001, Lefsky i in. 1999, St-Onge i Renaud 2001, Magnussen i Boudewyn 1998; Wack, Schardt 2004, Piekarski i Będkowski 1991). Stwierdzono ponadto, że dane o poziomej strukturze koron pozwalają na wnioskowanie o przestrzennym zróżnicowaniu biomasy w drzewostanach oraz miarach ekologicznej różnorodności i stanu zdrowotnego lasów (Coops i in. 1998, King 2002).

Dane teledetekcyjne umożliwiają ponadto wykrycie różnych stanów fizjologicznych pojedynczych drzew. Stany te uzewnętrzniają się jako przebarwienia koron, dobrze widoczne

zwłaszcza na zobrazowaniach wielospektralnych. Nawet na obrazach z satelitów LANDSAT TM (piksel kanału spektralnego 30x30 m) możliwe jest wykrycie martwych fragmentów lasu z praktycznie 100-procentową dokładnością (Zawiła-Niedźwiedzki i in. 2001) i to samo odnosi się do zobrazowań wysokorozdzielczych (Haara i Nevalainen 2002). Zdjęcia na spektrostrefowym filmie 35 mm są z powodzeniem stosowane przez *US Forest Service* do okresowej inwentaryzacji stanu sanitarnego lasu (King 2000). Potwierdzono możliwość zdalnego wyszukiwania gniazd hubowych w drzewostanach dąglezjowych, zwłaszcza na podstawie zmian w odbiciu w zakresie promieniowania czerwonego i podczerwonego (Leckie i in. 2004). Uzyskano też obiecujące wyniki wyszukiwania gniazd kornikowych jako miejsc o podwyższonej chlorozie igieł, chociaż stwierdzono też, że nawet zdrowe drzewa wykazują dużą zmienność charakterystyk spektralnych swych koron (Carter i in. 1998).

Specjalistyczne programy do przetwarzania i interpretacji danych teledetekcyjnych umożliwiają ponadto grupowanie drzewostanów podobnych pod względem wieku, składu gatunkowego oraz zagęszczenia (tekstury). Informacja ta może być przydatna przy weryfikacji składu grup stratyfikacyjnych wyznaczanych przy inwentaryzacji zapasu. Przydatnym do tego celu narzędziem może być np. oprogramowanie eCognition firmy Definiens, umożliwiające wykonywanie złożonej analizy tekstury obrazu poprzez jego fragmentację. Przeprowadzone na przykładzie północnego fragmentu Puszczy Niepołomickiej doświadczenie wykazało celowość tego typu analizy do określania faz rozwojowych drzewostanów liściastych (Wężyk, Kok, Zajaczkowski, 2004).

Podsumowanie

Obowiązująca Instrukcja urządzania lasu dopuszcza stosowanie teledetekcyjnych źródeł informacji podczas prac taksacyjnych prowadzonych w drzewostanach. Nie określa jednak zakresu możliwych zastosowań ani konkretnych źródeł tych danych, co w praktyce wpływa na istotne ograniczenie ich wykorzystania. Przedstawiona w niniejszym referacie analiza przydatności alternatywnych, w stosunku do pomiarów naziemnych, metod pozyskiwania danych o lesie dowodzi, że obrazy lotnicze (analogowe i cyfrowe) i satelitarne a także techniki GPS, przy uwzględnieniu funkcjonowania Systemu Informatycznego Lasów Państwowych, mogą w niektórych przypadkach nie tylko wspomagać taksatorów w pracach terenowych, ale nawet zapewnić dostęp do pełnego zakresu wymaganej informacji. Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić celowość zastosowania odbiorników DGPS oraz obrazów lotniczych i satelitarnych (QuickBird i zdjęć lotniczych) przy aktualizacji przebiegu wszelkich granic wewnętrznych w kompleksach leśnych, przy czym najlepsze wyniki daje jednocześnie zastosowanie obu technik. Z zarejestrowanych cyfrowych obrazów można dla pewnych typów drzewostanów pozyskać również informację o zwarciu koron, ilościowym składzie gatunkowym, liczbie drzew oraz formie ich zmieszania. Wykorzystanie skaningu laserowego umożliwia natomiast pozyskiwanie dokładnych danych o wysokości drzew i budowie pionowej drzewostanów oraz o ukształtowaniu terenu. Wydaje się, że w miarę rozwoju technik radarowych i laserowych uda się w niedługim czasie uzyskać precyzyjną informację o zasobności drzewostanów. Ponadto dane teledetekcyjne pozwalają lokalizować fragmenty martwego lub uszkodzonego drzewostanu. Dają też możliwość śledzenia zmian zachodzących w drzewostanach w kolejnych latach realizacji planów gospodarczych nadleśnictw.

Należy jednak pamiętać o istniejących ograniczeniach i wadach omawianych technik pozyskiwania danych. Termin rejestracji obrazów satelitarnych i lotniczych jest niezmiernie istotny i musi brać pod uwagę okres wegetacyjny i w większości dostępnych systemów teledetekcyjnych, także bezchmurną pogodę. Istotnym ograniczeniem w Polsce jest także cena tych materiałów, która dla 1 km² lasu waha się w granicach 20–30 \$ (wysokorozdzielcze skanery satelitarne QuickBird, IKONOS). W przeliczeniu na powierzchnię, dla przeciętnego polskiego nadleśnictwa generuje to sumy rzędu kilkunastu tysięcy złotych przy założeniu, że możliwe będzie zakupienie wyłącznie tych fragmentów obrazów, które pokrywają się z zasięgiem kompleksów leśnych. Uruchomienie stacji odbioru satelity IKONOS w Komorowie koło Warszawy i promocyjne ceny mogą dać w polskich warunkach poważną szansę dla rozwoju zastosowań teledetekcji na obszarach leśnych. Jeszcze innym ograniczeniem dla wykorzystania omawianych technik jest dosyć wąska grupa specjalistów w zakresie przetwarzania i interpretacji obrazów lotniczych i satelitarnych

Wykonywana obecnie w Polsce dla potrzeb LPIS i IACS ortofotomapa lotnicza (skale 1:13 000 i 1:26 000) może okazać się niezastąpionym materiałem do weryfikacji zmian jakie następują w wyniku prowadzenia gospodarki leśnej

Podsumowując omówione pierwsze wyniki projektu oraz doświadczenia innych autorów należy stwierdzić bezwzględną konieczność szerszego niż dotychczas wykorzystania technologii teledetekcyjnych do pozyskiwania danych o drzewostanach w procesie inwentaryzacji urzędzeniowej, przede wszystkim ze względu na ich obiektywizm.

Literatura

- Andersen H.E., Reutebuch S.E., Schreuder G.F., 2001: Automated individual tree measurement through morphological analysis of Lidar-based canopy surface model. Proc. 1st Int. Precision Forestry Coop. Symp., Seattle, ss. 11-22.
- Bolduc P., Lowell K., Edwards G., 1999: Automated estimation of localized forest volume from large-scale aerial photographs and ancillary cartographic information in a boreal forest. *International Journal of Remote Sensing*, 20(18), ss. 3611-3624.
- Carter G.A., Seal M.R., Haley T., 1998: Airborne detection of southern pine beetle damage using key spectral bands. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(7), ss. 1040-1045.
- Coops N.C., Culvenor D.C., Catling P.C., Preston R., 1998: Procedures for predicting habitat and structural attributes in eucalypt forests using high spatial resolution remotely sensed imagery. *Australian Forestry*, 61(4), ss. 244-252.
- Dawson A., Gougeon F.A., 2000: Procedure for individual tree crown (ITC) analysis of an image. http://www.pfc.forestry.ca/profiles/gougeon/docs/ITC-Suite_Manual.pdf, ss. 25.
- Dickson E., Franklin S.E., Moskal L.M., 1999: Monitoring of forest biodiversity using remote sensing: Forest stand (high spatial resolution) protocol and examples. Alberta Biodiv. Monitoring Prog. <http://www.abmp.arc.ab.ca/chapter09.pdf>, ss. 26
- Gaveau D.L., Hill R.A., 2003: Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, ss. 650-657.
- Gougeon F.A., 2000: Towards semi-automatic forest inventories using individual tree crown (ITC) recognition. Technology Transfer Note. *Forestry Research Applications. Pacific Forestry Centre*. Nr 22, ss. 6.
- Haara A., Nevalainen S., 2002: Detection of dead or defoliated spruces using digital aerial data. *Forest Ecology and Management*, 160, ss. 97-107.
- Hallikainen J., Hyyppä J., Haapanen T., Tares P., Ahola J., Pulliainen M., Toikka M., 1993: A helicopter-borne eight-channel ranging scatterometer for remote sensing - Part I: system description, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol 31, No 1, pp. 161-169.
- Holmgren J., 2002: Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Doct. Thesis. Swedish Univ. Agric. Sc., Umea, ss. 41.

- Hui A., Liew S.C., Kwok L.K., Hock L., 2000: Extraction and utilization of geometrical and contextual information in very high resolution IKONOS satellite imagery. Proc. 21th Asian Conf. Rem. Sens. Taipei, Vol. 1, ss. 158-163.
- Hyypäe J., Kelle O., Lehtikoinen M., Inkinen M., 2001: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5), ss. 969-975.
- King D.J., 2000: Airborne remote sensing in forestry: sensors, analysis and applications. *Forestry Chronicle*, 76(6) Spec. Issue on Rem. Sens., ss. 25-42.
- Leckie D.G., Gougeon F.A., Hill D.A., Quinn L., Armstrong L., Shreenan R., 2003a: Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), ss. 633-649.
- Leckie D.G., Gougeon F.A., Sturrock R.N., Paradine D., 2004: Detection and assessment of trees with *Phellinus weirii* (laminated root rot) using high resolution multi-spectral imagery. **Canadian Journal of Remote Sensing**. Online preview: <http://taylorandfrancis.metapress.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1080/0143116031000139926>
- Leckie D.G., Gougeon F.A., Walsworth N., Paradine D., 2003b: Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 85, ss. 355-369.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J., 2002: Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52(1), ss. 19-30.
- Lefsky M.A., Harding D.J., Cohen W.B., Shugart H.H., 1999: Surface Lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *BioScience*, 52(1), ss. 19-30.
- Magnussen S., Boudewyn P., 1998: Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(7), ss. 1016-1031.
- Piekarski E., Będkowski K., 1991: Fotografia lotnicza jako źródło informacji o lesie – fotogrametryczna taksacja drzewostanów i inwentaryzacja zapasu. [W:] Andrzejewski R. (red.): Metody oceny stanu i zmian zasobów leśnych. Wyd. SGGW-AR), ss. 105-118.
- Popescu S.C., Wynne R.H., Nelson R.F., 2003: Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(5), ss. 564-577.
- St-Onge B., Renaud A., 2001: Estimating merchantable timber volume of aspen and spruce stands of the boreal forest using airborne laser altimetry. Proc. 23rd Ann. *Canad. Symp. on Rem. Sens.*, Quebec, ss. 6.
- Szczygielski K., 2003: Pomiary metodą DGPS w zmieniających się warunkach drzewostanowych. Praca magisterska w Katedrze Ekologii Lasu. Wydział Leśny Akademii Rolniczej w Krakowie.
- Wack R., Schardt M., 2004: Ableitung von Gelände- und Forstparametern mit Laserscannerdaten für die Modellierung von Lawinenabgängen. *Angewandte Geoinformatik 2004, Beiträge zum 16. AGIT-Symposium Salzburg*. Wichmann, p. 754-759.
- Węzyk P., de Kok R., Zajączkowski G., 2004: The role of statistical and structural texture analysis in VHR image analysis for forest applications. A case study on Quickbird data in the Niepolomice Forest. *Angewandte Geoinformatik 2004, Beiträge zum 16. AGIT-Symposium Salzburg*. Wichmann Verlag, p. 770-775.
- Węzyk P., Koziół K., Madejczyk A., 2001: Zakładanie sieci powierzchni monitoringowych w terenach leśnych metodą DGPS. I Krajowa Konferencja „System Informacji Przestrzennej w Lasach Państwowych” – Rogów. Publikacja wydana na CD-R, 2001
- Wynne R.H., Nelson R.F., Popescu S.C., 2002: Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, ss. 71-95.
- Zajączkowski J., 2004: Możliwości określania wybranych charakterystyk koron pojedynczych drzew na obrazowaniach lotniczych i satelitarnych w świetle literatury światowej.
- Zawiła-Niedźwiedzki, T., Wiśniewska, E., Iracka, M., 2001: Zdjęcia lotnicze i satelitarne w leśnictwie. *Mat. XI Konf. PTIP Systemy Inf. Przestrz.*, Warszawa, ss. 317-327.

Summary

In the paper, preliminary results of research are presented. The project was executed by the Forest Management and Monitoring Unit of the Forestry Research Institute in cooperation with the GIS and Remote Sensing Laboratory at the Forest Ecology Department of the Forestry Faculty at the Kraków Agricultural Academy and was commissioned by the Directorate General of State Forests. Analysis of current state of the issue as discussed in world literature, not including results of the research of the authors' of this paper, was ordered by Forest Management Unit of the Forestry Research Institute.

The aim of this research is assessment of currently available information sources about forests (alternative to traditional ground measurements) from the point of view of their possible use in forest inventory. Different remotely sensed data were assessed, including high-resolution Quickbird satellite images, panchromatic 1:13.000 aerial photos, AISA hyperspectral scanner images, DGPS measurements and others selected materials. Possible use of these sources of information on tree stands was tested in summer 2003 and 2004 in Staszów forest district (Regional Directorate of State Forests Radom) and in Niepołomice forest district (Regional Directorate of State Forests Kraków).

Usefulness of the following techniques was proved: 1) DGPS receivers and aerial and satellite images (QuickBird and aerial photos) in updating delineation of any internal boundaries in forest complexes; 2) registered digital images for acquiring information on crown closure of certain types of tree stands, species composition, number of trees and their spatial pattern; 3) laser scanning for acquisition of accurate data on tree height and vertical architecture of tree stands and landform features; 4) remote sensed data for evaluation of tree health status and for monitoring its changes in subsequent years of implementation of economic plans of forest regions; 5) combination of the a/m techniques for creation of a numerical model of land surface. It is forecasted that with the development of radar and laser techniques it will be soon possible to acquire precise information on the wealth of tree stands.

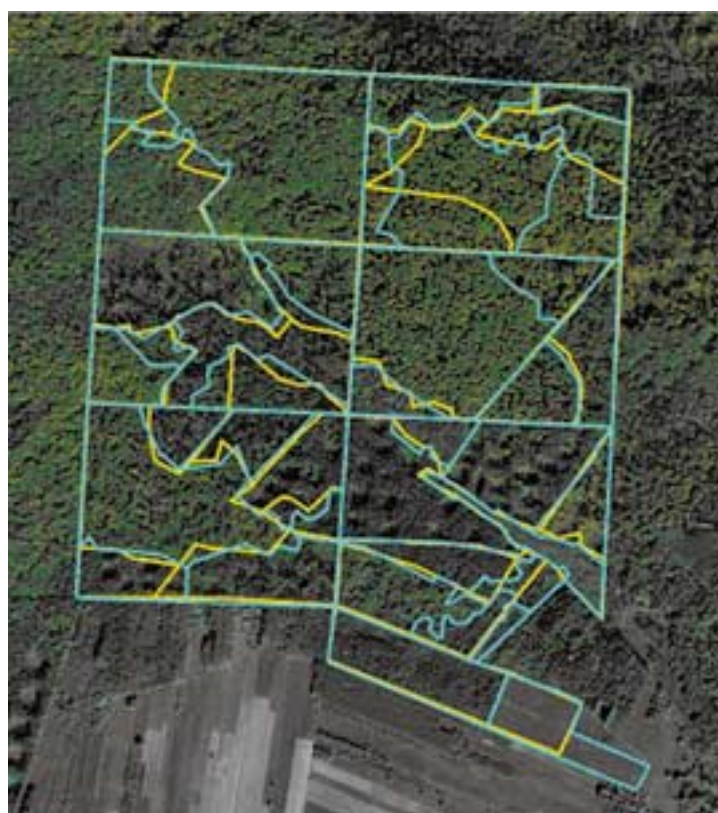
In the conclusions: 1) attention was drawn to: a) limitations and flaws of these techniques such as cloudless weather and appropriate vegetation period for aerial and satellite photos, b) high price of QuickBird and IKONOS satellite images, expecting at the same time promotional prices, when IKONOS satellite receiving station is opened in Komorów near Warsaw; c) too small group of specialists in the area of processing and interpretation of aerial and satellite images in Poland; 2) the need for wider than up till now application of remote sensing techniques for acquisition of information for forest inventory was emphasized, first of all due its objectivity and usually higher accuracy as compared to traditional forest inventory practices.

Dr inż. Grzegorz Zajaczkowski
G.Zajaczkowski@ibles.waw.pl

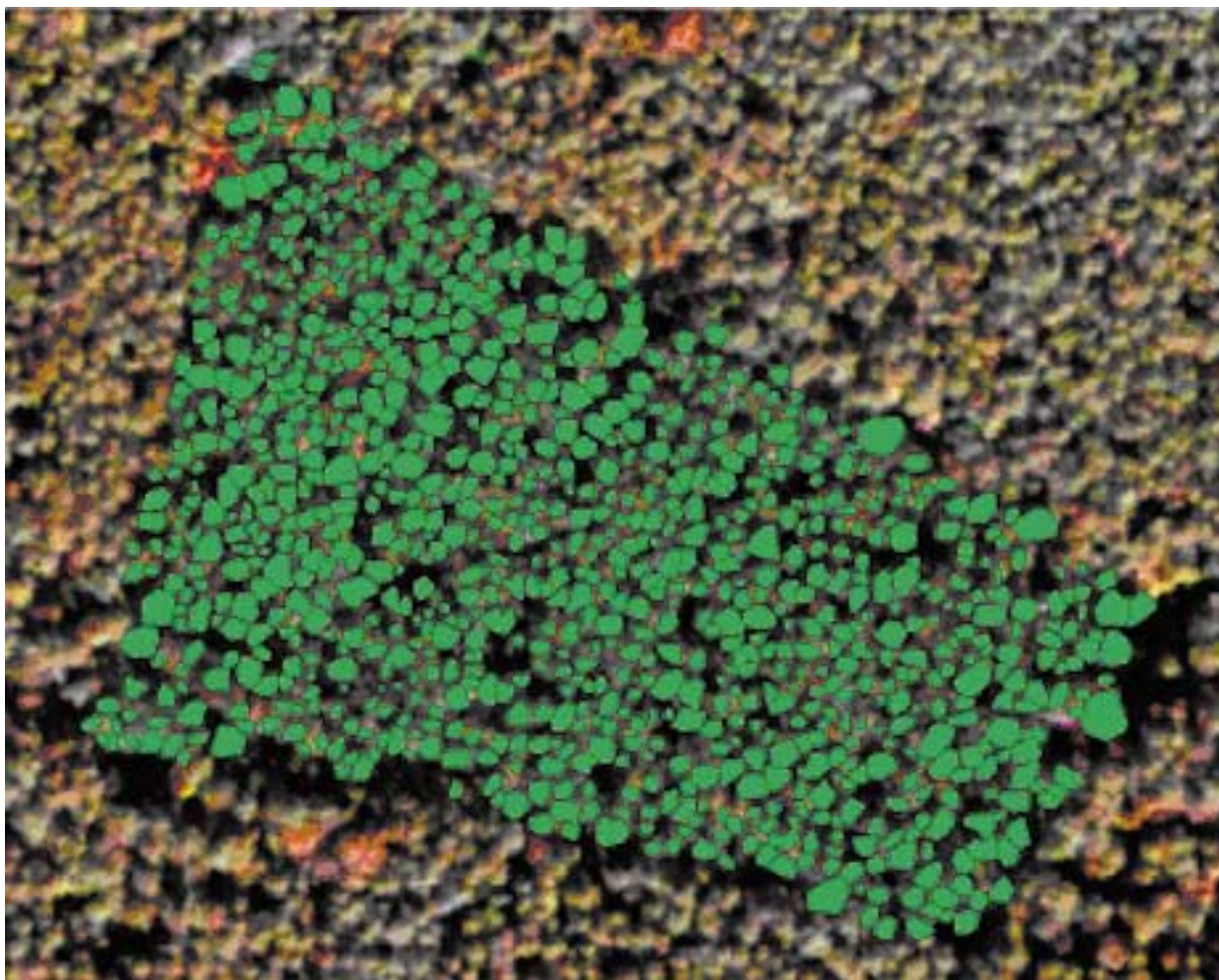
Dr inż. Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl



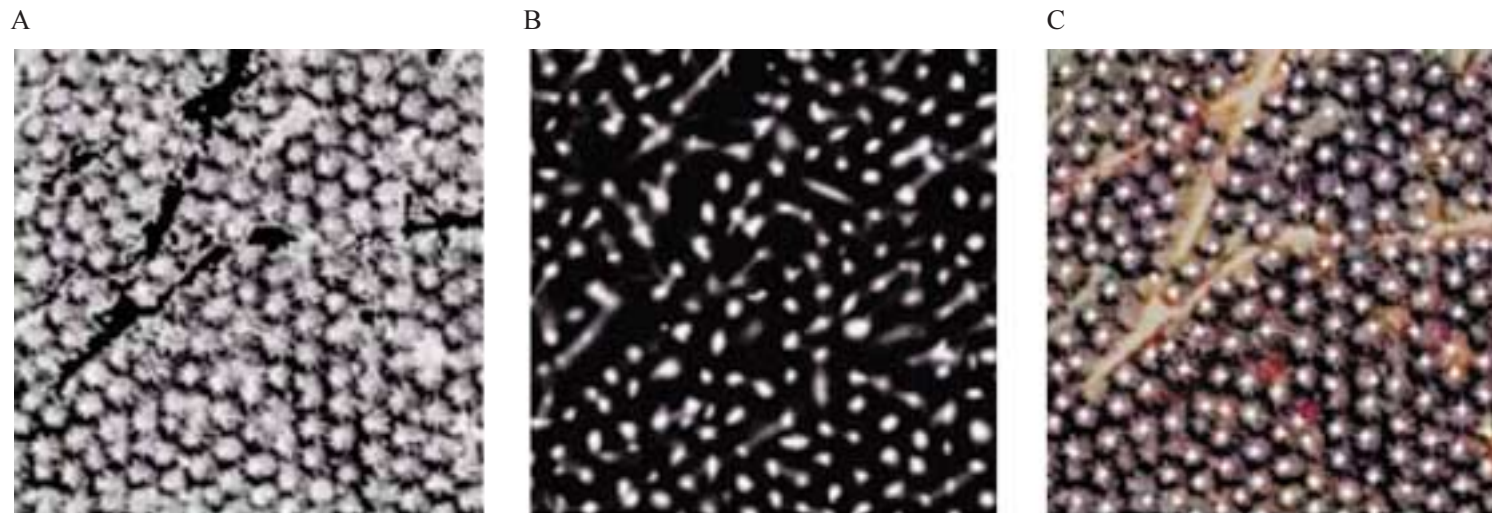
Rys. 1. Porównanie przebiegu granic wyłączeń w drzewostanach wyznaczonych na podstawie pomiarów DGPS z wektorami LMN wybranych oddziałów Nadleśnictwa Niepołomice (RDLP Kraków).



Rys. 2. Porównanie przebiegu granic wydziałów wyznaczonych na podstawie pomiarów odbiornikiem DGPS (żółty) oraz na zdjęciu satelitarnym (niebieski) dla wybranych oddziałów Nadleśnictwa Staszów (RDLP Radom)

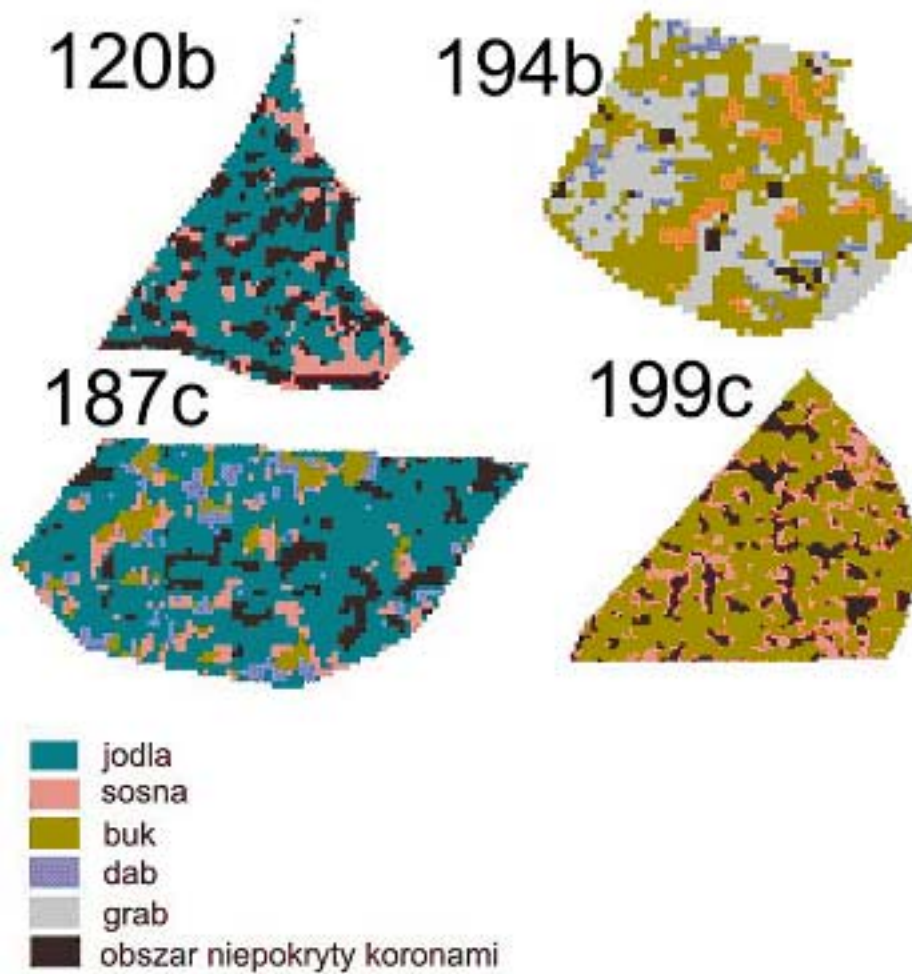


Rys. 3. Określanie liczby drzew i zasięgu ich koron na obrazie satelitarnym dla przykładowego wyłączenia drzewostanowego

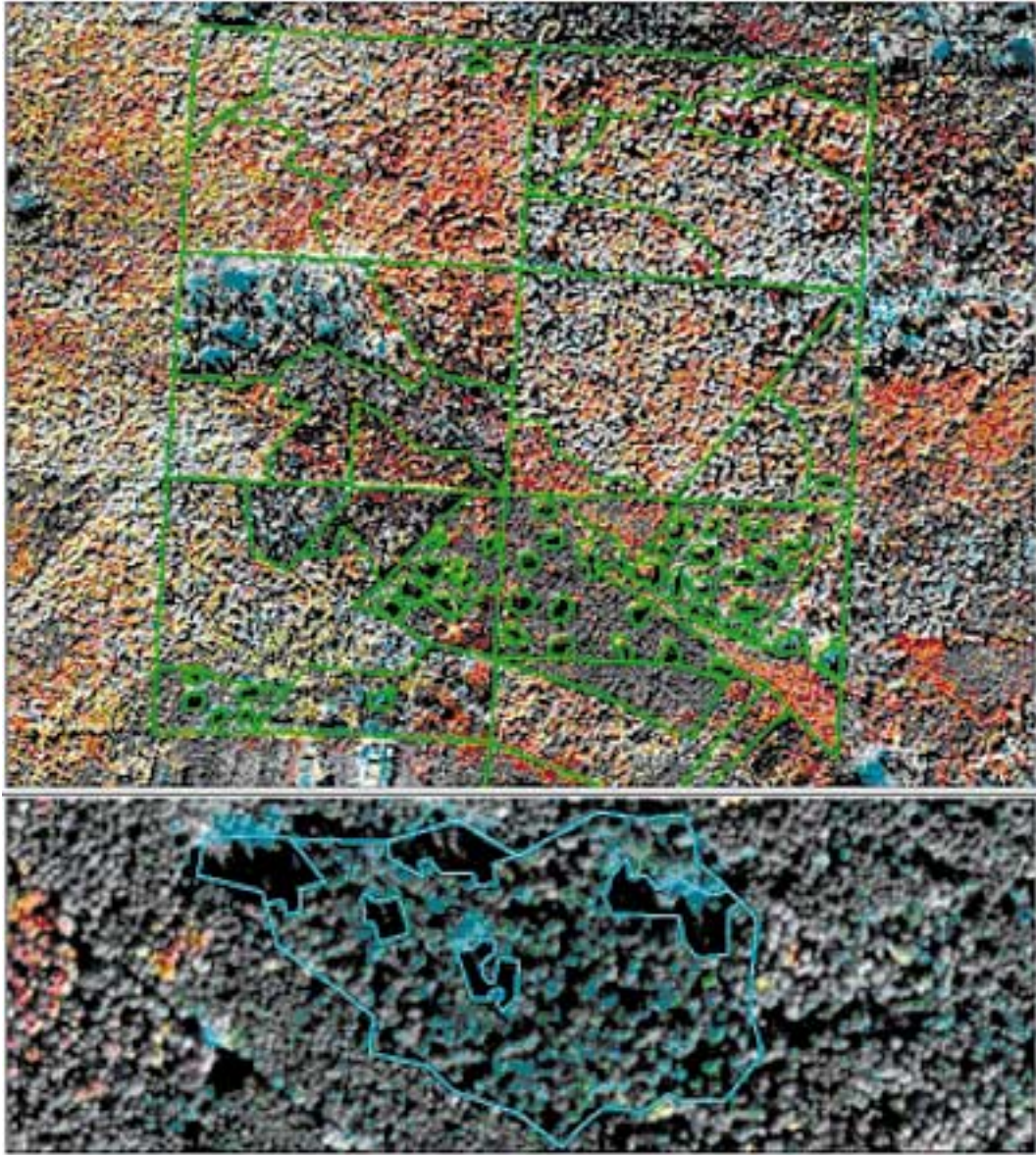


Rys. 4. Wykrywanie drzew na kompozycji barwnej IKONOS (wzmocnienie granic obiektów kanałem panchromatycznym) metodą wyszukiwania konturów koron w różnych skalach: A – wybrany do analizy obrazu czerwony kanał spektralny o dużej aktywności fotosyntetycznej; B – identyfikacja wierzchołków jako środków krzywizn, skumulowanych w różnych skalach; C – odnalezione wierzchołki na tle oryginalnego zdjęcia (piksel 1 m)

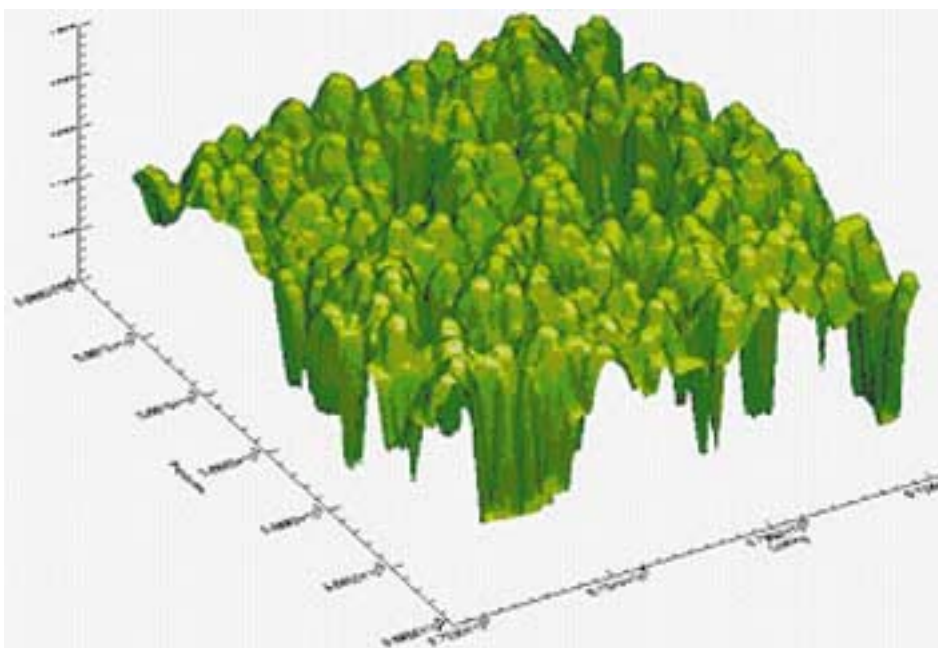
Źródło: Hui i in. 2000



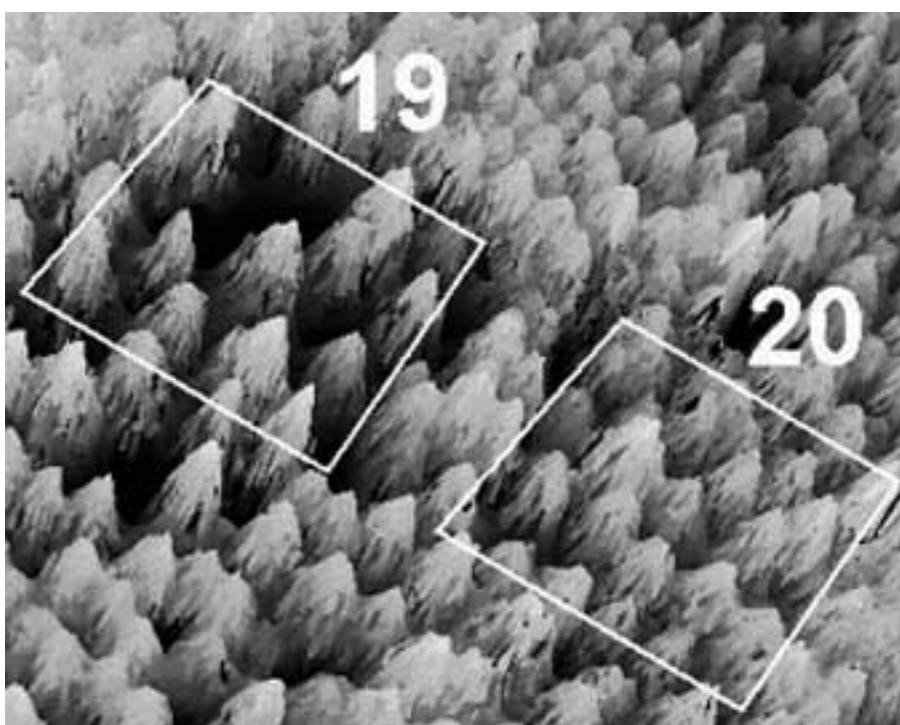
Rys. 5. Przykład określenia ilościowego składu gatunkowego oraz form zmieszania na obrazie satelitarnym QuickBird dla wybranych czterech wylęceń drzewostanowych



Rys. 6. Lokalizacja gniazd odnowieniowych na obrazie satelitarnym QuickBird



Rys. 7. Model sklepienia warstwy koron utworzony na podstawie punktów z pierwszego odbicia
 Źródło: Andersen i in. 2001



Rys. 8. Przestrzenny model fragmentu lasu, utworzony po zintegrowaniu geodanych z platformy lotniczej ze skaningu laserowego, wielospektralnej kamery cyfrowej, odbiornika DGPS i żyrokompasu
 Źródło: Leckie i in. 2003a