

**PIOTR WĘŻYK, PIOTR TOMPAŁSKI, ROELAND DE KOK, MARTA SZOSTAK,  
MATEUSZ KUKAWSKI**

## **Metoda szacowania liczby drzew w drzewostanie sosnowym z wykorzystaniem danych ALS oraz ortoobrazów**

Method of the tree number estimation in the pine stand using ALS data  
and true orthoimages

### **ABSTRACT**

Wężyk P., Tompałski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M. 2010. Metoda określania liczby drzew w drzewostanie z wykorzystaniem danych ALS oraz ortoobrazów. Sylwan 154 (11): 773-782.

Paper presents a method of estimation the number of trees and their density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand based on airborne laser scanning data (ALS cloud point) and pas-sive line scanner (true orthoimage RGB/NIR). The analysis was performed on selected part of a 107-year-old stand in the Milicz Forest District (Poland). On-screen digitised shapes and centroid of crowns were used as a reference data (number of trees). Different approaches were applied for automatically determine the number of trees and their positions. The first approach, called 'GIS watershed', was based on the canopy modelling of the ALS cloud point data. The other one, called 'OBIA', was based on segmentation and classification of the true orthoimage (CIR). The third method – 'data fusion' – was an integrated approach of the previous methods.. Different GIS spatial analyses were used to compare the results from all ap-proaches with the reference data. The results indicate that both datasets (ALS cloud point and true orthoimage) can be used for estimation of the number of trees in old Scots pine stand.

### **KEY WORDS**

number of trees, tree density, airborne laser scanning, true orthoimage

### **ADDRESSES**

Piotr Wężyk <sup>(1)</sup> – e-mail: rlwezyk@cyf-kr.edu.pl

Piotr Tompałski <sup>(1)</sup> – e-mail: piotr.tompalski@ur.krakow.pl

Roeland de Kok <sup>(2)</sup> – e-mail: roeland.de-kok@jrc.ec.europa.eu

Marta Szostak <sup>(1)</sup> – e-mail: rlszosta@cyf-kr.edu.pl

Mateusz Kukawski <sup>(1)</sup> – e-mail: mrkukawski@gmail.com

<sup>(1)</sup> Katedra Ekologii Lasu; Uniwersytet Rolniczy; al. 29 Listopada 46; 31-425 Kraków

<sup>(2)</sup> MARS Unit GeoCap IPSC; European Commision; Joint Research Centre; Ispra, Włochy

## **Wstęp**

Przyjęty i stosowany w Polsce model leśnictwa wielofunkcyjnego wymaga aktualnej i precyzyjnej informacji o zasobach leśnych. Tradycyjnie stosowane metody pozyskiwania informacji o drzewostanach dla potrzeb inwentaryzacji i urządzania lasu, oparte są na okresowo przeprowadzanych pomiarach terenowych wybranych cech na kołowych powierzchniach próbnych. Pozyskane tą drogą informacje stanowią podstawę w procesie podejmowania decyzji w zakresie określonych zabiegów hodowlanych. Ważne parametry drzewostanu to liczba drzew i ich przestrzenne zagęszczenie w obrębie pododdziału. Cechy te podlegają dynamicznym zmianom w całym okresie trwania drzewostanu. Pomimo sadzenia drzew w drzewostanach gospodarczych

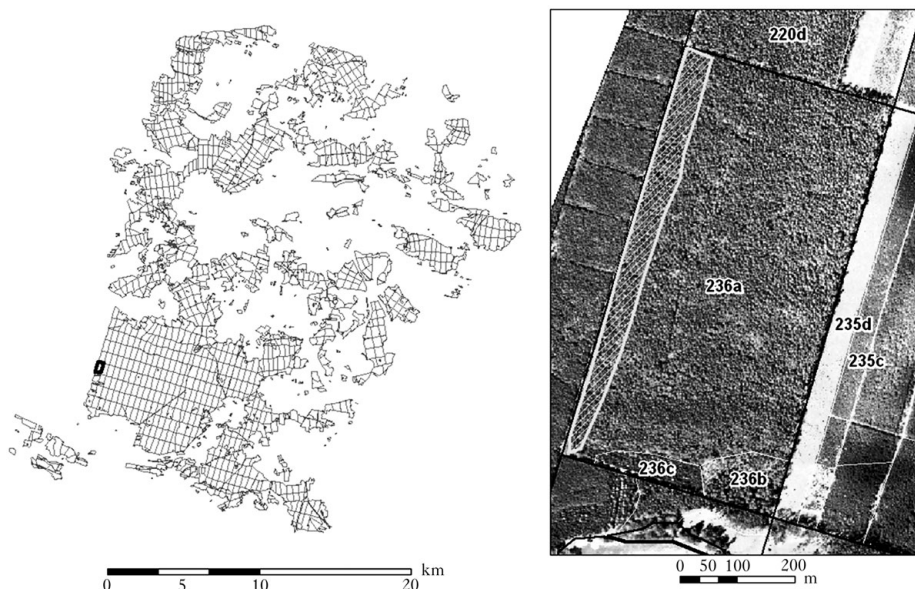
w regularnej więźbie, zróżnicowanie warunków siedliskowych oraz konkurencja, jak też i losowe oddziaływanie czynników biotycznych i abiotycznych, prowadzą często do niehomogenicznego przestrzennego rozmieszczenia pni i koron drzew oraz znacznego zróżnicowania ich rozmiarów. Zastosowanie technik teledetekcji, w tym szczególnie fotogrametrii, znane jest w leśnictwie od wielu dziesięcioleci. W zakresie określania przestrzennego zasięgu lasu (granic drzewostanów), zwarcia, wieku i liczby drzew, analogowe zdjęcia lotnicze (barwne lub czarno-białe) w stosunku do nowoczesnych cyfrowych kamer lotniczych, wciąż pozostają bogatym źródłem informacji. Współczesne technologie teledetekcyjne od kilkunastu lat oferują nowe możliwości pozyskiwania informacji poprzez zastosowanie lotniczego skanowania laserowego (ALS; ang. Airborne Laser Scanning) oraz skanerów wielo- i hiperspektralnych [Dubayah, Drake 2000; Lefsky i in. 2002; Wężyk i in. 2008]. Główną zaletą danych pozyskiwanych technologią ALS jest możliwość analizy pionowej i poziomej struktury drzewostanu, szczególnie w obrębie warstwy koron drzew reprezentowanej najczęściej przez wymodelowany z chmury punktów ALS Numeryczny Model Koron (CHM; ang. Crown Height Model) [Hyypä i in. 2006; Wężyk i in. 2008; Stereńczak i in. 2008]. Na obecnym etapie rozwoju tej technologii, nie zapewnia ona jednak możliwości bezbłędnej detekcji poszczególnych gatunków (głównie spośród drzew liściastych) ani też bezpośredniego określania ich kondycji zdrowotnej. Komplementarną technologią w tym zakresie są natomiast obrazy wielo- i hiperspektralne pochodzące ze skanerów linijkowych [Wężyk i in. 2003] bądź cyfrowych kamer lotniczych [Lillesand i in. 2007] czy wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych [Wężyk i in. 2006]. Integracja danych pochodzących z ALS oraz sensorów optycznych jest przedmiotem badań nad automatyzacją pozyskiwania informacji o parametrach drzewostanu, w tym m.in. o liczbie drzew, ich zagęszczeniu czy strukturze przestrzennej 3D [Brandtberg, Walter 1998; Leckie i in. 2003; Wang i in. 2004; Koch i in. 2006]. W tym celu wykorzystywane są nowoczesne algorytmy zaimplementowane w oprogramowaniu z zakresu przetwarzania obrazu (klasyfikacja obiektowa) [Tiede, Hoffmann 2006; de Kok, Wężyk 2008] czy też przestrzennych analizach GIS (np. analizy modelowania hydrologicznego). Te ostatnie często bazują na algorytmie tzw. „odwróconej/inwersyjnej zlewni” (ang. watershed segmentation), tzn. przestrzennej analizie Numerycznego Modelu Koron, utworzonego na podstawie chmury punktów ALS, którym przypisano ujemny znak wartości rzędnej wysokości [Bleau, Leon 2000; Kwak i in. 2007].

Przedstawiona praca prezentuje możliwości praktycznego wykorzystania technologii lotniczego skanowania laserowego (ALS) oraz wysokorozdzielczych sensorów optycznych (skanera linijkowego) w zakresie pozyskiwania informacji o liczbie drzew w drzewostanach sosnowych oraz przestrzennym ich rozmieszczeniu w pododdziale.

## Metodyka

TEREN BADAŃ. Transekt badawczy o powierzchni 3,2 ha wytyczono w drzewostanie sosnowym znajdującym się w pododdziale 236a Nadleśnictwa Milicz (RDLP Wrocław; 51°27' N; 17°12' E; ryc. 1). Według danych SILP z 2006 roku powierzchnia tego wydzielenia wynosiła 26,35 ha, wiek drzewostanu – 107 lat, wysokość – 23,0 m, zaś średnia pierśnica – 30 cm. Praca bazuje na danych teledetekcyjnych pozyskanych w ramach projektu badawczego realizowanego na zlecenie DGLP w latach 2006-2008 [Wencel i in. 2008].

DANE ALS, SKANERA LINIJKOWEGO TOPOSYS ORAZ DANE REFERENCYJNE. Lotniczy skanowanie laserowe został przeprowadzony w lipcu 2007 roku, przy wykorzystaniu urządzenia światłowodowego Falcon II firmy TopoSys. Średnia gęstość zarejestrowanych pierwszych i ostatnich



Ryc. 1.

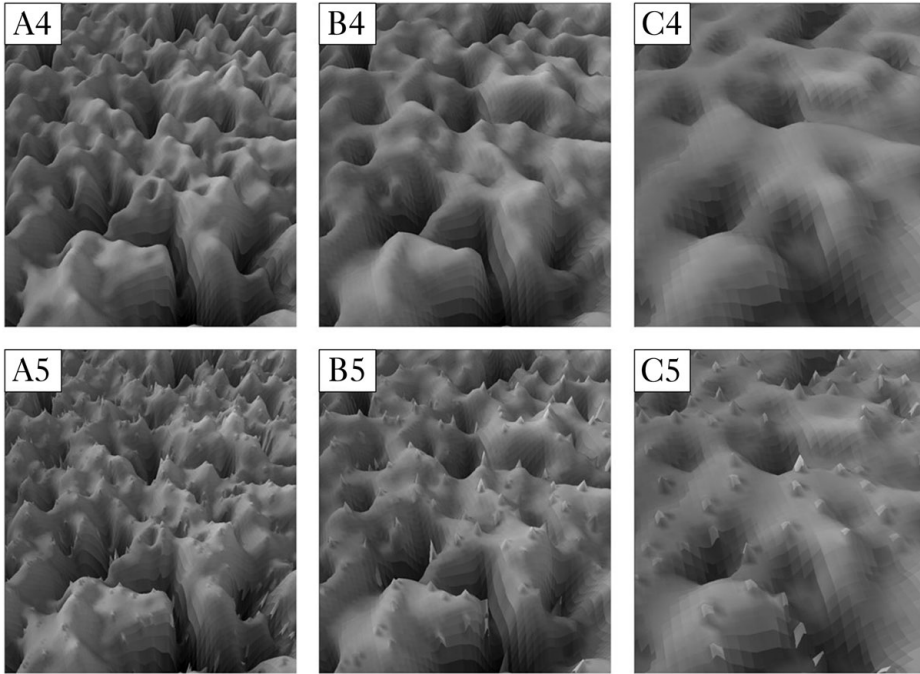
Lokalizacja transektu badawczego w pododdziale 236a na tle mapy obrębu Milicz oraz kompozycji CIR (w skali szarości) ortobrazu skanera Falcon II (TopoSys)

Location of the study transect in 236a subcompartment on Milicz range map as well as CIR composition of Falcon II (TopoSys) orthoimage

odbić (ang. FE oraz LE) wyniosła 14 pkt/m<sup>2</sup>. Jednocześnie podczas nalotu dokonano rejestracji wielospektralnym skanerem liniowym TopoSys (16 Bit; 4 kanały: R, G, B, NIR; rozdzielczość terenowa 0,25 m), który po ortorektyfikacji w oparciu o Numeryczny Model Powierzchni Terenu (DSM; ang. Digital Surface Model) uznano za tzw. prawdziwy ortobraz (ang. true orthoimage). Za dane referencyjne w zakresie liczby drzew posłużyły kontury koron drzew pozyskane na drodze ekranowej wektoryzacji, barwnej kompozycji ortobrazu CIR (wzmocnionym wizualnie warstwą rastrową CHM).

W celu oszacowania liczby drzew na transekcje zastosowano trzy różne metody przetwarzania informacji. Pierwszą z nich (metoda I) oparto jedynie na analizie chmury punktów ALS i zastosowaniu algorytmu wykrywania zlewni (na inwersyjnym modelu CHM). Druga (metoda II) polegała na segmentacji i klasyfikacji obiektowej ortobrazu. Ostatnia z nich (metoda III) opierała się na przetwarzaniu obu tych zestawów danych.

GENEROWANIE NUMERYCZNEGO MODELU KORON ORAZ SEGMENTACJA „WATERSHED”. Do wygenerowania numerycznego modelu koron (CHM) konieczne było wykorzystanie precyzyjnego Numerycznego Modelu Terenu (NMT), który powstał z kolei poprzez przetworzenie ostatnich odbić lasera algorytmem [Axelsson 2000] zaimplementowanym w oprogramowaniu Terrascan (Terrasolid). W kolejnym kroku NMT posłużył do normalizacji chmury punktów ALS (pierwszych odbić – FE). Tak przygotowane zestawy danych podlegały dalszemu przetworzeniu w różnych wariantach użycia algorytmu modelującego wygenerowaną powierzchnię CHM. Poszczególne modele różniły się wielkością wynikowego piksela, metodą filtracji oraz wariantem uwzględniania miejscowych maksimów i minimów (ryc. 2). Praca prezentuje 3 różne warianty wielkości zastosowanego piksela wynikowego (0,25 m, 0,5 m i 1,0 m) oraz filtracji (brak



Ryc. 2.

Wizualizacja wariantów numerycznych modeli koron z różną wielkością piksela (A – 0,25 m; B – 0,5 m, C – 1,0 m) oraz opcją uwzględniania (górny rząd) lub też braku (dolny rząd) lokalnych maksimów i minimum odbić płamki lasera od korony sosny

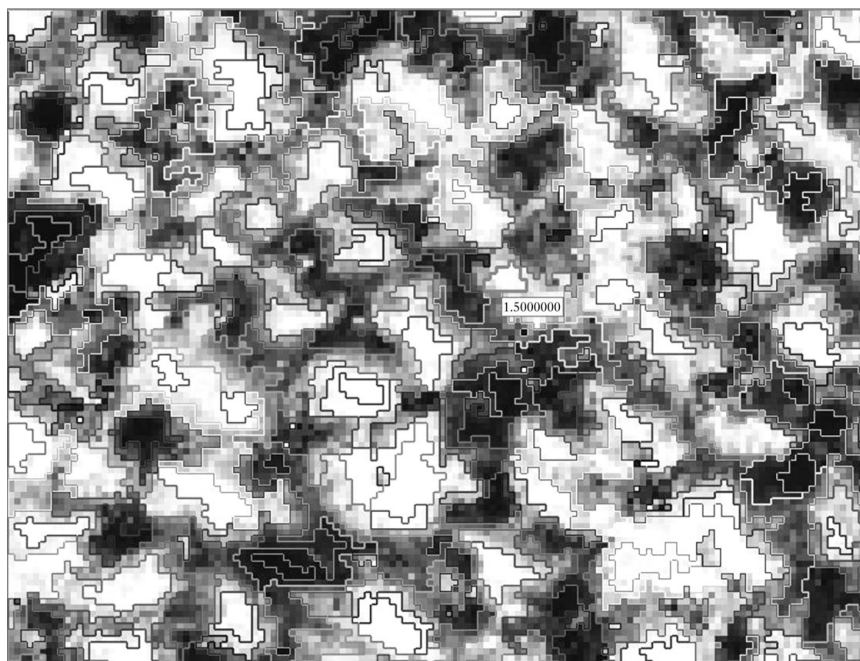
Visualisation of various CHMs in relation to different pixel size (A – 0.25 m; B – 0.5 m, C – 1.0 m) and including (upper row) or excluding (lower row) local minima and maxima of laser beam reflection from the crown

filtracji, filtry wygładzające i medianowe w oknach: 3×3, 5×5 oraz 9×9). Łącznie testowano 21 modeli CHM przy wykorzystaniu oprogramowania FUSION [McGaughey 2007], które podlegały dalszym przetworzeniom w oprogramowaniu ArcGIS (ESRI).

Algorytm tzw. odwróconej zlewni (inwersja wartości CHM) został użyty dla każdej powierzchni CHM (format GRID ESRI) w celu przetestowania optymalnej wielkości piksela i parametrów filtrujących dla uzyskiwanych obrysów pojedynczych zlewni w odwróconym modelu koron drzew.

**KLASYFIKACJA OBIEKTOWA (OBIA).** Obraz skanera wielospektralnego (kanały NIR, R, G) przetwarzano na drodze klasyfikacji obiektowej (OBIA; ang. Object Oriented Image Analysis), używając do tego celu oprogramowania Definiens Developer 7.0.8 (ryc. 3). Rezultatem przeprowadzonej segmentacji i klasyfikacji był zestaw współrzędnych środków koron (centroid), których lokalizacje określone były na podstawie różnicy jasności pikseli w poszczególnych kanałach spektralnych (filtry krawędziowe) oraz warunków bezpośredniego sąsiedztwa (np. cieni) [Wężyk, de Kok 2005]. Obiekty (segmenty), które nie spełniały warunków określonej wielkości minimalnej powierzchni, były automatycznie usuwane.

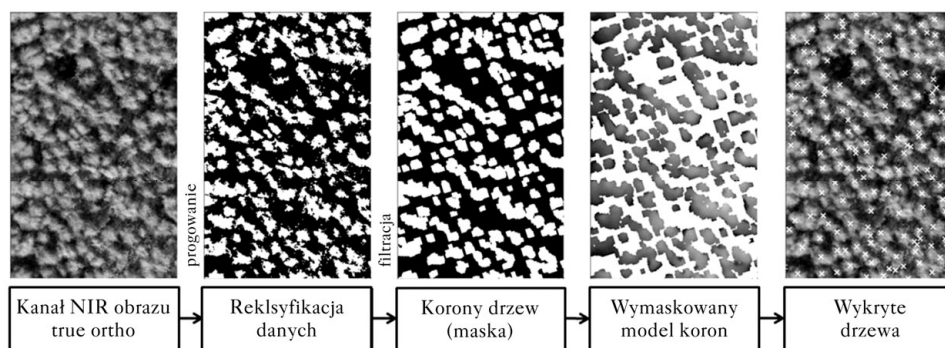
**ANALIZY OPARTE NA INTEGRACJI DANYCH ALS I OBRAZÓW WIELOSPKTRALNYCH.** Niezbyt obiecujące wstępne wyniki, uzyskane metodą przetwarzania chmury punktów ALS do postaci CHM oraz analizy „watershed” (metoda I), a także zbyt duża szczegółowość wyników klasyfikacji



Ryc. 3.

Wynik klasyfikacji obiektowej obrazu w kompozycji CIR – widoczne segmenty oraz pojedyncza korona o powierzchni 1,5 m<sup>2</sup>

OBIA classification of CIR composition – segments of the single tree crowns



Ryc. 4.

Schemat przetwarzania zintegrowanych danych ortoobrazów skanera liniowego oraz chmury punktów ALS

Workflow of processing the integrated data from linear scanner (true orthoimage) and ALS cloud points

OBIA (powstające „podkorony” w obrębie jednego drzewa), skłoniły autorów do podjęcia próby opracowania postępowania łączącego w sobie wykorzystanie obu dostępnych zestawów danych (ryc. 4). Szczególny nacisk położono na wyeliminowanie błędów detekcji drzew w lukach. Na podstawie wartości spektralnej pikseli reprezentujących wyższe partie koron odbijających promieniowanie słoneczne w zakresie NIR, zastosowano filtr progowania dla pikseli obrazu skanera liniowego, tworząc tym samym maskę (0, 1) dla dalszych analiz. Maskę zgenerali-

Tabela 1.

Zestawienie wyników dla wybranych modeli CHM (metoda I; 1 515 drzew referencyjnych)  
Results for selected CHMs (method I, number of reference trees: 1 515)

	Wariant CHM									
	A4		A5		B2		B3		C1	
	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]
Drzewa wykryte	1268	83,7	1292	85,3	1104	72,9	1141	75,3	1060	70,0
Drzewa wykryte poprawnie	1015	67,0	1017	67,1	970	64,0	979	64,6	913	60,3
Błąd przeszacowania	65	4,3	134	8,8	99	6,5	106	7,0	105	6,9
Błąd pominięcia	430	28,4	416	27,5	512	33,8	505	33,3	572	37,8

A4 – piksel 0,25 m, filtracja okno 5×5, maksima niezachowane; 0.25 m pixel, 5×5 filtering, maxima not preserved

A5 – piksel 0,25 m, filtracja okno 5×5, maksima zachowane; 0.25 m pixel, 5×5 filtering, maxima preserved

B2 – piksel 0,5 m, filtracja okno 3×3, maksima niezachowane; 0.5 m pixel, 3×3 filtering, maxima not preserved

B3 – piksel 0,5 m, filtracja okno 3×3, maksima zachowane; 0.5 m pixel, 3×3 filtering, maxima preserved

C1 – piksel 1,0 m, brak filtracji; 1.0 m pixel, no filtering

Tabela 2.

Wyniki detekcji drzew dla wszystkich zastosowanych metod  
Results of the tree detection using all presented methods

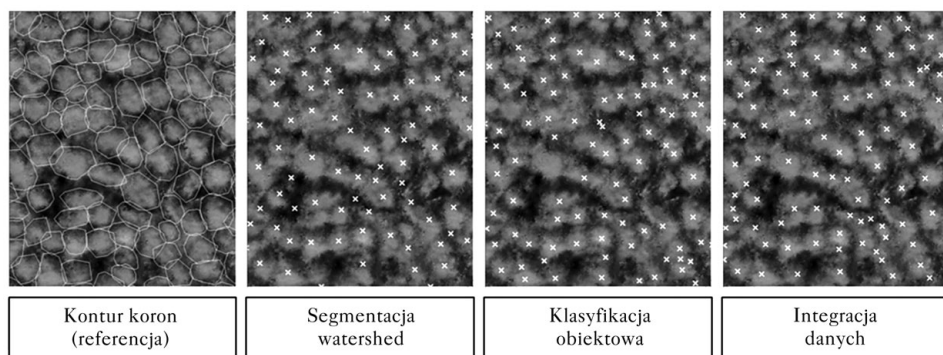
	ALS + segmentacja watershed		OBIA		Integracja danych NIR + CHM	
	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]	[szt.]	[%]
	Drzewa wykryte	1268	83,7	1487	98,2	1576
Drzewa wykryte poprawnie	1015	67,0	1129	74,5	1100	72,6
Błąd przeszacowania	65	4,3	122	8,1	135	8,9
Błąd pominięcia	430	28,4	265	17,5	249	16,4

zowano (filtry), a obszary koron uzyskały wartość wysokości CHM przez użycie analiz GIS (algebra map). Tą drogą uzyskano nowy zestaw danych dla przeprowadzenia segmentacji metodą inwersyjnej zlewni.

## Wyniki i dyskusja

W wyniku wektoryzacji ekranowej obrazu true ortho (kompozycja CIR) transektu badawczego operator pozyskał 1 515 koron (zagęszczenie 473 drzew/ha). Dane te zostały zweryfikowane w lipcu 2009 roku podczas prac terenowych wspartych nawigacją GPS (odbiornik Trimble Pathfinder ProXRS). Jak się okazuje, liczba drzew określona drogą wektoryzacji ekranowej została zawyżona o około 2,8% w odniesieniu do danych terenowych. Przyjęto też założenie, iż w okresie 2006-2009 nie zanotowano znacznych ubytków drzew w drzewostanie.

Spośród wszystkich testowanych wariantów numerycznych modeli koron wybrano jedynie 5, które pozwalały na osiągnięcie najlepszych wyników ( $\pm 30\%$  w stosunku do przyjętej referencji) na drodze zautomatyzowanego przetwarzania danych. Szczegółowe analizy wyników wykazały, że poza prawidłowo wykrytymi koronami drzew, występują też błędy przeszacowania (dodatkowe korony w obrębie jednego drzewa) lub pominięcia (korony niewykryte). Wyniki zastosowania metody segmentacji zlewni inwersyjnego modelu CHM zestawiono w tabeli 1. Przy wykorzystaniu jedynie danych ALS, najlepsze wyniki uzyskano dla modelu oznaczonego jako A4 (piksel 0,25 m, filtr uśredniający oraz medianowy 5×5, bez zachowywania lokalnych minimum i maksimum odbić FE plamki lasera). Tą drogą poprawnie wykrytych zostało 67% drzew (zagęszczenie 317 szt./ha). Uwzględnienie lokalnych minimum i maksimum odbić lasera prowadzi do bardzo podobnych wyników w zakresie poprawnie wykrytych drzew (tab. 1), z tym, że



Ryc. 5.

Wyniki wszystkich zastosowanych metod dla fragmentu transektu badawczego w pododdziale 236a  
Results of application of all methods – fragment of the study transect

procent przeszacowania wzrasta dwukrotnie. Drugim zastosowanym podejściem (metoda II) bazującym na nowoczesnej klasyfikacji OBIA, osiągnięto dokładność na poziomie 74,5% (tab. 2, ryc. 5; zagęszczenie 353 drzew/ha). Stosując przetwarzanie zintegrowanych ze sobą danych (metoda III) wykryto poprawnie 72,6% koron (zagęszczenie 344 drzew/ha). Wzrost dokładności wykrywania drzew tą metodą jest wyraźnie widoczny (wzrost liczby wszystkich wykrytych drzew o około 20% w stosunku do metody I, w tym tych poprawnie o kolejne 5% (tab. 2). Prezentowane wyniki można uznać za znacznie dokładniejsze w porównaniu do testów przeprowadzonych na tym samym obszarze przez inny międzynarodowy zespół badawczy wykorzystujący oprogramowanie TreesVis. Średnia dokładność liczby drzew uzyskiwana przez tych badaczy dla wydzielenia 236a wyniosła jedynie 50% [Wang i in. 2008], co może być częściowo wytłumaczone faktem znacznej jego niehomogeniczności pod kątem rozpatrywanej cechy liczby drzew. Posługując się tym samym skanerem lotniczym oraz identycznym oprogramowaniem (TreesVis), Stereńczak i in. [2008] osiągnęli wyniki w drzewostanach sosnowo-dębowych Nadleśnictwa Głuchów na poziomie 52,5-81,5% poprawnie wykrytych drzew. Prace autorów skandynawskich wykazują, iż bardzo ważnym parametrem wpływającym na dokładność uzyskiwanych wyników liczby drzew, jest gęstość rejestrowanych odbić ALS. Doświadczenie wykonane przez Holmgrena i Perssona [2004] w drzewostanach sosnowych pozwoliło na wykrycie 75% drzew przy gęstości punktów ALS wynoszącej zaledwie 1,2 pkt/m<sup>2</sup>. Zwiększenie gęstości odbić impulsów lasera prowadzi do polepszenia wyników, czego dowodzą Maltamo i in. [2004]. Dla podobnego drzewostanu uzyskali oni dokładność na poziomie 94% przy gęstości punktów lasera równej 10 pkt/m<sup>2</sup>.

## Podsumowanie

Przeprowadzone przetwarzanie danych potwierdziło wysoką przydatność chmury punktów lotniczego skaningu laserowego, a także wielospektralnych, wysokorozdzielczych zobrazowań lotniczych do określania liczby drzew, a tym samym i ich zagęszczenia w drzewostanie. Wykazano ponad wszelką wątpliwość, iż metody oparte wyłącznie na Numerycznych Modelach Koron prowadzą do gorszych rezultatów określenia liczby drzew niż nowoczesne podejście wykorzystywane w algorytmach klasyfikacji obiektowej lub integracji danych ALS i optycznych sensorów (skaner wielospektralny). Najdokładniejsze wyniki uzyskano posługując się metodą klasyfikacji OBIA, a niewiele gorsze dla danych zintegrowanych (ALS i true ortho). Właśnie ta metoda, integrująca różnego typu dane, zasługuje na szczególną uwagę i dalsze doskonalenie.

Praca udowodniła, iż wykrywanie pojedynczych koron sosen jest możliwe na drodze zautomatyzowanego przetwarzania chmur punktów ALS, choć wciąż konieczne jest rozwijanie tej metody. Kluczowym parametrem w tej metodzie jest optymalne modelowanie powierzchni koron uzależnione od oprogramowania i lokalnej zmienności koron różnych gatunków drzew leśnych. Sosna zwyczajna dzięki ażurowej budowie korony i niewyraźnym wierzchołkom w starszych klasach wieku nie jest na pewno idealnym drzewem do przeprowadzania tego typu testów, jednak trzeba mieć na uwadze jej dominujący udział w lasach Polski. Znajomość rzeczywistej liczby drzew w pododdziale oraz ich zagęszczenia na jednostce powierzchni (również przestrzennego rozkładu tej cechy) są niezmiernie ważne nie tylko z punktu widzenia podejmowanych decyzji odnośnie zabiegów hodowlanych, ale i planowania wielofunkcyjnej roli lasu. Precyzyjnie określona liczba drzew (zagęszczenie) na drodze automatycznego przetwarzania danych teledetekcyjnych, stwarza szansę na wdrożenie technologii teledetekcyjnych do praktyki prac urzędniowych. Przykłady innych krajów pokazują, iż tą drogą następuje wzrost dokładności dotychczas stosowanych metod przy jednoczesnym obniżeniu ich kosztów.

## Literatura

- Axelsson P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33 (4B): 203-210.
- Bleau A., Leon L. J. 2000. Watershed-based segmentation and region merging. *Computer Vision and Image Understanding* 77 (3): 317-370.
- Brandtberg T., Walter F. 1998. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis. *Machine Vision and Applications* 11 (2): 64-73.
- Dubayah R. O., Drake J. B. 2000. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry* 98 (6): 44-52.
- Holmgren J., Persson L. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90: 415-423.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest inventory information extraction. W: Koukal T., Schneider W. [red.]. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. EARSeL SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11. Vienna.* 63-78.
- Koch B., Heyder U., Weinacker H. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72 (4): 357-363.
- de Kok R., Wężyk P. 2008. Principles of full autonomy in image interpretation. The basic architectural design for a sequential process with image objects. W: Blaschke Th., Lang S., Hay G. J. [red.]. *Object-Based Image Analysis. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.* 697-710.
- Kwak D. A., Lee W. K., Lee J. H., Biging G. S., Gong P. 2007. Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data. *Journal of Forest Research* 12 (6): 425-434.
- Leckie D., Gougeon F., Hill D., Quinn R., Armstrong L., Shreenan R. 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29 (5): 633-649.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52 (1): 19-30.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. 2007. *Remote sensing and image interpretation.* Wiley India Pvt Ltd.
- Maier B., Tiede D., Dorren L. 2008. Characterising Mountain Forest Structure using Landscape metrics on LiDAR-based Canopy Surface Models. W: Blaschke Th., Lang S., Hay G. J. [red.]. *Object-Based Image Analysis. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.* 625-643
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkänen J., Yu X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791-1801.
- McGaughey R. J. 2007. *Fusion/ldv: Software for lidar data analysis and visualization. Software manual.* USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station.
- Persson A., Holmgren J., Soderman U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (9): 925-932.
- Stereńczak K., Będkowski K., Weinacker H. 2008. Accuracy of crown segmentation and estimation of selected trees and forest stand parameters in order to resolution of used DSM and nDSM models generated from dense small footprint LIDA data. *ISPRS Congress, Beijing, China, Commission VI, WG VI/5.* 27-32.
- Tiede D., Hoffmann C. 2006. Process oriented object-based algorithms for single tree detection using laser scanning data. *EARSeL-Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry. Vienna.* 151-156.



- Tiede, D., Lang S., Hoffmann C. 2008. Type-specific class modelling for one-level representation of single trees. W: Blaschke Th., Lang S., Hay G. J. [red.]. Object-Based Image Analysis. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. 133-151
- Wang L., Gong P., Biging G. S. 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Journal of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 70 (3): 351-358.
- Wang Y., Weinacker H., Koch B., Stereńczak K. 2008. Lidar point cloud based fully automatic 3d single tree modeling in forest and evaluations of the procedure. International archives of photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII. Beijing. 45-52.
- Wencel A., Wężyk P., Zasada M. 2008. Możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego w leśnictwie. W: Zawila-Niedźwiecki T., Zasada M. [red.]. Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – potrzeby i możliwości. Wydawnictwo SGGW. 77-89
- Wężyk P., Borowiec N., Szombara S., Wańczyk R. 2008. Generowanie numerycznych modeli powierzchni oraz terenu w Tatrach na podstawie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS). W: Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 18a: 651-662
- Wężyk P., de Kok R. 2005. Automatic mapping of the dynamics of forest succession on abandoned parcels in south Poland. Angewandte Geoinformatik: 774-779.
- Wężyk P., de Kok R., Koziół K. 2006. Application of the object based image analysis of VHR satellite images in land-use classification. Roczniki Geomatyki 4 (3): 227-238.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M. 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the scots pine stands using ALS data. 8<sup>th</sup> international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser 2008. Edinburgh, UK. 636-645.
- Wężyk P., Wertz B., Waloszek A. 2003. Skaner hiperspektralny AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Applications) jako narzędzie pozyskiwania informacji o ekosystemie leśnym. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 13B. Fotogrametria bliskiego i dalekiego zasięgu. 477-496.
- Wulder M., Niemann K. O., Goodenough D. G. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. Remote Sensing of Environment 73 (1): 103-114

## SUMMARY

### Determining the number of trees using ALS and true orthoimagery data

Current multi-functional forestry model requires rapid and accurate information about its resources. One of many important stand parameters is the number of trees and their spatial distribution. Both are changing over the time of the stand development and growth. The older the forest is, the less dominant trees it has, but in spite of the fact that trees are planted in a regular order, different habitat conditions and competition between trees, lead to their diversified spatial distribution and size. The purpose of the study was to estimate the tree number and tree density in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand based on airborne laser scanning (ALS cloud point) and passive line scanner data (true orthoimage RGB/NIR). The analysis was performed on selected part of a 107-year-old stand in the Milicz Forest District (Poland). On-screen digitised shapes of crowns were used as a reference data. Three different approaches were used to automatically determine the number of trees and their positions. First approach called 'GIS watershed' was based on the canopy modeling of the ALS cloud point data. Different algorithms were tested to find an optimal surface (Crown Height Model) representing the canopy. The second approach called 'OBIA' was based on segmentation and classification of the true orthoimage (R, G, B, NIR) resulting in finding crowns 'hot-spots'. A third method – 'data fusion' – was also tested and was based on both ALS and image data. Different GIS spatial analyses were used to compare the results from all approaches with the reference data. The results indicate that the different approaches leads all to comparable results which can be considered successful, therefore both datasets (ALS cloud point and true orthoimage)

can be used as a basis for estimation of the number of trees and their spatial distribution in old managed Scots pine stand. The accuracy, concerning correctly detected trees, was equal to 67.0% (ALS), 74.5% (true orthoimage) and 72.6% for fusion of previously used datasets. The research is being continued to improve the applied methods and results for different types of forests.