

METODA OCENY WSKAŹNIKA POWIERZCHNI LIŚCI
Z ZASTOSOWANIEM LOTNICZEGO SKANINGU LIDAROWEGO*

Mikhail Popov¹, Igor Semko¹, Ihor Kozak²

¹Centrum Naukowe Badań Aerokosmicznych Ziemi,
Narodowa Akademia Nauk Ukrainy
ul. Ołesya Honczara, 55b, Kijów, Ukraina,
e-mail: casre@casre.kiev.ua

²Katedra Ekologii Krajobrazu, Informatyki i Architektury Krajobrazu, Wydział Matematyki,
Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II
ul. Konstantynów 1H, 20-708 Lublin, Polska

Streszczenie. Zaproponowana została metoda zdalnej oceny LAI z zastosowaniem materiałów lotniczego skaningu lidarowego. Obliczeniowa część metody opiera się na modelu regresji pomiędzy wartościami wskaźnika LAI i danymi lotniczego skaningu lidarowego. Opracowane zostały równania regresji wielokrotnej. Przedstawione zostały wyniki testowania proponowanej metody, które potwierdzają jej wydajność i wysoką dokładność. Przedstawiony został przegląd nowoczesnych metod oceny wskaźnika powierzchni liści (LAI) – jednego z najbardziej kompleksowych i obiektywnych wskaźników produkcyjnej aktywności roślinności. Krótko opisano naziemne metody oceny LAI oraz ich oprzyrządowanie. Zauważono, że główną i niewątpliwą zaletą naziemnej metody oceny LAI jest wiarygodność uzyskanych wyników. Przy konieczności oceny poziomu aktywności roślinności na dużych obszarach i przy ograniczonych zasobach czasowych, zastosowanie technik naziemnych napotyka poważne trudności. W takich przypadkach bardziej obiecującym okazuje się podejście związane z zastosowaniem zdalnych technik i technologii. Pokazano kierunki ewentualnych dalszych kroków do zwiększenia dokładności metody.

Słowa kluczowe: drzewostany sosnowe, wskaźnik powierzchni liści, zdalne oceny, lotniczy skaningu lidarowy, regresja wielokrotna

* Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr Φ54.2/019 Fundacji Badań Podstawowych Ukrainy, realizowanych w latach 2013-2014.

WSTĘP

Jednym z głównych wskaźników aktywności procesów fotosyntezy jest wskaźnik powierzchni liści (Leaf Area Index – LAI) wprowadzony przez D. Watsona w połowie ubiegłego wieku (Watson 1947). LAI jest obecnie szeroko stosowany w badaniu interakcji roślinności z atmosferą, modelach obiegu węgla, ocenie produktywności lasów, obliczeniach fitomasy i innych (Chen i Black 1992, Chen i in. 1997, Lakida i in. 1995).

Do obliczeń wskaźnika powierzchni liści (LAI) istnieje wiele różnych metod, które można podzielić na naziemne i zdalne (Breada 2003). Najprostszą procedurę posiada metoda bezpośrednich, naziemnych pomiarów LAI. Polega ona na tym, że na pewnym obszarze z roślinnością obcina się wszystkie liście, następnie zbiera je i oblicza ich powierzchnię. Po czym przez podzielenie podsumowanej całkowitej powierzchni zebranych liści na powierzchnie obszaru otrzymuje się LAI (Breada 2003). Obliczenie całkowitej powierzchni liści trudno przeprowadzić inaczej niż ręcznie, ale wymaga to niestety dużo czasu. W związku z tym wskazana procedura skupia się przede wszystkim na pomiarze wartości LAI dla małych obszarów, przeważnie traw oraz plonów. Jednak istnieją także badania z zastosowaniem bezpośrednich pomiarów do oceny LAI roślin w lasach (Hutchison i in. 1986).

Główną zaletą bezpośrednich naziemnych pomiarów jest maksymalna adekwatność oceny LAI do aktualnego stanu roślinności (Breada 2003). Jest to powód, dla którego oparte na takich pomiarach metody były powszechnie stosowane do kalibracji innych technologii pomiaru LAI, w tym teledetekcyjnych (Garrigues i in. 2008, Popov i Semko 2013).

Istnieje wiele naziemnych sposobów i urządzeń odpowiednich do rejestrowania dystrybucji światła i przeprowadzenia niezbędnych jego pomiarów (Breada 2003, Chen i in. 1997, Jonckheere i in. 2004). Obecnie najczęściej stosowane są zdjęcia hemisferyczne Digital Hemispherical Photography (DHP) oraz analizy baldachimu roślin Plant Canopy Analysis (PCA) (Chen i Cihlar 1995).

Widoczną przewagą naziemnych metod oceny LAI jest wysokie podobieństwo otrzymanych wyników do rzeczywistej powierzchni liści w lesie i możliwość wyznaczenia opisywanej oceny w prosty sposób. Niestety zastosowanie naziemnych metod napotyka na poważne trudności, kiedy konieczne jest dokonanie oceny poziomu aktywności procesów fotosyntezy roślinności na dużych obszarach, a zwłaszcza w warunkach ograniczonych zasobów czasowych. W takich sytuacjach, coraz częściej stosuje się nowoczesne technologie teledetekcji, które pozwalają na uzyskanie niezbędnych oszacowań LAI przez tworzenie i późniejsze analizy komputerowe lotniczych zdjęć lub wielospektralnych zdjęć satelitarnych (Kodar i in. 2008, Zheng i Moskal 2009).

W pracy zaproponowano i zbadano zdalne metody szacowania LAI na podstawie danych z lotniczego skaningu lidarowego, tj. w oparciu o obrazy roślinności uzyskane przez lidar (Light Detection And Ranging – LiDAR).

Podstawą zastosowania metody zdalnej oceny LAI jest zjawisko selektywnej, spektralnej reakcji roślinności na padające na nią promieniowanie optyczne. Taka selektywność ustalona jest w wielospektralnych, satelitarnych zdjęciach powierzchni ziemi pokrytej roślinnością. Roślinność na badanym obszarze może zostać oszacowana za pomocą bardzo dobrze znanych wskaźników wegetacyjnych: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Reduced Simple Ratio (RSR) i Enhanced Vegetation Index (EVI) (Myneni i in. 1995, Lyalko i in. 2006).

Ogólny schemat otrzymania zdalnej oceny LAI za pośrednictwem wegetacyjnych wskaźników opiera się na analizie regresji. Dlatego też, przeprowadzone (Turner i in. 1999) badanie na zdjęciach Landsat-5 wykazało, że wartości NDVI i LAI są dobrze skorelowane ze sobą, a otrzymany statystyczny związek może być wystarczająco precyzyjnie opisany za pomocą regresji liniowej.

Wraz z pojawieniem się hiperspektralnych danych satelitarnych zaistniała możliwość syntezy nowych wskaźników wegetacyjnych. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie bardziej szczegółowych informacji na temat reakcji roślin na promieniowanie optyczne. Sprzyja to zwiększeniu dokładności pomiarów LAI (Fernandes i in. 2004, Schlerf i in. 2004).

W ostatnich latach opracowano wiele metod zdalnego szacowania LAI opartych na wykorzystaniu wielospektralnych i hyperspektralnych zdjęć satelitarnych. Jednak w każdej z nich nieodłączne pojawiają się dwa słabe punkty: 1) większość wielospektralnych i hiperspektralnych zdjęć, na których koncentrują się znane metody szacowania LAI, mają stosunkowo niską rozdzielczość przestrzenną; 2) wszystkie obliczenia LAI opierają się na analizie sygnałów odbitych tylko przez górną warstwę roślinności, czyli nie uwzględniają objętości przestrzennej obiektów roślinnych.

Obecnie obserwowane trendy światowe zmierzające do wyeliminowania powyższych wad, i uzyskania cech ilościowych roślinności (w tym LAI), wskazują na coraz częstsze opieranie się na takich środkach teledetekcji jak skanowanie laserowe powierzchni Ziemi z samolotu albo z satelity (Leblanc i in. 2005, Measures 1992, Medvedev i in. 2007). LAI według lidarowych danych ocenia się albo drogą analizy statystycznej korony drzew (Morsdorf i in. 2006) lub metodą analizy regresji (Zhao i Popescu 2009).

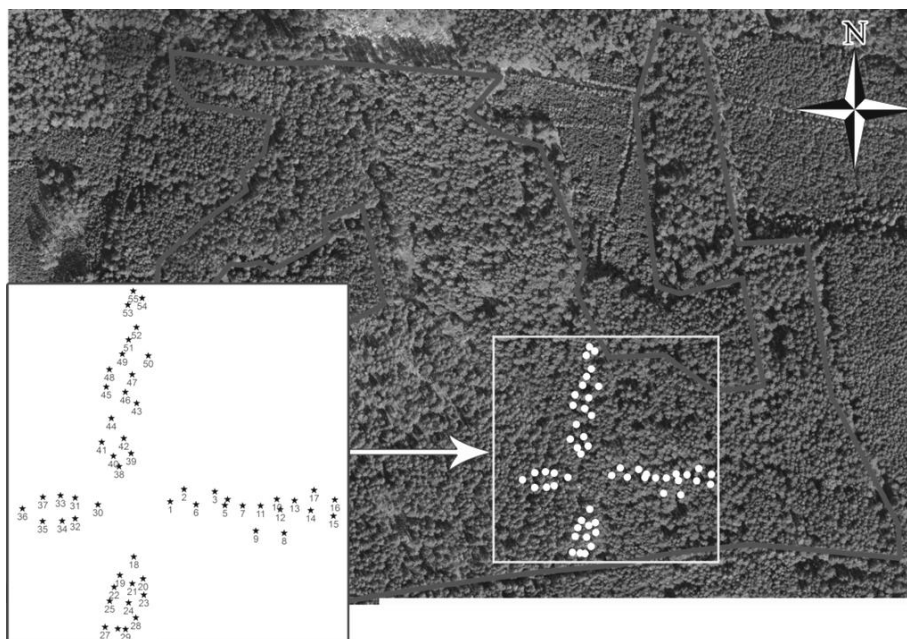
Należy zauważyć, że do tej pory nie udało się opracować uniwersalnej metody oceny wskaźnika LAI, którą można by stosować bezpośrednio do danych niezależnie od typu lidara. Ponadto, integralną częścią każdej technologii lidarowej, stosowanej w teledetekcji do wykrywania parametrów biofizycznych roślinności, jest przeprowadzenie referencyjnych pomiarów w terenie. Ze względu na te dwa

czynnikami rozwiązaniem praktycznie każdego zadania szacowania LAI na podstawie danych lidarowych wymaga dodatkowego opracowania naukowego i metodycznego wsparcia z uwzględnieniem specyfiki danych wejściowych, konkretnych właściwości badanych obiektów, warunków regionalnych itp.

Celem przedstawionych badań było opracowanie metody oceny wskaźnika LAI przy zastosowaniu lotniczych pomiarów lidarowych, a także przeprowadzenie eksperymentalnego testu dotyczącego jej dokładności i efektywności.

MATERIAŁ I METODY

Badania, dotyczące możliwości oceny indeksu powierzchni liści LAI według danych lotniczego skaningu lidarowego, przeprowadzone zostały na powierzchni około 25 ha na terenie leśnictwa Martew, nadleśnictwa Tuczno Województwa Zachodniopomorskiego w Polsce (współrzędne środka odcinka: E16°05'42" N53°11'38"). Na badanym obszarze dominują drzewostany sosnowe w różnym wieku (Chojnicki i in. 2010). Dla wyznaczonego obszaru (rys. 1) otrzymano dane lidarowe, zdjęcia hemisferyczne oraz zdjęcia lotnicze.



Rys. 1. Teren badań i punkty cyfrowych zdjęć hemisferycznych (CZH)

Fig. 1. Study area and test points of digital hemispherical photo (DHP)

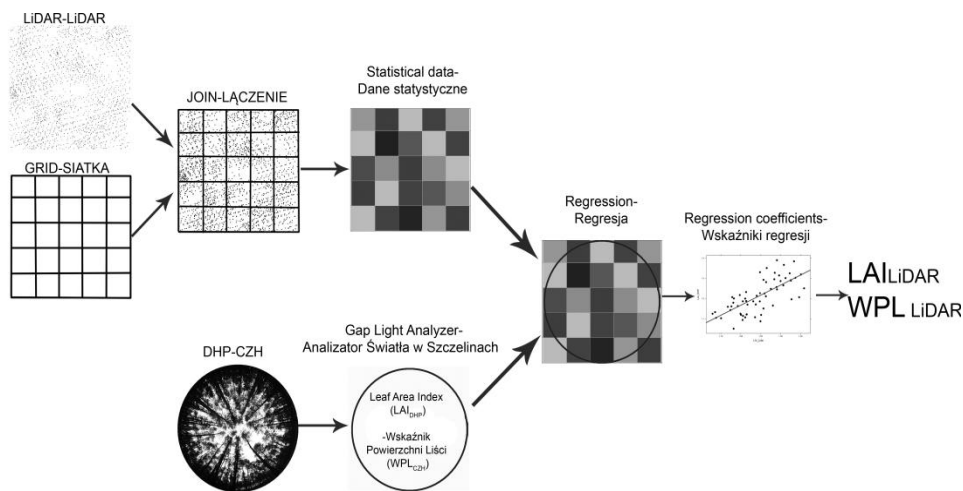
Dane lidarowe zostały uzyskane za pomocą laserowego skanera Optech ALTM z następującymi parametrami: długość fali 1,064 μm ; dokładność wysokościowa od 5 do 35 cm (w zależności od wysokości skanowania); gęstość punktów na ziemi około 40 na 1 m^2 ; dynamiczny zakres sygnału – 12 bit.

Zdjęcia DHP uzyskano stosując aparat Nikon D3000 z 10-megapikselową matrycą i obiektywem Fisheye-Nikkor "Rybie oko" 10.5mm f/2.8, który pozwala na uzyskanie obrazów spod drzewa o kącie 180°. W sumie wykorzystano 55 punktów fotografowania DHP (rys. 1), a każdy z nich miał określoną dokładną geopozycję. Dla uzyskania wymaganej orientacji w przestrzeni i stabilności w czasie fotografowania aparat fotograficzny umieszczano na statywie na wysokości 1,3 m nad powierzchnią ziemi. Wszystkie zdjęcia DHP zostały wykonane rano przed wschodem słońca, zgodnie z zaleceniami literaturowymi (Chianucci i Cutini 2012).

Zdjęcia lotnicze zostały wykorzystane w pracy w celu ułatwienia badań w terenie i określenia lokalizacji punktów pomiarowych.

WYNIKI I DYSKUSJA

Ocena LAI na podstawie danych lotniczych lidara została zrealizowana według schematu przedstawionego na rysunku 2 (rys. 2). Zgodnie ze schematem, cyfrowe przetwarzanie DHP i danych lidarowych dokonywano oddzielnie i niezależnie.



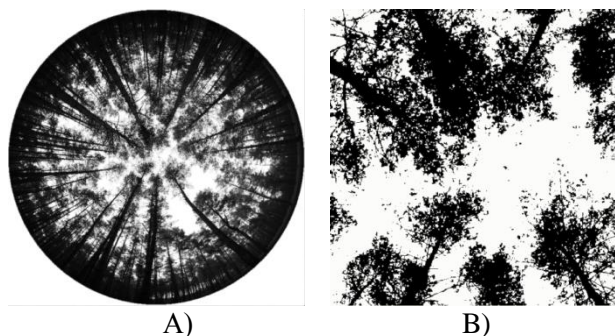
Rys. 2. Schemat oceny indeksu powierzchni liści za danymi lidara lotniczego
Fig. 2. Flowchart for Leaf Area Index assessment using LiDAR data

Obróbka danych DHP przeprowadzona została za pomocą programu Gap Light Analyzer (GLA). W tym programie każde zdjęcie DHP (ryc. 3A) zostało podzielone na trzy kanały, tworzące wspólnie obraz RGB (czerwony, zielony i niebieski), z których następnie wybierano kanał z największym stopniem informacji. W badaniu wybrano kanał niebieski, ponieważ jak wykazano w literaturze (Jonckheere i in. 2005, Leblanc i in. 2005) zapewnia on najbardziej wyraźne rozróżnienie między roślinnością, niebem i pikselami mieszanymi. Ponadto elementy fotosyntezujące (liście, igły) mają znacznie mniejsze odbicie i przepuszczalność właśnie w tej części spektrum (widok binarny pokazany na rys. 3B). Korzystając z tego obrazu, program GLA pozwolił na automatyczne uwidocznienie luk, ocenę ich powierzchni, przeprowadzenie innych niezbędnych obliczeń i na końcu oszacowanie LAI.

Obliczenia LAI wykonywano w programie GLA na dwa sposoby: 1) analizowano dystrybucje promieni w obrębie kąta przestrzennego $\pm 60^\circ$; 2) przeanalizowano dystrybucje promieni w obrębie kąta przestrzennego $\pm 75^\circ$. Wynik uzyskany pierwszym sposobem, oznaczony został w programie GLA jako LAI4, a wynik drugi – jako LAI5 (Frazer 1999).

W przeprowadzonym badaniu, wartość wskaźnika LAI ocenionego według danych lidarowych została obliczona jako średnia z tych dwóch pomiarów (w celu obniżenia możliwych błędów wskaźniki LAI_{DHP} wyliczane zostały poprzez uśrednienie dwóch otrzymanych ocen LAI4 i LAI5):

$$LAI_{DHP} = \frac{LAI4 + LAI5}{2} \quad (1)$$



Rys. 3. A) Fotografia cyfrowego zdjęcia hemisferycznego ; B) Fragment pełnego binarnego widoku w niebieskim zakresie

Fig. 3. A) Digital hemispherical photo; B) Fragment of full scale binary image in blue band

Proces przetwarzania danych lidarowych został zrealizowany za pomocą specjalistycznego oprogramowania TerraScan fińskiej firmy Terrasolid. Rozpoczyna się on od identyfikacji i filtrowania punktów należących do gleby (Gr). W czasie wykonywania tego zadania okazało się, że w prostych sytuacjach program TerraScan może to zrobić automatycznie, natomiast w sytuacji złożonej morfologii niezbędne było ręczne ustawienie niektórych parametrów (zwiększenie albo zmniejszenie odległości interpolacji punktów, kąta nachylenia terenu i innych).

Pozostałe punkty podzielono na dwie grupy, w zależności od wysokości lokalizacji: położone nad ziemią do wysokości 1,3 m włącznie, oraz te, które są powyżej określonej wysokości.

Kolejnym etapem przetwarzania dwóch wybranych warstw danych lidarowych było określenie zmiennych matematycznych (regresorów) do zbudowania równania regresji wielokrotnej (Seber i Lee 2003). W tym celu, dla obszaru badań została zbudowana siatka (grid) o oczku 1 m. Okazało się jednak, że w wielu przypadkach liczba punktów pomiarów laserowych w komórce tej wielkości, była mniejsza niż 10 punktów, co wpływało na dokładność uzyskanych wartości zmiennych. Z tego względu zdecydowano się zwiększyć rozmiar oczka siatki do 3 metrów. Po połączeniu siatki i danych lidarowych dla każdej komórki wyznaczono następujące metryczne i statystyczne parametry: gęstość i ilość odbitych impulsów, średnią wysokość współrzędnej z warstwy roślinności (Veg) odpowiednio dla każdej komórki, wysokość minimalną, wysokość maksymalną, odchylenie standardowe (stdv), współczynnik zmienności (CV); percentyl wysokości (5, 10, 25, 50, 75, 90, 95-ty).

W konstruowaniu funkcji regresji każdy z tych parametrów traktowany był jako regresor. Ponadto, w ocenie jakości regresora zastosowano także Laser Penetration Index – (LPI), który jest zdefiniowany jako (Barilotti i in. 2005):

$$LPI = \frac{Gr_{pulses}}{Gr_{pulses} + Veg_{pulses}}, \quad (2)$$

gdzie: Gr_{pulses} – gęstość punktów gleby; Veg_{pulses} – gęstość punktów wegetacyjnych.

Wymagane dane dotyczące gęstości punktów gleby i roślinności można uzyskać z wyników i wcześniejszych klasyfikacji zbiorów punktów, dlatego wskaźnik LPI również użyto w postaci zmiennej, do określenia wzoru regresji.

W dalszej części pracy wskaźnik LAI zostanie oceniony za pomocą danych lidarowych poprzez budowanie modelu regresji wielokrotnej (Seber i Lee 2003), w postaci:

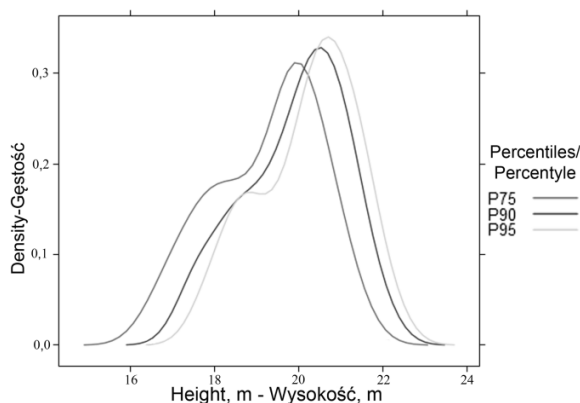
$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip}; \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

W modelu (3) pod y_i podstawiono odpowiednie oszacowanie wskaźnika powierzchni liści za danymi lidarowymi, tj. LAI_{LiDAR} ; x_1, x_2, \dots, x_p – zmienne niezależne (regresory); b_0, b_1, \dots, b_p – współczynniki regresji, p – liczba regresorów; n – liczba pomiarów; $n \gg p$.

Aby skonstruować równanie regresji wielokrotnej, konieczne jest rozwiązanie dwóch zadań: 1) wybór najlepszego zestawu regresorów spośród możliwych; 2) oszacowanie współczynników regresji.

Największe trudności związane były z pierwszym zadaniem, do rozwiązania którego zastosowano metodę kolejnych odrzuceń (Seber i Lee 2003). Obliczenie współczynników regresji przeprowadzono przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

W początkowej fazie metody kolejnych odrzuceń, w modelu regresji wielokrotnej, włączane są wszystkie możliwe regresory (liczba p maksymalna). Następnie, stosując test F-Fishera, ocenia się wpływ każdego regresora na zwiększenie dokładności obliczeń. Jeśli najmniejsza wartość kryterium Fishera jest mniejsza od uprzednio wybranej wartości krytycznej, wówczas zmienna ta jest usuwana z modelu (wartość p zmniejsza się o jeden). Odrzucenie jednej zmiennej oznacza faktyczną zmianę modelu. Kolejne obliczenia wykonuje się dla tego nowego zredukowanego modelu. Następnie wykonywane jest powtórne przeliczenie modelu i obliczoną wartość testu F porównuje się ponownie z wartością krytyczną, itd. Procedura tworzenia najlepszego zestawu regresorów kończy się wtedy, gdy najmniejsza otrzymana wartość kryterium, będzie większa niż krytyczna.



Rys. 4. Wykres zagęszczenia wartości percentyli
Fig. 4. Density distribution for percentiles

Analizę wszystkich zmiennych i wybór najbardziej informacyjnych regresorów w opisanym powyżej regułach wykonano za pomocą oprogramowania JMP SAS.

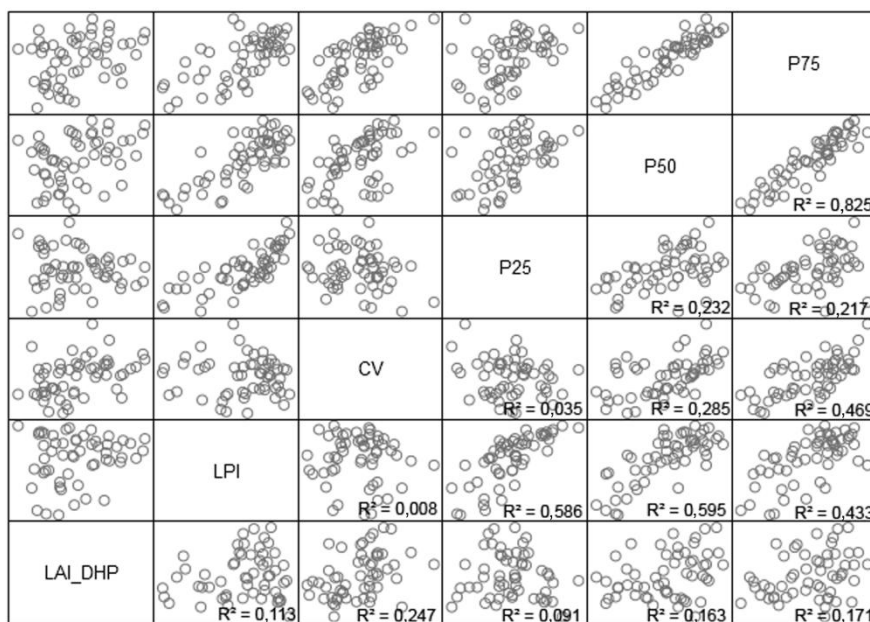
Po przeprowadzeniu analizy najbardziej informacyjnymi dla budowy równania regresji wielokrotnej były: CV (tj. stdev/min), LPI i percentyle P25, P50, P75, P90, P95. Jednak wartości ostatnich trzech percentyli P75, P90, P95 (rys. 4), prawie się pokrywają.

Zdecydowano, że do równania regresji wielokrotnej włączony zostanie tylko jeden z nich – P75, jako górny kwartyl.

Zestawienie diagramów rozproszenia wybranych regresorów i współczynnika determinacji przedstawiono w postaci macierzy blokowej (rys. 5). Inne regresory nie wykazały istotnej korelacji z LAI_{DHP} .

Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów oszacowano współczynniki regresyjne uzyskując równanie:

$$LAI_{LIDAR} = -1,14 + 3,31 \cdot LPI + 0,38 \cdot CV - 0,00766 \cdot P25 - 0,02 \cdot P50 - 0,14 \cdot P75. \quad (4)$$

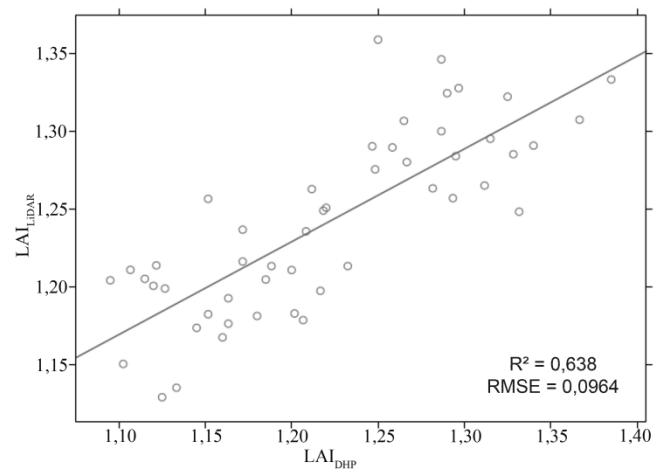


Rys. 5. Macierz-diagram korelacji pomiędzy wybranymi zmiennymi

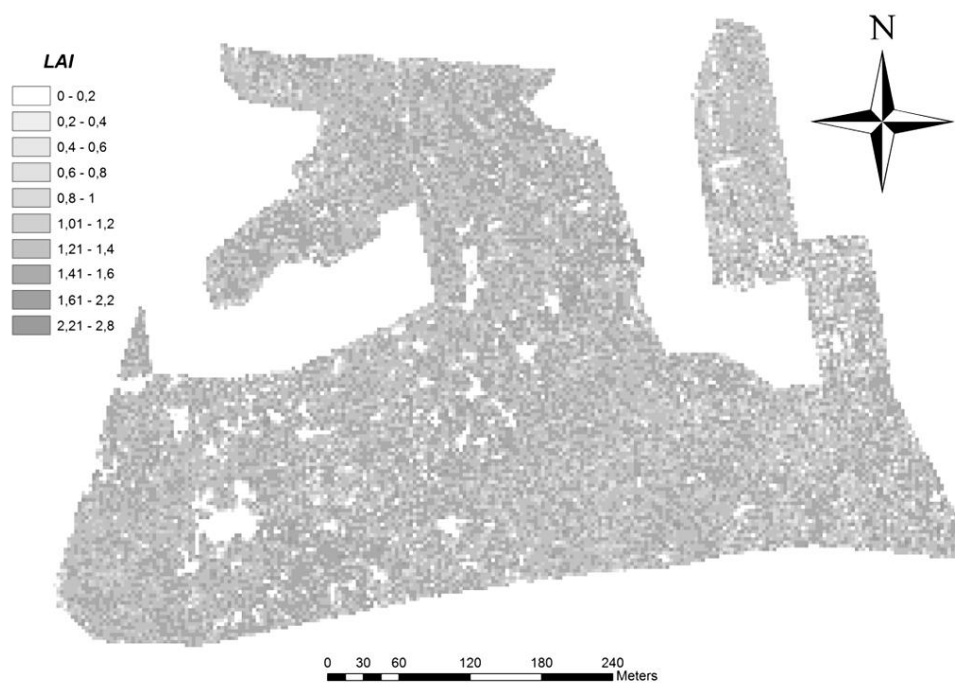
Fig. 5. Matrix diagram of correlations between chosen variables

Do oszacowania stopnia dopasowania został określony współczynnik determinacji ($R^2 = 0,638$) oraz średnie odchylenie kwadratowe współczynnika regresji dla jego rzeczywistej wartości ($RMSE = 0,096$). Generalnie (rys. 6) potwierdza tą ścisłą korelację pomiędzy LAI pochodzącymi z danych lidarowych, a fotografovaniem nieba przez korony drzew.

Na rysunku 7 (rys. 7) przedstawiono wyniki oceny LAI dla badanego obszaru przy użyciu uzyskanego modelu regresji w czasie pomiarów lidarowych. Jeżeli założymy, że znane są dane lidarowe dla różnych okresów czasowych, to porównanie wartości LAI z tych okresów czasowych stwarza możliwość oceny zmian w stanie roślinności oraz pozwala na opracowanie odpowiednich zaleceń.



Rys. 6. Regresja liniowa
Fig. 6. Linear Regression



Rys. 7. LAI na terenie badań
Fig. 7. LAI distribution for the study area

WNIOSKI

1. Zaproponowana została metoda zdalnego szacowania wskaźnika powierzchni liści, u podstaw której leży opracowany model regresji między wartościami wskaźnika LAI i danymi lotniczego skaningu lidarowego.

2. Otrzymane wyniki testowania proponowanej metody potwierdzają jej wydajność i wysoki potencjał użycia do oceny LAI roślinności na dużych obszarach.

3. Aktualnymi zagadnieniami do dalszych badań pozostaje: zwiększenie dokładności szacunków LAI z danych lidarowych, zapewnienie niezmienności ocen do przestrzennej skali badań, jak również zbadanie możliwości określenia na odległość innych wskaźników aktywności procesu fotosyntezy roślinnej w oparciu o dane lidarowe.

Podziękowanie.

Autorzy wyrażają podziękowanie Panom Andrzejowi Węglowi i Pawłowi Strzebińskiemu za udostępnienie danych w ramach projektu badawczego NN 309 014638 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Polski w latach 2010-2013.

PIŚMIENNICTWO

- Barilotti A., Turco S., Napolitano R., Bressan E., 2005. LiDAR technology for the study of biomass in forest ecosystems. 15th Meeting of the Italian Society of Ecology, Torino, Italy
- Breada N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, 54 (392), 2403-2417
Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- Chen J.M., Black T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 421-429
- Chen J.M., Cihlar J., 1995. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index. *Applied Optics*, 34 (27), 6211-6222
- Chen J.M., Rich P.M., Gower S.T., Norman J.M., Plummer S., 1997. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102(24) 29429-29443
- Chianucci F., Cutini A., 2012. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 5, 290-295
- Chojnicki B.H., Strzelinski P., Danielewska A., Baran M., 2010. Tree canopy leaf area index (LAI) measurements with the hemispherical photography at a Tuczno forest. *Acta Agrophysica*, 179, 89-101.
- Fernandes R., Miller J.R., Chen J.M., Rubinstein I.G., 2004. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 89, 200-216
- Frazer G.W., Canham C. D., Lertzman K.P., 1999. Gap Light Analyzer (GLA) version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Simon Fraser University,

- Garrigues S., Lacaze R., Baret F., Morisette J., Weiss J., Nickeson R., Fernandes S., Plummer N., Shabanov R., Myneni R., Knyazikhin Y., Yang W., 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 113, 20-28
- Hutchison B.A., Matt D.R., McMillen R.T., Gross L.J., Tajchman S.J., Norman J.M., 1986. The architecture of a deciduous forest canopy in eastern Tennessee. *Journal of Ecology*, 74, 635-646.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muys B., Copin P., Weiss M., Baret F., 2004. Review of methods for in-situ leaf area index determination. Part 1. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 19-35
- Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Coppin P., 2005. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 96-114.
- Kodar A., Kutsar R., Lang M., Lukk T., Nilson T. 2008. Leaf area index of forest canopies from optical measurements. *Baltic Forestry*, 14 (2), 185-194.
- Lakida P., Nilsson S., Shvidenko A., 1995. Estimation of Forest Phytomass for Selected Countries of the Former European USSR. WP. 33.
- Leblanc S., Chen J., Fernandes R., Deering D., Conley A., 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129, 187-207.
- Lyalko V.I., Popov M.O., Kostyuchenko Yu.V., 2006. *Multispectral Remote Sensing in Nature Management*. Naukova Dumka, Kyiv, 357 pp.
- Measures R.M., 1992. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. New York, 510.
- Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R., 2007. *Laser location - land and forest (in Russian)*. 2nd ed. Institut lesa im. V.N. Sukacheva SO RAN. 229.
- Morsdorf F., Kotz B., Meier E., Itten K., Allgower B., 2006. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment*, 104, 50-61.
- Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L., 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 2, 481-486.
- Popov M., Semko I., 2013. Evaluation of the characteristics of vegetation with the use of remote sensing (in Ukrainian). *Ekolohichna Bezpeka ta Pryrodokorystuvannya*, 12, 51-62.
- Schlerf M., Atzberger C., Vohland M., Buddenbaum H., Seeling S., Hill J., 2004. Derivation of forest leaf area index from multi- and hyperspectral remote sensing data. *EARSel eProceedings*. 405-413.
- Seber G.A.F., Lee A.J., 2003. *Linear Regression Analysis*. 2 ed. Wiley & Sons, 582.
- Turner D.P., Cohen W.B., Kennedy R.E., Fassnacht K.S., Briggs J.M., 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*. 70, 52-68.
- Watson D.J., 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. Variation in net assimilation rate and leaf areas between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41-76.
- Zhao K., Popescu S., 2009. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBECARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1628-1645.
- Zheng G., Moskal L.M., 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745.

METHOD FOR ASSESSING OF LEAF AREA INDEX USING LIDAR DATA

Mikhail Popov¹, Igor Semko¹, Ihor Kozak²

¹Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth National,
Academy of Sciences of Ukraine
Oles Honchar str., 55b, 01601, Kyiv, Ukraine
e-mail: casre@casre.kiev.ua

²Department of Landscape Ecology, Faculty of Mathematics, IT and Landscape Architecture,
John Paul II Catholic University of Lublin,
ul. Konstantynów 1H, 20-708 Lublin, Poland

Abstract. A remote sensing method for assessing LAI index using airborne lidar data is proposed. A calculation body of the proposed method is based on regression model which couples LAI value and lidar data derivatives. Multiple regression equation is constructed. The results of experimental investigation confirm the effectiveness and high accuracy of the proposed method. The paper presents a review of the contemporary approaches to the assessment of leaf area index (LAI) as one of most comprehensive and objective indicators of photosynthesis processes activity of vegetation. Methods for LAI in-situ assessing, its procedures and instrumental support are described in brief. It is emphasized that the main and absolute advantage of in-situ methods is the reliability of calculated LAI estimates. However, the application of in-situ methods is connected with significant problems when it is necessary to assess photosynthesis processes activity level for vegetation in cases of vast areas with time limitations. As the authors observe, for similar cases is more promising to use remote sensing techniques and technologies. Directions for further research to improve the precision of the method are outlined therewith.

Key words: vegetation, leaf area index, remote sensing assessment, airborne lidar data, multiple regression