

## Określanie miąższości i zagęszczenia drzew w drzewostanach centralnej Polski na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zasobów drzewnych

A two-phase inventory method for calculating standing volume and tree-density of forest stands in central Poland based on airborne laser-scanning data

Stanisław Miścicki<sup>1</sup>, Krzysztof Stereńczak<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; <sup>2</sup> Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Informatyki i Modelowania, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

✉ Tel. +48 22 7150325, fax. +48 22 7200397, e-mail: K.Sterenczak@ibles.waw.pl

**Abstract.** This paper describes a method of determining the stocking density and volume of forest stands based on airborne laser-scanning data. The aim of this study was to determine the relationship between ground-based measurements of standing volume and tree-density, and those acquired based on the Crown Height Model (CHM) interpolated from airborne laser-scanning data. Data were collected from 34 sample plots of two sizes for the CHM analysis: 500 m<sup>2</sup> (radius 12.61 m) and 1963.5 m<sup>2</sup> (radius of 25.0 m): Trees for sampling were selected using two methods, those whose “centroid” was fully within the sample plot (the tree was considered to be within the sample plot if the centroid of the crown was inside the circle) and those at the “border” (the tree was included in the sample plot if, at least, one part of the contour of the crown was inside the circle). There was a strong relationship ( $R^2 = 0.86$ ) between standing volume measured in sample plots on the ground and the indices produced by the crown elevation model at the locations where the ground-based measurements were performed.

**Key words:** centroid, ground-based data, forest inventory, scaling, airborne ceiling, Crown Height Model

### 1. Wstęp

Szacowanie zapasu drzewostanów na podstawie danych zebranych z pułapu lotniczego opiera się na poszukiwaniu zależności między cechami zmierzonymi na obrazowaniach zebranych z tego pułapu a zasobnością zmierzoną na ziemi – najczęściej na powierzchniach próbnych wielkości kilkuset metrów kwadratowych. Początkowo wykorzystywano pomiary wykonywane na zdjęciach lotniczych (Miścicki 2000, 2009; Korpela i Tokola 2006). Obecnie coraz szerzej stosowane są pomiary dzięki danym uzyskanym w wyniku lotniczego skanowania laserowego (Naesset 2004; Breidenbach et al. 2007; Hyypä et al. 2012).

Zastosowanie lotniczego skanowania laserowego (LSL) (ang: *Airborne Laser Scanning – ALS*) w anali-

zach środowiska leśnego zostało już opisane w literaturze krajowej (Będkowski 2004; Wężyk 2006; Chirrek et al. 2007; Stereńczak 2010a). Do najważniejszych zalet tej techniki należy zaliczyć: możliwość otrzymywania bardzo dokładnego wysokościowego modelu koron (WMK), możliwość analizowania budowy pionowej i poziomej drzewostanu oraz niektórych wymiarów drzew. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można zdefiniować dwie grupy metod określania zapasu drzewostanów. Dane lotniczego skanowania laserowego są w nich wykorzystywane do określania:

- cech pojedynczego drzewa (ang: *Individual Tree Detection – ITD*),
- cech odnoszących się do poszczególnych powierzchni próbnych (ang: *area-based approach – ABA*).

Rodzaj danych z lotniczego skanowania laserowego zależy od metody określania zapasu drzewostanów. Gdy wykorzystuje się informacje o pojedynczych drzewach, pożądane jest zastosowanie chmury punktów LSL o większej gęstości (około 4–5 pkt./m<sup>2</sup>), aby można było dokonać segmentacji (wyodrębnienia) pojedynczych koron drzew. W metodach, w których używa się cech odnoszących się do powierzchni próbnych, możliwe jest pozyskanie chmury punktów o mniejszej gęstości (około 0,5–1 pkt./m<sup>2</sup>). Zalety i wady obu metod porównano w tabeli 1.

Według danych z literatury (Korpela, Tokola 2006; Wack 2006; Hyypä et al. 2012; Straub, Koch 2012), przy stosowaniu różnych modeli zależności między zasobnością zmierzoną na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami zmierzonymi na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego, siła związku –

określona przy pomocy współczynnika korelacji – wahała się w granicach  $R=0,4–0,95$ . Najsilniejsza zależność była w drzewostanach iglastych, zwłaszcza świerkowych, a najsłabsza – w liściastych (Korpela, Tokola 2006; Wack 2006; Hyypä et al. 2012). Dla pojedynczych drzew w drzewostanach sosnowych współczynnik determinacji  $R^2$  zawierał się w granicach od 0,488 do 0,931 (Straub, Koch 2012). Niestety, liczba publikacji dotyczących lasów Europy Centralnej jest niewielka. Z dotychczas opublikowanych prac wynika, iż każdy taki model wymaga kalibracji do konkretnych drzewostanów (Breidenbach et al. 2007). Stąd potrzeba prowadzenia badań w Polsce i poszukiwania modeli, które będą najlepiej związane ze strukturą polskich lasów.

**Tabela 1. Porównanie metod określania miąższości drzewostanów z wykorzystaniem technologii lotniczego skanowania laserowego przy zastosowaniu danych dla pojedynczych drzew lub całych powierzchni próbnych wg Hyypä i in. (2006)**  
Table 1. Comparison of methods of standing volume estimation with Airborne Laser Scanning technology, with using individual tree detection or area based approach by Hyypä et al. (2006)

Zalety / Advantages	Wady / Disadvantages
<b>Metoda określania miąższości drzewostanów z wykorzystaniem parametrów uzyskanych z powierzchni próbnych</b> – chmura punktów LSL o gęstości około 0,5–1 pkt./m <sup>2</sup> Area based method of standing volume estimation (ALS point cloud with density about 0.5–1 p/m <sup>2</sup> )	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>łatwość integracji z obecnie obowiązującą metodą inwentaryzacji dzięki wykorzystaniu tych samych powierzchni referencyjnych</b> easy integration with the current method of forest stock inventory by using the same reference sample plots</li> <li>– <b>dobre podłoże statystyczne</b> strong statistical background</li> <li>– <b>relatywnie tanie pozyskanie danych lotniczego skanowania laserowego</b> relatively low cost of Airborne Laser Scanner data acquisition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>wymagana duża liczba dokładnych, reprezentatywnych, i przez to drogich, danych referencyjnych</b> requires large number of accurate, representative, and thus expensive reference data</li> <li>– <b>duża liczba błędów w inwentaryzacji w wyniku niewystarczającej liczby wiarygodnych danych referencyjnych</b> a large number of errors in inventory as a result of insufficient number of reliable reference data</li> </ul>
<b>Metoda określania miąższości drzewostanów z wykorzystaniem danych odnoszących się do pojedynczych drzew</b> – chmura punktów LSL o gęstości około 4–5 pkt./m <sup>2</sup> Individual tree detection method of standing volume estimation – ALS point cloud with density about 4–5 p/m <sup>2</sup> )	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>dobra korelacja (istniejące modele) z estymowaną miąższością</b> good correlation (existing models) of the estimated standing volume,</li> <li>– <b>niewielka liczba danych referencyjnych potrzebna do kalibracji</b> requires small number of reference data for model calibration,</li> <li>– <b>zwiększenie liczby parametrów opisujących las, tzw. precyzyjne leśnictwo</b> increasing the number of parameters describing the forest, so-called precision forestry</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>droższe dane lotniczego skanowania laserowego</b> expensive Airborne Laser Scanner data acquisition,</li> <li>– <b>dużo bardziej złożony system, trudniejszy do zastosowania w praktyce</b> a much more complex system, difficult to apply in practice</li> </ul>

## 2. Materiał badawczy

### Naziemne powierzchnie próbne

Materiał badawczy stanowiły dane pochodzące z 34 kołowych powierzchni próbnych założonych w drzewostanach Obrębu Milicz (Nadleśnictwo Milicz, RDLP Wrocław; 51°48' N i 17°33' E) (ryc. 1).

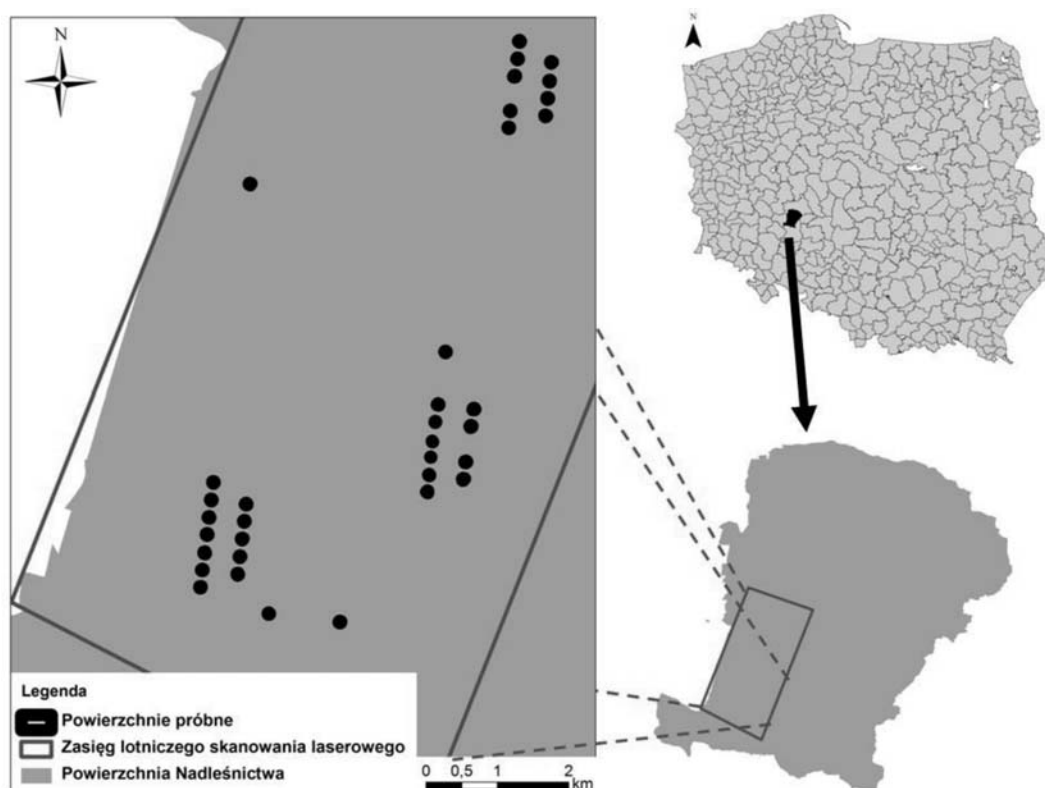
Na każdej z nich w sierpniu 2006 r. zmierzono pierśnicę i wysokość drzew zaliczonych do próby. Na podstawie współrzędnych biegunowych określono położenie tych drzew w stosunku do środka danej powierzchni próbnej. Współrzędne środków powierzchni próbnych zmierzono metodą różnicową, wykorzystując odbiornik GPS – Mobil Mapper. Błąd średni pomiaru określono na poziomie 2 m. Wielkość powierzchni próbnych wynosiła średnio 391 m<sup>2</sup> i wahała się (w zależności od wieku drzewostanu) od 200 do 500 m<sup>2</sup>. Średni wiek drzewostanów wyniósł 85 lat (w zakresie 15–150 lat). Skład gatunkowy był zróżnicowany: sosna była gatunkiem dominującym na 16 powierzchniach próbnych, buk – 11, dąb – 3, olsza – 2, modrzew – 1, brzoza – 1. Przeciętny stopień pokrycia powierzchni przez korony (ustalony szacunkowo) wyniósł 59% (w zakresie 20–95%). Ogólna

charakterystyka danych pozyskanych w terenie przedstawiała się następująco:

- średnia wysokość drzew – 23,9 m (w zakresie 5–39 m),
- wysokość górna (liczona jako średnia trzech najwyższych drzew na powierzchni próbnej) – 26,1 m (w zakresie 5–40 m),
- średnia liczba drzew (o pierśnicy co najmniej 7 cm) na powierzchni próbnej – 16,2 sztuk (w zakresie 0–33), w tym drzew I piętra – 14,4 sztuk (w zakresie 0–33),
- średnia zasobność – 330 m<sup>3</sup>/ha (w zakresie 0–665 m<sup>3</sup>/ha),
- średnie zagęszczenie drzew (o pierśnicy, co najmniej 7 cm) – 490 szt./ha (w zakresie 0–1300 szt./ha).

### Dane pozyskane w wyniku lotniczego skanowania laserowego

W analizach wykorzystano dane lotniczego skanowania laserowego pozyskane w dniach 2–3 maja 2007 r. Zastosowano skaner laserowy FALCON II firmy TopoSys GmbH o pulsacyjno-włóknistym typie sensora. Długość wysyłanej fali wynosiła 1560 nm. Skanowania dokonano z wysokości 700 m z częstotliwością 83 kHz, kątem skanowania wynosił ±7,1° od nadir. Skaner reje-



Rycina 1. Położenie obiektu badawczego i powierzchni próbnych

Figure 1. Study area and sample plots location (black dots – sample plots, dark line – border of ALS data acquisition, grey are – Milicz forest district area)

strował pierwsze (*first echo* – FE) i ostatnie (*last echo* – LE) odbicie. Średnica plamki skanera na ziemi wynosiła 0,7 m. W trakcie nalotu, stosując skaner liniowy, pozyskano również informację spektralną o kanałach R, G, B i IR. Dane obrazowe przetworzono do postaci true-ortofotomapy o wielkości piksela 0,25 m.

W pierwszym etapie przetwarzania dane z lotniczego skanowania laserowego wykorzystano do interpolacji numerycznego modelu terenu (NMT), numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) oraz znormalizowanego numerycznego modelu pokrycia terenu (zNMPT) (ryc. 2), będącego różnicą odpowiadających sobie pikseli w NMPT i NMT. Różnicowy model pokrycia terenu w warunkach leśnych nazywany może być wysokościowym modelem koron (WMK).

Do filtracji chmury punktów oraz interpolacji modeli terenu wykorzystano program TreesVis (FELIS Freiburg University). Zaimplementowano do niego algorytm aktywnych konturów (ang: *active contours algorithm*) (Elmqvist 2000) wykorzystywany do filtracji danych punktowych.

Wykorzystując dane o współrzędnych środków powierzchni próbnych na wysokościowym modelu koron, wskazano ich położenie oraz utworzono koła, wewnątrz których przeprowadzono odpowiednie pomiary. Zastosowano dwie wielkości kół: 500 m<sup>2</sup> (promień 12,61 m) i 1963,5 m<sup>2</sup> (promień 25,0 m). Oznacza to, że powierzchnie próbne zdefiniowane na wysokościowym modelu koron były większe (tylko niekiedy równe) niż powierzchnie próbne naziemne. Dla każdej powierzchni próbnej zastosowano dwa warianty zaliczenia drzew do próby: według „centroidu” (drzewo zaliczono do próby, jeżeli centroid jego korony znalazł się wewnątrz koła) lub według „granicy” (drzewo zaliczono do próby, jeżeli choć jeden fragment obrysu korony znalazł się wewnątrz koła).

Przeprowadzono segmentację koron drzew (Stereńczak 2010b). Wykorzystano do tego wysokościowy model koron, wykonując kolejne etapy:

- wczytanie wysokościowego modelu koron i jego uproszczenie (wygładzenie) z użyciem filtra Gaussa,
- wykonanie pierwszej segmentacji, wydzielenie pierwotnych segmentów,

- ustalenie warstw wysokościowych koron drzew,
- przydzielenie segmentów pierwotnych do klas wysokościowych,
- wygładzenie grup wysokościowych z użyciem filtra Gaussa o różnej wielkości – wyższe warstwy – większym, a niższe – mniejszym (zastosowano 3 warstwy wysokościowe, gdzie wartościami granicznymi były wartości 15 m i 25 m, a wielkości filtrów odpowiednio: 3×3, 5×5, 7×7 pikseli).

Po wyodrębnieniu segmentów definitywnych:

- określono zasięgi poszczególnych koron drzew; w każdym segmencie ostatecznym określono maksymalną wartość rzędnej wysokościowej  $Z$  punktu należącego do korony, a w odniesieniu do numerycznego modelu terenu – wysokość drzewa ( $H_{max}$ ),
- odrzucono piksele znajdujące się poniżej poziomu wynoszącego  $0,7 \times H_{max}$ ,

– dla każdego wyodrębnionego segmentu, wykorzystując informację o  $H_{max}$ , zmierzono powierzchnię przekroju korony w miejscu określonym jako  $0,7 \times H_{max}$ .

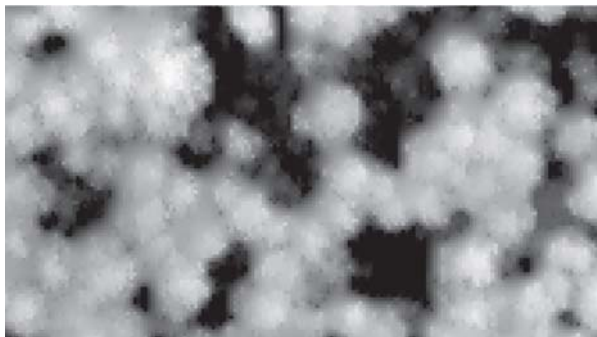
W rezultacie tak przeprowadzonych pomiarów dysponowano następującymi danymi charakteryzującymi poszczególne drzewa zaliczone do próby:

- wysokością drzewa,
- wysokością nad gruntem najniższej obserwowanej części korony,
- powierzchnią przekroju korony na wysokości równej  $0,7$  wysokości drzewa, zgodną z teoretyczną wysokością osadzenia korony drzewa w zwartym drzewostanie,
- maksymalną średnicą korony w miejscu wykonania przekroju.

Na podstawie tych danych obliczono cechy charakteryzujące poszczególne powierzchnie próbne (ryc. 3).

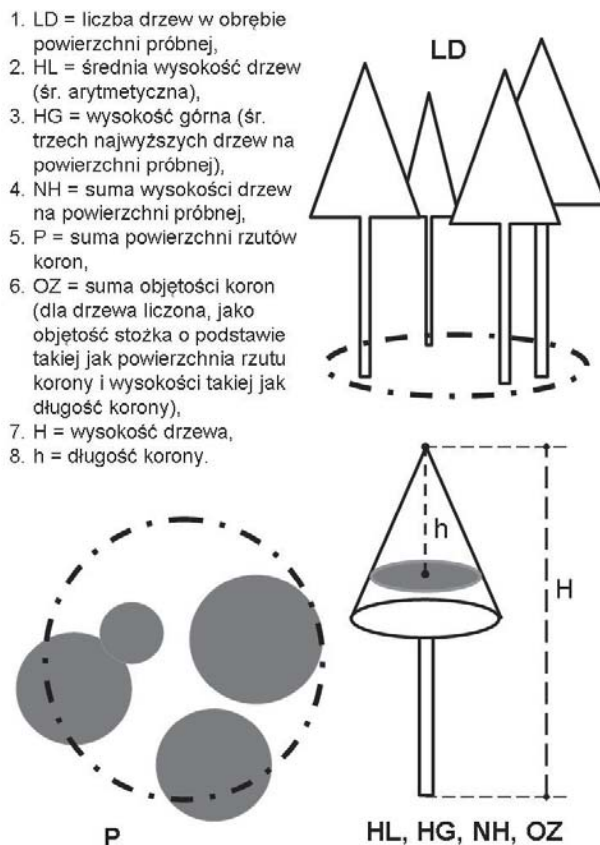
Obliczenie zależności między zasobnością i zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami pozyskanymi z wysokościowego modelu koron (WMK)

Przyjmując, że zmienną zależną jest – uzyskana z naziemnych pomiarów powierzchnia próbnych – jedna z cech odniesiona do 1 ha (zapas grubizny drzew  $V$  lub liczba wszystkich drzew  $ZAG$ ), a zmiennymi niezależnymi – cechy obliczone na podstawie analizy wysoko-



**Rycina 2. Wysokościowy model koron, jasne odcienie oznaczają wysokie drzewa, ciemne – grunt, roślinność zielną lub dolne warstwy drzewostanu (nalot, podrost lub podszyt)**

Figure 2. Canopy Height Model, bright tones are referring to tallest trees, dark – ground, herbaceous vegetation or understory stand layers (seedlings, saplings or shrubs)



Rycina. 3. Cechy charakteryzujące fragment drzewostanu w obrębie powierzchni próbnej oraz zasady obliczania niektórych z tych cech na podstawie wysokościowego modelu koron (WMK)

Figure 3. Variables describing part of the stand inside sample plot and rules of calculations some of these features based on Canopy Height Model (CHM) (“h” means length of so called visible part of the crown in CHM (minimum 0.7 of tree height), LD – tree number inside sample plot, HL – mean height, HG – mean height for 3 tallest trees, NH – tree height sum, P – sum of crown vertical projections, OZ – tree crown volume sum (crown volume was counted as a volume of cone, H – tree height)

ciowego modelu koron (w miejscu odwzorowania naziemnych powierzchni próbnych), obliczono regresję wielokrotną. Przyjęto kwadratową funkcję zmiennych niezależnych, która w przypadku dwóch zmiennych  $t$  i  $z$  ma ogólną postać:

$$y = a_0 + a_1 t + a_2 z + a_3 t^2 + a_4 z^2 + a_5 tz$$

Jako zmienne niezależne przyjmowano trzy cechy oraz odpowiednie ich kwadraty i pary iloczynów. Przyjęcie tylko trzech cech wynikało z faktu, że każda z sześciu wskazanych cech, uzyskana z pomiaru WMK, miała jeden pokrewny odpowiednik. I tak alternatywnymi parami były:

- HL i HG,
- LD i NH,
- P i OZ.

Z tego powodu można było utworzyć osiem kombinacji zestawu cech wyjściowych. Dobór zmiennych do równania regresji wykonano metodą krokową „wstecz”, korzystając z programu Statistica.

Wskazane wyżej obliczenia zostały wykonane czterokrotnie z uwzględnieniem, że zarówno zmienne niezależne różniły się w zależności od wielkości próby, jak i od sposobu zaliczenia drzew (koron) do próby.

### 3. Wyniki

#### Obliczenie zależności między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami pozyskanymi z wysokościowego modelu koron (WMK)

Siła związku między zasobnością  $V$  na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami określonymi dla WMK różniła się w zależności od wielkości i sposobu zliczenia drzew do próby. Największa była w przypadku powierzchni „centroid 500 m<sup>2</sup>”, a najmniejsza w przypadku powierzchni „granica 1963,5 m<sup>2</sup>” (tab. 2).

**Tabela 2. Wyniki obliczeń regresji wielokrotnych opisujących zależności między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych  $V$  a zasobnością określoną na podstawie analizy wysokościowego modelu koron. Przyjęto cztery rodzaje prób  $a$  różniących się wielkością (odpowiednik w terenie) oraz sposobem zaliczania drzew do próby (najsilniejsze zależności podkreślono z użyciem pogrubionej czcionki).**

Tables 2. The results of multiple regression calculations describing the relationship between standing volume estimated based on ground sample plots measurements  $V$  and variables taken from Canopy Height Model. Four types of sample plots  $a$  different in size were used (equivalent to the field) and the way-off qualification trees to the sample (strongest correlations were highlighted using bold font).

Zaproponowane zmienne (+ ich kwadraty i pary iloczynów) The proposed variables (+ their squares and pair multiplication)	Wielkość i rodzaj powierzchni próbnych określonych dla WMK The size and type of sample plots established for CHM			
	wg centroidy /by centroid 500 m <sup>2</sup>	graniczne / by border 500 m <sup>2</sup>	wg centroidy / by centroid 1963,5 m <sup>2</sup>	graniczne / by border 1963,5 m <sup>2</sup>
	wybrane zmienne; w ostatnim wierszu – współczynnik korelacji R selected variables, the last line – the correlation coefficient R			
HL, OZ, NH	HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HL×OZ, HL×NH 0,915	OZ, HL×NH, OZ×NH 0,871	HL <sup>2</sup> , HL×OZ, HL×NH, OZ×NH 0,891	HL×OZ, HL×NH, OZ×NH 0,840
HL, OZ, LD	HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HL×OZ, OZ×LD 0,924	HL, OZ, LD <sup>2</sup> , HL×LD, OZ×LD 0,891	HL <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HL×OZ, HL×LD 0,898	OZ <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HL×OZ 0,856
HL, P, NH	HL <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , NH <sup>2</sup> , HL×P 0,897	HL <sup>2</sup> , HL×P, HL×NH, P×NH 0,869	NH, HL×P, P×NH 0,850	P <sup>2</sup> , HL×NH, P×NH 0,839
HL, P, LD	P <sup>2</sup> , HL×P, HL×LD 0,883	P, HL×LD, P×LD 0,870	HL <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HL×P 0,849	P <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HL×P 0,851
HG, OZ, NH	HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG×OZ, HG×NH 0,922	HG <sup>2</sup> , OZ, HG×NH, OZ×NH 0,891	HG, OZ, HG×NH, OZ×NH 0,883	HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG×NH, OZ×NH 0,863
HG, OZ, LD	HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD <sup>2</sup> , HG×OZ, HG×LD 0,925	HG, OZ, LD, HG×LD, OZ×LD 0,907	HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , LD, LD <sup>2</sup> , HG×OZ 0,899	HG, HG <sup>2</sup> , OZ <sup>2</sup> , HG×OZ 0,841
HG, P, NH	HG <sup>2</sup> , NH <sup>2</sup> , HG×P, HG×NH, P×NH 0,899	HG <sup>2</sup> , HG×P, HG×NH, P×NH 0,888	P, HG×NH, P×NH 0,852	HG, P <sup>2</sup> , NH, HG×NH, P×NH 0,871
HG, P, LD	HG, HG <sup>2</sup> , P, P <sup>2</sup> , LD, HG×LD 0,912	HG, P, LD, LD <sup>2</sup> , HG×LD, P×LD 0,911	HG <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HG×P 0,870	HG <sup>2</sup> , P <sup>2</sup> , HG×P 0,840

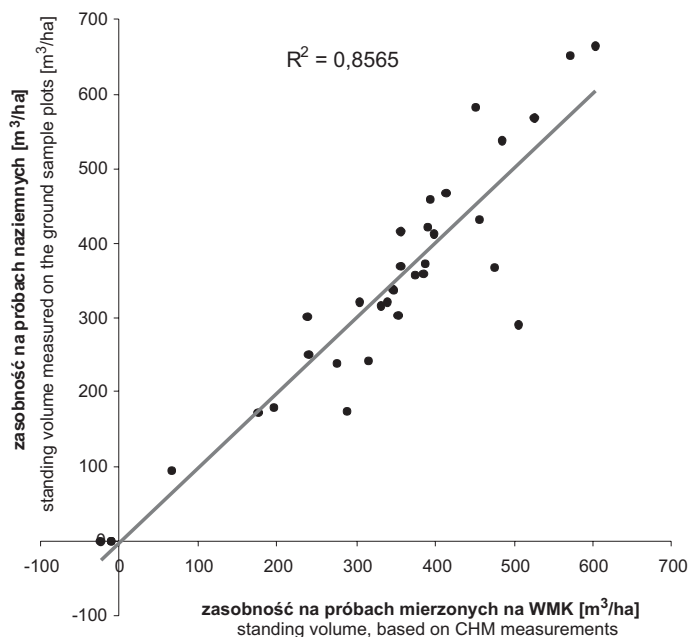
**Objaśnienia symboli zmiennych jak na rycinie 3**

For the variable symbols see Figure 3

Ogólnie – zależność tę należy ocenić jako bardzo silną. Największa wartość współczynnika korelacji wyniosła  $R=0,925$  ( $p<0,001$ ). Wyniki dla najlepszego modelu zależności (powierzchni typu „centroid 500 m<sup>2</sup>”) przedstawiono na rycinie 4. Wartości ujemne wynikały z użycia relatywnie prostego modelu. Uniknięcie tej sytuacji jest możliwe w następstwie stosowania transformacji danych lub modelu regresji bez wyrazu wolnego.

W przypadku powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” trzy zestawy cech można uznać za szczególnie

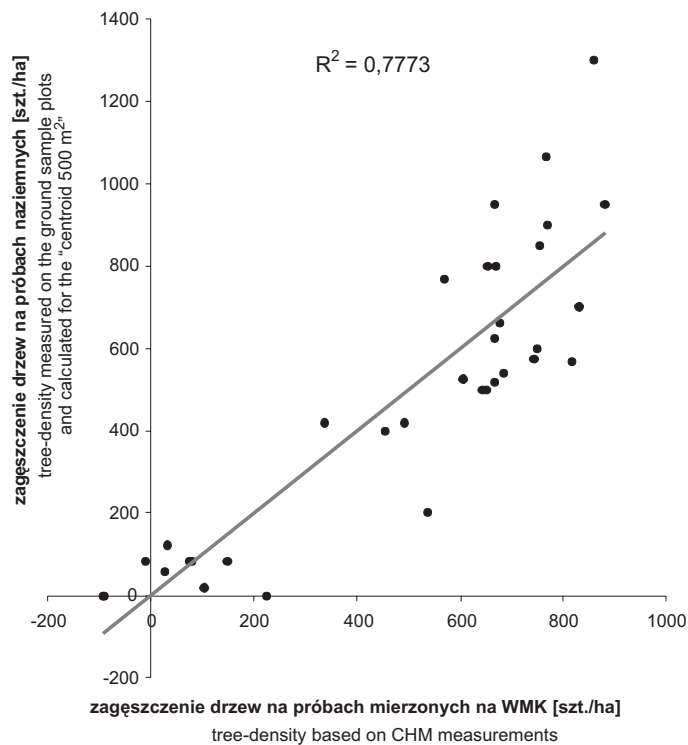
przydatne. Za każdym razem znalazła się tam cecha OZ (objętość koron). Cechy HG lub HL oraz LD lub NH można by uznać za jednakowo przydatne.



**Rycina 4. Zależność między zasobnością na naziemnych powierzchniach próbnych a obliczoną na podstawie powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” zmierzonych na wysokościowym modelu koron (WMK).**

Figure 4. Correlation between standing volume measured on the ground sample plots and calculated for the “centroid 500 m<sup>2</sup>” plots based on the Canopy Height Model

(OY – volume based on sample plots measurements, OX – volume based on CHM measurements)



**Rycina 5. Zależność między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami zmierzonymi na wysokościowym modelu koron (WMK), obliczonymi na podstawie powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>”**

Figure 5. Correlation between tree-density measured on the ground sample plots and calculated for the “centroid 500 m<sup>2</sup>” plots based on the Canopy Height Model (OY – tree-density based on sample plots measurements, OX – tree-density based on CHM measurements)

#### **Obliczenie zależności między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami pozyskanymi z wysokościowego modelu koron (WMK)**

Siła związku między zagęszczeniem drzew *ZAG* na naziemnych powierzchniach próbnych i określona na podstawie wyników segmentacji wysokościowego mo-

delu koron różniła się w zależności od wielkości i sposobu zliczenia drzew do próby. Tak jak w przypadku zasobności – najsilniejsza zależność była przy stosowaniu powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” (najlepszy wynik dla powierzchni „granica 500 m<sup>2</sup>” potraktowano jako przypadkowy), a najmniejsza przy stosowaniu powierzchni „granica 1963,5 m<sup>2</sup>” (tab. 3). Ogólnie – zależność tę należy ocenić jako bardzo silną, choć nieco mniejszą niż w przypadku zasobności. Największa war-

**Tabela 3. Wyniki obliczeń regresji wielokrotnych opisujących zależności między zagęszczeniem drzew na naziemnych powierzchniach próbnych ZAG a zagęszczeniem określonym na podstawie segmentacji wysokościowego modelu koron. Przyjęto cztery rodzaje prób różniących się wielkością (odpowiednik w terenie) oraz sposobem zaliczania drzew do próby (najsilniejsze zależności podkreślono z użyciem pogrubionej czcionki)**

Table 3. The results of multiple regression calculations describing the relationship between tree-density estimated based on ground sample plots measurements ZAG and density taken from Canopy Height Model. Four types of sample plots a different in size were used (equivalent to the field) and the way-off qualification trees to the sample (strongest correlations were highlighted using bold font).

Zaproponowane zmienne (+ ich kwadraty i pary iloczynów) The proposed variables (+ their squares and pair multiplication)	Wielkość i rodzaj powierzchni próbnych określonych dla WMK The size and type of sample plots established for CHM			
	wg centroidy / by centroid 500 m <sup>2</sup>	graniczne / by border 500 m <sup>2</sup>	wg centroidy / by centroid 500 m <sup>2</sup>	graniczne / by border 1963,5 m <sup>2</sup>
	wybrane zmienne; w ostatnim wierszu - współczynnik korelacji R selected variables, the last line – the correlation coefficient R			
HL, OZ, NH	HL, OZ, NH, NH <sup>2</sup> , HL×OZ 0,882	NH, NH <sup>2</sup> , HL×NH, OZ×NH 0,888	NH, NH <sup>2</sup> , HL×NH, OZ×NH 0,855	NH, HL×NH 0,795
HL, OZ, LD	OZ, LD <sup>2</sup> , HL×OZ 0,865	HL, OZ, HL×OZ, HL×LD, OZ×LD 0,851	LD 0,763	LD 0,773
HL, P, NH	NH, NH <sup>2</sup> , HL×NH, P×NH 0,868	NH, NH <sup>2</sup> , HL×NH, P×NH 0,864	NH, HL×NH 0,796	NH, HL×NH 0,795
HL, P, LD	P, HL×P 0,840	HL <sup>2</sup> , P, LD <sup>2</sup> , HL×LD, P×LD 0,840	LD 0,763	LD 0,773
HG, OZ, NH	NH, NH <sup>2</sup> , HG×NH, OZ×NH 0,852	HG, HG <sup>2</sup> , HG×OZ 0,807	NH, NH <sup>2</sup> , HG×NH, OZ×NH 0,841	NH, HG×NH 0,796
HG, OZ, LD	OZ, LD <sup>2</sup> , HG×OZ 0,863	OZ, LD <sup>2</sup> , HG×OZ 0,864	OZ, HG×OZ 0,824	OZ, HG×OZ 0,797
HG, P, NH	P, HG×P 0,811	HG, HG <sup>2</sup> , P 0,825	P, HG×P 0,811	NH, HG×P 0,786
HG, P, LD	NH, HG×NH 0,808	P, HG×P 0,811	P, HG×P 0,811	P, HG×P 0,797

**Objaśnienia symboli zmiennych jak na rycinie 3**

For the variable symbols see Figure 3

tość współczynnika korelacji wyniosła  $R=0,888$  ( $p<0,001$ ). Wyniki dla najlepszego modelu zależności (powierzchni typu „centroid 500 m<sup>2</sup>”) przedstawiono na rycinie 5. Przyczyny wystąpienia wartości ujemnych oraz możliwości uniknięcia tej sytuacji można objaśnić tak samo jak przy obliczeniach dla zasobności.

W przypadku powierzchni próbnych „centroid 500 m<sup>2</sup>” najlepszym zestawem cech okazał się HL, OZ i NH. Jednak zamiana którejs z tych cech na HG lub P, lub LD nie powodowała znacznego pogorszenia siły związku (tab. 3).

## 4. Dyskusja

Wykorzystanie drzewostanów Obrębu Milicz jako obiektu badań pozwoliło na porównanie rezultatów zastosowania pomiarów LSL z pomiarami fotogrametrycznymi. Traktując wyniki pomiarów z wykorzystaniem wysokościowego modelu koron jako potencjalne próby I fazy w dwufazowej kombinowanej metodzie inwentaryzacji lasu, możliwe było porównanie z rezultatami podobnego opracowania wykonanego z wykorzystaniem zdjęć lotniczych w skali 1:10 000 (Miścicki 2009). W cytowanym opracowaniu wykorzystano pomiary 283 naziemnych powierzchni próbnych (267 w drzewostanach w wieku powyżej 20 lat) wykonanych



w roku 2005 i takiej samej liczby prób fotolotniczych (zmierzonych w tym samym roku), zlokalizowanych w miejscu odwzorowania powierzchni naziemnych. Położenie powierzchni próbnych z roku 2006, wykorzystanych w niniejszej pracy, było zdeterminowane przez położenie 34 stałych powierzchni próbnych naziemnych, jednych z tych, które były wykorzystane w cytowanych badaniach. Można więc przyjąć, że materiał badawczy był porównywalny, a stąd rezultaty badań nad wykorzystaniem zdjęć lotniczych i obrazowań LSL do inwentaryzacji zasobów drzewnych metodą kombinowaną – porównywalne.

Siła związku między zasobnością obliczoną na powierzchniach naziemnych, a cechami fotolotniczymi, określona przy pomocy współczynnika korelacji, wyniosła  $R=0,830$  (Miścicki 2009) i była mniejsza niż w przypadku obliczeń z wykorzystaniem cech określonych na podstawie WMK ( $R=0,925$ ).

W cytowanych badaniach (Miścicki 2009) nie obliczono zależności między zagęszczeniem drzew na powierzchniach naziemnych a cechami na fotolotniczych powierzchniach próbnych. Można więc posłużyć się tylko odniesieniem do wcześniejszych badań (Miścicki 2000), biorąc jednak pod uwagę, że technika opracowania fotogrametrycznego stała wówczas (w roku 2000) na niższym poziomie – stąd rezultaty uzyskane dziś mogłyby być lepsze. W przypadku zagęszczenia wszystkich drzew siła związku ( $R=0,697$ ) była znacznie mniejsza niż dla prób, w których wykorzystano analizę wysokościowego modelu koron ( $R=0,888$ ). Należy także nadmienić, że wykonując pomiary na zdjęciach lotniczych użyto wiek drzewostanu jako dodatkową cechę. Nie była ona wykorzystana w niniejszych badaniach.

Zestaw cech zastosowanych do określenia miąższości był podobny do tych użytych przez innych autorów (Hyypä et al. 2006, 2012; Straub, Koch 2012). W odróżnieniu od pracy Strauba i Koch (2012) w budowie modelu nie wykorzystywano charakterystyk określonych na podstawie chmury punktów. Pomimo to objętość korony okazała się istotną informacją. Do jej obliczenia wykorzystano dane określone na podstawie wysokościowego modelu koron, interpolowanego z danych lotniczego skanowania laserowego.

Siła związku między zasobnością, zmierzoną na powierzchniach próbnych naziemnych, a cechami określonymi na podstawie WMK była większa niż w przypadku związku między zasobnością na próbach naziemnych a cechami zmierzonymi przy pomocy metod fotogrametrycznych w obrębie prób fotolotniczych. Oznacza to, że zautomatyzowanie obliczeń w przypadku analizy wyników interpolacji danych skanowania laserowego stwarza jakościowo nową (lepszą) sytuację dla pomiarów prowadzonych metodą kombinowaną. Na przykład zapas drzewostanów Obrębu Milicz o powierzchni leśnej

7599 ha, przy stosowaniu 267 prób naziemnych – jako części inwentaryzacji wykonywanej metodą kombinowaną – i 1980 prób opartych na cechach określonych na podstawie WMK, mógłby być oszacowany z błędem ok.  $\pm 2,6\%$  (przy poziomie istotności  $p=0,05$ ). Byłaby to dokładność bardzo zbliżona do tej, którą uzyskano w ramach inwentaryzacji urzędniowej z zastosowaniem 835 powierzchni próbnych naziemnych. Dalsze zwiększenie liczby prób mierzonych na wysokościowym modelu koron prowadziłyby do zwiększenia dokładności inwentaryzacji. Takie rozwiązanie wydaje się możliwe, ponieważ koszt (automatycznego) pomiaru w niewielkim stopniu zależy od liczby prób na WMK, a jest ograniczony jedynie czasem przetworzeń danych. Pełna automatyzacja procesu, po dostarczeniu wyników terenowej inwentaryzacji powierzchni próbnych, pozwala na określenie zasobności drzewostanów nadleśnictwa w ciągu kilku dni.

## 5. Wnioski

1. Wskazane jest stosowanie jednakowych powierzchni próbnych naziemnych i odpowiadających im powierzchni próbnych na wysokościowym modelu koron (WMK). Użycie na WMK powierzchni większych prowadziło do pogorszenia wyniku obliczenia zależności między zasobnością lub zagęszczeniem drzew, zmierzonymi na tych dwóch rodzajach powierzchniach próbnych.

2. Lepszym sposobem zaliczania drzew do próby jest metoda „centroidu”.

3. Cechą, określoną na podstawie wysokościowego modelu koron, szczególnie przydatną do obliczenia zasobności, jak i zagęszczenia drzew, jest „suma objętości koron” (OZ). Pozostałe cechy: wysokość (HG – górna lub HL – średnia), liczba drzew widoczna na obrazowaniu (LD) lub suma wysokości drzew (NH) także mogą być wykorzystane i mają podobne znaczenie dla objaśnienia zależności między wartością zmienną cech zmierzonych na naziemnych powierzchniach próbnych (zasobnością lub zagęszczeniem drzew) a wartością zmienną cech zmierzonych na powierzchniach próbnych na wysokościowym modelu koron.

## Podziękowania

Badania przedstawione w pracy były sfinansowane przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w ramach projektu: „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”, wykonanego w latach 2006-2008.

## Literatura

- Będkowski K. 2004. Skanowania laserowe i jego zastosowanie w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, 2(4): 33–40.
- Breidenbach J., McGaughey R.J., Andersen H-E., Kandler G., Reutebuch S.E. 2007. A mixed-effects models to estimate stand volume by means of small footprint airborne LiDAR data for an American and a German study site. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. Finlandia, Espoo.
- Chirrek M., Wencel A., Strzeleński P., Stereńczak K., Zasada M., Zawila-Niedźwiecki T. 2007. Lotniczy skaning laserowy jako źródło danych dla systemu informacji przestrzennej nadleśnictwa. *Roczniki Geomatyki*, 5(3):19–28.
- Elmqvist M. 2000. Automatic Ground Modelling using Laser Radar Data. Master thesis, Linköping, Linköping University: 30 pp.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction, in: T. Koukal, W. Schneider (eds.) 3-D Remote Sensing in Forestry, Vienna. EARSeL SIG Forestry. ISPRS WG VIII/11: 63–78.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Vastaranta M., Holopainen M., Kukko A., Kaartinen H., Jaakkola A., Vaaja M., Koskinen J., Alho P. 2012. Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, 4(5): 1190–1207.
- Korpela I.S., Tokola T.E. 2006. Potential of Aerial Image-Based Monoscopic and Multiview Single-Tree Forest Inventory: A Simulation Approach. *Forest Science*, 52(2): 136–137.
- Miścicki S. (red.) 2000. Kombinowana dwufazowa inwentaryzacja lasów nizinnych z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i stałych kontrolnych powierzchni próbnych. Warszawa, Fundacja „Rozwój SGGW”. ISBN 9788372740243.
- Miścicki S. 2009. Pomiar zapasu grubizny z wykorzystaniem zdjęć lotniczych. *Sylwan*, 153(6): 373–385.
- Naesset E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 164–179.
- Stereńczak K. 2010a. Technologia lotniczego skanowania laserowego jako źródło danych w półautomatycznej inwentaryzacji lasu. *Sylwan*, 154(2): 88–99.
- Stereńczak K. 2010b. Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych. Praca doktorska. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny.
- Straub C., Koch B. 2012. Estimating Single Tree Stem Volume of *Pinus sylvestris* Using Airborne Laser Scanner and Multispectral Line Scanner Data. *Remote Sensing*, 3(5): 929–944.
- Wack R. 2006. Combined use of satellite imagery and laser-scanner data for the assessment of forest stand parameters. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th–15th Feb. 2006, Vienna: 375–379.
- Wężyk P. 2006. Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego LIDAR w leśnictwie. *Roczniki Geomatyki*, 5(4): 119–132.