

**WYKORZYSTANIE CECH OKREŚLONYCH  
NA PODSTAWIE WYSOKOŚCIOWEGO MODELU KORON  
W DWUFAZOWEJ METODZIE INWENTARYZACJI  
ZAPASU DRZEWOSTANU\***

**USING CHARACTERISTICS BASED ON CROWN HEIGHT  
MODEL IN DOUBLE SAMPLING METHOD  
OF FOREST STOCK INVENTORY**

**Stanisław Miścicki, Krzysztof Stereńczak**

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Wydział Leśny  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Słowa kluczowe: lotnicze skanowania laserowe (LSL), leśnictwo, Park Narodowy Gór Stołowych, modelowanie**

Keywords: Airborne Laser Scanning (ALS), forestry, Stołowe Mountains National Park, modeling

## **Wstęp**

Lotnicze skanowanie laserowe (ALS) jest od ponad dekady technologią wykorzystywaną do pozyskiwania informacji o środowisku leśnym (Stereńczak, 2010). Analiza danych lotniczego skanowania laserowego, w zależności od technologii i możliwości, może być prowadzona na kilka sposobów:

- analiza chmury punktów i na jej podstawie określenie wielkości charakteryzujących drzewa i drzewostany,
- wygenerowanie, na podstawie chmury punktów, modeli: numerycznego modelu terenu (NMT) i numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) – w wyniku odejmowania odpowiadających sobie pikseli obu modeli uzyskanie różnicowego modelu pokrycia terenu dla obszarów leśnych, nazywanego wysokościowym modelem koron (WMK),
- łączne przetwarzanie chmury punktów i modelu terenu.

---

\* Praca wykonana w ramach projektu N N309 111937 „Opracowanie metody pomiaru zasobów leśnych z wykorzystaniem lotniczego skaningu laserowego (na przykładzie terenu górskiego objętego ochroną)” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków na naukę w latach 2009-2012.

W odniesieniu do określania wielkości zapasu stosowane są na świecie dwa zasadnicze podejścia:

- metoda bazująca na wykorzystaniu parametrów pojedynczych drzew (ang: *Individual Tree Detection* – ITD),
- metody oparte na modelowaniu parametrów uzyskanych z powierzchni próbnych (ang: *area-based approach* – ABA).

Z punktu widzenia stosowanych metod statystycznych (metoda reprezentacyjna), szacowanie zapasu z wykorzystaniem materiałów teledetekcyjnych może odbywać się według „dwufazowej metody dla stratyfikacji” lub „dwufazowej metody z estymatorami regresyjnymi” (Cochran, 1977; Chojnacki, 1998; Spencer, Czaplewski, 1998; Parker, Evans, 2004; Köhl i in., 2006). W obu metodach konieczne jest wykorzystanie danych naziemnych – na ogół zbieranych na losowo rozmieszczonych powierzchniach próbnych. Za bardziej efektywną uważana jest metoda dwufazowa z estymatorami regresyjnymi. Szacowanie zapasu odbywa się tu dwuetapowo (dwufazowo). W pierwszym określana jest zależność między zasobnością zmierzoną na naziemnych powierzchniach próbnych a cechami zmierzonymi z poziomu lotniczego w miejscach, które odwzorowały fragmenty lasu, w których były zlokalizowane naziemne powierzchnie próbne. W drugim etapie, korzystając z dodatkowych (na ogół bardzo licznych) powierzchni próbnych, zmierzonych już tylko na poziomie lotniczym, następuje rozszerzenie obliczeń. Pierwotnie w tym procesie wykorzystywano pomiary wykonywane na zdjęciach lotniczych (Chojnacki, 1998; Miścicki, 2000; 2009; Korpela, Tokola, 2006). Obecnie coraz szerzej są stosowane pomiary wykonywane z wykorzystaniem danych pozyskiwanych za pomocą lotniczego skanowania laserowego (Parker, Evans, 2004). Charakterystyki drzew i drzewostanów mogą być określane w oparciu o dane punktowe (chmurę punktów ALS), modele terenu bądź obydwie zestawy danych jednocześnie (Naesset, 2004; Hyypä i in., 2006, 2012; Straub, Koch, 2012; Stereńczak, Miścicki, 2012).

W metodzie dwufazowej z estymatorami regresyjnymi o dokładności oszacowania zapasu decyduje – oprócz liczby zmierzonych powierzchni próbnych – siła związku między zasobnością określoną na ziemi, a cechami zmierzonymi na zobrazowaniu (Cochran, 1977). Z tego powodu te ostatnie cechy powinny być tak dobrane, aby były możliwie silnie skorelowane z zasobnością zmierzoną na ziemi. W przypadku stosowania pomiarów fotogrametrycznych, dodatkowym zadaniem jest znalezienie jak najmniejszego zestawu cech mierzonych na zdjęciach lotniczych, silnie skorelowanych z zasobnością mierzoną na ziemi. W tym wypadku ważnym aspektem jest ograniczenie zakresu zdalnych pomiarów powierzchni i wynikające z tego zredukowanie ich kosztów.

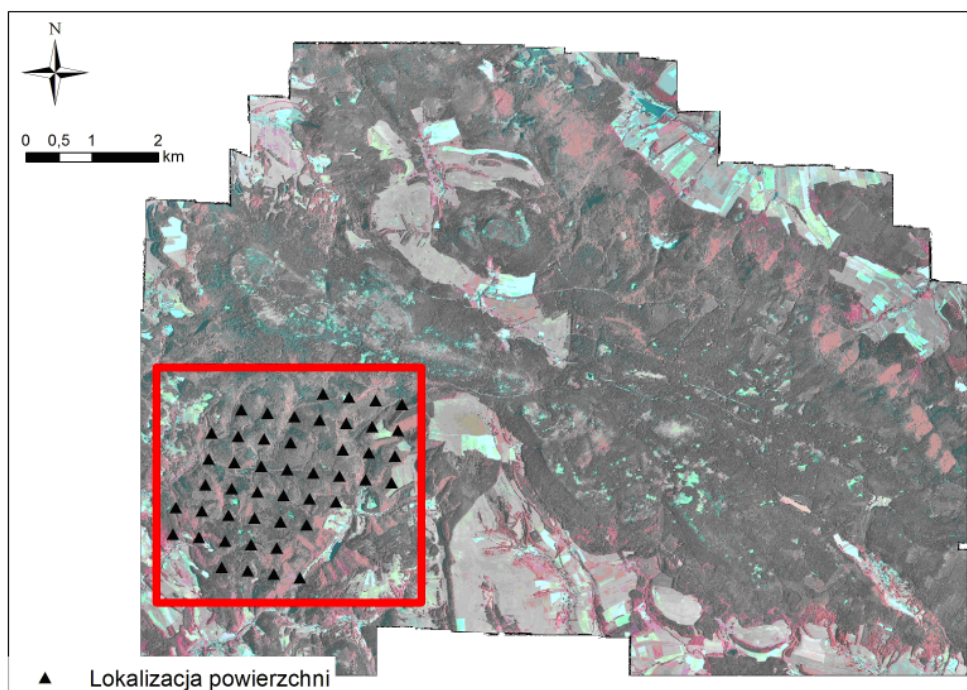
W przeszłości, gdy w metodzie estymacji do regresji stosowano pomiary fotogrametryczne, najczęściej wykorzystywanymi cechami były: wysokość drzew (często średnia jej wartość) i stopień pokrycia powierzchni przez korony drzew (Loetsch, Haller, 1964). W lasach strefy umiarkowanej pomiar tych cech był trudny i zapewne obarczony błędem. W przypadku wysokości wynikało to faktu, że na ogół miejsce wyrastania drzew (rzędna wysokości terenu) było niewidoczne, stąd konieczne było stosowanie metod pośrednich do określenia wysokości drzew. Z kolei dokładny pomiar pokrycia powierzchni przez korony drzew był bardzo pracochłonny. W tym przypadku na ogół stosowano szybsze oszacowanie z użyciem wzorców.

Zastosowanie pomiarów na zobrazowaniu lidarowym stworzyło nowe możliwości, ze względu na pomiar cech charakteryzujących poszczególne drzewa, jak i całą powierzchnię próbną. Dotyczyło to zarówno zwiększenia dokładności pomiaru cech stosowanych trady-

cyjnie, możliwości stosowania nowych, jak i przyspieszenia i automatyzacji samego procesu pomiarów. Doświadczenia wcześniejsze wskazują na wysoką skuteczność opisanych metod w drzewostanach iglastych jednogatunkowych. W niniejszej pracy postanowiono dokonać oceny, które cechy mogą być wartościowe w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zapasu w drzewostanach liściastych i mieszanych. Przyjęto przy tym, że sposób obliczeń inwentaryzacyjnych jest taki, że wybrane cechy są określone dla poszczególnych drzew wyodrębnionych na podstawie wysokościowego modelu koron (Stereńczak, 2008; 2011), ale poszukiwanie związku z zasobnością zmierzoną na ziemi dotyczy sum lub średnich wartości cech uzyskanych w obrębie poszczególnych powierzchni próbnych.

## Material badawczy

Material badawczy stanowiły dane zebrane na naziemnych powierzchniach próbnych oraz na odpowiadających im powierzchniach próbnych tzw. aerolidarowych, zmierzonych w miejscach i w granicach odpowiadających położeniu naziemnych powierzchni próbnych. Naziemne powierzchnie próbne były położone w terenie górskim, w południowo-zachodniej części Parku Narodowego Gór Stołowych, rozmieszczone systematycznie w siatce kwadratów  $400 \times 400$  metrów. Zmierzono je w lipcu 2009 roku. W pracy wykorzystano 47 powierzchni o obszarze  $500 \text{ m}^2$ , położonych na wysokości od 472 do 737 (średnio 601) metrów n.p.m. Powierzchnie próbne aerolidarowe zmierzono na zobrazowaniu pozyskanym w sierpniu 2008 roku. Lokalizację powierzchni na tle ortofotomapy Parku Narodowego przedstawiono na rysunku 1.



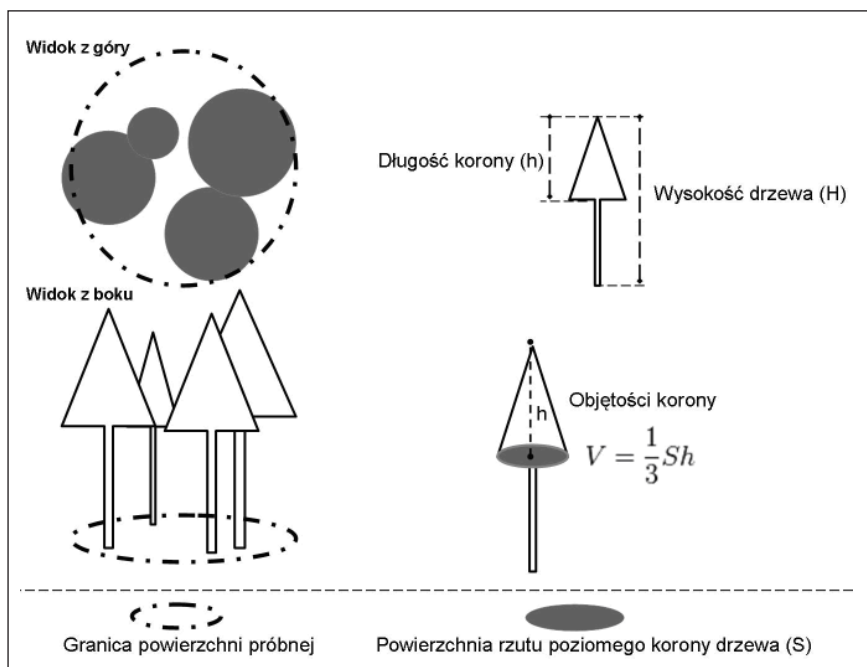
Rys. 1. Lokalizacja powierzchni próbnych na tle ortofoto mapy PNGS

Drzewostany, w których były zlokalizowane powierzchnie próbne, były w większości wielogatunkowe, zróżnicowane ze względu na wiek i wymiary drzew. Na 8 powierzchniach próbnych dominował buk, na 6 świerk, na 2 modrzew, na 1 jesion, na 1 brzoza, a na 29 udział żadnego gatunku nie przekraczał 40% – choć najczęściej największy był udział buka. Oprócz wymienionych gatunków występował też jawor. Średnia wysokość drzew na powierzchni próbnej zawierała się w przedziale 9-35 (średnio 25) metrów, a zasobność w przedziale 73-983 (średnio 480) m<sup>3</sup>/ha.

## Metodyka analizy zmiennych

Na wysokościowym modelu koron, w miejscach i w granicach odpowiadających położeniu naziemnych powierzchni próbnych, dokonano segmentacji drzewostanu (Stereńczak, 2011). Po wyodrębnieniu korony drzew określono automatycznie ich wysokość (maksymalna wartość WMK w obrębie korony), wysokość położenia podstawy korony (minimalna wartość WMK w obrębie korony) oraz powierzchnię rzutu korony. Drzewa zaliczono do próby na podstawie położenia centroidy, tj. punktu reprezentującego środek masy rzutu poziomego korony drzewa na płaszczyznę. Z dalszych opracowań wyeliminowano drzewa o wysokości poniżej 7 m zakładając, że takie drzewa nie mają miąższości grubizny. Na podstawie tych obliczeń dla każdej powierzchni próbnej przygotowano zestaw cech użytych do dalszych analiz (rys. 2). Były to:

- LD = liczba drzew w obrębie powierzchni próbnej,
- SUMH = suma wysokości drzew na powierzchni próbnej,



Rys. 2. Graficzna reprezentacja cech drzew i drzewostanów określanych na podstawie wysokościowego modelu koron

- VZ = suma objętości koron (dla poszczególnych drzew liczona jako objętość stożka o podstawie równej powierzchni rzutu korony i wysokości równej długości korony, tj. różnicy między wysokością drzewa a najniższą obserwowaną częścią korony),
  - POW = suma powierzchni rzutów koron,
  - Hśr = średnia arytmetyczna wysokości drzew na powierzchni próbnej.
- Dodatkowo wprowadzono cechy, które były iloczynem dwóch innych:
- VZ\*Hśr,
  - SUMH\*VZ.

W celu ustalenia, które cechy zmierzone na powierzchniach aerolidarowych najlepiej wiążą się z zasobnością na ziemi (VOL), przeprowadzono analizę regresji. Sprawdzone, czy zależność między VOL a poszczególnymi cechami ma charakter prostoliniowy. Spodziewano się, że w przypadku nieliniowej zależności konieczne byłoby dokonanie transformacji danej cechy. Obliczono macierz współczynników korelacji prostoliniowej między parami wszystkich analizowanych cech. Celem tego etapu było wstępne ustalenie cech najlepiej objaśniających zmienność VOL, a także wykrycie współliniowości danych (Stanisz, 2007). Wybór cech aerolidarowych przeprowadzono za pomocą metody regresji krokowej „wstecz”.

## Wyniki

Stwierdzono, że w przypadku wszystkich cech zmierzonych na powierzchniach próbnych aerolidarowych można było przyjąć, że ich związek z VOL ma charakter prostoliniowy. Najsilniejsza zależność była między VOL a Hśr, ale niewiele mniejsza między VOL a iloczynami VZ\*Hśr lub SUMH\*VZ (tab. 1). Cechami słabo skorelowanymi z VOL okazała się liczba (zagęszczenie) drzew, a także powierzchnia rzutów koron.

Przyjmując, że pierwszą cechą wybraną do modelu objaśniającego zależność między VOL a cechami z prób aerolidarowych jest Hśr, należało odrzucić VZ oraz VZ\*Hśr jako cechy współliniowe. Kierowano się przy tym kryterium, że współczynniki korelacji między nimi a Hśr (odpowiednio 0,754 oraz 0,857) były większe niż między VOL a Hśr (0,750). Kolejnymi cechami w tym modelu mógł być iloczyn SUMH\*VZ, ewentualnie także SUMH.

**Tabela 1.** Macierz korelacji między cechami aerolidarowymi i zasobnością zmierzoną na ziemi (zależności istotne na poziomie  $P < 0,05$  oznaczono pogrubioną czcionką)

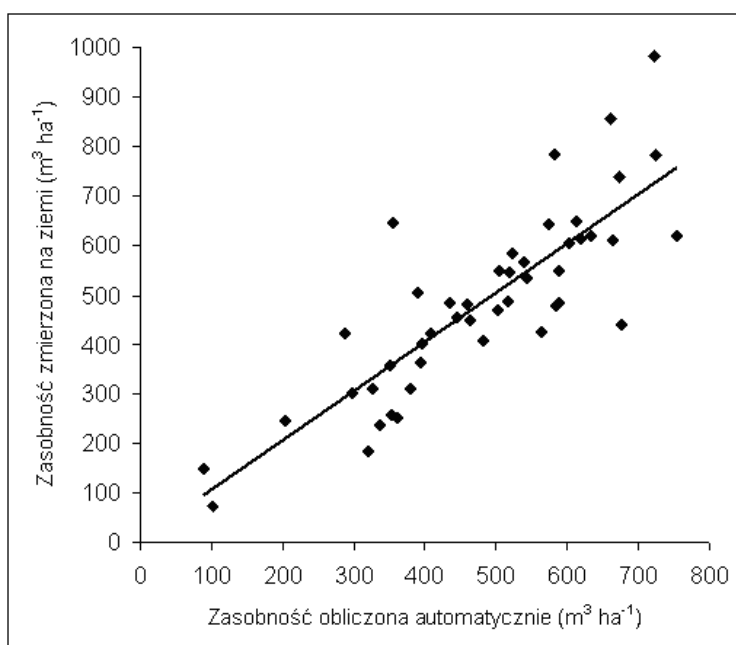
Cecha	Cecha							
	LD	SUMH	VZ	POW	Hśr	VZ*Hśr	SUMH*VZ	VOL
LD	1,000	<b>0,766</b>	0,133	<b>0,524</b>	-0,144	-0,002	<b>0,473</b>	0,103
SUMH	<b>0,766</b>	1,000	<b>0,578</b>	<b>0,642</b>	<b>0,485</b>	<b>0,530</b>	<b>0,858</b>	<b>0,596</b>
VZ	0,133	<b>0,578</b>	1,000	<b>0,680</b>	<b>0,754</b>	<b>0,953</b>	<b>0,876</b>	<b>0,688</b>
POW	<b>0,524</b>	<b>0,642</b>	<b>0,680</b>	1,000	<b>0,354</b>	<b>0,541</b>	<b>0,692</b>	<b>0,419</b>
Hśr	-0,144	<b>0,485</b>	<b>0,754</b>	<b>0,354</b>	1,000	<b>0,857</b>	<b>0,651</b>	<b>0,750</b>
VZ*Hśr	-0,002	<b>0,530</b>	<b>0,953</b>	<b>0,541</b>	<b>0,857</b>	1,000	<b>0,844</b>	<b>0,745</b>
SUMH*VZ	<b>0,473</b>	<b>0,858</b>	<b>0,876</b>	<b>0,692</b>	<b>0,651</b>	<b>0,844</b>	1,000	<b>0,741</b>
VOL	0,103	<b>0,596</b>	<b>0,688</b>	<b>0,419</b>	<b>0,750</b>	<b>0,745</b>	<b>0,741</b>	1,000

Objaśnienia skrótów jak w tekście.

Na podstawie metody regresji krokowej „wstecz” potwierdzono powyższy wybór. Zmienność cechy zależnej VOL na powierzchniach próbnych była najlepiej objaśniana przez zmienne niezależne Hsr oraz SUMH\*VZ (odrzucono SUMH). Współczynnik korelacji wielorakiej wyniósł  $R=0,820$  ( $P<0,001$ ), co oznacza, że wyjaśniono 67% zmienności. Cecha HL objaśniała 53% zmienności, a cecha SUMH\*VZ – 50%. Dodanie kolejnych cech tylko w niewielkim stopniu polepszało dopasowanie modelu. Ostatecznie przyjął on postać:

$$VOL = 50,0 + 16,2 \cdot (Hsr - 7) + 0,000380 \cdot SUMH * VZ \quad (1)$$

Zależność między zasobnością obliczoną według powyższego modelu (VOL\*), a zasobnością VOL zmierzona na ziemi przedstawia rysunek 3.



**Rys. 3.** Zależność między zasobnością obliczoną według modelu z użyciem cech zmierzonych na powierzchniach próbnych aerolidarowych a zasobnością zmierzona na naziemnych powierzchniach próbnych we fragmencie lasu w Parku Narodowym Gór Stołowych;  $R^2=0,673$ ,  $P<0,001$

## Dyskusja

Uzyskany model objaśniający zależność między zasobnością zmierzona na powierzchniach próbnych naziemnych a cechami zmierzonymi na powierzchniach próbnych aerolidarowych należy uznać za satysfakcjonujący i porównywalny z pracami innych autorów (Bredenbach i in., 2007; Hollaus i in., 2007). Ocena taka wynika nie tylko z faktu uzyskania stosunkowo wysokiego współczynnika korelacji wielorakiej. Dodatkową okolicznością jest to, że materiał był zebrany w trudnym terenie górskim, z silnymi spadkami terenu (miejscami przekraczającymi  $35^\circ$ ), w drzewostanach zróżnicowanych ze względu na wymiary oraz gatunki drzew. Ponadto całkowicie zrezygnowano z użycia cech innych niż zmierzone na

powierzchniach próbnych aerolidarowych, które można byłoby uzyskać w pośredni sposób, np. wysokość położenia powierzchni próbnej n.p.m. lub wiek drzewostanu.

Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką skuteczność wykorzystania wysokościowego modelu koron w analizach środowiska leśnego (Stereńczak, 2008). Główną zaletą tego typu analiz jest ich szybkość, gdyż w porównaniu do analiz wykorzystujących chmurę punktów są one o wiele mniej pracochłonne.

## Wnioski

1. Cechami aerolidarowymi szczególnie przydatnymi do obliczenia zasobności drzewostanów przy pomocy cech zmierzonych na powierzchniach próbnych aerolidarowych były: średnia arytmetyczna wysokości drzew, suma wysokości drzew oraz suma objętości koron. Pozostałe cechy: powierzchnia rzutów koron i liczba (zagęszczenie) drzew słabo wyjaśniały zmienność zasobności na powierzchniach próbnych.
2. Silna zależność między zasobnością na powierzchniach próbnych naziemnych a cechami na powierzchniach próbnych aerolidarowych (z pominięciem cech pośrednich, takich jak np. wiek drzewostanu) wskazuje, że możliwe jest stosowanie dwufazowej metody inwentaryzacji lasów silnie zróżnicowanych, a także zbliżonych do naturalnych, występujących w parkach narodowych.
3. Zaprezentowany w pracy procedura pozwala na całkowite zautomatyzowanie procesu pomiaru i analizy całych drzewostanów/kompleksów leśnych.

## Literatura

- Breidenbach J., McGaughey R.J., Andersen H.E., Kandler G., Reutebuch S.E., 2007: A mixed-effects model 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, Espoo, Wrzesień 12-14, 2007, Finlandia.
- Chojnacki D.C., 1998: Double sampling for stratification: a forest inventory application in the Interior West. Res. Pap. RMRS-RP-7. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 15 p.
- Cochran W.B., 1977: Sampling techniques. Wiley, New York.
- Hollaus M., Dorigo W., Wagner W., Schadauer K., Maier B., 2007: Large-area stem volume estimation based on airborne laser scanner data and national forest inventory data. Materiały konferencyjne z ForestSAT 2007. Montpellier, Francja.
- Hyypä J., Yu X., Hyypä H., Maltamo M., 2006: Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. [In:] Koukal T., Schneider W. (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.
- Köhl M., Magnussen S.S., Marchetti M., 2006: Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- 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.
- Loetsch F., Haller K. E., 1964: Forest inventory, vol. I. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bern, Wien.
- Miścicki S. (red.) 2000: Kombinowana dwufazowa inwentaryzacja lasów nizinnych z wykorzystaniem zdjęć lotniczych i stałych-kontrolnych powierzchni próbnych. Fundacja „Rozwój SGGW” Warszawa 2000.
- Miścicki S. 2009: Pomiar zapasu grubizny z wykorzystaniem zdjęć lotniczych. *Sylvan* 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* No 19: 164-179.
- Parker R.C., Evans D.L., 2004: An application of LIDAR in a double-sample forest inventory. *Western Journal of Applied Forestry* 19(2): 95-101.
- Spencer R.D., Czaplowski R.L., 1998: National forest inventory in the USA: an outline of the procedure. *Aust. For.* 60 (1): 56-66.
- Stanisz A., 2007: Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny, Tom2. Modele liniowe i nieliniowe. StatSoft Polska, Kraków.
- Stereńczak K., 2008: Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego. *Czasopismo Techniczne* 2-Ś: 273-279.
- Stereńczak K., 2010: Technologia lotniczego skanowania laserowego jako źródło danych w półautomatycznej inwentaryzacji lasu. *Sylwan* 154 (2): 88-99.
- Stereńczak K., 2011: Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych. Praca doktorska. Wydział Leśny, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- Stereńczak K., Miścicki S., 2012: Crown delineation influence on standing volume calculations in protected area. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (w druku).
- 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.

### **Abstract**

*The paper presents an analysis of selected tree and tree stand characteristics measured on aerial-lidar samples, in terms of their usefulness for remote and automatic determination of the growing stock volume. Characteristics specified for single trees were based on Crown Height Model (CHM). The study was conducted in mountainous area, in the south-western part of the Stołowe Mountains National Park. Seven stand and tree characteristics based on CHM and single tree segmentation were analyzed. The variability of the dependent features - growing stock volume on the sample plots - were best explained by the following independent variables: the average height of trees (HL) and the multiplication of the sum of crown volume (VZ) and the total tree height (SUMH) within the sample plot area. The obtained multiple correlation coefficient for those features was relatively high and significant ( $R=0.820$ ,  $P < 0.001$ ).*

prof. dr hab. Stanisław Miścicki  
stanislaw.miscicki@wl.sggw.pl  
tel. 22 593 82 08

dr inż. Krzysztof Stereńczak  
krzysztof.sterenczak@wl.sggw.pl  
tel. 22 593 82 17