

**WYKORZYSTANIE WSKAŹNIKÓW PRZESTRZENNYCH 3D
W ANALIZACH CECH ROŚLINNOŚCI MIEJSKIEJ
NA PODSTAWIE DANYCH Z LOTNICZEGO SKANOWANIA LASEROWEGO¹**

**THE USE OF 3D SPATIAL INDICES
FOR URBAN VEGETATION ANALYSIS
BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

Piotr Tompalski

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Katedra Ekologii Lasu, Wydział Leśny
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: ALS, wskaźniki przestrzenne, struktura, roślinność

STRESZCZENIE: W pracy przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem zintegrowanych danych z lotniczego skanowania laserowego (ALS) oraz zobrażeń satelitarnych (GeoEye-1) w celu automatycznego kartowania roślinności (obiektowa analiza obrazu) oraz generowania wskaźników przestrzennych 3D opisujących w sposób syntetyczny strukturę roślinności. Utworzone wskaźniki charakteryzują zróżnicowanie pionowe roślinności wysokiej (VDI – *Vegetation Diversity Index*) oraz objętość wypełnionej przez nią przestrzeni (FR – *Filling Ratio*, V2A – *Volume to Area*). Ponadto opracowany został wskaźnik VV2BV (*Vegetation Volume to Built-up Volume*) wyrażający stosunek objętości roślinności do objętości (kubatury) budynków. Wskaźnik ten stosowany może być do przyrodniczej waloryzacji obszarów zabudowanych.

1. WSTĘP

Rosnąca popularność technologii LiDAR, przejawiająca się jej stosowaniem zarówno w projektach badawczych jak i wdrożeniach na skalę ogólnopolską (ISOK), skutkuje coraz łatwiejszym dostępem do chmur punktów oraz utworzonych na ich podstawie modeli (DTM, DSM, nDSM). Wśród wielu możliwych zastosowań danych pozyskanych za pomocą lotniczego skanowania laserowego (ALS), na uwagę zasługują również te dotyczące środowiska przyrodniczego, drzew i drzewostanów. Liczne badania udowodniły, że chmury punktów mogą być wykorzystane do określania wysokości drzew, wysokości podstaw koron, długości koron, liczby drzew, miąższości, objętości koron i biomasy (Lefsky *et al.*, 1999; Næsset i Økland, 2002; Andersen *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2008; Wężyk *et al.*, 2008; Hollaus *et al.*, 2009; Maltamo *et al.*, 2009).

Chmury punktów ALS pozwalają również na ocenę struktury i budowy pionowej roślinności wysokiej (Lefsky *et al.*, 2002; Będkowski i Stereńczak, 2008), szczególnie jeśli

¹ Badania zostały zrealizowane dzięki środkom finansowym w ramach stypendium im. Anny Pasek, edycja 2009/2010 (www.annapasek.org).

zostały pozyskane w okresie bezlistnym. Emitowana podczas skanowania wiązka laserowa przenika wtedy lepiej przez korony drzew, a zarejestrowane odbicia lepiej odzwierciedlają strukturę roślinności, choć faktem jest, że większość impulsów zostaje odbita od koron drzew dominujących (Chasmer *et al.*, 2004; Stereńczak i Będkowski, 2011).

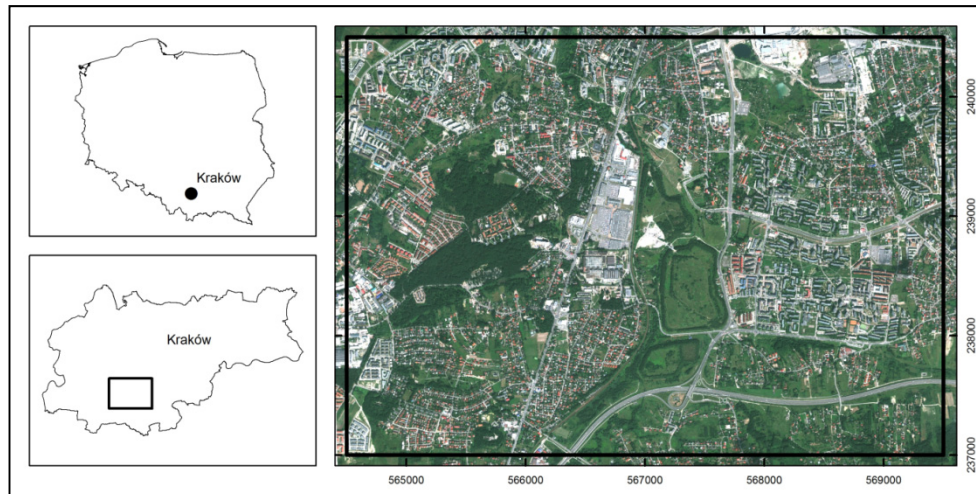
Koncepcje dotyczące wykorzystania danych ALS do opisu struktury i budowy pionowej roślinności wysokiej obecne w literaturze, obrazują zarówno wysoki potencjał tych danych w analizach 3D, jak i trudności związane z próbą scharakteryzowania skomplikowanych cech przestrzennych za pomocą pojedynczej wartości liczbowej. Zazwyczaj autorzy skupiają się na analizie histogramu wysokości punktów i korelacji jego statystyk opisowych z typem budowy pionowej lub struktury przestrzennej. Przykładem mogą być badania Blaschke *et al.* (2004), którzy zaproponowali wykorzystanie miar rozkładu (średnia, odchylenie standardowe) opartych o wysokość punktów. Mücke *et al.* (2010) zasugerowali podział drzewostanu na 3 warstwy (L1, L2 i L3), a następnie kategoryzowanie go na jednopiętrowy lub wielopiętrowy na podstawie udziału punktów w poszczególnych warstwach. Z kolei Maltamo *et al.* (2004) opisują sposób analizy rozkładu wysokości punktów ALS w celu określenia jego multimodalności, co z kolei pozwala określić czy badany fragment posiada budowę jedno- lub dwupiętrową. Natomiast Ewijk i in. (2009) oraz Hashimoto *et al.* (2004) zaadaptowali wskaźniki ekologiczne (wskaźnik równomierności Pielou, wskaźnik Shannona-Wienera) dla charakteryzowania stopnia zróżnicowania budowy pionowej drzewostanu.

Oprócz analiz dotyczących środowiska przyrodniczego, technologia skanowania laserowego jest także szeroko wykorzystywana w klasyfikacji roślinności i zabudowy obszarów miejskich (Haala i Brenner, 1999; Priestnall *et al.*, 2000; Ducic *et al.*, 2006; Rutzing *et al.*, 2007; Wagner *et al.*, 2008; Höfle i Hollaus, 2010) pozwalając dodatkowo na określenie objętości jaką zajmuje roślinność wysoka (Meinel i Hecht, 2005; Hecht *et al.*, 2006). Atrybuty przestrzenne 3D określone na podstawie chmury punktów i przypisane każdemu budynkowi oraz fragmentowi zieleni, pozwalają lepiej badać istniejące między nimi zależności przestrzenne. Dane te są jednocześnie doskonałą podstawą analiz ukierunkowanych na ocenę roślinności wysokiej miast w kontekście zwiększającej się industrializacji i inwestycji budowlanych.

Celem prezentowanych badań było opracowanie wskaźników przestrzennych 3D opartych o dane pozyskane technologią LiDAR, które następnie mogą być zastosowane do waloryzacji obszarów miejskich (nowe inwestycje, aktualna sytuacja dotycząca interakcji zabudowa-roślinność) oraz w ocenie struktury przestrzennej roślinności wysokiej.

2. METODYKA

Terenem, na którym przeprowadzono badania i dla którego obliczone zostały wskaźniki przestrzenne, był fragment miasta Krakowa o wymiarach 3.5×5.0 km. Obszar ten został wybrany w taki sposób, aby w analizach uwzględniona została różnorodność obszarów miejskich – w jego granicach znajdują się zarówno tereny gęstej zabudowy ("blokowska"), zabudowy jednorodzinnej, jak i parki oraz inne tereny zielone (Rys. 1).



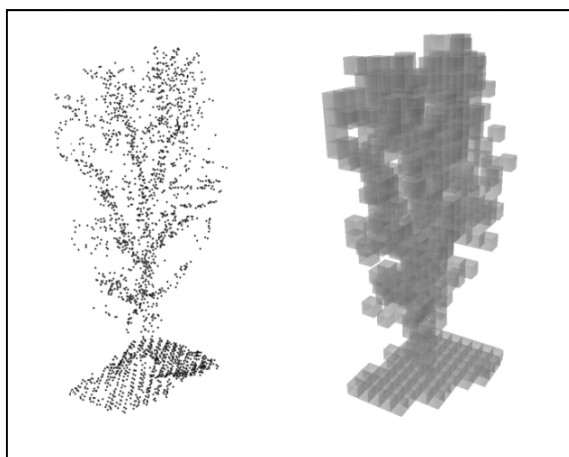
Rys. 1. Teren badań. Z lewej: mapa przeglądowa Polski oraz granice miasta Krakowa wraz z wielobokiem opracowania. Z prawej kompozycja RGB GeoEye-1 (PUWG1992)

W badaniach wykorzystano chmurę punktów ALS pozyskaną w listopadzie 2006 roku i udostępnioną do badań dzięki uprzejmości Biura Planowania Przestrzennego Urzędu Miasta Krakowa (Jędrzychowski, 2007) oraz zobrazowanie satelitarne GeoEye-1. Podstawą analiz był wynik klasyfikacji obiektowej przeprowadzonej w oparciu o wymienione dane. Analizy te przeprowadzono w oprogramowaniu Trimble eCognition Developer 8.64 wykorzystując warstwy rastrowe przedstawiające wysokość względną maksymalną (nDSM), wysokość względną minimalną (nMin) oraz odchylenie standardowe wysokości względnej punktów (SD). Warstwy te utworzone zostały na podstawie znormalizowanej chmury punktów ALS. Ponadto, w procesie obiektowej analizy obrazu, wykorzystano kanały spektralne wspomnianego zobrazowania satelitarnego GeoEye-1. Rezultat klasyfikacji, czyli warstwy wektorowe roślinności wysokiej oraz budynków, zostały następnie wykorzystane we wsadowym przetwarzaniu danych ALS. Należy zaznaczyć, iż narzędzia OBIA (*Object Based Image Analysis*) pozwoliły na dokładne wyodrębnienie pojedynczych budynków oraz homogenicznych pod względem wysokości oraz odpowiedzi spektralnej płatów roślinności wysokiej. Sposób przetwarzania danych szerzej opisany jest w osobnej publikacji (Tompalski i Wężyk, 2011).

Wykorzystując narzędzia LASTools (LASTools, 2011) oraz Fusion (McGaughey, 2010) dokonano podziału chmury punktów na poszczególne fragmenty wyznaczone przez poligony warstwy wektorowej "roślinność wysoka". Fragmenty te, zapisane w osobnych plikach, były następnie przetwarzane w środowisku R (R Development Core Team, 2011). Utworzony w tym środowisku statystycznym algorytm w sposób w pełni zautomatyzowany dokonywał transformacji chmury punktów na voxele oraz określał wartości liczbowe opracowanych wskaźników przestrzennych 3D.

Wspomniana transformacja (punkty – voxele, Rys. 2) pozwoliła nie tylko na określenie objętości zajmowanej przez dany fragment roślinności wysokiej, ale także na normalizację rozkładu przestrzennego punktów. Z badań autora wynika, że histogram wysokości voxelu lepiej odzwierciedla budowę pionową roślinności wysokiej niż histogram wysokości

punktów, w którym niejednokrotnie dochodzi do dominacji klas wysokościowych podlegających bezpośredniej ekspozycji wiązki laserowej lub jego zaburzenia wynikającego z nakładania się pasów nalogu. Dodatkowo, algorytm przypisuje każdemu voxelowi atrybut – liczbę punktów znajdujących się w jego wnętrzu. Użytkownik może sprecyzować zatem nie tylko rozmiar voxela lecz także minimalną liczbę punktów wymaganą do jego utworzenia.



Rys. 2. Fragment chmury punktów oraz voxele utworzone na jej podstawie

3. OPRACOWANE WSKAŹNIKI PRZESTRZENNE 3D

Wszystkie opracowane wskaźniki przestrzenne 3D bazowały na homogenicznych wysokościowo segmentach roślinności wysokiej, reprezentowanych przez zbiór voxelów o zadanym rozmiarze i minimalnej liczbie punktów. Opracowane wskaźniki można podzielić na dwie kategorie: opisujące strukturę roślinności wysokiej oraz opisujące interakcje pomiędzy roślinnością wysoką a zabudową.

FR – Filling ratio

Wskaźnik FR (Filling ratio) opisuje procent przestrzeni wypełnionej przez roślinność i został opracowany w dwóch wariantach: FR_{MAX} oraz FR_{CROWN} . W zależności od wariantu wyraża stosunek objętości roślinności określonej na podstawie voxelów o zadanym rozmiarze, do:

- 1) całkowitej objętości bryły wyznaczonej przez wymiary podstawy voxelów i wysokość maksymalną – FR_{MAX}

$$FR_{MAX} = \frac{V_{VEG}}{A_{BASE} * H_{MAX}} \quad (1)$$

gdzie:

V_{VEG} – sumaryczna objętość voxelów

A_{BASE} – pole powierzchni rzutu voxelów na płaszczyznę poziomą

H_{MAX} – odległość maksymalna pomiędzy voxelami położonym najniżej i najwyżej, z uwzględnieniem ich płaszczyzn – odpowiednio dolnej i górnej (wysokość)

- 2) całkowitej objętości bryły wyznaczonej przez podstawę voxeli oraz voxele o maksymalnej wysokości w każdym słupie voxeli, która dla celów przetwarzania danych dzielona jest na rzędy, kolumny i słupy.

$$FR_{CROWN} = \frac{V_{VEG}}{\sum_{i=1}^{j_{max}} \sum_{j=1}^{i_{max}} H_{MAXij} - H_{Gij}} \quad (2)$$

gdzie:

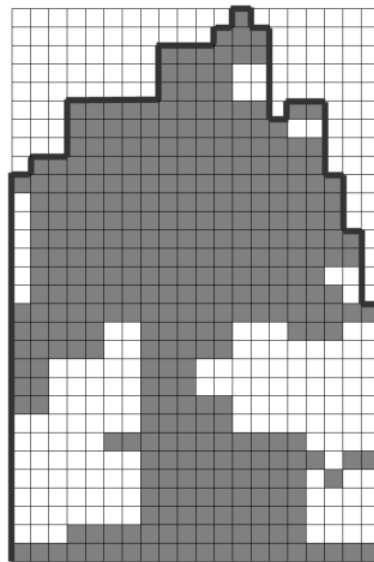
V_{VEG} – sumaryczna objętość voxeli

H_{MAXij} – maksymalna wysokość voxeli w rzędzie „i” oraz kolumnie „j”

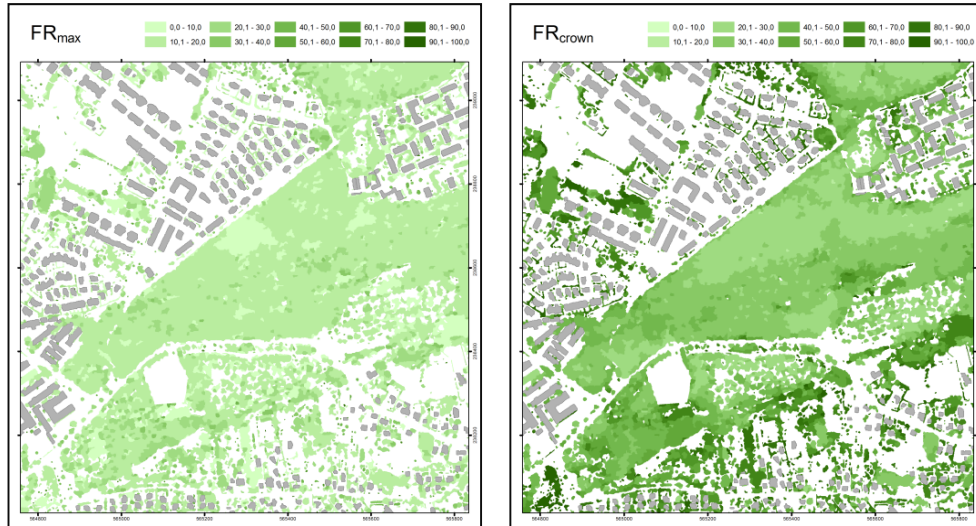
H_{Gij} – wysokość gruntu dla voxeli w rzędzie „i” oraz kolumnie „j”

Oba wskaźniki (Rys. 4) różnią się wartością objętości, do której odnoszona jest objętość roślinności. Różnicę tę przedstawiono na przykładzie (Rys. 3). Wskaźnik FR_{MAX} to stosunek objętości roślinności (szare pola) do sumarycznej objętości voxeli, które mogłyby wypełnić dany fragment przestrzeni, ograniczonej wysokością gruntu u dołu i wierzchołkiem drzewa od góry (wszystkie pola na rycinie). Dla podanego przykładu wartość wskaźnika FR_{MAX} wynosi 56%. W przypadku wskaźnika FR_{CROWN} , objętość wegetacji (tylko szare pola) odnoszona jest jedynie do całkowitej objętości przestrzeni ograniczonej przez górną część korony drzewa (czarna linia). Wskaźnik ten w omawianym przykładzie przyjmuje wartość 70%.

Innymi słowy, wskaźniki wyrażają stopień wypełnienia przestrzeni przez dany, homogeniczny płat roślinności wysokiej. Są przy tym niezależne od wysokości – podobnymi wartościami wskaźnika mogą charakteryzować się zarówno wysokie drzewa o długich koronach i/lub z występującym podszytem, jak i niskie zarośla krzewiaste.



Rys. 3. Przykładowy przekrój przez voxele – zobrazowanie zasady obliczania wskaźnika FR. Objaśnienia w tekście



Rys. 4. Wizualizacja wskaźników FR_{MAX} i FR_{CROWN} na fragmencie terenu badań

V/A – Volume to Area

Wskaźnik ten wyraża stosunek objętości wegetacji do zajmowanej przez nią powierzchni. Przyjmuje wysokie wartości w przypadku dużej objętości roślinności zajmującej niewielką powierzchnię terenu (np. grupy wysokich drzew o długich koronach) a niskie w przypadku rozległych płatów roślinności w niewielkim stopniu wypełniających przestrzeń (Rys. 6).

$$V/A = \frac{V_{VEG}}{A_{VEG}} \quad (3)$$

gdzie:

V_{VEG} – sumaryczna objętość voxeli

A_{VEG} – powierzchnia podstawy analizowanego fragmentu.

VDI – Vegetation Diversity Index

Jego wartość zależy od stopnia zróżnicowania budowy pionowej analizowanego fragmentu chmury punktów i określana jest jako stosunek długości linii łączącej poszczególne klasy histogramu wysokości voxeli do maksymalnej wysokości voxela przetwarzanej chmury. Współczynnik ten zapisać można w postaci wzoru:

$$VDI = \frac{\sum_{i=1}^{h_{max}} \sqrt{(c_i - c_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2}}{h_{max}} \quad (4)$$

gdzie:

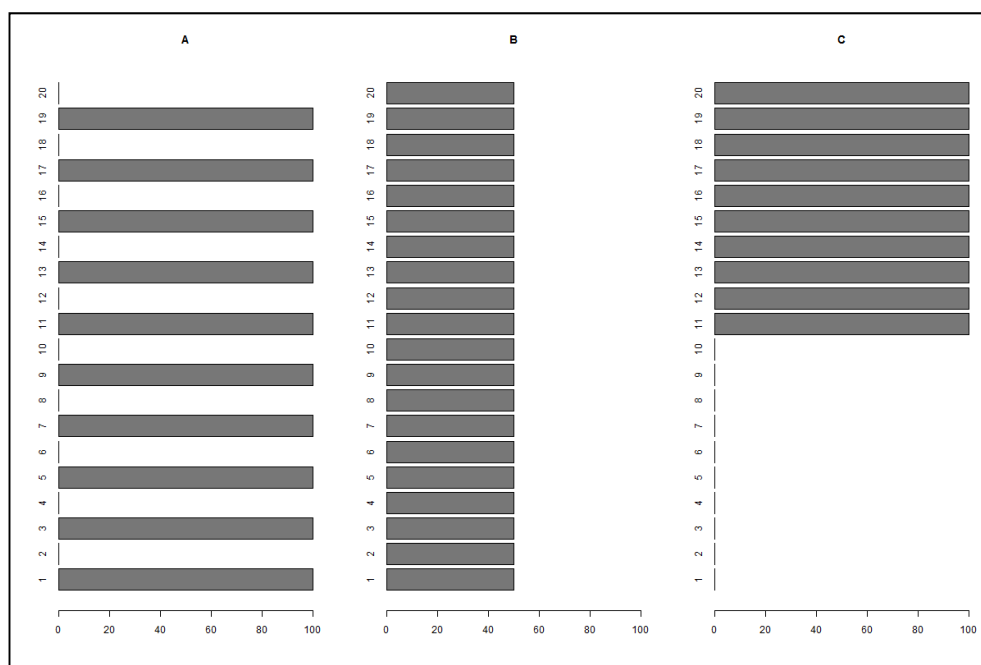
c_i – liczebność klasy i

h_i – wartość wysokości środka klasy i

h_{max} – wysokość maksymalna

Im większe zróżnicowanie histogramu wysokości punktów (voxeli) tym dłuższa staje się linia łącząca wartości poszczególnych jego klas. Aby uniezależnić wartość wskaźnika od wysokości roślinności, sumaryczna wartość długości odcinków łączących poszczególne klasy wysokości histogramu jest dzielona przez wartość maksymalnej wysokości punktu (voxela) – h_{max} .

Poniższa rycina (Rys. 5) przedstawia trzy przypadki rozkładu danej cechy (np. wysokości punktów lub voxeli), obrazujące podobieństwa i różnice pomiędzy podstawowymi statystykami opisowymi a wskaźnikiem VDI. We wszystkich trzech przypadkach średnia liczebność klas wynosi 50. Odchylenie standardowe liczebności w pierwszym i trzecim przypadku jest równe i wynosi 51.3. Zróżnicowanie rozkładu cechy dobrze obrazuje natomiast wskaźnik VDI, który w przypadku rozkładu najbardziej zróżnicowanego (Wariant A) przyjmuje bardzo wysoką wartość (95.0), a w przypadku rozkładu jednorodnego (Wariant B) wartość bardzo niską (0.95) (Tabela 1, Rys. 6).



Rys. 5. Trzy warianty rozkładu voxeli w klasach wysokości

Tabela 1. Wartości: średnia, odchylenie standardowe oraz współczynnik VDI dla trzech przykładowych rozkładów wysokości voxeli

Wariant	średnia	odch. stand.	VDI
A	50	51.3	95.0
B	50	0	0.95
C	50	51.3	5.9



Rys. 6. Wizualizacja wskaźników V/A oraz VDI na fragmencie terenu badań

VV2BV – Vegetation Volume to Built-up Volume

Wskaźnik $VV2BV\%$ wyraża stosunek objętości zieleni (średniej i wysokiej) do łącznej objętości zieleni i objętości zabudowy (kubatury budynków).

$$VV2BV\% = \frac{V_{HV}}{V_B + V_{HV}} * 100 \quad (5)$$

gdzie:

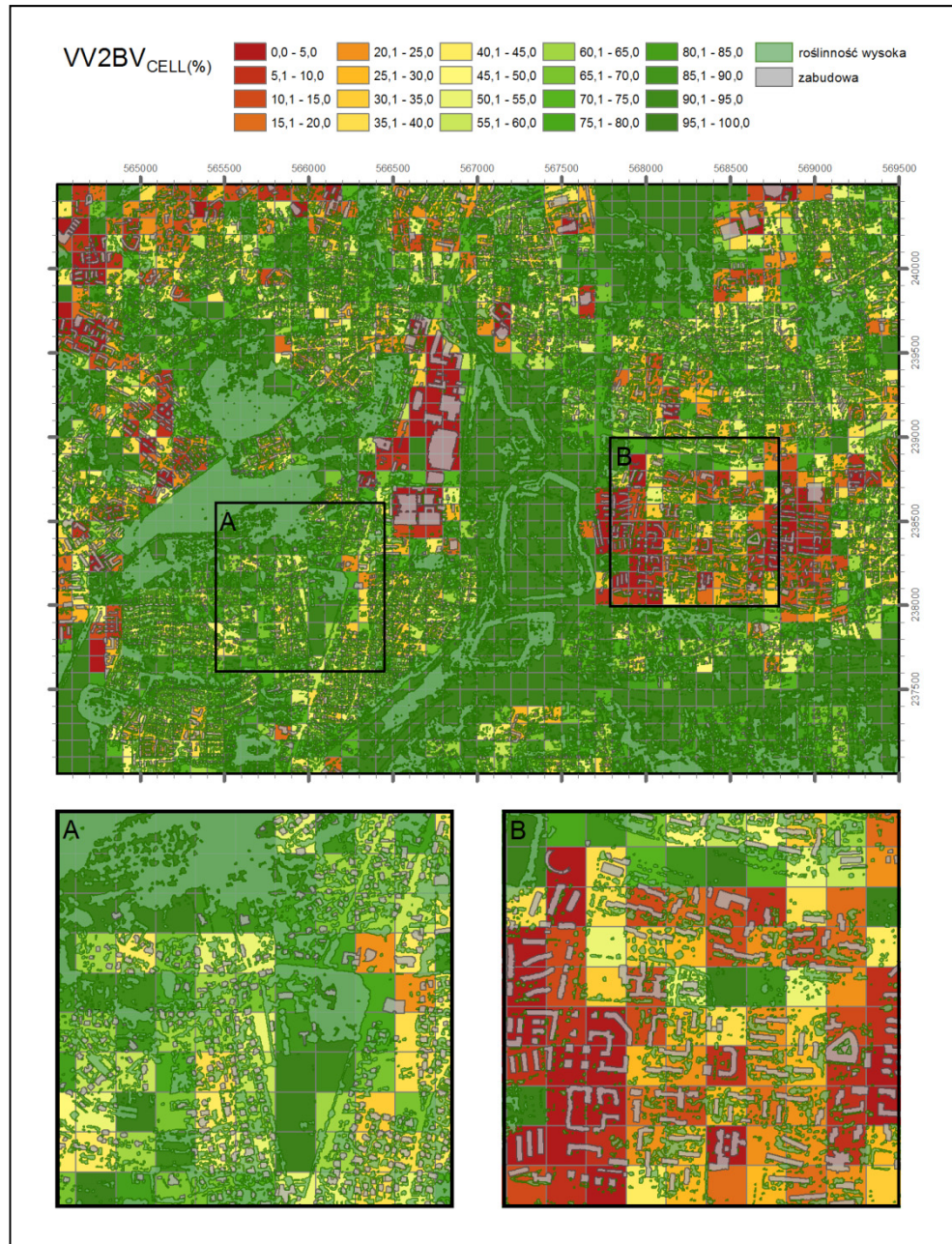
V_{IH} – objętość roślinności wysokiej

V_B – objętość zabudowy

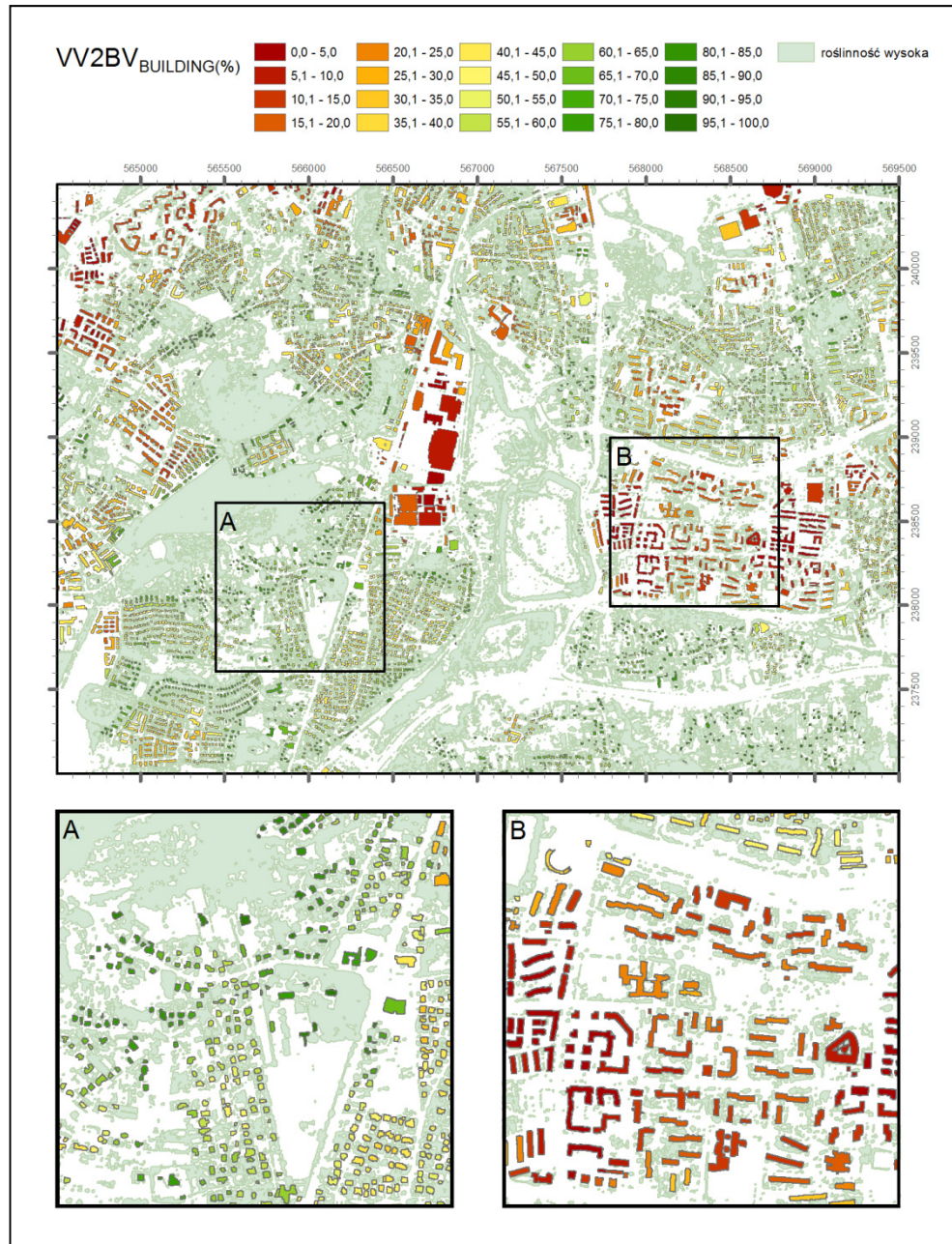
Wskaźnik ten opracowano w dwóch wariantach:

- $VV2BV_{CELL}(\%)$ – wartość wskaźnika określana jest dla komórki o zadanym rozmiarze (np. 100×100 m, Rys. 7)
- $VV2BV_{BUILDING}(\%)$ – wartość wskaźnika określana jest dla każdego budynku indywidualnie, przy zadanym promieniu analiz (np. 100 m, Rys. 8)

Oparcie wartości wskaźnika na informacji 3D uzyskanej w drodze przetwarzania chmur punktów z lotniczego skanowania laserowego pozwala na pełniejsze obrazowanie warunków życia mieszkańców danego fragmentu miasta. Wskaźnik w swojej domyślnej postaci nie uwzględnia powierzchni roślinności niskiej, oparty jest jedynie o roślinność średnią i wysoką ($h > 1$ m). Objętość zabudowy określana jest jako iloraz średniej wysokości budynku i jego powierzchni i może być stosunkowo szybko obliczona na podstawie warstwy rastrowej nDSM. Objętość roślinności natomiast określana jest na podstawie sumy voxelów w danym, homogenicznym segmencie roślinności wysokiej.



Rys. 7. Wskaźnik VV2BV_{CELL}(%) – wizualizacja na obszarze całego terenu badań



Rys. 8. Wskaźnik VV2BV_{BUILDING}(%) – wizualizacja na obszarze całego terenu badań

4. DYSKUSJA I WNIOSKI

Przedstawione koncepcje wskaźników przestrzennych opartych o informację 3D zawartą w chmurach punktów pozyskanych technologią lotniczego skanowania laserowego, pozwalają na syntetyczne przedstawienie wybranych cech przestrzennych roślinności, takich jak objętość wypełnionej roślinnością przestrzeni czy zróżnicowanie jej budowy pionowej. Pozwalają również analizować interakcje zachodzące pomiędzy środowiskiem naturalnym a coraz rozleglejszymi obszarami zabudowanymi w miastach. W sposób łatwy do interpretacji i wizualizacji przedstawiają informacje na temat budowy przestrzennej roślinności wysokiej.

Cechą wyróżniającą przedstawione analizy jest oparcie wskaźników przestrzennych opisujących strukturę roślinności o voxele. W opinii autora, zastosowany zabieg polegający na transformacji chmury punktów do zbioru voxelów, ma duży wpływ na histogram wysokości, a tym samym na wartość liczbową wskaźników o niego opartych (VDI). Metodę tę można również zastosować w odniesieniu do innych wskaźników obliczanych na podstawie histogramu wysokości punktów (Hashimoto i in., 2004; Ewijk i in., 2009).

Opracowane wskaźniki przestrzenne 3D można podzielić na dwie grupy: a) dotyczące jedynie roślinności wysokiej, opisujące jej budowę pionową i wypełnienie przestrzeni (FR, VDI, V/A) oraz b) dotyczące roślinności miejskiej, opisujące objętość roślinności przypadającą na dany fragment przestrzeni miasta lub dany budynek, w stosunku do kubatury zabudowy (VV2BV).

Pierwsza grupa wskaźników pozwala na charakterystykę struktury przestrzennej roślinności wysokiej. Wskaźniki FR_{MAX} i FR_{CROWN} określają ilość przestrzeni wypełnionej roślinnością i przyjmują wyższe wartości ($FR_{CROWN} > 70\%$) w przypadku drzewostanów wielopiętrowych lub gęstych zarośli krzewiastych, niższe np. w przypadku monokultur sosnowych bez podrostu lub podszytu. Wskaźnik VDI opisuje natomiast stopień zróżnicowania budowy pionowej danego fragmentu roślinności i przyjmuje tym wyższe wartości, im zróżnicowanie to jest większe. Warto podkreślić, że opracowane wskaźniki mogą być również wykorzystane w odniesieniu do danych pozyskanych skanerem naziemnym (TLS).

Druga grupa wskaźników – $VV2BV_{CELL(\%)}$ oraz $VV2BV_{BUILDING(\%)}$ nawiązuje ideowo do wskaźnika Green Index (Schöpfer i in., 2005), jednak oparcie ich o chmury punktów ALS pozwala na uwzględnienie w obliczeniach wymiarów przestrzennych obiektów terenowych, a nie tylko ich powierzchni. Zaproponowany podział wskaźnika na dwa warianty umożliwia zastosowanie go w dwojakiego rodzaju analizach przestrzennych. Wskaźnik $VV2BV_{CELL(\%)}$ waloryzuje obszar miasta dzieląc go na fragmenty o z góry ustalonym rozmiarze (siatka kwadratów). Wskaźnik $VV2BV_{BUILDING(\%)}$ z kolei pozwala na ocenę warunków przyrodniczych dla każdego z budynków z osobna.

Warunki życia mieszkańców miast pod względem przyrodniczym, rozumianym jako ilość i sąsiedztwo zieleni, regulowanie są prawnie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690), są także przedmiotem analiz i porównań przeprowadzanych na skalę europejską (Urban Audit, 2011). Wykorzystanie w tym kontekście wskaźników przestrzennych 3D, które pozwalają charakteryzować przestrzeń miasta pod kątem wypełniającej go zieleni, umożliwić może nie tylko wyznaczanie obszarów miast np. o niewystarczającej ilości roślinności danego typu, ale także służyć do porównywania miast między sobą. Wskaźniki te mogą być także wykorzystane do charakteryzowania struktury całego miasta i wspomagać planistów przy podejmowaniu decyzji związanych np. z nowymi inwestycjami.

W odczuciu autora, opracowane wskaźniki przestrzenne 3D, zarówno te dotyczące budowy przestrzennej roślinności, jak i te odnoszące się do charakteryzowania relacji zabudowa-roślinność, mogą znaleźć szerokie zastosowanie w związku z coraz powszechniejszym wykorzystaniem technologii LiDAR. Pozwalają one w sposób czytelny i syntetyczny przedstawić wartościowe informacje przestrzenne dotyczące roślinności, będąc przez to narzędziem ekstrakcji cech trudnych do określenia metodami tradycyjnymi.

5. LITERATURA

- Andersen, H. E., Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32, 355–366.
- Będkowski, K., Stereńczak, K., 2008. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki* VI, 55–60.
- Blaschke, T., Tiede, D., Heurich, M., 2004. 3D landscape metrics to modelling forest structure and diversity based on laser scanning data, W: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, Weinacker, H. (Eds.), *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, pp. 129–132.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Treitz, P., 2004. Assessing the 3D-Frequency Distribution of Airborne and Ground-Based LIDAR Data for Red Pine and Mixed Deciduous Forest Plots, W: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, Weinacker, H. (Eds.), *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, pp. 66–70.
- Ducic, V., Hollaus, M., Ullrich, A., Wagner, W., Melzer, T., 2006. 3d vegetation mapping and classification using full-waveform laser scanning. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 211–217.
- Dz. U. 2002 nr 75 poz. 690, Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- Ewjić, K. Y.v., Treitz, P. M., Scott, N. A., 2009. Characterizing forest structure using a lidar derived complexity index, W: Popescu, S., Nelson, R., Zhao, K., Neuenschwander, A. (Eds.), *Silvilaser 2009*, College Station, Texas, USA.
- Haala, N., Brenner, C., 1999. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 130–137.
- Hashimoto, H., Imanishi, J., Hagiwara, A., Morimoto, Y., 2004. Estimating Forest Structure Indices for Evaluation of Forest Bird Habitats by an Airborne Laser-Scanner, W: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, Weinacker, H. (Eds.), *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Germany, 03–06 October 2004.
- Hecht, R., Meinel, G., Buchroithner, M., 2006. Estimation of urban green volume-based on last pulse LIDAR data at leaf-off aerial flight times. *Proc. Challenges Solutions – 1st Workshop EARSeL Special Interest Group Urban Remote Sens.*
- Höfle, B., Hollaus, M., 2010. Urban vegetation detection using high density full-waveform airborne LiDAR data – Combination of object-based image and point cloud analysis W: W. Wagner, B. Székely (Eds.), *ISPRS Technical Commission VII Symposium, 100 Years ISPRS, Advancing Remote Sensing Science*, Vienna, Austria.
- Hollaus, M., Wagner, W., Schadauer, K., Maier, B., Gabler, K., 2009. Growing stock estimation for alpine forests in Austria: A robust lidar-based approach. *Canadian Journal of Forest Research* 39, 1387–1400.

- Huang, M. J., Shyue, S. W., Lee, L. H., Kao, C. C., 2008. A knowledge-based approach to urban feature classification using aerial imagery with lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74, 1473–1485.
- Jędrzychowski, I., 2007. Lotnicze skanowanie laserowe Krakowa. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 17a.
- LAStools, 2011. <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A., Harding, D., 1999. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment* 70, 339–361.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., Harding, D. J., 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52/1, 19–30.
- Maltamo, M., Næsset, E., Bollandsås, O.M., Gobakken, T., Packalén, P., 2009. Non-parametric prediction of diameter distributions using airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24, 541–553.
- Maltamo, M., Packalén, P., Yu, X., Eerikainen, K., Hyypä, J., Pitkanen, J., 2004. Identifying and quantifying heterogeneous boreal forest structures using laser scanner data, W: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, Weinacker, H. (Eds.), *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Freiburg, Germany, pp. 153–156.
- McGaughey, R. J., 2010. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. Software Manual. USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station.
- Meinel, G., Hecht, R., 2005. Reconstruction of Urban Vegetation Based on Laser Scan Data at Leaf-Off Aerial Flight Times. *ISPRS International WG I/2 Workshop 2005: 3D Mapping from InSAR and LiDAR*, Banff, Alberta, Canada, 7–10 June, 2005.
- Mücke, W., Hollaus, M., Prinz, M., 2010. Derivation of 3D landscape metrics from airborne laser scanning data, *Silvilaser 2010*, Freiburg, Germany.
- Næsset, E., Økland, T., 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79, 105–115.
- Priestnall, G., Jaafar, J., Duncan, A., 2000. Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems* 24, 65–78.
- R Development Core Team, 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Rutzinger, M., Höfle, B., Pfeifer, N., 2007. Detection of high urban vegetation with airborne laser scanning data, *ForestSAT07*, Montpellier.
- Schöpfer, E., Lang, S., Blaschke, T., 2005. A "green index" incorporating remote sensing and citizen's perception of green space. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences* Vol. No. XXXVII-5/W1, Tempe, AZ, 1–6.
- Stereńczak, K., Będkowski, K., 2011. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. *Sylwan* 155 (4), 219–227.
- Tompalski, P., Wężyk, P., 2011. Kartowanie pokrycia terenów zurbanizowanych przy zastosowaniu klasyfikacji obiektowej zintegrowanych geodanych lotniczego skanowania laserowego oraz zobrażeń geodezyjnych. *Roczniki Geomatyki* t. 9, z. 2 (46).
- Urban Audit, 2011. <http://www.urbanaudit.org/>
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C., Ducic, V., 2008. 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing* 29, 1433–1452.

Wężyk, P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data, 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. *SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK, pp. 636–645.

THE USE OF 3D SPATIAL INDICES FOR URBAN VEGETATION ANALYSIS BASED ON AIRBORNE LASER SCANNING DATA

KEY WORDS: ALS, spatial indices, structure, vegetation

SUMMARY: The paper presents results of studies on the application of integrated data from airborne laser scanning (ALS) and satellite imagery (GeoEye-1) for the automatic mapping of vegetation (object-oriented image analysis) and to generate 3D spatial indices describing the structure of the vegetation. Created indices characterize the vertical diversity of vegetation (VDI – Vegetation Diversity Index) and the amount of space filled by vegetation (FR – Filling Ratio, V2A – Volume to Area). In addition, the VV2BV index (Vegetation Volume to Built-up Volume) is expressing the ratio of volume of vegetation to volume of buildings. This indicator can be applied for valorization of built-up areas.

mgr inż. Piotr Tompalski
e-mail: piotr.tompalski@ur.krakow.pl
telefon: +48 12 6625076