

**PORÓWNANIE NUMERYCZNYCH MODELI  
TERENU OBSZARÓW LEŚNYCH  
GENEROWANYCH Z WYKORZYSTANIEM  
DANYCH SKANINGU LASEROWEGO (LIDAR)  
UZYSKANYCH W OKRESIE WIOSENNYM I LETNIM\***

COMPARISON OF DIGITAL TERRAIN MODELS  
OF FORESTED AREAS  
GENERATED FROM LASER-SCANNING DATA  
ACQUIRED IN SPRING AND SUMMER

**Krzysztof Będkowski, Krzysztof Stereńczak**

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

**Słowa kluczowe: LIDAR, NMT, chmura punktów, dokładność, leśnictwo**  
Keywords: LIDAR, DTM, point cloud, accuracy, forestry

## Wstęp

Numeryczny model terenu (DTM) oraz numeryczny model pokrycia terenu (DSM) są podstawowymi produktami interpolacji chmury punktów pozyskanej z zastosowaniem lotniczego skanowania laserowego (ALS). Materiały te bardzo często wykorzystywane są w badaniach i pomiarach środowiska leśnego. Za pomocą generowanego na ich podstawie wysokościowego modelu koron (WMK) (Stereńczak, 2008), możliwe jest określenie wielu charakterystyk drzew i drzewostanów, m.in.: wysokości (Leckie et al., 2003; Andersen et al., 2005; Stereńczak et al., 2008), liczby drzew (Coops et al., 2004; Maltamo et al., 2004; Stereńczak et al., 2008) oraz wielu innych (Naesset et al., 2004a; 2004b; 2004c; Riano et al., 2004; Yu et al., 2004; Tickle et al., 2006).

---

\*Badania prowadzono w ramach pracy finansowanej ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N309 114537 „Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych”. Wykorzystano dane lidarowe uzyskane w ramach projektu 2 P06L 02229 „Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie”.

Analiza dokładności modeli terenu była przedmiotem wcześniejszych prac (Hyypä et al., 2005; Lovell et al., 2005; Yu et al., 2005; Anderson et al., 2006; Będkowski i in., 2008; Stereńczak, 2009). Większość przeprowadzonych badań opierała się na pomiarze położenia punktów w terenie i odniesieniu ich wartości do wartości pikseli modeli terenu. Podstawową wadą takiego sposobu weryfikacji jest jedynie punktowe sprawdzenie dokładności i pominięcie powierzchni, na których błędy mogą osiągać bardzo duże wartości. Dodatkowo wiele firm dostarczających dane z lotniczego skanowania laserowego i wygenerowane w oparciu o nie modele terenu, nie weryfikuje dokładności modeli na obszarze lasów, gdyż wiązałoby się to ze zbyt dużym nakładem środków. W warunkach miejskich weryfikacja jest bardziej istotna, lecz łatwiejsza i o wiele mniej kosztowna. Dotychczas niewiele prac poświęconych było wpływowi sezonu wegetacyjnego na numeryczne modele terenu (Hyypä et al., 2005).

Celem prezentowanej pracy było sprawdzenie dokładności modeli terenu i pokrycia terenu generowanych z danych lidarowych pozyskanych w dwóch terminach. Prace przeprowadzono w obiekcie leśnym o zróżnicowanej strukturze przestrzennej i składzie gatunkowym. Postanowiono sprawdzić czy pokrywa roślinności istotnie wpływa na dokładność modeli oraz czy możliwe jest wydzielenie takich cech drzewostanu, które mogą być przyczyną powstawania błędów.

## Metodyka badań i uzyskane wyniki

Badania przeprowadzono na terenie uroczyska Głuchów Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, należącego do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Wykorzystano dane skanowania laserowego, które pozyskano w okresie wczesnej wiosny 2-3 maja oraz w pełni sezonu wegetacyjnego, w lipcu 2007 r. Charakterystyka zastosowanego systemu skanowania laserowego zawarta jest w pracy (Będkowski i in., 2008).

Na podstawie chmur punktów skanowania laserowego przygotowano numeryczne modele terenu oraz modele pokrycia terenu w kilku wariantach (tab. 1). Wszystkie modele miały rozdzielczość  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ , a do ich interpolowania wykorzystano program TreesVis (Weinacker et al., 2004).

**Tabela 1.** Numeryczne modele terenu i modele pokrycia terenu wykorzystane w badaniach

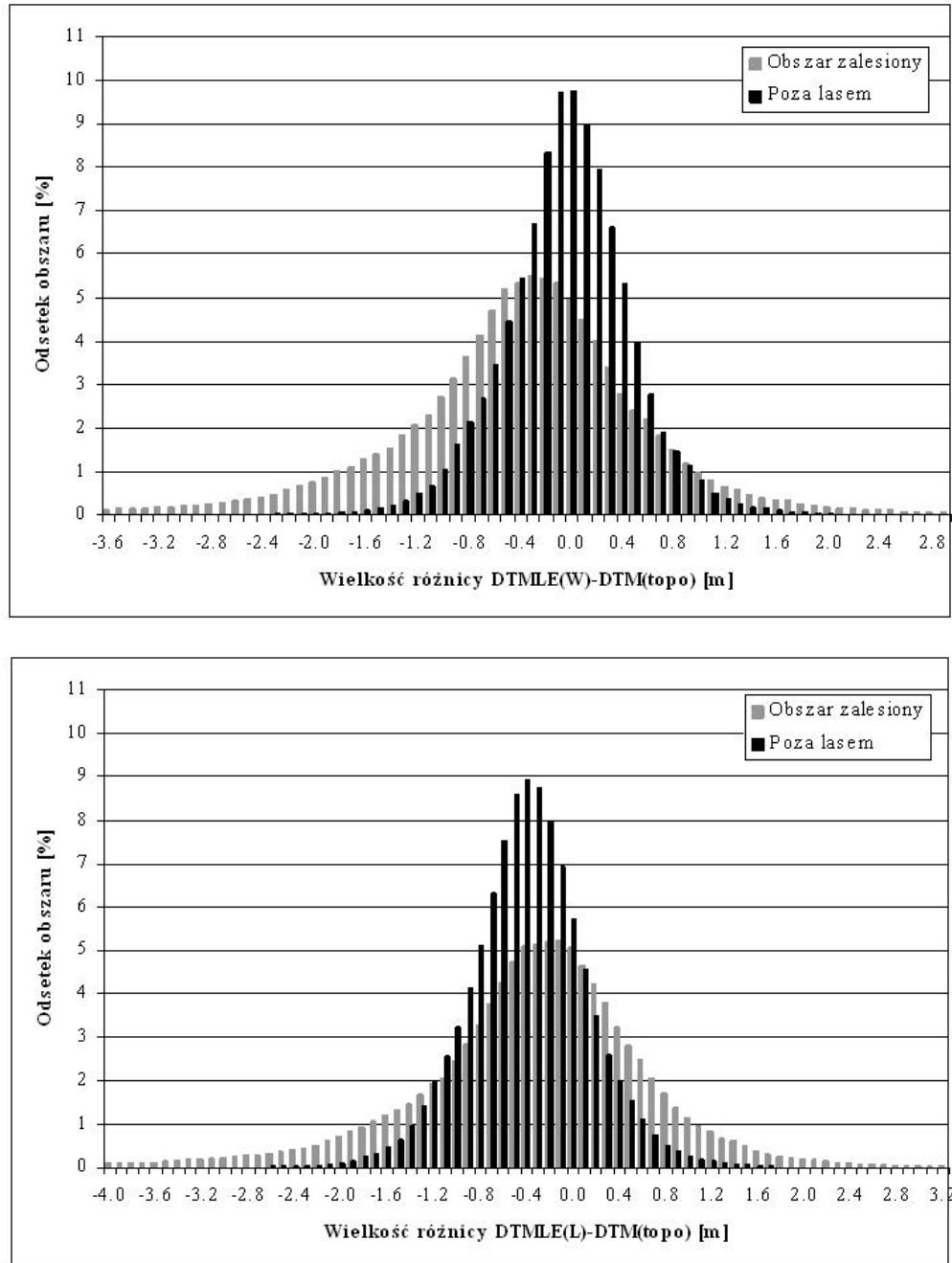
Model		Dane	
Symbol	Nazwa	Termin pozyskania	Źródło
DTM(topo)	Model terenu	Opracowanie z 1981 r.	Mapa topograficzna 1:10 000
DTMLE(W)	Model terenu	Skanowanie wiosenne (W), 2007 r.	Chmura punktów tzw. ostatnich odbić ( <i>last echo</i> )
DTMLE(L)	Model terenu	Skanowanie letnie (L), 2007 r.	Chmura punktów tzw. ostatnich odbić ( <i>last echo</i> )
DSMFE(W)	Model pokrycia terenu	Skanowanie wiosenne (W), 2007 r.	Chmura punktów tzw. pierwszych odbić ( <i>first echo</i> )
DSMFE(L)	Model pokrycia terenu	Skanowanie letnie (L), 2007 r.	Chmura punktów tzw. pierwszych odbić ( <i>first echo</i> )

Jak wynika z porównania modeli terenu generowanych na podstawie danych skanowania letniego DTMLE(L) oraz wiosennego DTMLE(W), na obszarach lasów można znaleźć obszary, na których mamy do czynienia ze swoistą anomalią, polegającą na tym, że rzędne modelu „letniego” mają wartości niższe od rzędnych modelu „wiosennego” (rys. 2). Obserwowane różnice są niekiedy bardzo wysokie, gdyż sięgają kilkunastu metrów (rys. 1), a nie można ich objaśnić efektem wynikającym z przeprowadzenia między terminami skanowania prac pielęgnacyjnych i wycinką drzew. Logiczna relacja między tymi modelami powinna być odwrotna, ponieważ z powodu zatrzymywania impulsów laserowych w wyższych partiach drzewostanu, nie docierają one do dna lasu i można zakładać, że budowany na ich podstawie model terenu otrzyma rzędne leżące wyżej w stosunku do położenia poprawnego. Podobny efekt anomalii wystąpił także przy porównaniu wymienionych modeli z modelem terenu opracowanym na podstawie mapy topograficznej. Wyjaśnieniem różnic mogą być w tym przypadku błędy mapy topograficznej. Brak widoczności terenu na zdjęciach lotniczych powoduje bowiem, że mapy te opracowywane fotogrametrycznie, na terenie lasów są mniej dokładne niż na pozostałych obszarach.

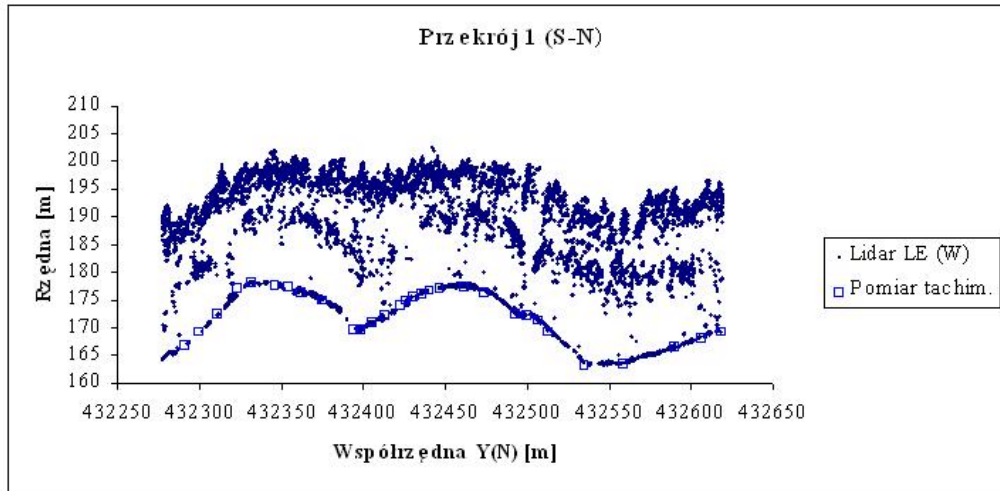
Fakt, iż rejon „anomalii” rozmieszczone są niemal wyłącznie na obszarze lasu sugeruje, że przyczyną ich powstawania są specyficzne warunki środowiska leśnego. W celu wyjaśnienia charakteru obserwowanego zjawiska wykonano dokładne pomiary ukształtowania terenu, które wykorzystano do wyznaczenia pionowych przekrojów terenu. Całość pomiarów zrealizowano za pomocą tachimetru elektronicznego wzdłuż kilkunastu linii. Współrzędne XYZ punktów terenu wyznaczono w jego charakterystycznych miejscach. Przekroje dowiązano do istniejącej na terenie badań osnowy poligonowej. Zastosowana metoda zapewnia uzyskanie współrzędnych punktów o dokładności kilku–kilkunastu centymetrów. Tak uzyskane przekroje terenu porównano następnie wizualnie z przekrojami wykonanymi na modelach terenu opracowanych na podstawie danych ze skanowania laserowego (rys. 3, 4, 5). Celem było sprawdzenie zgodności przekrojów lidarowych i topograficznego z rzeczywistą rzeźbą terenu. Prace zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania Idrisi32 (Eastman, 1999).

Przekroje (łącznie na 15 odcinkach o długości do 300 m) zlokalizowano przede wszystkim w miejscach, w których zauważono nietypowe relacje między modelami terenu „wiosennym” i „letnim”, z uwzględnieniem drzewostanów o różnej budowie pionowej. Wybrano drzewostany sosnowe z gatunkami liściastymi w dolnym piętrze (rys. 6, 7) oraz lite sosnowe (rys. 8).

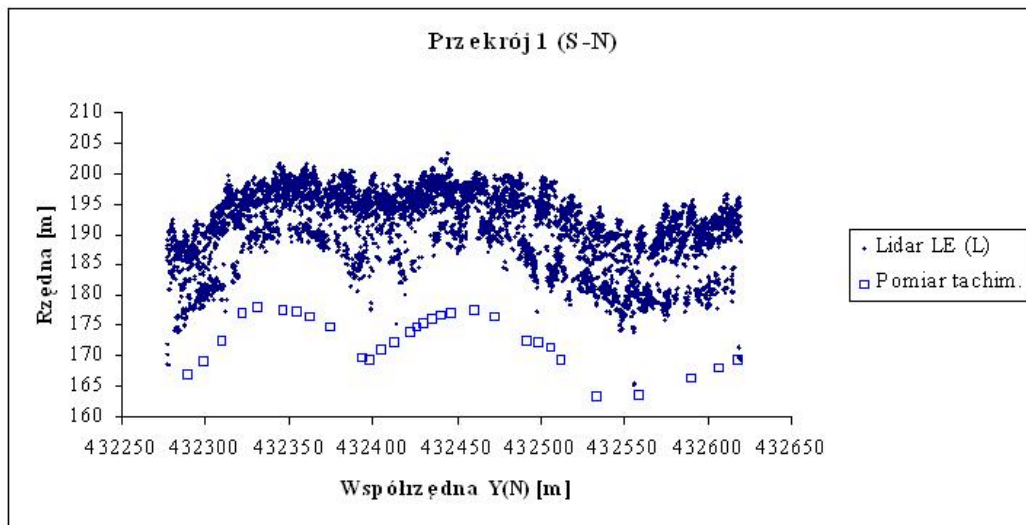
Dla dokładniejszej analizy zagadnienia wykonano również przekroje pionowe chmur punktów skanowania laserowego. Charakterystyczne przykłady pokazano na rysunkach 9, 10, 11. Przekroje przedstawiają rozkłady punktów chmur z pasów o szerokości 10 m, wzdłuż analizowanych odcinków terenu.



**Rys. 1.** Porównanie rozkładów różnic między rzędnymi modelu terenu opracowanymi na podstawie danych lidarowych oraz mapy topograficznej na obszarach zalesionych i poza lasem: a – wiosną, b – latem

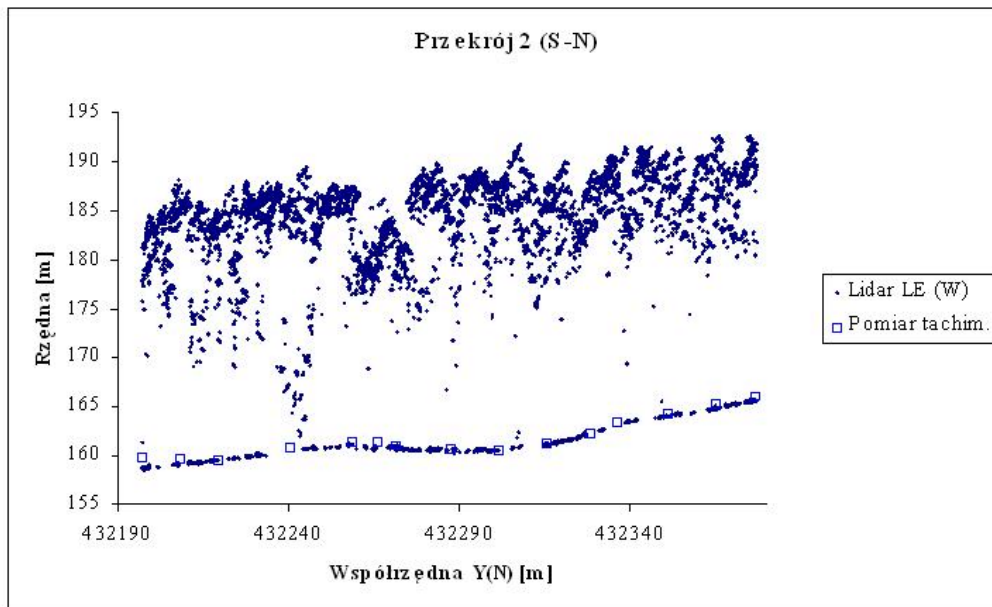


a

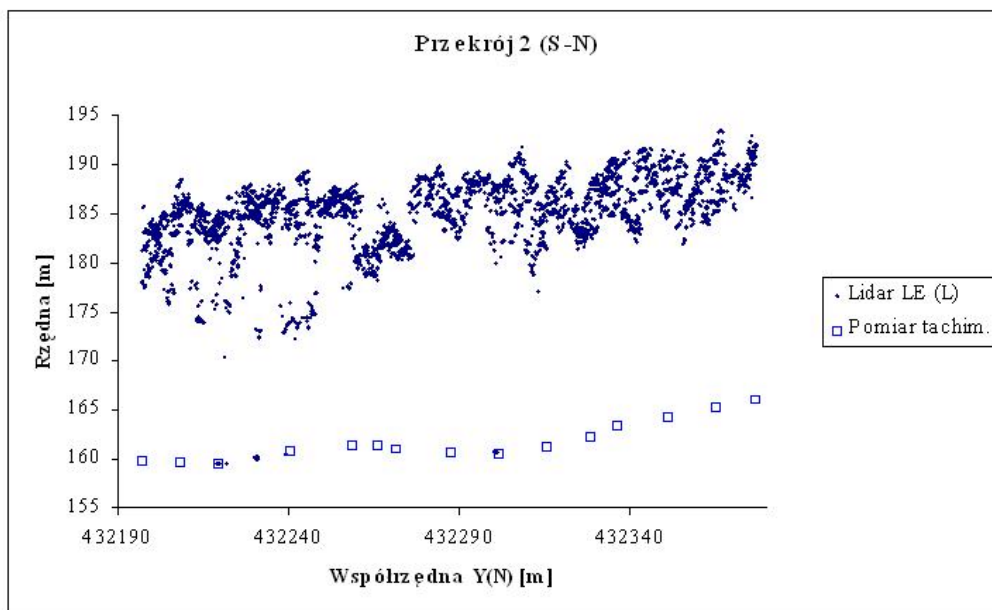


b

**Rys. 9.** Przekrój pionowy (ten sam odcinek co na rys. 3a, kierunek S-N) przez chmury punktów uzyskanych w okresie: a – wiosennym, b – letnim; pokazano także położenie punktów pomierzonych tachimetrycznie

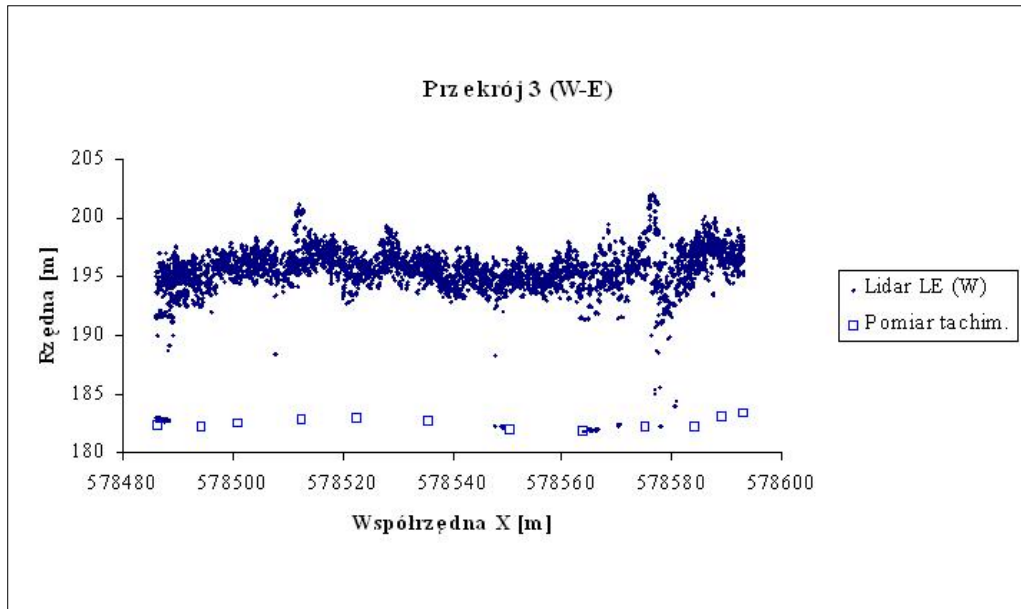


a

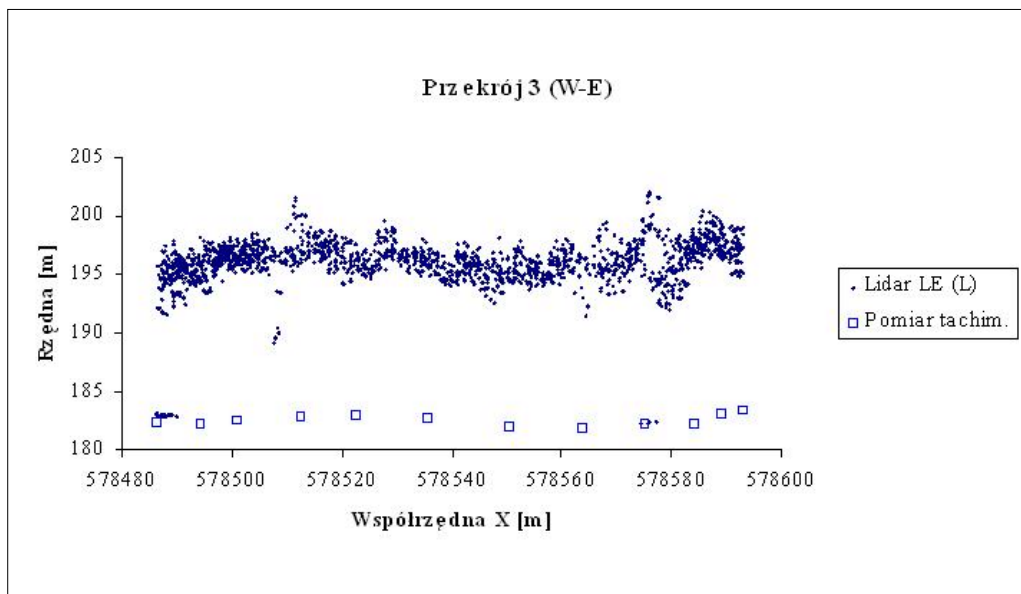


b

Rys. 10. Przekrój pionowy przez chmury punktów uzyskanych w drzewostanie z sosną w pierwszym piętrze i bukiem w drugim piętrze w okresie: a – wiosennym, b – letnim (por. z rys. 4)



a



b

**Rys. 11.** Przekrój pionowy przez chmury punktów uzyskanych w jednopiętrowym drzewostanie sosnowym w okresie a – wiosennym, b – letnim (por. z rys. 5)

## Dyskusja wyników

Na wszystkich przekrojach, poprowadzonych w różnych typach drzewostanów, stwierdzono duże podobieństwo modeli opisujących ukształtowanie warstwy koron DSMFE(W) i DSMFE(L). Nieznaczne różnice, tj. najczęściej głębiej położone minima modelu „wiosenne-go” i wyżej leżące maksima modelu „letniego” wynikają prawdopodobnie ze stanu aparatu asymilacyjnego gatunków liściastych w dwóch różnych fazach sezonu wegetacyjnego.

Model terenu opracowany na podstawie mapy topograficznej zawiera liczne błędy, których jest wyraźnie więcej na obszarze lasów w porównaniu do obszaru pól uprawnych. Błędy te wyrażają się głównie w przesunięciach horyzontalnych, które są przyczyną powstawania bądź zwiększenia niezgodności (różnic rzędnych) między modelami terenu DTM(topo) i DTMLE(W) oraz DTM(topo) i DTMLE(L).

Rozkłady punktów odbić promieni laserowych (chmury punktów) odzwierciedlają w pewnym stopniu strukturę pionową drzewostanów. Najwięcej punktów odbić impulsów lasera znajduje się zwykle w strefie koron. Latem do dna lasu o gęstej warstwie koron gatunków liściastych dociera bardzo mało impulsów lasera.

Terenowe pomiary tachimetryczne wykazały, że modele terenu opracowane na podstawie danych skanowania wiosennego DTMLE(W) są najlepszą reprezentacją rzeczywistego ukształtowania terenu. Duże rozbieżności między modelem terenu DTMLE(L) i rzeczywistym ukształtowaniem terenu występują przede wszystkim w tych drzewostanach, w których jest zwarta warstwa gatunków liściastych, przy jednocześnie znacznym zróżnicowaniu wysokościowym (deniwelacjach) terenu.

## Wnioski

Badania pozwalają na sformułowanie kilku wniosków istotnych dla praktyki inwentaryzacji środowiska leśnego. Przede wszystkim, aby uzyskać poprawne informacje o wysokości drzew i drzewostanów należy korzystać z modeli terenu opracowanych na podstawie danych skanowania laserowego wykonanego w okresie wiosennym. Ponieważ modele pokrycia terenu DSMFE(W) i DSMFE(L) różnią się nieznacznie, można stosować je wymiennie przy wyznaczaniu np. znormalizowanych modeli pokrycia terenu ( $nDSM = DSM - DTM$ ), które wyrażają wysokość drzew. Nietypowe relacje między modelami terenu „wiosennymi” i „letnimi” powstają w drzewostanach, w których występują łącznie dwa czynniki: drzewostany te posiadają gęstą warstwę gatunków liściastych, przez co do dna lasu dociera niewiele impulsów laserowych oraz ukształtowanie terenu charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem wysokościowym.

W dalszych badaniach należy rozważyć, czy relacje między modelami terenu uzyskiwanymi w różnych fazach sezonu wegetacyjnego mogą być wykorzystane do wnioskowania o pionowej budowie drzewostanów. Obserwowane anomalie mogą bowiem sugerować występowanie zwartej pokrywy gatunków liściastych, związanych najczęściej z drugim, niżej położonym piętnem drzewostanu. Dalsze poszukiwania związków między danymi skanowania laserowego i budową pionową drzewostanów należy prowadzić uwzględniając nie tylko modele, lecz także przestrzenne rozkłady chmur punktów laserowych.



### Literatura

- Andersen H.E., McGaughey R.J., Reutrbuch S.E., 2005: Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 94: 441-449.
- Będkowski K., Brach M., Stereńczak K., 2008: Numeryczny model terenu obszaru zalesionego utworzony na podstawie skanowania laserowego i jego dokładność. *Roczniki Geomatyki*, t. 6, z. 8: 49-53. PTIP, Warszawa.
- Coops N.C., Wulder M.A., Culvenor D.S., St-Onge B., 2004: Comparison of forest attributes extracted from fine spatial resolution multispectral and LIDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing* nr 6, 855-866.
- Eastman J. R., 1999: IDRISI32. Guide to GIS and Image Processing. Vol. 1, 2. Clark Labs, Clark University, USA.
- Hyypä H., Yu X., Hyypä J., Kaartinen H., Kaasalainen S., Honkovaara E., Ronnholm, P., 2005: Factors affecting quality of DTM generation in forested areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 3/W, 85-90.
- Jan, J.F., 2005: Comparison of Forest Height Derived Using LIDAR Data and Aerial Photos. *Taiwan Journal of Forest Science* 20, 13-27.
- 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* No 5, 633-649.
- Lefsky M. A., Cohen W. B., Parker G. G., Harding D. J., 2002: LIDAR Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* vol. 52 no. 1: 19-30.
- Lovell J.L., Jupp D.L.B., Newnham G.J., Coops N.C., Culvenor D.S., 2005: Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameters for forest height retrieval. *Forest Ecology and Management* 214, 398-412.
- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkanen J., Yu. X., 2004: The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791-1801.
- Naesset E. 2004a: Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* no 19: 164-179.
- Naesset E. 2004b: Estimation of above- and below-ground biomass in boreal forest. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 8/W2,.
- Naesset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyypä H., Hyypä J., Maltamo M., Nilson M., Olsson H., Persson A., Soderman U., 2004c: Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, no 19: 6-22.
- Riano D., Chuvieco E., Condes S., Gonzalez-Matesanz J., Ustin S.L., 2004: Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L/ from LIDAR. *Remote Sensing of Environment* 92: 245-352.
- Stereńczak K., 2008: Możliwości wykorzystania wysokościowego modelu koron w badaniach środowiska leśnego. *Czasopismo Techniczne* 2-Ś, 273-279.
- 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 LIDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Youth Forum, vol. XXXVIII, Part B6b, 27-33.
- Stereńczak, K., 2009: Accuracy of Digital Terrain Models generated from laser scanning data under forest conditions. Unpublished MSc. thesis. UNIGIS Master of Science Programme, Paris-Lodron University of Salzburg, Jagiellonian University, Kraków.
- Tickle P.K., Lee A., Lucas R.M., Austin J., Witte C., 2006: Quantifying Australian forest floristic and structure using small footprint LIDAR and large scale aerial photography. *Forest Ecology and Management* 223: 379-394.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R., 2004: TREESVIS: A Software System for Simultaneous ED-Real-Time Visualisation of DTM, DSM, Laser Raw Data, Multispectral Data, Simple Tree and Building Models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 8/W2, 90-95.

- Yu X., Hyypä J., Kaartinen. H., Maltamo M., 2004: Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 451-462.
- Yu, X., Hyypä, H., Kaartinen, H., Hyypä, J., Ahokas, E. & Kaasalainen, S., 2005: Applicability of first pulse digital terrain models for boreal forest studies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 3/W, 85-90.

### ***Abstract***

*The aim of this paper is to present how forest environment influences digital models (DTM and DSM) generated from LIDAR point clouds, acquired in two seasons – summer and spring. If any strong relation between spatial distribution of LIDAR data and forest structure is established, it will be possible to use this information for correction of model interpolation.*

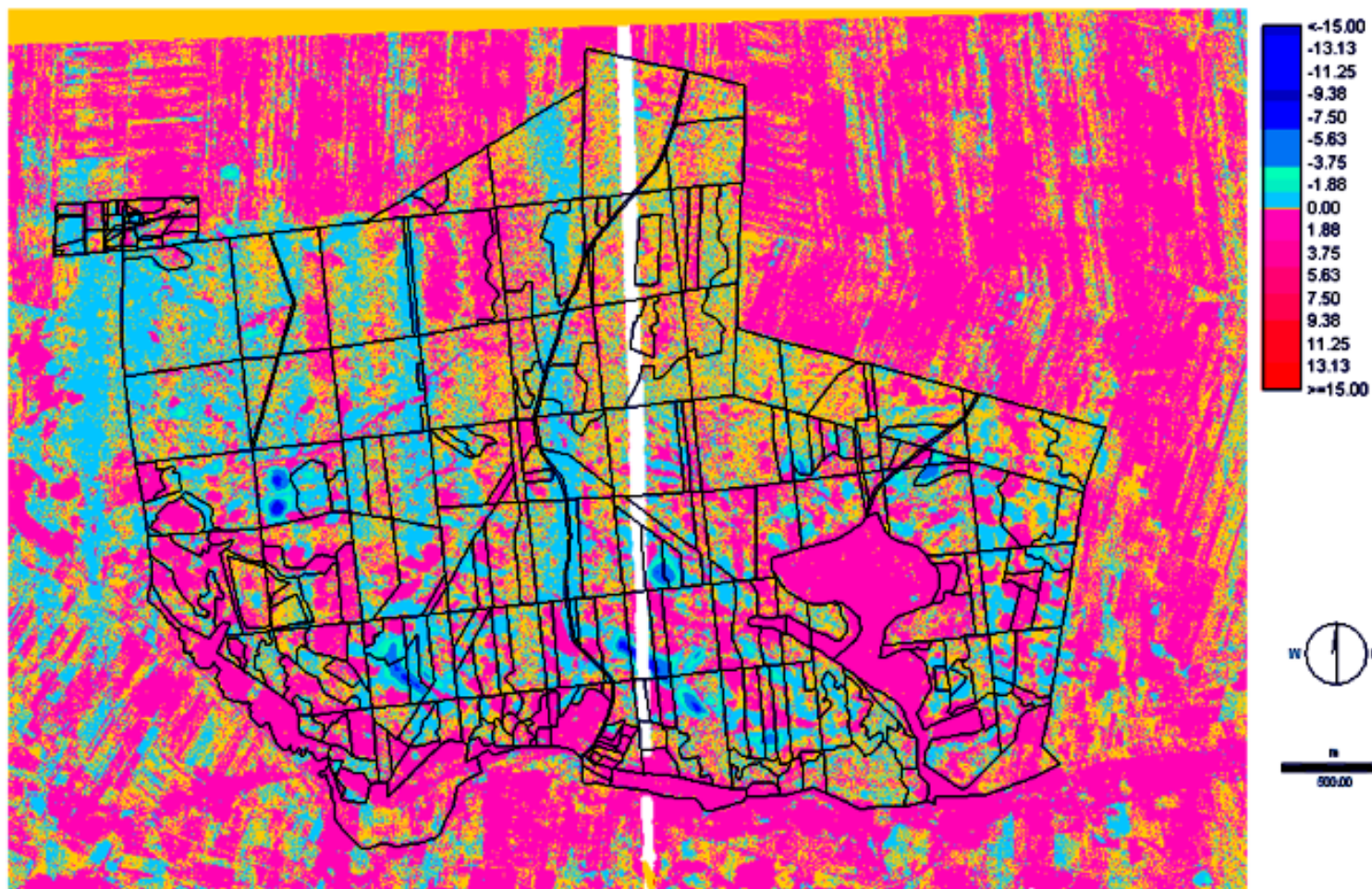
*LIDAR data (Falcon II system, TopoSys Company) as well as field inventory data were acquired in 2007. The forest structure, species composition and age varied, so all cases were checked. The main goal was to find forest parameters that cause similarities and especially dissimilarities between models.*

*The results showed that LIDAR data used for stand height estimation should be collected during spring as the leaves do not disturb penetration of forest by laser impulses. There are very small differences between DSM (spring) and DSM (summer) so both of them may be used in forest stands analyses. Untypical relations between DTMs (spring – summer) are apparently connected with the presence of dense broadleaved species in understory canopies. This results in lack of LIDAR points in the stand's bottom. An additional condition, favoring such results might be big differences in terrain elevations, which can alter the operation of algorithm used in TreesVis software. No correlation was found between the differences in DTM models and forest parameters.*

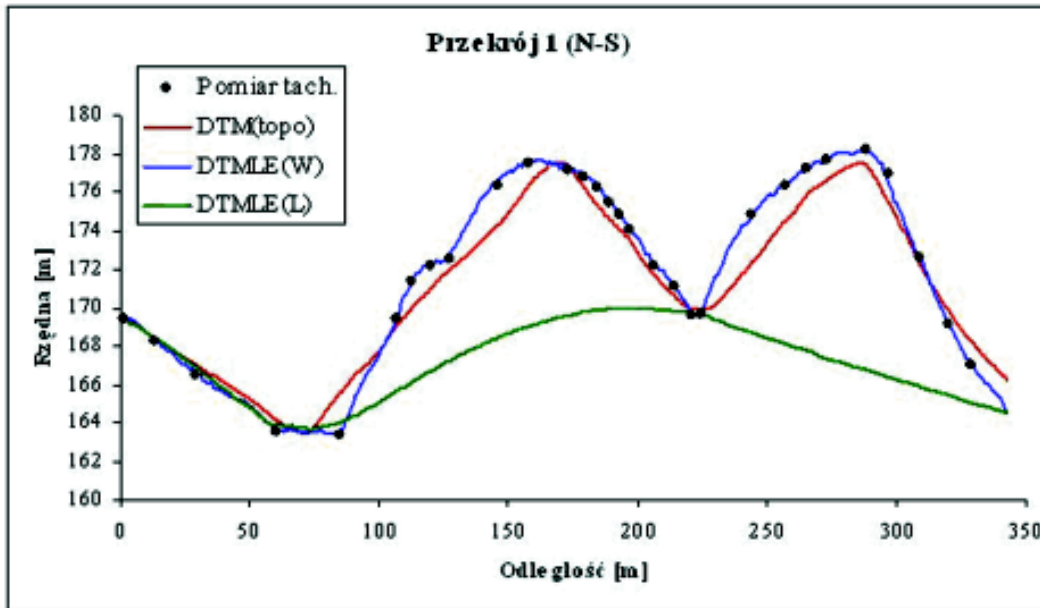
dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW  
Krzysztof.Bedkowski@wl.sggw.pl  
tel. +48 22 593-82-22

mgr inż. Krzysztof Stereńczak  
Krzysztof.Sterenczak@wl.sggw.pl  
tel. +48 22 593-82-17

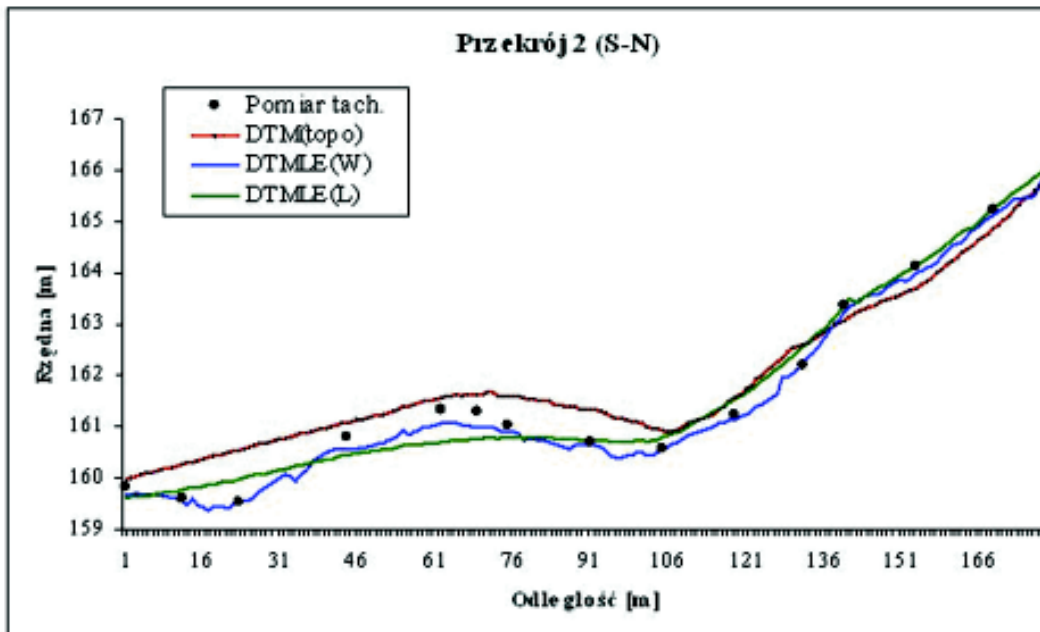
Różnica DTM(lato)-DTM(wiosna)



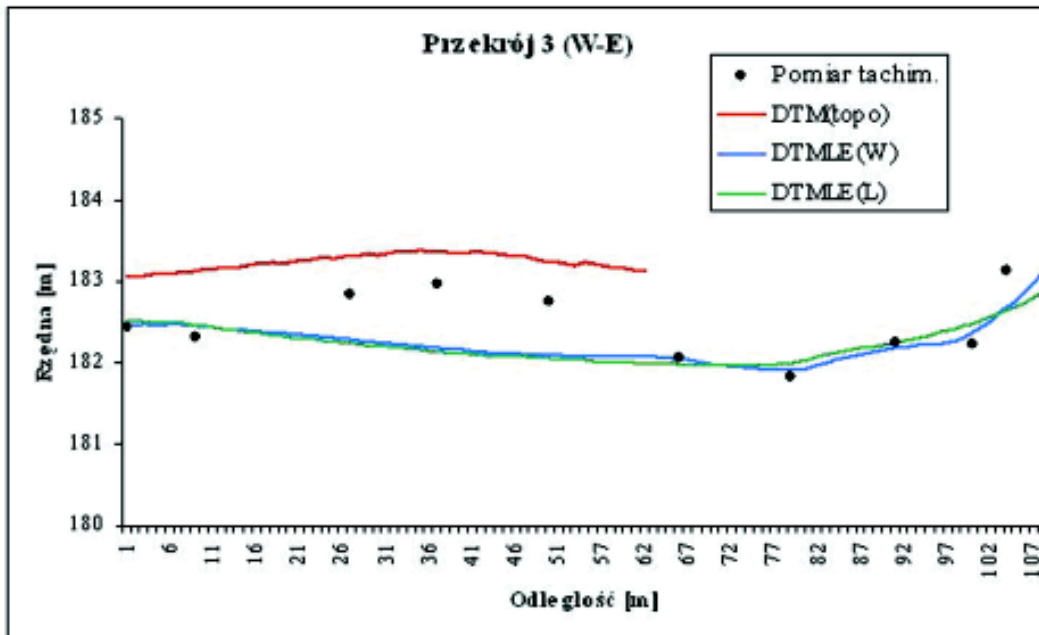
Rys. 2. Model różnicowy terenu utworzony przez odejmowanie  $DTM_{LE}(L) - DTM_{LE}(W)$ . Obszary o znacznych wartościach różnic ujemnych występują przede wszystkim na terenach pokrytych lasami; biały pasek w środku oznacza obszar, dla którego brak danych



Rys. 3. Przekroje pionowe przez modele terenu utworzone w drzewostanie dwuwarstwowym – sosna w górnej warstwie, gęsta pokrywa grądu w warstwie dolnej



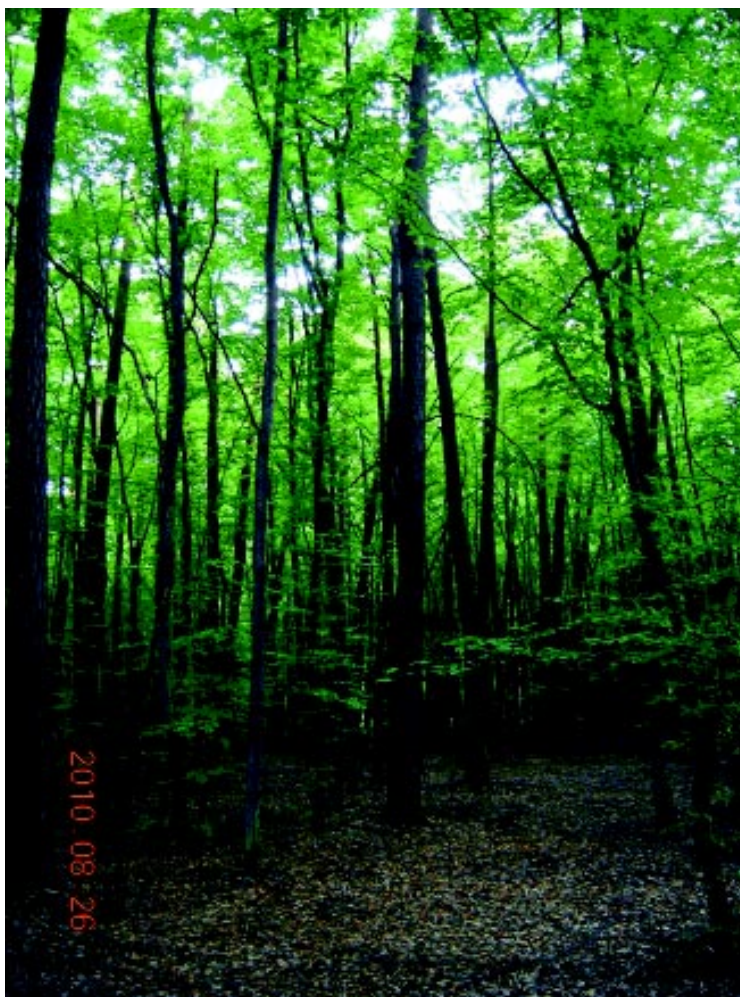
Rys. 4. Przekroje pionowe przez modele terenu utworzone w drzewostanie dwuwarstwowym – sosna w górnej warstwie, buk w warstwie dolnej



**Rys. 5.** Przekroje pionowe przez modele utworzone w drzewostanie sosnowym jednowarstwowym; brak modelu DTM(topo) dla części przekroju



**Rys. 6.** Drzewostan sosnowy z gęstym drugim piętrzem uformowanym przez grab – por. z przekrojami na rys. 3 (fot. K. Będkowski)



**Rys. 7.** Drzewostan sosnowy z drugim piętrzem uformowanym przez buk – por. z przekrojami na rys. 4 (fot. K. Będkowski)



**Rys. 8.** Lity drzewostan sosnowy – por. z przekrojami na rys. 5 (fot. K. Będkowski)