

**WYBRANE ZDALNE METODY SZACOWANIA
BIOMASY ROŚLINNEJ W EKOSYSTEMACH LEŚNYCH
JAKO PODSTAWA
SYSTEMU RAPORTOWANIA BILANSU WĘGLA**

**SELECTED REMOTE SENSING METHODS
FOR BIOMASS ASSESSMENT
IN FOREST ECOSYSTEMS AS THE BASIS
FOR BALANCE REPORTING SYSTEMS**

**Paweł Strześliński¹, Agata Wencel¹, Tomasz Zawila-Niedźwiecki³,
Michał Zasada², Andrzej Jagodziński⁴, Marcin Chirrek¹**

¹Zakład Urządzania Lasu, Katedra Urządzania Lasu, Wydział Leśny, Akademia Rolnicza w Poznaniu

²Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Wydział Leśny, SGGW

³Wydział Leśny, Uniwersytet Nauk Stosowanych w Eberswalde (Niemcy)

⁴Pracownia Ekofizjografii, Instytut Dendrologii PAN w Kórniku

Słowa kluczowe: teledetekcja, skaniny laserowe, indeks powierzchni liściowej
Keywords: remote sensing, laser scanning, leaf area index LAI

Wstęp

Wzrastająca zawartość dwutlenku węgla w atmosferze Ziemi i przewidywane zmiany klimatu wywołały zainteresowanie badaniami zmierzającymi do sterowania ilością węgla magazynowanego w ekosystemach lądowych i wodnych. Rolę roślinności w procesie redukcji poziomu tego gazu podkreślają liczne międzynarodowe konwencje i umowy m.in. Ramowa Konwencja Klimatyczna ONZ (*United Nations Framework Convention on Climate Changes*, UNFCCC) i stanowiący jej uszczegółowienie, podpisany przez ponad 150 krajów w 1997 r., *Protokół Kyoto*. Zgodnie z artykułem 3.4 *Protokołu Kyoto* (Kyoto Protocol, 1998) poszczególne państwa mogą decydować o uznaniu zagospodarowanych lasów za magazyn dwutlenku węgla. W rezultacie konieczna jest coroczna inwentaryzacja i raportowanie ilości gazów szklarniowych, a państwa zobowiązane są do precyzyjnego określenia zasobów węgla. Zwiększanie lesistości i podwyższanie intensywności gospodarki leśnej uważane są za jedno z najbardziej efektywnych sposobów kompensowania wzrostu emisji CO₂ powodowanego rozwojem gospodarczym. Monitorowanie węgla wiązanego lub uwalnianego w rezultacie gospodarowania ekosystemami leśnymi oraz prognozowanie jego zmian w zależności od różnych scenariuszy postępowania jest w związku z tym bardzo ważne.

Polska dotychczas nie opracowała całościowej metody pozwalającej na określenie ilości węgla wiązanego przez ekosystemy leśne. Brakuje także wypróbowanych sposobów określania zmian ilości węgla magazynowanego przez las przy różnych wariantach gospodarowania. Spowodowało to uruchomienie przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w kwietniu 2007 roku szeroko zakrojonego projektu badawczego *Bilans węgla w biomasie drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski*, koordynowanego przez Katedrę Urządzenia Lasu AR w Poznaniu.

Celem projektu jest opracowanie równań allometrycznych oraz weryfikacja wzorów empirycznych i współczynników przeliczeniowych do określania ilości biomasy drzewnej w drzewostanach głównych gatunków lasotwórczych, jak również opracowanie metody określania ilości magazynowanego węgla w drzewostanach i kompleksach leśnych, a także określania zmian w akumulacji węgla i jej dynamiki wynikających z realizacji określonego sposobu gospodarowania.

Badania zostaną przeprowadzone dla 8 podstawowych gatunków lasotwórczych w Polsce (sosna, świerk, jodła, modrzew, dąb, buk, brzoza, olsza) oraz 12 gatunków podszytowych (jarząb, kruszyna, leszczyna, czeremcha zwyczajna, czeremcha amerykańska, bez czarny, dereń świdwa, wierzba szara, wierzba uszata, wierzba iwa, grab, jałowiec). Po wyborze ok. 300 powierzchni badawczych, reprezentujących różne klasy wieku i siedliska oraz znaczenie gospodarcze analizowanych gatunków drzew, rozpoczną się pomiary oraz zbieranie materiałów do dalszych analiz. Po zakończeniu prac terenowych i laboratoryjnych opracowane zostaną wzory empiryczne i współczynniki przeliczeniowe służące do określania biomasy drzew, krzewów, roślinności runa oraz węgla związanego w drzewostanach głównych gatunków lasotwórczych – głównie na podstawie precyzyjnych pomiarów lasu (pomiary bezpośrednie, naziemny skaning laserowy). Opracowane wzory użyte zostaną do oszacowania ilości węgla akumulowanego w biomasie badanych drzewostanów. Ponieważ inwentaryzacja prowadzona do celów planowania gospodarczego pozwala zazwyczaj na określenie tylko miąższości drzew, konieczne będzie uzupełnienie sumarycznej biomasy związanej przez ekosystem leśny o tę, która jest zawarta w gałęziach, igliwiu/liściach (lub aparacie asymilacyjnym – do wyboru) oraz korzeniach drzew, roślinności dna lasu, martwej leżaninie, podszytcie i glebie. Podjęta zostanie także próba określenia dynamiki zmian wiązania węgla w zależności od różnych założeń gospodarczych. Część informacji pochodzić będzie z dodatkowych pomiarów wykonanych na powierzchniach badawczych, część zaś opracowana zostanie na podstawie danych zawartych w literaturze.

Projekt badawczy będzie realizowany wspólnie przez zespoły z następujących jednostek: AR w Poznaniu, Instytut Dendrologii PAN w Kórniku, AR w Krakowie, SGGW w Warszawie, Politechniki Warszawskiej oraz Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Eberswalde (Niemcy).

Teledetekcja w badaniach bilansu węgla

Wykorzystanie narzędzi teledetekcyjnych w monitoringu biosfery w ostatnim dziesięcioleciu gwałtownie wzrosło (Lefsky, Cohen, 2003). O ile informacje o pokryciu powierzchni Ziemi oraz stanie biofizycznym roślinności mogą być już zdobywane na wiele różnych sposobów, w różnych skalach i z wykorzystaniem materiałów o zróżnicowanej rozdzielczości i złożoności, o tyle monitorowanie procesu krążenia węgla w przyrodzie pozostaje nadal wyzwaniem.

Turner i in. (2004) wymieniają następujące elementy, które opisane za pomocą teledetekcji mogą posłużyć do określania stanu i zmian zasobów węgla w ekosystemach leśnych: pokrycie terenu, wiek drzewostanów, indeks powierzchni liściowej (ang. LAI – *Leaf Area Index*), biomasa i wysokość drzewostanów. Liczba elementów, które mogłyby być wykorzystane w tego rodzaju badaniach, jest o wiele większa, ale większość autorów ogranicza się do biomasy uzupełniając ją dodatkowymi elementami, np. LAI. Również w przypadku opisywanego tematu badawczego narzędzia teledetekcyjne będą wykorzystane do określenia tych właśnie parametrów.

Szacowanie biomasy – lidar lotniczy

W przypadku wykorzystania danych z lidara lotniczego, biomasa jest najczęściej szacowana na podstawie informacji o wysokości drzew (Drake i in., 2003; Dubayah, Drake, 2000; Mette i in., 2003). Tradycyjne modele wykorzystywane do określania biomasy i miąższości wymagają jednak informacji o średnicy drzew, a ponieważ informację taką trudno jest bezpośrednio uzyskać w przypadku lidara lotniczego, najczęściej wykorzystuje się fakt, że parametr ten jest funkcją wysokości, a co za tym idzie może być szacowany na podstawie danych uzyskiwanych w ten sposób (Lim i in., 2003).

Metody szacowania biomasy na podstawie danych z lidara lotniczego opierają się zazwyczaj na zależnościach między poziomym rozmieszczeniem koron a powierzchnią ziemi (Blair, Hofton, 1999; Dubayah, Drake, 2000; Dubayah i in., 2000; Harding i in., 2001), a także na ekologicznych i biomechanicznych zależnościach między biomasa a strukturą poziomą koron (Oohata, Shinozaki, 1979; O'Neill, DeAngelis, 1981; Givnish, 1986; Franco, Kelly, 1998). Badania z wykorzystaniem lidara lotniczego w określaniu biomasy wykazały, że ta metoda daje dobre efekty w różnych typach środowiska leśnego (Lefsky i in., 1999a, 1999b, 2002; Magnussen i in., 1999; Drake i in., 2002; Nelson i in., 1988; Means i in., 1999).

Hese i in. (2004) oraz Drake i in. (2003) podkreślają jednak, że jednym z głównych ograniczeń lidara lotniczego jest to, że umożliwi on uzyskanie informacji tylko o strukturze poziomej lasu, podczas gdy badania pokazują, że istotne jest również określenie innych elementów, a przede wszystkim uzyskanie informacji o pionowej strukturze drzewostanu oraz fenologii czy typie lasu.

Szacowanie biomasy – lidar naziemny

Informacji, których nie da się uzyskać za pomocą lidara lotniczego, może dostarczyć skanowaniem naziemne. Pozwala ono na uzyskanie szczegółowych informacji o parametrach poszczególnych drzew, a także pionowej strukturze drzewostanu.

Aschoff i in. (2004) wymieniają trzy podstawowe typy danych otrzymywanych w wyniku zastosowania naziemnego skanera laserowego. Są to: obraz intensywności, obraz odległości oraz trójwymiarowy obraz powierzchni próbnej. Dane te umożliwiają określanie m.in.: lokalizacji pnia, gatunku, wysokości drzewa, pierśnicy, miąższości a także kąta ustawienia, liczby i grubości gałęzi, jakości strzały i właściwości korony (Chasmer i in., 2004; Watt, Donoghue, 2005; Aschoff i in., 2004; Pfeifer i in., 2004; Pfeifer, Winterhalder, 2004; Simon-

se i in., 2003; Thies, Spiecker, 2004; Thies i in., 2004). Poza opisem pojedynczych drzew skaning naziemny pozwala na uzyskanie informacji dotyczących całego drzewostanu, tj. zagęszczenia drzew, struktury pionowej drzewostanu czy LAI.

Przydatność wysokorozdzielczych zobrażeń z lasera naziemnego dla określania struktury drzewostanu, a przede wszystkim struktury koron (również w drzewostanach mieszanych, w kontekście konieczności szacowania i opisywania procesów zachodzących w drzewostanach, w tym również obiegu węgla) potwierdzili m.in. Henning i Radke (2006), a także Danson i in. (2006).

W ramach projektu *Bilans węgla ...* na wybranych powierzchniach wykonane zostaną zobrażenia za pomocą naziemnego skanera laserowego FARO LS 880 (<http://www.faro.com>). Zobrażenia te, w liczbie 3–4 na każdej wytypowanej powierzchni badawczej, posłużą do precyzyjnego określenia cech biometrycznych poszczególnych drzew i krzewów, także rosnących w warstwie podrostu, podszytu i dolnych pięter drzewostanu. Skaning zostanie uzupełniony cyfrowymi zdjęciami z wykorzystaniem obiektywu typu *rybie oko*, co pozwoli na uzupełnienie obrazów wygenerowanych w postaci chmur punktów o barwy rzeczywiste (fotorealistyczny model 3D).

Indeks powierzchni liściowej

Indeks powierzchni liściowej (wyrażony w m^2 liści/ m^2 powierzchni drzewostanu) będzie określany w ramach projektu *Bilans węgla ...* czterema metodami, tj. za pomocą:

- równań allometrycznych – przez określenie powierzchni igieł/liści każdego z drzew modelowych, a następnie opracowanie równań służących do obliczania LAI drzew na podstawie znajomości ich pierśnic,
- pomiarów instrumentalnych – z wykorzystaniem przyrządu LAI-2000 Plant Canopy Analyser (LI-COR Biosciences, Inc., Lincoln, Nebraska, USA; http://www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000/2000_intro.jsp),
- zdjęć hemisferycznych – z wykorzystaniem kamery cyfrowej, wyposażonej w obiektyw typu *rybie oko*, umożliwiający rejestrację obrazu w zakresie 180° ,
- zdjęć satelitarnych i lotniczych.

Pierwsza z wymienionych metod, czyli równania allometryczne, opiera się głównie na bezpośrednich pomiarach drzew. Pozostałe metody pomiarów LAI można zaliczyć do typowych metod zdalnych. Ich szerokie zastosowanie w omawianym projekcie pozwoli na porównanie narzędzi teledetekcyjnych i tradycyjnie stosowanych metod instrumentalnych.

LAI – pomiary instrumentalne

Instrumentalne pomiary LAI wykonywane są przy pomocy LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Metoda ta jest od wielu lat bardzo popularna w badaniach przyrodniczych (m.in. Chen, 1996; Bartelink, 1998; Kucharik i in., 1998a,b; Gower i in., 1999; Xu, Harrington, 1998; Hyer i in., 2004). Zaletą tych badań jest możliwość wykonania w krótkim czasie znacznej liczby pomiarów indeksu powierzchni liściowej przy użyciu niedestrukcyjnych metod opartych na pomiarach radiacyjnych. Wykorzystanie dwóch zestawów czujników, z których jeden umieszczony jest na przestrzeni otwartej, a drugi pod okapem drzew, pozwala na analizę względnej ilości światła docierającego do badanej warstwy drzewostanu. Pomiary

wykonane przy pomocy analizatora LAI-2000 pozwalają nie tylko na określanie warunków świetlnych, ale także i innych parametrów związanych ze strukturą zwarcia koron drzew, czy niższych warstw roślinności.

LAI – cyfrowe zdjęcia hemisferyczne

Bezpośrednim zastosowaniem cyfrowej fotografii hemisferycznej jest ocena stopnia ażurowości koron w drzewostanach oraz pomiar bezwzględnej ilości światła docierającej do dna lasu, a w konsekwencji również określenie indeksu powierzchni liściowej (Martens i in., 1993; Gower i in., 1999; Kucharik i in., 1998a, 1998b; Hyer i in., 2004). W tym celu najczęściej wykorzystuje się kamerę z obiektywem typu rybie oko (*fish-eye*), o kącie widzenia 180° (Chan i in., 1986; Becker i in., 1989; Wagner, 1994; Frazer i in., 1999; Englund i in., 2000; Inoue i in., 2002; Robakowski, 2003; Inoue i in., 2004; Megumi, 2004; Robakowski i in., 2004).

W opisywanym projekcie do wykonywania zdjęć hemisferycznych wykorzystywane będą dwa różne zestawy:

- aparat cyfrowy typu SLR (lustrzanka) – Canon EOS 20D (matryca 8 MP) z obiektywem Canon EF-S 18-55/3,5-5,6 oraz konwerterem typu *rybie oko* – Raynox DCR-CF 185PRO (<http://www.raynox.co.jp/english/dcr/dcrf185pro>),
- aparat cyfrowy typu SLR (lustrzanka) – Canon EOS 5D (matryca 12 MP) z obiektywem Sigma 8 mm f/3.5 DG EX FISH EYE.

Rynek oprogramowania, które pozwala na opracowywanie i analizę zdjęć hemisferycznych, jest bardzo wyspecjalizowany i oferuje zaledwie kilka pakietów. Są to (Strzeliński, 2006):

- CI-110 (<http://www.cid-inc.com>),
- Gap Light Analyzer (<http://www.ecostudies.org/gla>),
- HemiView and the Digital Plant Canopy Imager (<http://www.delta-t.co.uk>),
- RGBFisheye (<http://www.gifu-u.ac.jp/~ishidam/RGBFisheye02.htm>)
- WinSCANOPY (<http://www.regent.qc.ca>).

Zakładanym efektem analiz opartych na zdjęciach hemisferycznych jest określenie następujących elementów (Strzeliński, 2006):

- bezwzględnej ilości światła rejestrowanej na poziomach pomiarowych,
- struktury zwarcia koron,
- zmienności przestrzennej ulistnienia okapu drzewostanu,
- indeksu powierzchni liściowej,
- biomasy aparatu asymilacyjnego.

LAI – zdjęcia satelitarne

Zdjęcia satelitarne są wykorzystywane do określania indeksu powierzchni liściowej już od momentu udostępnienia danych z Landsat TM (m.in. Zawila-Niedźwiecki i in., 1993; Waring, Running, 1998; Manninen i in., 2005; Kalacska i in., 2005; Berterretche i in., 2005; Johansen, Phinn, 2006). W ramach projektu proponuje się określenie siły związku pomiędzy wskaźnikami roślinnymi obliczanymi na podstawie zdjęć satelitarnych a wskaźnikiem LAI, zmierzonym terenowo i z wykorzystaniem kamery hemisferycznej. Poszukiwane będą relacje pomiędzy LAI a wskaźnikami roślinności, szczególnie indeksami wegetacji: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) i EVI (*Enhanced Vegetation Index*), wyliczonymi ze

zdjęć satelitarnych. Do wyliczenia tych wskaźników potrzebne są takie zdjęcia, które rejestrują zakresy czerwieni i bliskiej podczerwieni. Dlatego też wydaje się zasadne przebadanie możliwości wykorzystania zdjęć wykonywanych przez satelity meteorologiczne NOAA, Terra-ASTER oraz Ikonos lub QuickBird. Zdjęcia NOAA charakteryzują się stosunkowo niską rozdzielczością terenową (wielkość piksela rzędu 1 km); zdjęcia Terra-ASTER o rozdzielczości terenowej 20 m wykonywane są w kilkunastu zakresach spektralnych. Natomiast zdjęcia pozyskiwane przez satelity wysokorozdzielcze dostarczają o wiele bardziej precyzyjnych danych, np. Ikonos charakteryzuje piksel jednometrowy w zakresie panchromatycznym i czterometrowy w kanałach spektralnych, a QuickBird – odpowiednio: 0,66 m i 2,44 m.

Zastosowanie danych gromadzonych przez wyżej wymienione satelity pozwoli na opracowanie alternatywnych metod określania wskaźników w sposób operacyjny, powtarzalny oraz obejmujący znaczne obszary, a jednocześnie uwzględni różne reżimy dokładności obrazowania.

W omawianym projekcie zakresem prac zaproponowano objąć:

- przetwarzanie i korekcje zdjęć,
- określanie wskaźników roślinności dla różnych typów lasu,
- obliczenie korelacji pomiędzy NDVI i EVI oraz LAI dla różnych typów lasu,
- obliczenie LAI z danych satelitarnych dla różnych typów lasu,
- porównanie wyników uzyskanych z poszczególnych zobrazowań satelitarnych.

Podsumowanie

Cennym elementem projektu badawczego *Bilans węgla w biomacie drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski* jest możliwość integracji i porównania wielu metod badawczych, stosowanych przez różne środowiska naukowo-badawcze. Oczekiwane jest także uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania:

- Jaki wpływ na dokładność szacowania biomasy drzew i drzewostanów oraz bilans węgla w drzewostanach ma indeks powierzchni liściowej obliczany na podstawie pomiarów bezpośrednich oraz instrumentalnych, za pomocą zdjęć hemisferycznych, zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz w oparciu o naziemny i lotniczy skaning laserowy?
- Jaki wpływ na dokładność szacowania biomasy drzew i drzewostanów oraz bilans węgla w drzewostanach mają indeksy wegetacji?
- Czy laserowy skaner naziemny pozwala na znaczne podniesienie dokładności i skrócenie czasu pomiaru drzew i drzewostanów oraz szacowanie biomasy roślinności dna lasu?

Zlokalizowanie poligonów badawczych na obszarach, gdzie zebranych zostanie odpowiednio dużo danych referencyjnych, pozwoli na zdalne szacowanie biomasy ze znanym błędem. Uzyskane wyniki powinny umożliwić oszacowanie biomasy drzewostanów oraz sekwestracji węgla w przeliczeniu na leśne zasoby Polski (z wykorzystaniem urzędniowych baz danych, baz SILP oraz wyników innych prowadzonych dotychczas prac i badań). Jest to niezwykle istotne dla zbadania bilansu węgla w ekosystemach leśnych naszego kraju, ale także z punktu widzenia raportowania dwutlenku węgla pochłanianego przez polskie lasy.

Literatura

- Aschoff T., Thies M., Spiecker H., 2004: Describing forest stands using terrestrial laser-scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 35(5), pp. 237-241.
- Bartelink H.H., 1998: Radiation interception by forest trees: a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. *Ecological Modelling* 105, pp. 213-225.
- Becker P.F., Erhart D.W., Smith A.P., 1989: Analysis of forest light environments. I. Computerized estimation of solar radiation from hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology* 44, pp. 217-232.
- Berterretche M., Hudak A.T., Cohen W.B., Maierberger T.K., Gower S.T., Dungan J., 2005: Comparison of regression and geostatistical methods for mapping Leaf Area Index (LAI) with Landsat ETM+ data over a boreal forest. *Remote Sensing of Environment* 96 (1), pp. 49-61.
- Blair J.B., Hofton M.A., 1999: Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data. *Geophysical Research Letters*, 26, pp. 2509-2512.
- Chan S.S., McCreight M.C., Walstad J.D., Spies T.A., 1986: Evaluating forest cover with computerized analysis of fisheye photographs. *Forest Science* 32, pp. 1085-1091.
- Chasmer L., Hopkinson C., Treitz P., 2004: Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based lidar data for red pine and mixed deciduous forest plots. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (8/W2), pp. 66-70.
- Chen J.M., 1996: Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 80, pp. 135-163.
- Danson F.M., Hetherington D., Morsdorf F., Koetz B., Allgower B., 2006. Three-dimensional forest canopy structure from terrestrial laser scanning. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry 14th-15th Feb. 2006 Vienna – Session 2b.
- Drake J.B., Dubayah R.O., Clark D.B., Knox R.G., Blair J.B., Hofton M.A., Chazdon R.L., Weishampel J.F., Prince S., 2002: Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment* 79, pp. 305-319.
- Drake J.B., Knox R.G., Dubayah R.O., Clark D.B., Condit R., Blair J.B., Hofton M., 2003: Above-ground biomass estimation in closed canopy Neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. *Global Ecology & Biogeography*. 12, pp. 147-159.
- Dubayah R., Drake J.B., 2000: Lidar remote sensing for forestry applications. *Journal of Forestry*. 98, pp. 44-46.
- Dubayah R., Knox R., Hofton M., Blair J.B., Drake, J., 2000: Land surface characterization using LIDAR remote sensing. [In:] Hill M. and Aspinall R. (eds.). *Spatial Information for Land Use Management*. International Publishers Direct, Singapore. <http://www.geog.umd.edu/vcl/pubs/chapter.pdf>
- Englund S.R., O'Brien J.J., Clark D.B., 2000: Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densitometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research* 30(12), pp. 1999-2005.
- Franco M., Kelly C.K., 1998: The interspecific mass-density relationship and plant geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 95, pp. 7830-7835.
- Frazer G.W., Canham C.D., Lertzman K.P., 1999: Gap Light Analyzer (GLA), vers. 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Burnaby, British Columbia: Simon Fraser Univ. and Millbrook, NY: Institute of Ecosystem Studies.
- Givnish T.J., 1986: Biomechanical constraints on self-thinning in plant populations. *Journal of Theoretical Biology*. 119, pp. 139-146.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M., 1999: Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing and Environment*, 70, pp. 29-51.
- Harding D.J., Lefsky M.A., Parker G.G., Blair J.B., 2001: Laser altimeter canopy height profiles: methods and validation for closed canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*. 76, pp. 283-297.
- Henning J.G., Radtke P.J., 2006: Ground-based Laser Imaging for Assessing Three Dimensional Forest Canopy Structure. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 72(12), pp. 1349-1358.

- Hese S., Schmullius C., Dubayah R., Lucht W., Barnsley M., 2004: The Earth Observation Mission Carbon-3D – a Synergetic Multi-sensor Approach to Global Biomass Mapping for an Improved Understanding of the CO₂ Balance. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 35 (8/W2), pp. 301-306.
- Hyer E.J., Goetz S.J., 2004: Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*. 122 (3-4), pp. 157-174.
- Inoue A., Yamamoto K., Mizoue, N., Kawahara Y., 2002: Estimation of relative illuminance using digital hemispherical photography. *Journal of Forest Planning* 8, pp. 67-70.
- Inoue A., Yamamoto K., Mizoue, N., Kawahara Y., 2004: Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 126 (1-2), pp. 89-97.
- Johansen K., Phinn S., 2006: Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using IKONOS and landsat ETM plus data in Australian tropical savannahs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(1), pp. 71-80.
- Kalacska M., Sanchez-Azofeifa A., Caelli T., Rivard B., Boerlage B., 2005: Estimating leaf area index from satellite imagery using Bayesian networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (8), pp. 1866-1873.
- Kucharik C.J., Norman J.M., Gower S.T., 1998a: Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, pp. 69-88.
- Kucharik C.J., Norman J.M., Gower S.T., 1998b: Measurements of leaf orientation, light distribution and sunlit leaf area in a boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91, pp. 127-148.
- Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change. New York, USA, 1998.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Acker S.A., Parker G.G., Spies T.A., Harding D., 1999a: Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir-Western Hemlock Forests. *Remote Sensing of the Environment*. 70, pp. 339-361.
- Lefsky M.A., Harding D., Cohen W.B., Parker G.G., Shugart H.H., 1999b: Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of the Environment*. 67, pp. 83-98.
- Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D., 2002: Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*. 52(1), pp. 19-30.
- Lefsky, M.A., Cohen W.B., 2003: Selection of remotely sensed data. [In:] Wulder M.A, Franklin S.E. (Eds.). *Methods and Applications for Remote Sensing: Concepts and Case Studies*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, pp. 13-46.
- Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B., Flood M. 2003. Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography*. 27 (1), pp. 88-106.
- Magnussen S., Eggermont P., LaRicca V.N., 1999: Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Science*. 45, pp. 407-422.
- Manninen T., Stenberg P., Rautiainen M., Voipio P., Smolander H., 2005: Leaf area index estimation of boreal forest using ENVISAT ASAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (11), pp. 2627-2635.
- Martens S.N., Ustin S.L., Rousseau R.A., 1993: Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology and Management* 61, pp. 91-108.
- Means J.E., Acker S.A., Harding D.J., Blair J.B., Lefsky M.A., Cohen W.B., Harmon M.E., McKee W.A., 1999: Use of largefootprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment* 67, pp. 298-308.
- Megumi I., 2004: Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (11), pp. 2208-2216.
- Mette T., Papanthassiou K.P., Hajnsek I., Zimmermann R., 2003: Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry. *Proceedings of POLinSAR 2003*, Frascati, Italy, January 14-16, 2003.
- Nelson R., Krabill W., Tonelli J., 1988: Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 24, pp. 247-267.

- O'Neill R.V., DeAngelis D.L., 1981: Comparative productivity and biomass relations of forest ecosystems. Dynamic properties of forest ecosystems [In:] Reichle D.E. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, pp. 411-449.
- Oohata S., Shinozaki K., 1979: A statistical model of plant form – Further analysis of the pipe model theory. *Japanese Journal of Ecology* 29, pp. 323-335.
- Pfeifer N., Gorte B., Winterhalder D., 2004: Automatic reconstruction of single trees from terrestrial laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35 (B), pp. 114-119.
- Pfeifer N., Winterhalder D., 2004: Modelling of tree cross sections from terrestrial laser scanning data with free-form curves. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2), pp. 76-81.
- Robakowski P., 2003. Retrospektywna analiza przyrostów sadzonek jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) rosnących pod okapem różnych gatunków drzew w Karkonoskim Parku Narodowym. *Sylvan* 1, s. 41-50.
- Robakowski P., Wyka T., Samardakiewicz S., Kierkowski D., 2004: Growth, photosynthesis, and needle structure of silver fir (*Abies alba* Mill.) seedlings under different canopies. *Forestry Ecology and Management* 201 (2/3), s. 211-227.
- Simonse M., Aschoff T., Spiecker H., Thies M., 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Umeå, Sweden, pp. 251- 257.
- Strzeliński P., 2006. Zastosowanie zdjęć hemisferycznych w badaniach ekosystemów leśnych. *Roczniki Geomatyki*, Tom IV, Zeszyt 2, s. 103-112, PTIP Warszawa.
- Thies M., Pfeifer N., Winterhalder D., Gorte B.G.H., 2004: Three-Dimensional Reconstruction of Stems for Assessment of Taper, Sweep and Lean Based on Laser Scanning of Standing Trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, pp. 571-581.
- Thies M., Spiecker H., 2004: Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (8/W2), pp. 192-197.
- Turner D.P., Ollinger S.V., Kimball J.S., 2004: Integrating Remote Sensing and Ecosystem Process Models for Landscape to Regional Scale Analysis of the Carbon Cycle. *BioScience* 54, pp. 573-584.
- Wagner S., 1994: Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosystem*, Band. 123, pp. 1-169.
- Waring R.H., Running S.W., 1998: *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*, Academic Press, New York.
- Watt P.J., Donoghue D.N.M., 2005: Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 26 (7), pp. 1437-1446.
- Xu M., Harrington T.B., 1998: Foliage biomass distribution of loblolly pine as affected by tree dominance, crown size and stand characteristics. *Canadian Journal of Forest Research* 28, pp. 887-892.
- Zawiła-Niedźwiecki T., Gruszczyńska M., Strzelecki P., 1993: Wskaźnik LAI w teledetekcyjnej ocenie kondycji lasu. *Sylvan* 137(6), s. 55-60.

Źródła internetowe (aktualne na dzień 30.07.2007 r.)

- <http://www.cid-inc.com>
<http://www.delta-t.co.uk>
<http://www.ecostudies.org/gla>
<http://www.faro.com>
<http://www.gifu-u.ac.jp/~ishidam/RGBFisheye02.htm>
http://www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000/2000_intro.jsp
<http://www.raynox.co.jp/english/dcr/dcref185pro>
<http://www.regent.qc.ca>

Summary

Effects of increasing CO₂ content in the atmosphere of Earth have been widely discussed for a long time and found their expression in a form of the “Kyoto Protocol”. The document shows various ways of reducing the CO₂ content. Forest management is listed as one of such possibilities. Thus, the important issue arises to monitor carbon amount accumulated or released as a result of forest ecosystem management as well as to predict its changes depending on various scenarios. The importance of this problem persuaded the General Directorate of State Forests to fund a research project entitled „The Carbon balance in biomass of the major forest forming species in Poland”. The goal of the project is to elaborate and validate allometric equations and expansion factors for determining the biomass of forest stands. Methods to assess amount of carbon accumulated in forest ecosystems as well as methods of detecting changes in carbon accumulation and dynamics resulting from various ways of forest management were also to be elaborated.

The first stage of the research, planned for years 2007–2010, is to be performed on about 300 sample plots representing different age classes and sites for 8 major forest tree species and 12 species of shrubs. Empirical equations and expansion factors for determining biomass of trees, shrubs, forest floor, and carbon sequestered in stands will be worked out based on direct and indirect measurements of various forest attributes. The valuable element of the project is a possibility of data integration and comparison of various research methods (satellite and airborne imagery, airborne and terrestrial laser scanning, hemispheric images).

As a result of the project, also answers to the following questions are expected: What is the influence of LAI, determined with the use of various methods (hemispheric images, airborne and satellite imagery, and airborne and terrestrial laser scanning), on the accuracy of tree biomass and stand carbon balance assessment? What is the role of vegetation indices on tree biomass assessment accuracy? Does the terrestrial laser scanning significantly increase accuracy and precision, and shorten time of tree, stand and forest floor plants’ measurements and their biomass assessment?

mgr inż. Marcin Chirrek, doktorant
w Zakładzie Urządzania Lasu, AR w Poznaniu
chirrek@au.poznan.pl

dr inż. Paweł Strzeliński
strzelin@au.poznan.pl

mgr inż. Agata Wencel, doktorantka
w Zakładzie Urządzania Lasu, AR w Poznaniu
agata.wencel@au.poznan.pl
<http://www.au.poznan.pl/kul/>

dr inż. Michał Zasada
Michal.Zasada@wl.sggw.pl
<http://wl.sggw.waw.pl>

prof. dr hab. inż. Tomasz Zawila-Niedźwiecki
tzawila@fh-eberswalde.de
<http://www.fh-eberswalde.de/zawila>
tel. +49 3334 65478

dr inż. Andrzej M. Jagodziński
amj@man.poznan.pl
<http://www.idpan.poznan.pl>