

POMIARY WYMIANY DWUTLENKU WĘGLA ORAZ BIOMASY W EKOSYSTEMACH LEŚNYCH – STACJA POMIAROWA W TUCZNIE¹

**Bogdan H. Chojnicki, Marek Urbaniak, Alina Danielewska,
Paweł Strzeleński, Janusz Olejnik**

Streszczenie

Badania ekosystemów leśnych są niezbędne do oceny ich wpływu na globalny bilans CO₂. Prowadzone są już w wielu krajach europejskich takich, jak Niemcy, Finlandia czy Czechy. Również w Polsce uruchamiana jest pierwsza stacja pomiarowa, na której prowadzone są pomiary wymiany gazów i ciepła między atmosferą i lasem oraz pomiary biomasy. Ulokowana jest ona na terenie nadleśnictwa Tuczo. Do oceny wielkości strumienia netto dwutlenku węgla ekosystemów leśnych stosowana jest powszechnie metoda kowariancji wirów. Wymaga ona zastosowania skomplikowanych i wyrafinowanych urządzeń pomiarowych. Pomiar wielkości biomasy nadziemnej, a tym samym ilości ułożonego w lesie CO₂ może być uzupełnieniem wyników uzyskanych dzięki zastosowaniu metody kowariancji wirów. Oszacowanie biomasy leśnej może być wykonywane zarówno metodami tradycyjnymi, jak i przy pomocy nowoczesnych technik teledetekcyjnych. Badania te wykonywane są m.in. przy pomocy nowatorskiej techniki naziemnego skaningu laserowego, uzupełnionej laserowym skanieniem lotniczym, wysokorozdzielczą cyfrową ortofotomapą i zdjęciami hemisferycznymi.

Słowa kluczowe: strumienie CO₂, sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L., technika kowariancji wirów, skaniny naziemny, skaniny lotniczy

MEASUREMENT OF CARBON DIOXIDE EXCHANGE AND BIOMASS IN FOREST ECOSYSTEMS - MEASURING STATION IN TUCZNO

Abstract

Studies of forest ecosystems are essential to assess their impact on the global balance of CO₂. They are already held in many European countries such as Germany, Finland and Czech Republic. Also in Poland, the first measuring station started, where they carry out measurements of gas and heat exchange between the atmosphere and the forest and biomass measurements. It is located in Tuczo Forest District. To assess the magnitude of net carbon flux of forest ecosystems the eddy covariance method is commonly used. It requires quite complicated and sophisticated measuring equipment. Measurement of aboveground biomass, and thus the quantity of CO₂ deposited under the forest can be complementary to the results obtained by the eddy covariance method. Estimation of forest biomass may be carried out both traditional and modern techniques using remote sensing. These tests are carried out, inter alia, using innovative techniques of terrestrial laser scanning, supplemented by airborne laser scanning, high resolution digital photos and orthophotomap and hemispherical photos.

Keywords: streams of CO₂, pine *Pinus sylvestris* L., eddy covariance technique, terrestrial scanning, airborne scanning

¹ Badania sfinansowane przez Dyрекcyję Generalną Lasów Państwowych

Wprowadzenie

Bilans obiegu węgla w ekosystemie leśnym składa się głównie z takich elementów jak: strumień CO_2 z atmosfery pochłaniany w procesie fotosyntezy (asymilacja) i strumień uwalniany do niej przez las (respiracja). Strumień netto CO_2 jest sumą tych dwóch strumienia. Las może być uważany jako pochłaniacz węgla atmosferycznego kiedy intensywność procesu asymilacji przewyższa wielkość emisji związanej z respiracją. Poziom złożoności bilansu węgla zależy od rozpatrywanej skali czasowej i przestrzennej.

CO_2 wraz z CH_4 i N_2O jest uważany za główny składnik cyklu biochemicznego w ekosystemie leśnym (Hansen i Lacis 1990). W ostatnich latach zaobserwowano istotny wzrost produktywności lasu i jako główne powody tego zjawiska wymieniane są wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze, wzrost dostępności azotu oraz globalne ocieplenie. Ponieważ lasy europejskie są generalnie w młodym wieku dlatego ciągle zwiększają swoją zdolność do pochłaniania i magazynowania węgla (Nabuurs i in. 2003). Dla poszczególnych krajów europejskich określona została indywidualna zdolność lasów do magazynowania węgla na jednostkę powierzchni w ciągu roku. Najwyższą wartość odnotowano dla Słowenii $142.5 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$, natomiast najniższą dla Grecji oraz Albanii $5.2 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$. Indywidualna zdolność lasów Polski została oszacowana na $32 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ (Janssens i in. 2005).

Średnio szacuje się, że lasy europejskie akumulują 124 g C m^{-2} z atmosfery rocznie. Ponad 70% z podanej ilości ulokowane jest w biomase nadziemnej, reszta przypada na węgiel zmagazynowany w glebie (Liski i in. 2000, 2002; Nabuurs i in. 2001). Ilość węgla zmagazynowana w ekosystemach leśnych jest relatywnie duża w porównaniu z całkowitą emisją CO_2 wywołaną działalnością człowieka, dlatego badania nad dynamiką oraz wielkością wymiany węgla pomiędzy ekosystemami a atmosferą są ważnym elementem wiedzy o środowisku w kontekście zachodzących zmian klimatycznych.

W ciągu ostatniej dekady badania nad wymianą CO_2 prowadzone są w skali globalnej z wykorzystaniem takich sieci pomiarowych jak Ameriflux, Canadaflex, CarboEurope. Składają się one głównie z wież pomiarowych zlokalizowanych w kompleksach leśnych, na których zainstalowane są systemy pomiarowe oparte o technikę kowariancji wirów (Aubinet i in. 2000). Pierwsza w Polsce wieża pomiarowa tego typu została zbudowana 2007 roku. Uruchomienie systemu kowariancji wirów na szczycie wieży było pierwszym etapem realizacji projektu badawczego, w którym współpracują: Katedra Agrometeorologii Uniw. Przyr. w Poznaniu oraz DGLP. Wspomniana wcześniej wieża pomiarowa zlokalizowana jest w Nadleśnictwie Tuczo, ok. 120 km na północny wschód od Poznania. Obecnie na jej szczycie wykonuje się głównie pomiary wymiany CO_2 , H_2O oraz masy i energii pomiędzy ekosystemem leśnym a atmosferą. Równocześnie realizowany jest projekt dotyczący przyrostu biomasy głównych gatunków lasotwórczych w Polsce. Jest on efektem współpracy Katedra Urządzania Lasu Uniw. Przyr. w Poznaniu z DGLP. Innowacyjna technika 3 wymiarowego skanowania laserowego została zastosowana do oceny wielkości naziemnej biomasy a tym samym sekwestracji węgla przez główne gatunki drzew w Polsce.

Opis miejsca pomiarowego

Stacja badawcza zlokalizowana jest w Nadleśnictwie Tuczo (północno-zachodnia część Polski, $53^\circ 11' \text{ N}$, $16^\circ 5' \text{ E}$). 54-letni drzewostan na powierzchni, którego umieszczona została wieża pomiarowa składa się w 99% sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) i 1% domieszki brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* ROTH). Powyższy skład gatunkowy jest zbliżony do typowego dla większej części nizinnych lasów Polski gdzie średni wiek drzew wynosi ok. 60 lat. Średnia pierśnica drzew wynosi ok. 21 cm podczas gdy ich wysokość to ok. 20 m. Średni roczny opad i temperatura powietrza wynoszą odpowiednio 570 mm i 7.6° C . Powyższe charakterystyki

meteorologiczne są podobne do wartości średnich notowanych w Polsce które wynoszą odpowiednio 600 mm opad i 10°C temperatura. Zachodni kierunek wiatru jest przeważającym w Tucznie, zaś na obszarze Polski przeważają wiatry północne i północno zachodnie. Długość okresu wegetacyjnego wynosi 220 dni. W podszycie głównymi gatunkami są buk zwyczajny *Fagus sylvatica* L. oraz grab zwyczajny *Carpinus betulus* L.. Gatunek gleby, na której rośnie las to bielica – zgodnie z klasyfikacją FAO.

Metodologia

Na stacji badawczej w Tucznie wykorzystywanych jest kilka technik pomiarowych. Zastosowane instrumenty badawcze dostarczają informacji na podstawie, których możliwa jest ocena intensywności procesów wybranych gazów oraz ciepła między powierzchnią lasu a atmosferą oraz przyrostu biomasy leśnej. Zastosowane podczas badań techniki można podzielić na trzy grupy.

Skaning naziemny oraz laserowy

W celu uzyskania precyzyjnych pomiarów wybranych parametrów drzew oraz odwzorowania mikrorzeźby terenu wykonano naziemny skaning laserowy. Do tego celu wykorzystano urządzenie FARO Laser Scanner LS HE880 (Faro, Lake Mary, Florida, USA) Skaning wykonano w dniach 27-28 sierpnia 2008 oraz 24-26 września 2008 r., łącznie na 71 punktach. Punkty zlokalizowano na ok. 100 m transektach, skierowanych od wieży w kierunkach: N, S, E, W. Lokalizację punktów określono przy pomocy odbiornika GPS Trimble, GeoExplorer XT CE), mierząc min. 750 epok na każdym punkcie (ryc. 1). Skaning wykonywano z rozdzielczością ¼ (pliki o wielkości ok. 150 MB).

W celu pozyskania danych wysokościowych oraz utworzenia ortofotomapy terenu, w dniu 2 września 2008 r. wykonano lotniczy skaning laserowy oraz wysokorozdzielcze cyfrowe zdjęcia lotnicze. Obok zbudowania numerycznego modelu terenu dane są wykorzystywane w celu oszacowania biomasy i innych cech biometrycznych drzew. Lotniczy skaning laserowy wykonano za pomocą skanera Riegl LMS-Q560 (Riegl, Horn, Austria) przy założeniu gęstości skanowania min 4 pkt/m². Zdjęcia lotnicze wykonano kamerą cyfrową DigiCAM H39 (IGI mbH Ingenieur-Gesellschaft fuer Interfaces, Kreutzbühl, Germany) z obiektywem 50 mm, w kanałach RGB, z rozdzielczością przestrzenną (terenowa wielkość piksela) 9 cm.

Po przetworzeniu dokładność materiałów wynosi nie mniej niż:

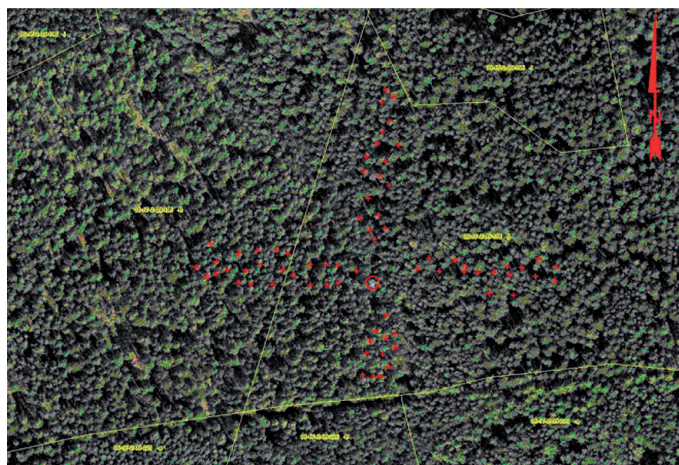
1. pozioma (x, y) – dla ortofotomapy ±0,25 m,
2. wysokościowa (h) – dla skanowania ±0,20 m.

Zdjęcia hemisferyczne

Na wszystkich punktach, na których wykonywano naziemny skaning laserowy sfotografowano korony drzew z wykorzystaniem metody cyfrowych zdjęć hemisferycznych. Na każdym punkcie wykonano min. 3 zdjęcia. Do wykonywania zdjęć hemisferycznych wykorzystano następujący zestaw: aparat cyfrowy typu SLR („lustrzanka”) – Canon EOS 5D (matryca 12 MP) z obiektywem Sigma 8 mm f/3.5 DG EX FISH EYE. Do analizy zdjęć hemisferycznych wykorzystano oprogramowanie Gap Light Analyzer.

Podstawowym celem analizy zdjęć hemisferycznych było określenie następujących parametrów:

- bezwzględna ilość światła bezpośredniego i rozproszonego,
- struktura zwarcia koron (ażurowość),
- indeks powierzchni liściowej (*ang. Leaf Area Index*),
- zmienność przestrzenna ulistnienia okapu drzewostanu⁷,
- biomasa aparatu asymilacyjnego.



Ryc. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych wokół wieży, na których wykonano naziemny skaningu laserowego i zdjęcia hemisferyczne – na tle ortofotomapy

Fig. 1. Location of sampling points around the tower, on which terrestrial laser scanning and hemispheric photos were performed – orthophotomap in the background

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” (*ang. fish-eye*), o kącie widzenia 180o (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 efekcie analiz opartych na zdjęciach hemisferycznych spodziewane jest określenie szeregu parametrów charakteryzujących strukturę koron drzew (Strzeliński 2006).

Szacowanie biomasy

Do celów niniejszego opracowania wykorzystano tradycyjnie wykonywane naziemne pomiary biomasy drzew. Oparte są one o pomiary pierśnicy (średnica mierzona na wysokości 130 cm – DBH) oraz o pomiary wysokości drzew (H). Na podstawie tych parametrów z tablic (przyjętych do stosowania w drzewostanach sosnowych w Polsce) odczytuje się zasobność w m³/ha. Dane te gromadzone są bazach Systemu Informatycznego Lasów Państwowych. System ten funkcjonuje na poziomie każdego nadleśnictwa w Polsce.

Pomiary mikrometeorologiczne

Technika kowariancji wirów jest standardową metodą do pomiaru wymiany masy i energii między ekosystemami leśnym a atmosferą. Nad lasem Tucznie, także zastosowano system kowariancji wirów, składa się on z dwóch instrumentów pomiarowych: analizator gazowy z otwartą ścieżką pomiarową IRGA Li-7500 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA) oraz asymetryczny anemometr ultradźwiękowy CSAT3 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Oba urządzenia wykonują pomiary z częstotliwością 20 Hz. Dodatkowo gęstość strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktyw-

nego mierzona jest przy pomocy czujnika Quantum SKP 215 (Skye, UK). Oba urządzenia oraz czujnik podłączone są do dataloggera CR 5000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA), który zajmuje się przetwarzaniem, gromadzeniem oraz transmisją danych do lokalnych komputerów. Te maszyny liczące odpowiedzialne długoterminowe przechowywanie danych nieprzetworzonych oraz za transmisję wyników średnich oraz parametrów pracy systemu do komputera bazowego który znajduje się w Katedrze Agrometeorologii. Pozyskane dane zbierane są i magazynowane na komputerach znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie wieży.

System kowariancyjny umieszczony jest na 4m maszcie, który przytwierdzony jest do szczytu 34m wieży pomiarowej. System zasilania składa się z dwóch podwójnych zestawów akumulatorów połączonych szeregowo (napięcie generowane przez pojedynczy zestaw wynosi 24V). Akumulatory odpowiadają za zasilanie całego systemu dostarczając energię przez całą dobę oraz w przypadku przerw w dostawie prądu z sieci publicznej. System w opisanej formie pracuje nieprzerwanie od stycznia 2008 roku.

Wstępne wyniki badań

Współczynnik ulistowienia (LAI) na stacji pomiarowej w Tucznie

W drzewostanach objętych pomiarami przy pomocy zdjęć hemisferycznych, wartość współczynnika powierzchni liściowej (LAI) waha się w granicach od 0,96 do 1,50, przyjmując wartości średnie – odpowiednio – dla LAI 4 ring: 1,16 oraz dla LAI 5 ring: 1,25 (tab. 1). Ponieważ dla drzewostanów sosnowych rosnących na terenie Polski praktycznie nie ma danych porównawczych, to wyniki należy odnieść do pomiarów wykonywanych za pomocą LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Li-Cor, Lincoln, NE, USA). Porównanie to wykazuje jednak, że wartości LAI oszacowane na podstawie zdjęć hemisferycznych mogą być poważnie zaniżone (średnio od ok. 30 do ok. 45%) w porównaniu do wyników uzyskanych za pomocą LAI-2000. Zależność pomiędzy tymi metodami pomiarowymi zastosowanymi dla drzewostanów sosnowych przedstawia ryc. 2.

Struktura zwarcia koron drzew [%] jest to procent ilości otwartego nieba widziany z poziomu pod koronami drzew. LAI na 4 kręgu jest efektywną wartością współczynnika w przedziale kątowym widzenia od 0 do 60 stopni (Stenberg i in. 1994). LAI na kręgu 5 odpowiada wartości współczynnika odpowiadającemu kątowi od 0 do 75 stopni (Welles i Norman 1991). Światło bezpośrednie opisuje udział promieniowania słonecznego jakie dociera do powierzchni dna lasu przez korony drzew. Światło rozproszone to udział promieniowania rozproszonego.

Szacowanie biomasy

Do celów niniejszego opracowania wykorzystano tradycyjnie wykonywane naziemne szacunki biomasy drzew, które uzyskano w oparciu wykonane pomiary pierśnicy (średnica mierzona na wysokości 130 cm – DBH) oraz wysokości drzew (H). Na podstawie uzyskanych wartości tych parametrów oszacowano się zasobność [$m^3 \cdot ha^{-1}$] wykorzystując powszechnie przyjęte w Polsce tablice. Dane tego typu gromadzone są bazach Systemu Informatycznego Lasów Państwowych i funkcjonuje on na poziomie każdego nadleśnictwa w Polsce.

Strumienie CO₂

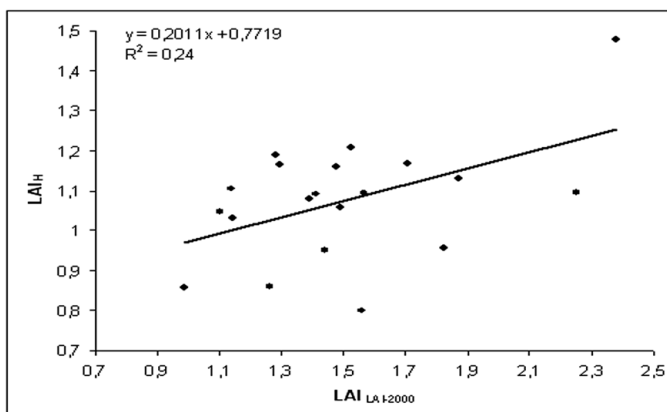
Produkcja ekosystemu netto (*ang. Net Ecosystem Production NEP*) stanowi różnicę pomiędzy oddychaniem ekosystemu leśnego (*ang. respiration*) a Produkcją Ekosystemu Brutto (*ang. Gross Ecosystem Production GEP*). Wartości dodatnie NEP wskazują na przewagę procesów pochłaniania nad emisji CO₂ przez las natomiast wartości ujemne odwrotnie. Średnie dobowe wartości NEP zmierzone w 2008 r. zawierają się w przedziale -50 to 315 CO₂ kg·ha⁻¹. Wzrostowy trend NEP wy-

stępował w okresie od marca do maja natomiast w miesiącach od czerwca do października trend był spadkowy. Dobowe wartości NEP w okresie od maja do czerwca nie ulegały wyraźnym zmianom w czasie. Najwyższą wartość NEP zaobserwowano w kwietniu natomiast najniższą w styczniu (ryc. 3). Obie wartości zdecydowanie różnią się sąsiednich wyników pomiarów, jednakże nie ma jednoznacznego powodu aby powyższe dane wykluczyć z całej serii pomiarowej.

Tab. 1. Podstawowe parametry zdjęć hemisferycznych

Table 1. Basic parameters of hemispheric photos

parametr	liczba obserwacji	średnia	max	min	odchyl. stand.
Ażurowość koron drzew [%]	212	27,70	31,71	23,70	1,57
LAI krąg 4	212	1,16	1,34	0,96	0,07
LAI krąg 5	212	1,25	1,50	1,02	0,11
Światło bezpośrednie [%]	212	38,19	49,61	29,81	4,18
Światło rozproszone [%]	212	39,70	45,47	35,25	1,88

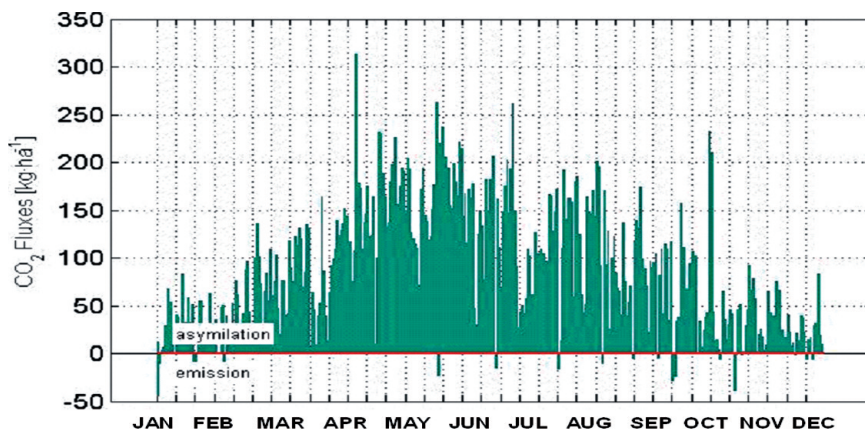


Ryc. 2. Zależność między wartościami współczynników powierzchni liściowej obliczonym w oparciu o pomiary przy użyciu LAI-2000 PCA ($LAI_{LAI-2000}$) oraz zdjęć hemisferycznych (LAI_H). Pomiary wykonano w 2006 r., w 20 drzewostanach sosnowych (w wieku od 28 do 107 lat) na terenie Nadleśnictwa Milicz. Do obliczeń wykorzystano dane z ok. 540 zdjęć hemisferycznych oraz z ok. 1200 pomiarów LAI-2000 (źródło: Strzeliński i Jagodziński, 2009)

Fig. 2. Relationship between the values of leaf area ratios calculated based on measurements using the LAI-2000 PCA and hemispheric photos

Wartości GEP obliczone na podstawie pomierzonych wartości NEP w Tucznie zależą od wartości gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (ang. Photosynthetical Photon Flux Density – PPFD). Wynika to z faktu, iż ilość dostępnej energii promienistej bezpośrednio warunkuje na intensywność procesu fotosyntezy, jednakże takie czynniki jak temperatura powietrza, dostępność wody czy gatunek oraz wiek drzewostanu nie mogą być pominięte ze względu na złożoność ekosystemu leśnego (Black et al. 1996, Pilegaard et al. 2001, Carrara et al. 2003). Otrzymane dane posłużyły do parametryzacji zależności pomiędzy GEP a PPFD dla poszczególnych

miesiący w 2008 r. Do opisu zależności zdecydowano się użyć równania Michaelisa-Menthena a współczynniki funkcji dla poszczególnych miesięcy zostały uzyskane przy pomocy metody Monte Carlo (ryc. 4). Uzyskane równania wykorzystane zostały do procedur wypełniania dziur w niekompletnych seriach pomiarowych.



Ryc. 3. Roczny przebieg średnich dobowych wartości NEP zmierzonych w ekosystemie leśnym w Tucznie w roku 2008

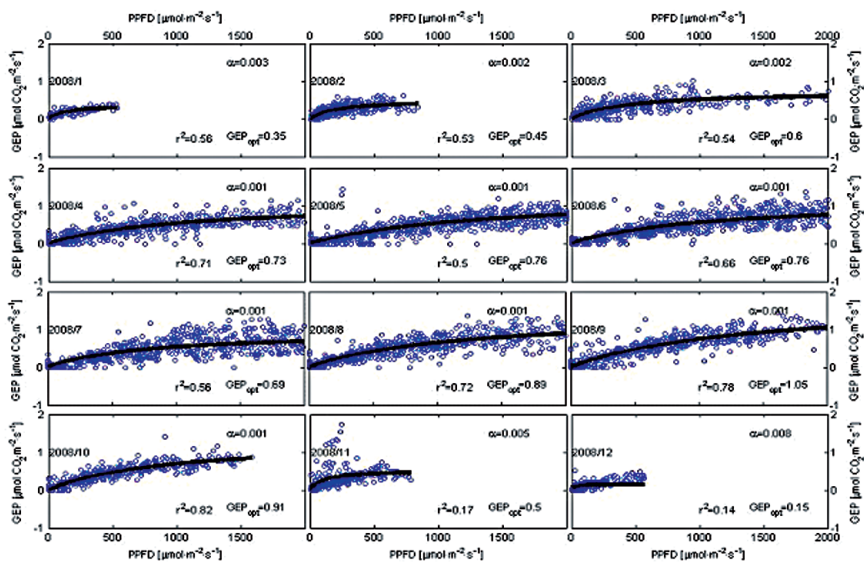
Fig. 3. The annual run of average daily values of NEP measured in forest ecosystem in Tuczno in 2008

Intensywność pochłaniania CO_2 przez badany 54-letni drzewostan sosnowy uzależniona jest od gęstości strumienia wielkości promieniowania i przy PFD równej $500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ średnia produkcja ekosystemu brutto w marcu, październiku i sierpniu wynosi odpowiednio 0,6; 0,91; i 0,89 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ryc. 4). Od początku prowadzenia pomiarów do końca 2008 r. badany drzewostan pochłoniął zasymilował ok. 30 ton dwutlenku węgla na hektar (ryc.5). Zanotowana wielkość jest porównywalna z danymi opublikowanymi w literaturze fachowej (Aubinet et al. 2001, Doloman et al. 2002). Roczna dynamika produkcji ekosystemu netto jest również porównywalna z danymi literaturowymi (Anthoni et al. 1999, Amiro et al. 2006, Hirano et al. 2003, 2007).

Wnioski i podsumowanie

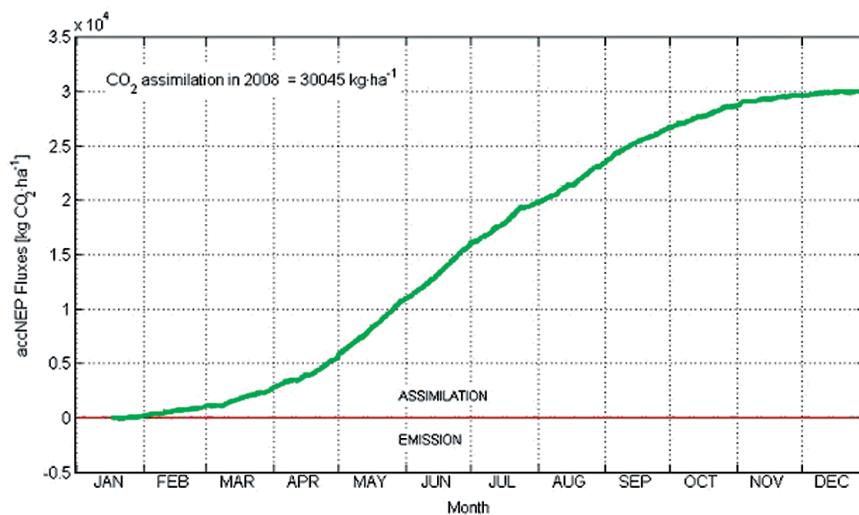
Pierwsza w Polsce wieża pomiarowa, gdzie zastosowano technikę kowariancji wirów otwiera nowy rozdział badań nad wymiana masy i energii w tego rodzaju ekosystemach w Polsce. Dobowe wartości produkcji ekosystemu brutto zawierają się w przedziale od -50 do 315 kg CO_2 na hektar w 2008 r. Z tego powodu las w Tucznie może być uważany za silny pochłaniacz dwutlenku węgla, który w ciągu 2008 r. zasymilował ok. 30 ton CO_2 na hektar. Otrzymane wartości NEP mogą być jednak silnie obciążone niedokładnościami związanymi ze zjawiskiem magazynowania CO_2 w pokrywie roślinnej poniżej zainstalowanego systemu (ang. storage) oraz występowaniem zjawiska adwekcji ponad koronami drzew.

W związku z powyższym konieczna jest wnikliwa analiza pozyskanych danych oraz dalsza rozbudowa systemu pomiarowego. Tak aby w pełni opisać poszczególne elementy składowe procesu



Ryc. 4. Zależność pomiędzy promieniowaniem fotosyntetycznie aktywnym (PPFD) a produkcją ekosystemu brutto (GEP) określona dla poszczególnych miesięcy 2008 r.

Fig. 4. Relationship between photosynthetically active radiation (PPFD) and gross ecosystem production (GEP) set out for each month of 2008



Ryc. 5. Krzywa kumulacyjna produkcji ekosystemu netto (NEE) oszacowana dla drzewostanu sosnowego w Tuczno w roku 2008

Fig. 5. Cumulative curve of net ecosystem production (NEE) estimated for pine in Tuczno in 2008

wymiany masy i energii w tak skomplikowanym ekosystemie jakim jest las. Skaning naziemny oraz lotniczy stanowią jako techniki pełnić rolę uzupełniającą i kontrolną dla pomiarów kowariancyjnych.

Na terenie lasu w Tucznie zostały zastosowane najnowsze techniki badawcze pozwalające na ocenę wymiany masy i energii oraz biomasy ekosystemów leśnych na najwyższym światowym poziomie. Dalsze użytkowanie już zastosowanego tam sprzętu oraz niezbędna rozbudowa systemu pozwolą na szczegółowe badania procesów wymiany w ekosystemach sosnowych w warunkach polskich.

Literatura

- Amiro, B.D, Barr, A.G., Black, T.A., Iwashita, H., Kljun, N., McCaughey, J.H., Morgenstern, K., Murayama, S., Nescic, Z., Orchansky, A.L. & Saigusa, N. 2006. Carbon, energy and water fluxes at mature and disturbed forest sites, Saskatchewan, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 136: 237–251.
- Anthoni, P.M., Law, B.E. & Unsworth, M.H. 1999. Carbon and water vapour exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology* 95: 151-168.
- Aubinet, M., Chermaine, B., Vandenhaute, M., Longdoz, B., Yernaux, M. & Laitat, E. 2001. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology* 108: 293-315.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, Ch., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R. & Vesala T. 2000. Estimates of annual net carbon and water exchange of forest: the EUROFLUX methodology. *Advances in ecological research*. 30: 113-173.
- 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: 217-232.
- Black, T.A., Den Hartog, G., Neumann, H.H., Blanken, P.D, Yang, P.C., Russell, C., Nescic, Z., Lee, X., Chen, S.G., Staebler, R. & Novak M.D. 1996. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology* 2: 219-229.
- Carrara, A., Kowalski, A.S., Neiryneck, J., Janssens, I.A., Curiel Yuste, J. & Ceulemans, R. 2003. Net ecosystem CO₂ exchange of mixed forest in Belgium over 5 years. *Agricultural and Forest Meteorology* 119: 209-227.
- 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: 1085-1091.
- Dolman, A.J., Moors, E.J. & Elbers, J.A. 2002. The carbon uptake of a mid latitude pine forest growing on sandy soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 111: 157-170.
- 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: 1999-2005.
- 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 University and Millbrook, NY: Institute of Ecosystem Studies.
- 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: 29-51.
- Hansen, J.E. & Laciš A.A. 1990. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change. *Nature* 346: 713-719.
- Hirano, T., Hirata, R., Fujinuma, Y., Saigusa, N., Yamamoto, S., Harazono, Y., Takada, M., Inukai, K. & Inoue, G. 2003. CO₂ and water vapour exchange of a larch forest in northern Japan. *Tellus* 55B: 244-257.
- Hirata, R., Hirano, T., Saigusa, N., Fujinuma, Y., Inukai, K., Kitamori, Y., Takahashi, Y. & Yamamoto, S. 2007. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange of a temperate larch forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 147:110-124.

- 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): 157-174.
- Inoue, A., Yamamoto, K., Mizoue, N., Kawahara, Y. 2002. Estimation of relative illuminance using digital hemispherical photography. *Journal of Forest Planning* 8: 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: 89-97.
- Janssens, I. A., Freibauer, A., Schlamadinger, B., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A.J., Heimann, M., Nabuurs, G.J., Smith, P., Valentini, R. & Schulze E.D. 2005. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. *Biogeosciences* 2: 15-26.
- 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: 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: 127-148.
- Liski, J., Karjalainen, T., Pussinen, A., Nabuurs, G.-J. & Kauppi, P. 2000. Trees as carbon sinks and sources in the European Union. *Env. Sci. Pol.* 3: 91-97.
- Liski, J., Perruchoud, D. & Karjalainen, T. 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils of western Europe. *For. Ecol. Manage.* 169: 159-175.
- Martens, S.N., Ustin, S.L., Rousseau, R.A. 1993. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis. *Forest Ecology Management* 61: 91-108.
- Nabuurs, G.J., Pussinen, A., Liski, J., Karjalainen, T. 2001. Upscaling based on forest inventory data and EFIS-CEN. In: Mohren, G.M.J., Kramer K. (Eds.), Long term effects of climate change on carbon budgets of forests in Europe. *Alterra rapport* 194. Alterra, Green World Research, Wageningen. Pp. 220-234.
- Nabuurs, G.J., Schelhaas, M.J., Mohren, G.M.J. & Field, C.B. 2003. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink; 1950–1999. *Glob. Change Biol.* 9: 152-160.
- Prentice IC, Farquhar GD, Fasham MJR, Goulden ML, Heimann M, Jaramillo VJ, et al. 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, et al., eds). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 183-237.
- Sławski, M. 2000. Możliwość zastosowania pomiarów wskaźnika powierzchni liści (LAI) w monitoringu środowiska leśnego. *Sylwan* 1: 109-115.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., Flower-Ellis, J. 1994. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands. *Tree Physiology* 14: 981-995.
- Strzeliński, P. 2006. Zastosowanie zdjęć hemisferycznych w badaniach ekosystemów leśnych. *Roczniki Geomatyki* 4: 103-112.
- Strzeliński, P., Jagodziński, A. Zdjęcia hemisferyczne. (In:) Zawila-Niedzwiecki, T., Zasada, M. (eds.). *Techniki geomatyczne w inwentaryzacji lasu – przykłady zastosowań praktycznych* (red.). Wydawnictwo SGGW Warszawa. (in press)
- Wagner, S. 1994. Strahlungsschatzung in Waldern durch hemisphärische Fotos. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme* 123: 1-169.
- Welles, J.M., Norman, J.M. 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal* 83: 818-825.

**Bogdan H. Chojnicki¹⁾, Marek Urbaniak¹⁾, Alina Danielewska¹⁾
Paweł Strzeliński²⁾, Janusz Olejnik¹⁾**

¹⁾ Katedra Agrometeorologii, ²⁾ Katedra Urządzenia Lasu,
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu