

**ANALIZA PRZESTRZENNEJ ZMIENNOŚCI WYBRANYCH CECH BUDOWY  
PIONOWEJ DRZEWOSTANU NA PODSTAWIE DANYCH LOTNICZEGO  
SKANOWANIA LASEROWEGO**

**ASSESSMENT OF SPATIAL VARIABILITY OF SELECTED VARIABLES  
DESCRIBING VERTICAL FOREST STAND'S STRUCTURE ON THE BASIS  
OF AERIAL LASER-SCANNING DATA**

**Monika Zarzecka, Krzysztof Będkowski**

Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa SGGW w Warszawie

**SŁOWA KLUCZOWE:** drzewostan, struktura pionowa, zmienność przestrzenna, lotnicze skanowanie laserowe

**STRESZCZENIE:** Jednym z ważniejszych elementów opisu aktualnego stanu drzewostanów jest informacja o ich budowie pionowej (układzie warstw). Informacje te gromadzone są w ramach okresowych inwentaryzacji zasobów leśnych. Z uwagi na dużą pracochłonność mają one jednak charakter bardzo ogólny, gdyż są odnoszone do stosunkowo dużych fragmentów lasu. Poszukuje się sposobów pozwalających na uzyskanie informacji o budowie niedużych fragmentów drzewostanów, o wielkości kilku- kilkunastu arów. Lotniczy skanowanie laserowe z powodzeniem jest wykorzystywany przez leśników do określania wysokości drzewostanów, liczby drzew w drzewostanie oraz wielkości jego biomasy. Dostrzeżono także możliwość rozpoznawania za pomocą skanowania laserowego pionowej budowy drzewostanów. Przeprowadzono badania w drzewostanie z sosną pospolitą w górnym piętrze, które miały na celu sprawdzenie możliwości detekcji dolnej warstwy podszytu składającego się z gatunków liściastych. Wykonano analizę histogramów rozkładów pionowych chmur punktów lotniczego skanowania laserowego. Histogramy przedstawiały liczbę impulsów zarejestrowanych w 0.5 m warstwach: 0÷0.5 m, 0.5÷1.0, itd. Do opisanego kształtu histogramów zaproponowano 7 cech. Stwierdzono, że dzięki ich zastosowaniu możliwe jest rozpoznanie obecności dolnej warstwy w drzewostanie.

## **1. WSTĘP**

Trwała i zrównoważona gospodarka leśna jako podstawowy paradygmat przyjmuje oparcie wszelkich czynności, szczególnie z zakresu hodowli lasu, na dokładnym rozpoznaniu warunków siedliska, w tym jego mikroźródnicowania. Jednym z ważniejszych elementów opisu aktualnego stanu drzewostanów jest informacja o budowie pionowej (układzie warstw). Informacje te gromadzone są w ramach okresowych inwentaryzacji lasu. Z uwagi na dużą pracochłonność mają one jednak charakter bardzo ogólny, gdyż są odnoszone do stosunkowo dużych fragmentów lasów – drzewostanów, o wielkości kilku, a niekiedy kilkunastu hektarów. Poszukuje się sposobów pozwalających na uzyskanie informacji o budowie niedużych fragmentów drzewostanów, wielkości kilku lub kilkunastu arów.

Strukturę pionową drzewostanów analizuje się za pomocą histogramów, które przedstawiają rozkład punktów skanowania laserowego w poszczególnych warstwach drzewostanu. Przeprowadzone dotychczas analizy dotyczą wybranych fragmentów drzewostanów – powierzchni próbnych (Będkowski *et al.* 2008, 2011, Będkowski i Stereńczak 2008, Myszkowski i Ksepko 2010), nie zajmowano się natomiast problemem zmienności cech chmur punktów skanowania laserowego na obszarze całego drzewostanu. Badania takie są niezbędne, aby wykazać na ile cechy histogramów są charakterystyczne dla danego drzewostanu (uznawanego z punktu widzenia urządzania lasu za jednolitą jednostkę przestrzenną) oraz czy mogą być wykorzystane do wyszukiwania fragmentów istotnie różniących się od pozostałych budową pionową, co pozwoliłoby np. stwierdzić obecność oraz stan dolnych warstw drzewostanu.

## 2. METODYKA BADAŃ

Do badań, które miały na celu sprawdzenie możliwości detekcji dolnych warstw drzewostanów poprzez analizę histogramów rozkładów punktów w chmurach skaningu laserowego, wybrano lity drzewostan sosnowy (Leśny Zakład Doświadczalny w Rogowie, uroczysko Głuchów), w którym górne piętro tworzyła sosna pospolita (*Pinus silvestris*) w wieku 65 lat z nieznacznym udziałem (pojedyncze egz.) dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea*). Na części powierzchni drzewostanu dolną warstwę stanowi podrost drzew gatunków liściastych – głównie dąb bezszypułkowy, brzoza brodawkowata (*Betula pendula*), rzadziej dąb czerwony (*Quercus rubra*) i buk (*Fagus sylvatica*) oraz krzewów – kruszyna (*Frangula alnus*), czeremcha (*Prunus sp.*) i jałowiec (*Juniperus communis*). Drzewostan główny ma wysokość ok. 26 m, natomiast warstwa dolna sięga do wysokości ok. 5.5 m.

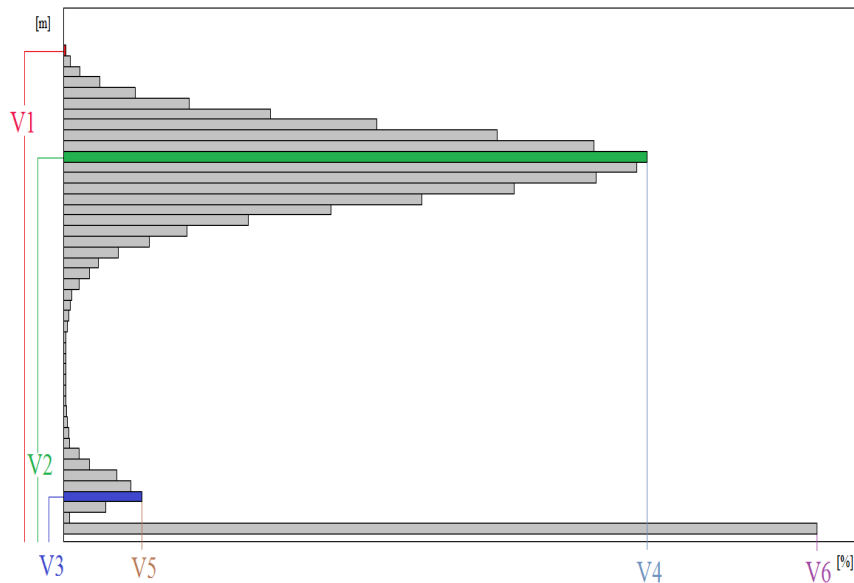
W drzewostanie założono 250 kołowych powierzchni próbnych w regularnej siatce o oczku 12.5 m. Z chmur punktów skanowania laserowego wybrano punkty wypadające w obrębie powierzchni próbnych, w dwóch wariantach wielkości: o promieniach 6.31 m oraz 12.62 m. Ze względu na przyjętą odległość środków powierzchni próbnych oraz wielkość promienia, powierzchnie w terenie pokrywały się częściowo – dane koło miało wspólne z sąsiednim kołem odpowiednio 0.1 lub 39.6% swojej powierzchni.

Dla każdej powierzchni próbnej wykonano histogramy (Rys. 1) przedstawiające rozkład punktów skanowania laserowego zarejestrowanych w 0.5 m warstwach: 0÷0.5 m, 0.5÷1 m itd. W badaniach wykorzystano chmury punktów (tzw. pierwsze echo) skanowania laserowego przeprowadzonego w okresie letnim, za pomocą skanera FALCON II firmy TopoSys GmbH (gęstość skanowania ok. 4 punkty / m<sup>2</sup>).

Histogramy sporządzono dla znormalizowanych chmur punktów. W tym celu od rzędnej wysokościowej każdego punktu odejmowano rzędną odpowiedniego punktu numerycznego modelu terenu. Selekcję punktów z oryginalnych chmur skanowania laserowego oraz obliczenie znormalizowanych współrzędnych wysokościowych tych punktów, wyrażających ich położenie nad poziomem terenu, zrealizowano za pomocą specjalnie opracowanego programu ANALID (Zarzecka 2010). W obliczeniach wykorzystano model terenu opracowany za pomocą programu TreesVis (Axelsson 2000; Weinacker *et al.* 2004) z wykorzystaniem danych wiosennego skanowania laserowego (Będkowski, Stereńczak 2010).

Kształt histogramów (Rys. 1) opisano za pomocą siedmiu zmiennych  $V1÷V7$ , które określały:

- $V1$  – wysokość (nad poziomem terenu) najwyżej zarejestrowanego impulsu,
- $V2$  – wysokość (nad poziomem terenu) maksimum histogramu,
- $V3$  – wysokość (nad poziomem terenu) drugiego maksimum histogramu,
- $V4$  – odsetek odbić impulsów laserowych w warstwie maksimum histogramu,
- $V5$  – odsetek odbić w warstwie drugiego maksimum,
- $V6$  – odsetek odbić na poziomie terenu (w pierwszej warstwie),
- $V7$  – stosunek liczby odbić w dolnej strefie drzewostanu (bez warstwy najniższej) do sumy odbić w całej dolnej strefie drzewostanu, tj. wraz z warstwą najniższą (na poziomie terenu).



Rys. 1. Charakterystyki  $V1 \div V6$  opisujące histogramy (Zarzecka 2011)

Dla oceny zmienności charakterystyk  $V1 \div V7$  (Tab. 1) obliczono dla każdej z nich wartość średnią (*mean*), minimalną (*min*), maksymalną (*max*) oraz odchylenie standardowe (*stdev*).

Tab. 1. Charakterystyki  $V1 \div V7$  obliczone na podstawie histogramów 250 kołowych powierzchni próbnych o promieniach 6.31 m (R1) oraz 12.62 m (R2)

| Cecha obliczona dla 250 pow. próbnych | $V1$ [m] |      | $V2$ [m] |       | $V3$ [m] |      | $V4$ [%] |       | $V5$ [%] |      | $V6$ [%] |       | $V7$ [%] |       |
|---------------------------------------|----------|------|----------|-------|----------|------|----------|-------|----------|------|----------|-------|----------|-------|
|                                       | R1       | R2   | R1       | R2    | R1       | R2   | R1       | R2    | R1       | R2   | R1       | R2    | R1       | R2    |
| <i>mean</i>                           | 21.0     | 22.0 | 18.00    | 18.00 | 1.50     | 1.50 | 11.25    | 11.00 | 0.47     | 0.40 | 6.03     | 6.40  | 21.06    | 24.01 |
| <i>min</i>                            | 18.5     | 20.0 | 15.00    | 16.00 | –        | –    | 7.47     | 8.45  | –        | –    | 0        | 0.54  | 0        | 0     |
| <i>max</i>                            | 24.5     | 24.5 | 18.00    | 19.50 | 5.50     | 5.00 | 40.35    | 17.10 | 5.36     | 2.26 | 24.07    | 16.15 | 83.33    | 61.63 |
| <i>stdev</i>                          | 1.05     | 0.87 | 0.59     | 0.81  | 1.27     | 0.86 | 3.66     | 1.91  | 1.05     | 0.55 | 3.34     | 4.38  | 21.59    | 16.28 |

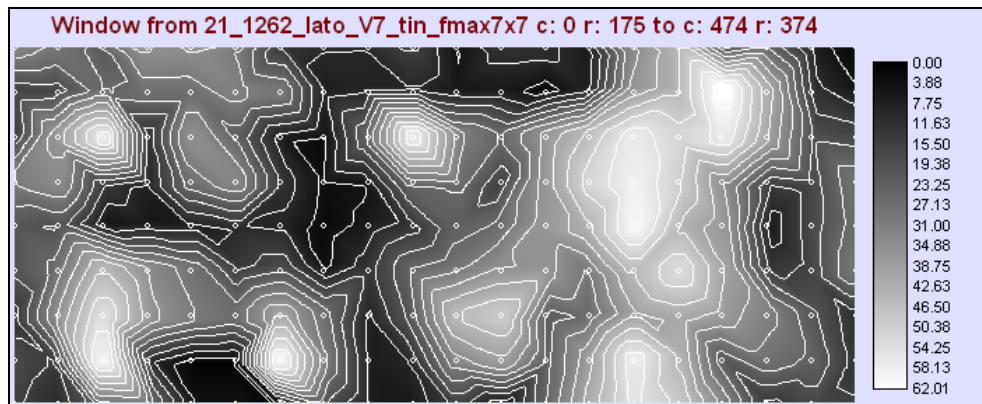
### 3. WYNIKI

Wielkość powierzchni próbnej nie miała dużego wpływu na określenie wartości średnich (*mean*) dla cech histogramów. Największe różnice dotyczą wysokości najwyższego położonego odbicia (*V1*) oraz odsetka liczby odbić impulsów laserowych na poziomie terenu (*V7*). Wpływ wielkości powierzchni próbnej zaznaczył się natomiast wyraźnie w wartościach minimalnych (*min*), maksymalnych (*max*) i odchyleniu standardowym (*stdev*) pozostałych cech. Największe różnice między wynikami dla powierzchni próbnych o promieniach R1 i R2 są widoczne dla wartości maksymalnych dotyczących odsetka liczby odbić impulsów laserowych w strefie maksimum histogramu (*V4*), a następnie w strefie dolnego maksimum związanego z obecnością (lub nie) warstwy podszytu z podrostem (*V5*), na powierzchni terenu (*V6*) oraz w dolnej strefie drzewostanu (*V7*). Podobnie zróżnicowane są wartości odchylenia standardowego.

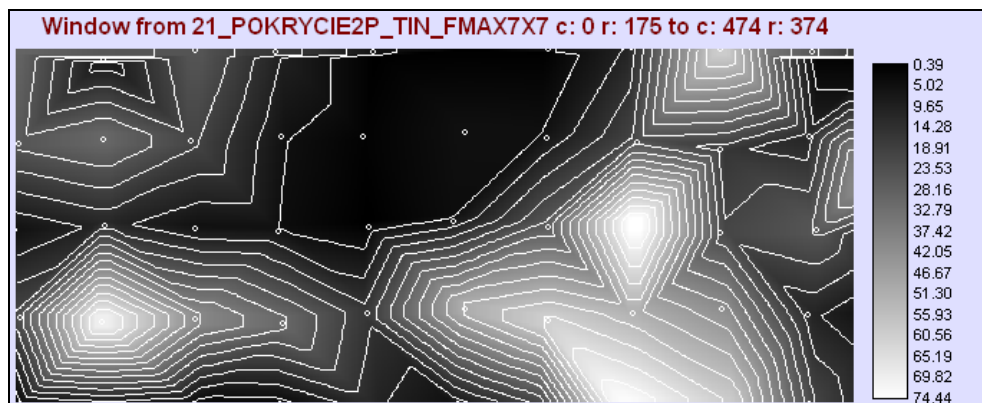
Uzyskane rezultaty można wytłumaczyć cechami budowy drzewostanu. Warstwa piętra górnego drzewostanu była mało zróżnicowana pod względem wysokości drzew. Oczekiwano natomiast, że położenie (wysokość) drugiego (tj. dolnego) maksimum histogramu (*V3*) będzie cechą silnie związaną z występowaniem oraz cechami dolnej warstwy w drzewostanie. Ze względu na mikrozmianowanie siedliska warstwa podrostu i podszytu była bardzo zróżnicowana – na badanym obszarze występowały powierzchnie próbne zarówno zupełnie pozbawione tej warstwy, a także z bardzo rozwiniętą pokrywą. Również wysokość warstwy podrostu i podszytu była zróżnicowana – w wielu miejscach (jeśli w ogóle występowała) sięgała jedynie ok. 0.5 m, w innych natomiast ok. 5.5 m (wartości średnie dla danej powierzchni próbnej).

Cecha *V4* wykazuje dużą zmienność przestrzenną, co jest wyrazem zmienności zwarcia, tj. odległości między koronami drzew. Udział impulsów zatrzymanych przez drugą warstwę (*V5*) w ogólnej liczbie zarejestrowanych impulsów jest bardzo mały. Nie mniej, cecha ta wykazuje związek z obecnością w drzewostanie warstwy złożonej z gatunków liściastych. Zaznaczyć należy także wyraźny wpływ wielkości pola powierzchni próbnej na zmienność uzyskiwanych wyników. Przenikanie impulsów laserowych do dna lasu (*V6*) jest wynikiem łącznego wpływu wszystkich warstw drzewostanu. Cecha ta charakteryzuje się dużą zmiennością.

Interesująca jest interpretacja cechy *V7* histogramów. Na podstawie przeglądu uzyskanych danych oraz inwentaryzacji terenowej stwierdzono, że zmienność kształtu dolnej części histogramów może mieć związek z charakterem rozmieszczenia w drzewostanie podszytu z podrostem. Sprawdzenia tej hipotezy dokonano na 50 powierzchniach próbnych w siatce o rozdzielczości 25 × 25 m. Ich położenie dobrano tak, aby pokrywały się z co drugim środkiem LIDAR-owych powierzchni próbnych (por. Rys. 2 i 3). Na każdej powierzchni próbnej (promień R = 12.5 m) określono w terenie szacunkowo wielkość pokrycia terenu przez dolną warstwę drzewostanu *S<sub>mean</sub>* (%). Przedstawione na rysunkach 2 i 3 przestrzenne rozkłady cech są wynikiem przeprowadzonej następnie interpolacji, na podstawie nieregularnej sieci trójkątów (ang. TIN), w gęstej siatce 1 × 1 m.

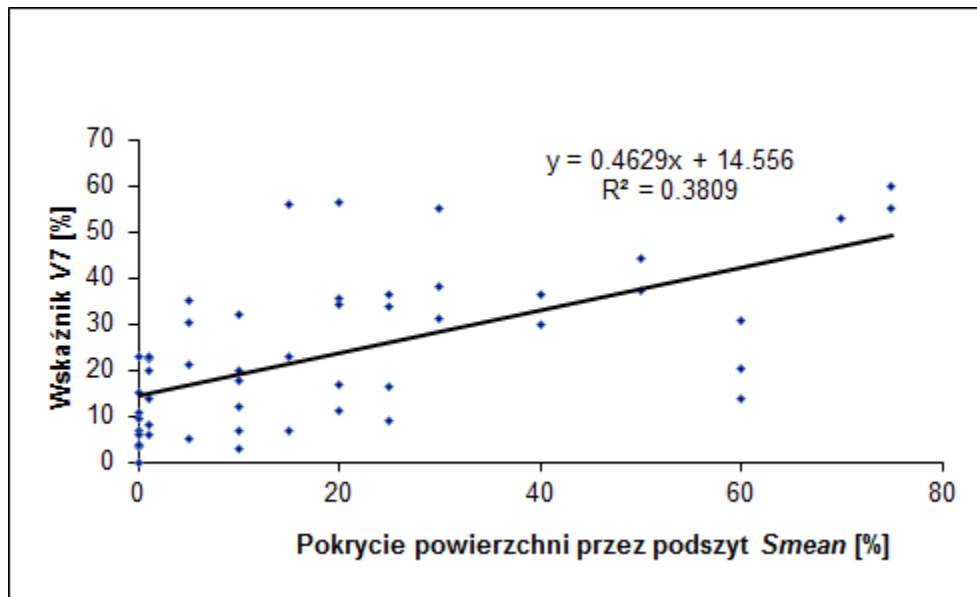


Rys. 2. Rozkład przestrzenny cechy  $V7$  (%) histogramów. Izolinie interpolowano w odstępach 5%. Punkty oznaczają położenie środków kołowych powierzchni próbnych w siatce  $12.5 \times 12.5$  m



Rys. 3. Pokrycie powierzchni drzewostanu przez dolną warstwę drzewostanu – krzewy i podrost  $S_{mean}$  (%). Izolinie interpolowano w odstępach 5%. Punkty oznaczają położenie środków kołowych powierzchni próbnych w siatce  $25 \times 25$  m

Mimo iż dane pochodzące z terenu jedynie w przybliżony, szacunkowy sposób opisują cechy dolnej warstwy drzewostanu, można zauważyć podobieństwo przestrzennego rozkładu ich wartości do rozkładu cechy  $V7$ . Większe różnice występują w zasadzie jedynie w centralnej i północnej części przedstawionego obszaru. Jak wynika z charakterystyki drzewostanu, znaczenie mogły mieć tutaj pojedynczo rosnące wysokie dęby, ugałęzione niemal od poziomu terenu, które sięgają koronami aż do I piętra drzewostanu. Ten czynnik wymaga dokładniejszych analiz. Związki przedstawionych charakterystyk pokazano na rysunku 4. Nie stwierdzono istotnych związków pozostałych cech histogramów, tj.  $V1 \div V6$ , z określonymi w terenie cechami dolnej warstwy drzewostanu.



Rys. 4. Związek między pokryciem terenu *Smean* przez podszyt i podrost oraz cechą *V7* histogramów rozkładów chmur punktów skanowania laserowego na 50 powierzchniach próbnych (współczynnik korelacji  $r = 0.6172$ )

#### 4. WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonego doświadczenia upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1. Drugie maksimum histogramu położone w jego dolnej części może być wskaźnikiem obecności w jednopiętrowym drzewostanie sosnowym warstwy podrostu i podszytu.
2. Warstwy drzewostanu położone wyżej, mogą zatrzymywać znaczną część impulsów laserowych i utrudniać detekcję warstw położonych niżej. Poszczególne części drzewostanu charakteryzują się różnym stopniem zatrzymywania impulsów laserowych w warstwie koron pierwszego piętra.
3. Istnienie związku korelacyjnego między cechą *V7* histogramów oraz pokryciem terenu przez warstwę podrostu i podszytu *Smean* wskazuje, że w analizie struktury drzewostanu należy uwzględnić sumy odbić z szerszych stref wysokości, a nie ograniczać się do wybranych warstw, jak np. przy określaniu cech *V4* i *V5*.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki prac, które były finansowane w latach 2009–2011 ze środków na naukę, jako projekt badawczy N N309 114537 *Las i jego cechy w rastrowym modelu danych przestrzennych*.

## 5. LITERATURA

- Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol, XXXIII/4B*, Amsterdam.
- Będkowski K., Adamczyk J., Brach M., Gzowski P., Karaszkiwicz W., Krawczyk A., Marmol U., Mikrut S., Miścicki S., Morańda M., Olenderek H., Stereńczak K., Stepniowski P., Walo J., Zawadka R., 2008. Zastosowanie lotniczego i naziemnego skaningu laserowego w analizie struktury przestrzennej i funkcjonowania lasów w krajobrazie. Raport końcowy projektu badawczego 2 P06L 02229. Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie, Warszawa.
- Będkowski K., Brach M., Banaszczyk P., 2011. Sezonowa zmienność rozkładu chmury punktów skanowania laserowego w drzewostanach iglastych i jej związek z cechami taksacyjnymi drzewostanu. *Sylvan* 155 (11): 736–748.
- Będkowski K., Stereńczak K., 2008. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki*, t. VI, z. 8, s. 55–60.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2010. Porównanie numerycznych modeli terenu obszarów leśnych generowanych z wykorzystaniem danych skaningu laserowego (LIDAR) uzyskanych w okresie wiosennym i letnim. *Roczniki Geomatyki*, T. VIII, z. 7 (43): 11–20.
- Myszkowski M., Ksepko M., 2010: Budowa pionowa drzewostanu w świetle przestrzennego rozkładu punktów lotniczego skanowania laserowego. *Roczniki Geomatyki*, t. VIII, z. 7 (43), s. 30–48.
- Weinacker H., Koch B., Weinacker R., 2004. Treesvis – a software system for simultaneous 3D-real-time visualization of DTM, laser raw data, multispectral data, simple tree and building models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI – 8/W2, s. 90–95.
- Zarzecka M., 2010. ANALID – application for LIDAR data. Research project at Forest Information Technology master studies at Faculty of Forestry in Warsaw University of Life Sciences – SGGW (Poland) and Faculty of Forest and Management at University of Applied Sciences in Eberswalde (Germany).
- Zarzecka M., 2011. The use of airborne laser data for analyzing spatial structure of forest stands. Master thesis at Forest Information Technology master studies at Faculty of Forestry in Warsaw University of Life Sciences – SGGW (Poland) and Faculty of Forest and Management at University of Applied Sciences in Eberswalde (Germany).

### **ASSESMENT OF SPATIAL VARIABILITY OF SELECTED VARIABLES DESCRIBING VERTICAL FOREST STAND'S STRUCTURE ON THE BASIS OF AERIAL LASER-SCANNING DATA**

KEY WORDS: forest stand, vertical structure, spatial variability, ALS

SUMMARY: One of most important characteristics describing forest is their vertical structure (number of layers). This information is collected during periodical forest inventories. The inventory procedures are time-consuming and can provide only general information, describing relatively big parts of forests. There are still a lot of research activities on the search for methods providing more accurate information. In past aerial laser-scanning was successfully adopted by foresters to determine forest height, number of trees and biomass volume. There was suggested also to use ALS to detect forest vertical structures. This paper describes research made in an Scotch pine (*Pinus silvestris*) stand with some deciduous species in order to check whether it is possible to detect a forest understory

with ALS data. An analysis of histograms describing vertical structure of laser-scanning clouds in half-meter layers was done. Histogram shapes were described with 7 special developed variables V1÷V7. It was found, that there is possible to detect the presence of forest understorey with one of variables.

Mgr inż. Monika Zarzecka  
e-mail: [monika\\_zarzecka@wp.pl](mailto:monika_zarzecka@wp.pl)

Dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW  
e-mail: [krzysztofbedkowski@tlen.pl](mailto:krzysztofbedkowski@tlen.pl)  
telefon: (+48) 22 5938222  
fax: (+48) 22 5938207