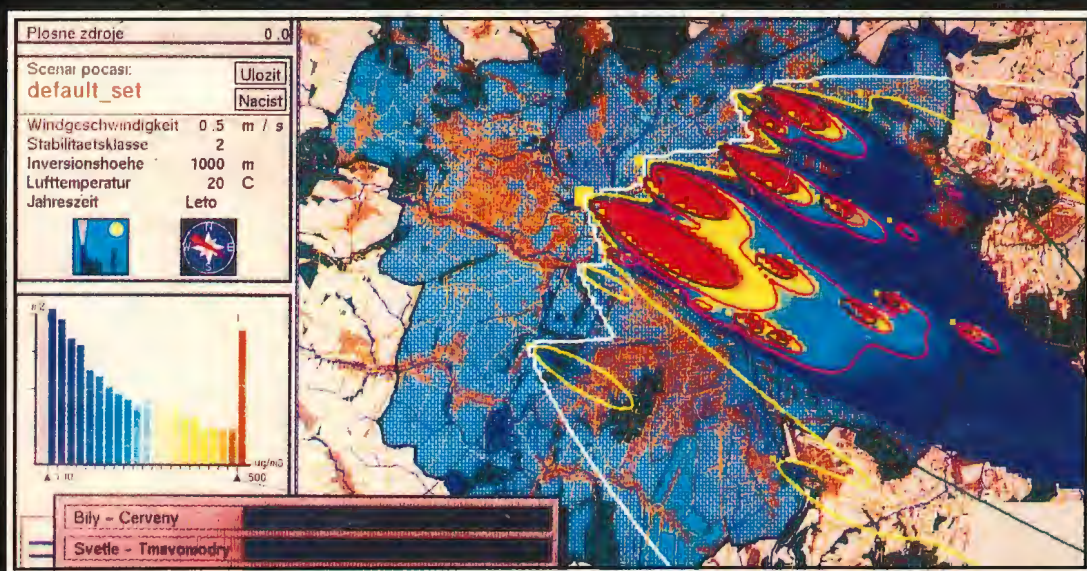


\* Polski Zespół ds. Współpracy z IIASA \*  
\* Instytut Badań Systemowych PAN \*

# ANALIZA SYSTEMOWA I JEJ ZASTOSOWANIA



INTERDYSCYPLINARNOSC \* DEMOGRAFIA \* PRZEKSZTALCENIA  
GOSPODARCZE \* SRODOWISKO \* LASY \* ENERGETYKA \*  
ZASOBY WODNE \* METODY I TECHNIKI SYSTEMOWE

*Materiały z konferencji "Dni Międzynarodowego Instytutu  
Stosowanej Analizy Systemowej"*

*Warszawa, Pałac Staszica, 20-21 kwietnia 1993*

**Redaktor**  
**JAN W. OWSIŃSKI**

\* Polski Zespół ds. Współpracy z IIASA \*  
\* Instytut Badań Systemowych PAN \*

---

---

# ANALIZA SYSTEMOWA I JEJ ZASTOSOWANIA

*Materiały z konferencji "Dni Międzynarodowego Instytutu  
Stosowanej Analizy Systemowej"*  
*Warszawa, Pałac Staszica, 20-21 kwietnia 1993*

**Redaktor**  
**JAN W. OWSIŃSKI**

Warszawa, grudzień 1993

**Niniejsza publikacja została wydana dzięki dofinansowaniu  
przyznanemu przez Komitet Badań Naukowych**

**© Polska Akademia Nauk**

**ISBN 83 - 85847 - 25 - 1**

*Na okładce wykorzystano fragment postaci ekranu z jednego  
z systemów oprogramowania przeznaczonych do celów  
przestrzennej analizy środowiskowej, opracowanego w ramach projektu  
IIASA - ZAAWANSOWANYCH ZASTOSOWAN KOMPUTEROWYCH  
we współpracy z zespołem z IBS PAN w składzie:  
P.Holnicki, A.Katuszko i A.Żochowski.*

42859

**Skład i opracowanie tekstu:  
Dział Wydawniczy Instytutu Badań Systemowych PAN**

**Druk i oprawa: ZWP SYNPRESS, Łomianki, ul. Łąkowa 17  
tel./fax 511-745**

**OSZACOWANIE BILANSU CO<sub>2</sub> EKOSYSTEMÓW  
LEŚNYCH POLSKI  
PORÓWNANIE METOD "STATYSTYCZNEJ"  
I "PRZEPLYWU WĘGLA" \***

**Wojciech Galiński\* & Manfred Küppers♦**

*\*Instytut Badawczy Leśnictwa  
Zakład Ekologii i Ochrony Środowiska*

*♦Technische Hochschule Darmstadt  
Institut für Botanik*

**1. WSTĘP**

Stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze wzrosło o około 30% w ciągu dwóch ostatnich wieków (Houghton et al., 1992; IPCC, 1990; Raynaud et al., 1993). Głównymi przyczynami tego wzrostu są spalanie paliw kopalnych i zmiany w użytkowaniu gruntów, a szczególnie wylesienia (Houghton i Skole, 1990). Lasy są ważnym elementem ekosystemów lądowych, a biomasa leśna zawiera więcej niż 80% węgla zawartego w roślinach lądowych.

\* Artykuł ten, jakkolwiek o charakterze bardziej przyczynkowym niż pozostałe pozycje zawarte w tomie, stanowi istotny wkład do rozważań podjętych w artykułach Nakićewiça, Mareckiego i Szujeckiego (przyp. red.)

Gleby leśne zawierają więcej niż 70% węgla znajdującego się w wszystkich glebach świata (Post et al., 1982; Olson et al., 1983). Zatem bilans węgla (CO<sub>2</sub>) ekosystemów leśnych stanowi istotny element globalnego bilansu tego pierwiastka.

Polska jest krajem średniej wielkości (powierzchnia  $312.5 \cdot 10^3$  km<sup>2</sup> w tym powierzchni leśnej  $86.7 \cdot 10^3$  km<sup>2</sup>) położonym głównie w pasie dolin środkowo-europejskich. Zatem powierzchnia niżowych siedlisk leśnych wynosi aż 89.1% ogółu powierzchni leśnej kraju. Przeważającym typem siedliskowym lasu jest "bór mieszany świeży" (30.2% powierzchni leśnej), a choć siedliska borowe zajmują ogółem 63.4% powierzchni leśnej, to lasy liściaste zajmują jedynie 20.8% tej powierzchni, gdyż część siedlisk lasowych zajmują drzewostany iglaste (Anonim, 1989).

Istnieje wiele dowodów, że drzewostany strefy umiarkowanej stanowią silny układ absorpcyjny ("sink") dla węgla (Sedjo, 1992; Tans et al., 1990). Zatem, oszacowanie ilości węgla trwale wiązane przez ekosystemy leśne w Polsce stało się konieczne dla poprawnego wykonania bilansu absorpcji i emisji gazów szklarniowych dla całego kraju (Radwański, Skowroński i Twarowski, bez daty). W niniejszej pracy zaproponowano dwie zupełnie niezależne metody szacowania absorpcji węgla (w postaci CO<sub>2</sub>) umożliwiające określenie w przybliżeniu zakresu rozrzutu wyników bilansu węgla w ekosystemach leśnych Polski.

## **2. ZAŁOŻENIA I TEORIA**

Przyjmuje się, że ekosystemy leśne znajdują się w stanie równowagowym w ciągu jednego roku o ile utrzymywana jest stabilna gospodarka leśna i nie występują poważne katastrofy ekologiczne o czasie trwania znacznie krótszym niż jeden rok (Kolchugina i Vinston, 1993a,b; Swedish Environmental Protection Agency, 1991; Eriksson, 1991; Apps et al., 1991; Isaev et al., 1993). Sytuacja taka wystąpiła w leśnictwie polskim w roku 1988, a zatem założenie stanu równowagowego jest uprawnione i będzie ono stale stosowane w niniejszej pracy. Przyjęcie tego założenia powoduje, że wszystkie dyskutowane procesy ekologiczne mogą być charakteryzowane za pomocą różnic ich intensywności na początku i końcu roku (bilanse roczne). Dla procesów cyklicznych różnice te wynoszą zero.

Praca ta jest ograniczona do rozważania bilansu  $\text{CO}_2$  jako najważniejszego gazu szklarniowego dla leśnictwa w Polsce. Inne gazy mające wpływ na zmiany klimatyczne są emitowane w znikomych ilościach (być może z wyjątkiem metanu) przez ekosystemy leśne. Co więcej, pominięto tutaj wszystkie źródła emisji  $\text{CO}_2$  związane z gospodarką leśną (transport leśny, itd.).

### 2.1. Metoda "statystyczna"

Bilans absorpcji ( $A$ ) i emisji ( $E$ )  $\text{CO}_2$  dla ekosystemu leśnego jest określony przez równanie:

$$\frac{d M\text{CO}_2}{dt} = A - E \quad (1)$$

gdzie:

$M\text{CO}_2$  - ilość  $\text{CO}_2$  zakumulowanego w ekosystemach leśnych

$t$  - czas

$A$  - absorpcja  $\text{CO}_2$  przez ekosystemy leśne

$E$  - emisja  $\text{CO}_2$  przez ekosystemy leśne

Bilans ten wymaga oszacowania wielkości absorpcji i emisji  $\text{CO}_2$  przez ekosystemy leśne.

#### 2.1.1 Oszacowanie absorpcji $\text{CO}_2$ przez ekosystemy leśne

Jarvis i Leverentz (1983) stwierdzają, że zdolność ekosystemu leśnego do asymilacji i trwałej akumulacji  $\text{CO}_2$  w tkankach roślin zależy przede wszystkim od produktywności drzew górnego piętra drzewostanu. Ta zdolność do asymilacji może być oszacowana przy użyciu wielkości trwałego przyrostu biomasy ekosystemu. Przyrost ten nie uwzględnia  $\text{CO}_2$  związanego w nietrwałych organach roślin (np. w liściach). Zatem dalsza analiza będzie ograniczona do trwałej biomasy drzew czyli głównie biomasy drewna (w tym korzeni) i kory.

Produkcja netto ekosystemu leśnego może być przybliżona przez przyrost miąższości drewna na pniu, a zatem nie ma potrzeby rozważania tutaj produkcji pierwotnej brutto i odejmowania od niej emisji  $\text{CO}_2$  następującej w wyniku procesów oddychania.

Dostępne dane dotyczące miąższości i zasobów drewna na pniu są wyrażane w m<sup>3</sup> grubizny, to znaczy, że nie uwzględniają one biomasy drobnicy i małych gałęzi oraz korzeni. W celu oszacowania wielkości (oraz przyrostów) tej biomasy proponuje się użycie współczynników korekcyjnych (mnożników) zdefiniowanych jako stosunki odpowiednich przyrostów i suchych mas zwykle nie mierzonych elementów drzew do przyrostu i suchej masy grubizny tych drzew. Współczynniki te zostały obliczone na podstawie danych Vyskota (1983) dla drzewostanów iglastych i Ellenberga (1971) dla drzewostanów liściastych. Dane Vyskota dotyczą drzewostanu w wieku 26 lat, a dane Ellenberga drzewostanu w wieku 59 lat. Średni wiek (powierzchniowy) drzewostanów w Polsce wynosi 46,2 lat, a zatem wpływ różnic pomiędzy tym średnim wiekiem, a wiekiem drzewostanów badanych przez Ellenberga i Vyskota, na wyniki tej pracy powinien być niewielki i został pominięty w dalszej części pracy. Współczynniki obliczone na podstawie danych Vyskota i Ellenberga porównano ze współczynnikami obliczonymi według danych Anderssona (1970) dotyczących dojrzałych drzewostanów liściastych na południu Szwecji. Stwierdzono, że wartości odpowiadających sobie współczynników są podobne a różnice pomiędzy nimi (zawsze mniejsze niż 12%) mogą być wytłumaczone przez różnice ekologiczne pomiędzy badanymi drzewostanami.

Średnia roczna intensywność (na hektar) absorpcji CO<sub>2</sub> netto przez ekosystem lasów iglastych/liściastych ( $\epsilon$ ) wynosi:

$$\epsilon = \Delta G * a * \rho * \alpha \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta G$  - średni przyrost grubizny w drzewostanach iglastych/liściastych

$a$  - współczynnik korekcyjny umożliwiający przeliczenie przyrostu grubizny w trwały przyrost biomasy ekosystemu lasów iglastych ( $a = 1.665$ ; Vyskot, 1983) lub liściastych ( $a = 1.475$ ; Ellenberg, 1971)

$\rho$  - gęstość węgla w drewnie: 0.26 t C/m<sup>3</sup> (Larcher, 1980)

$\alpha$  - współczynnik umożliwiający przeliczenie C na CO<sub>2</sub>: 3.66 t CO<sub>2</sub>/t C (IPCC, 1991).

Całkowita absorpcja CO<sub>2</sub> netto w drzewostanach iglastych/liściastych może być obliczona przez odpowiednie pomnożenie przez całkowitą powierzchnię drzewostanów.

### 2.1.2 Oszacowanie emisji CO<sub>2</sub> z ekosystemów leśnych

Jeżeli absorpcja CO<sub>2</sub> przez ekosystem leśny obliczana jest na podstawie trwałego przyrostu biomasy (jak ma to miejsce w niniejszej pracy) to wówczas źródłami emisji CO<sub>2</sub> z tych ekosystemów są procesy wynikające z naruszenia normalnego stanu lasu. Można wyróżnić trzy główne źródła emisji CO<sub>2</sub> z naruszonych ekosystemów leśnych: (1) rozkład martwej biomasy roślinnej pozostałej na zrębach i pożarzyskach, (2) spalanie biomasy podczas pożarów leśnych oraz (3) mineralizacja związków organicznych w glebach powodowana przez wylesianie. Jednakże proces trwałego wylesiania praktycznie w Polsce nie zachodzi, a zatem emisja CO<sub>2</sub> wynikająca z tego procesu jest pomijalnie mała i nie będzie tu szacowana.

Emisja CO<sub>2</sub> następująca w wyniku rozkładu resztek pozrębowych, w tym pniaków i korzeni, w drzewostanach iglastych/liściastych ( $E_L$ ) wynosi:

$$E_L = R * b * \rho * \alpha \quad (3)$$

gdzie:

$R$  - miąższość pozyskanej grubizny iglastej/liściastej,

$b$  - współczynnik korekcyjny umożliwiający przeliczenie miąższości grubizny iglastej ( $b=0.815$ ; Vyskot, 1983) lub liściastej ( $b=0.740$ ; Ellenberg, 1971) na miąższość korzeni, pniaków i pozostałych resztek pozrębowych.

Niestety nie dysponujemy informacjami dotyczącymi wieku, składu gatunkowego i biomasy spalanej podczas pożarów leśnych w Polsce. Zakłada się zatem, że spaleniem uległy drzewostany iglaste o przeciętnej zasobności. Średnia powierzchnia pojedynczego pożaru leśnego wyniosła zaledwie 1.2 ha (Anonim, 1989) a grubizna z pożarzysk posiadała nadal wartość handlową, dlatego można przyjąć, że spaleniem uległy jedynie drobnica i igły, a pniaki i korzenie uległy naturalnemu rozkładowi. Emisja CO<sub>2</sub> następująca w wyniku pożarów oraz naturalnego rozkładu biomasy pozostawionej na pożarzysku ( $E_F$ ) może być oszacowana jako:



$$E_F = S_F * \frac{W_C}{S_C} * d * \rho * \alpha \quad (4)$$

gdzie:

$S_F$  - łączna powierzchnia pożarów leśnych

$W_C$  - zapas grubizny w drzewostanach iglastych

$S_C$  - powierzchnia drzewostanów iglastych

$d$  - współczynnik korekcyjny umożliwiający przeliczenie grubizny na drobnicę, igły, pniaki i korzenie,  $d=0.793$  (Vyskot, 1983).

Całkowita emisja CO<sub>2</sub> ( $E$ ) jest sumą  $E_L + E_F$ .

## 2.2. Metoda "przepływu węgla"

Podstawowym założeniem metody "przepływu węgla" jest to, że fotosyntetyczna asymilacja CO<sub>2</sub> przez rośliny ekosystemów leśnych powoduje trwały przyrost ich biomasy wyrażający się produkcją pierwotną netto. Oszacowanie tej produkcji umożliwi uzyskanie oszacowania absorpcji CO<sub>2</sub> przy użyciu metody niezależnej od opisanej wcześniej metody "statystycznej".

Monteith (1977, 1981) wykazał, że ilość światła pochłonięta przez warstwę koron jest głównym czynnikiem ograniczającym produktywność drzew. Zatem inne ekologiczne czynniki ograniczające produktywność działają poprzez ograniczenia intensywności fotosyntezy. Produkcja drzewostanów ograniczona jest w podobny sposób (Jarvis i Leverenz, 1983) a zatem najpierw zostanie oszacowana przeciętna ilość światła pochłanianego przez drzewostany w Polsce.

Oznaczmy przez  $L$  ilość krótkofalowej radiacji słonecznej dostępnej dla roślin w czasie gdy może zachodzić fotosynteza ( $L$  jest różne dla drzewostanów iglastych i liściastych z uwagi na różną długość tego okresu w ciągu roku). Radiacja fotosyntetycznie aktywna (PAR) stanowi jedynie część  $L$  i z błędem mniejszym niż 10% (McCree, 1983) można ją oszacować jako  $0.5 * L$  (Szeicz, 1974). Jednakże PAR pochłonięte przez drzewa jest mniejsze od PAR dostępnego z uwagi na niezerową transmitancję i reflektancję warstwy koron. Zatem asymilacja netto CO<sub>2</sub> (na hektar) drzewostanu iglastego/liściastego ( $P$ ) wynosi w przybliżeniu:

$$P = \gamma * (1 - r - T) * 0.5 * L * \beta * \alpha \quad (5)$$

gdzie:

- $\gamma$  - wydajność fotosyntetycznej produkcji suchej masy przez ekosystem leśny, jednostką jest g/MJ,
- $r$  - współczynnik reflektancji dla warstwy koron drzewostanu iglastego/liściastego,
- $T$  - współczynnik transmitancji (jednakowy dla drzewostanów iglastych i liściastych),
- $L$  - średnia ilość słonecznej radiacji krótkofalowej (na hektar) dostępnej dla drzewostanów iglastych/liściastych w okresie umożliwiającym fotosyntezę, jednostką  $L$  jest J/ha,
- $\beta$  - zawartość węgla w biomase drzewnej ( $\beta \approx 0.5$ , Krzysik, 1978).

Transmitancja i reflektancja drzewostanów zależą od ich LAI (Cannell, 1988). Jednakże średnia reflektancja ( $r$ ) jest zwykle szacowana jako 15% dostępnej energii świetlnej dla drzewostanów liściastych (Cannell, 1988) i 10% dla drzewostanów iglastych (Jarvis et al. 1976). Transmitancja ( $T$ ) jest szacowana jako 11% dostępnej energii świetlnej, jednakowo dla drzewostanów iglastych i liściastych (Larcher, 1980). Powyższe oszacowania są również zgodne z wynikami Rook (1985).

W powyższym równaniu zakłada się, że asymilacja  $\text{CO}_2$  dokonuje się tylko w okresie gdy fotosynteza jest możliwa. To znaczy wówczas, gdy drzewa liściaste mają liście lub w przypadku drzew iglastych, gdy średnia temperatura dobową jest wyższa od  $5^\circ\text{C}$  (Pisek, 1973).

Wydajność fotosyntetycznej produkcji suchej masy została oszacowana na podstawie danych przedstawionych przez Cannell (1988) i Rook (1985). Jednakże autorzy ci rozważali jedynie produkcję nadziemną, która powinna być powiększona o oszacowanie produkcji korzeni. Do oszacowania tego wykorzystano dane Küppers (1992), który prezentuje sezonowe bilanse rozdziału asymilatów uzyskane na podstawie mierzonych bilansów węgla wybranych drzew i krzewów. Rośliny te kierowały około 30% asymilowanego  $\text{CO}_2$  do korzeni gdzie zużywany był on w procesach wzrostu i oddychania. Tranquilini (1973) szacuje, że oddychanie korzeni wynosi około 7% asymilacji, a zatem około 23% rocznej produkcji fotosyntezy netto lokowane jest w korzeniach. Ostatecznie obliczone wartości wydajności fotosyntetycznej produkcji suchej masy przez ekosystem

leśny ( $\gamma$ ) zawierają się w zakresie od 1.0 do 2.5 t (suchej masy)/TJ (pochłoniętego PAR);  $T = 10^{12}$ . Wyższe wartości zwykle przypisuje się drzewostanom iglastym.

Średnią ilość krótkofalowej radiacji słonecznej (na hektar) dostępną dla roślin w okresie gdy fotosynteza jest możliwa obliczono na podstawie tablic meteorologicznych (Müller, 1980), osobno dla drzewostanów iglastych ( $L = 14.1$  TJ/ha) i liściastych ( $L = 12.0$  TJ/ha).

### 2.3. Oszacowanie retencji CO<sub>2</sub> w ekosystemach leśnych

Oszacowanie retencji CO<sub>2</sub> związanego w trwałej i nietrwałej oraz martwej biomase ekosystemów leśnych wymaga oszacowania sumy zasobów tych biomas. Dokonano tego zgodnie z propozycją Kolchugina i Vinson (1993c) przez pomnożenie trwałej biomasy roślin przez współczynnik zależny od rodzaju drzewostanu.

Retencja CO<sub>2</sub> w glebach ekosystemów leśnych została oszacowana w oparciu o dane Ziegler (1991) dotyczące zawartości węgla organicznego w glebach leśnych. A zatem całkowita retencja CO<sub>2</sub> w ekosystemach leśnych ( $R_{CO_2}$ ), została oszacowana jako:

$$R_{CO_2} = [(W_C * a_c + W_D * a_d) * \rho + (S_C + S_D) * \Theta] * \alpha \quad (6)$$

gdzie:

$W_D$  - zapas grubizny liściastej w lasach Polski,

$S_D$  - powierzchnia lasów liściastych,

$a_c$  - współczynnik korekcyjny umożliwiający przeliczenie miąższości grubizny iglastej na miąższość całkowitej biomasy ekosystemu leśnego,  $a_c = 2.906 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (Vyskot, 1983; Kolchugina i Vinson, 1993c),

$a_d$  - współczynnik korekcyjny umożliwiający przeliczenie miąższości grubizny liściastej na miąższość całkowitej biomasy ekosystemu leśnego,  $a_d = 3.544 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (Ellenberg, 1971; Kolchugina i Vinson, 1993c),

$\Theta$  - ilość węgla organicznego w przeliczeniu na jednostkę powierzchni ekosystemu leśnego,  $\Theta = 157 \text{ t}_C/\text{ha}$  (Ziegler, 1991).

### 3. WYNIKI I DYSKUSJA

Dane statystyczne dotyczące leśnictwa w Polsce w 1988 przedstawiono w Tab. I. Pochodzą one wyłącznie z dostępnych źródeł oficjalnych (Anonim, 1989; GUS, 1989).

#### 3.1. ABSORPCJA CO<sub>2</sub>

##### 3.1.1. Oszacowanie metodą "statystyczną"

Oszacowanie średniej rocznej absorpcji CO<sub>2</sub> (na hektar) w ekosystemie iglastym ( $\epsilon$ , równ. 2) wynosi 5.54 t CO<sub>2</sub>/ha/rok, a w ekosystemie liściastym 4.83 t CO<sub>2</sub>/ha/rok. Wartości te określają całkowity strumień CO<sub>2</sub> wpływający do odpowiedniego ekosystemu.

Zakres błędu powyższych oszacowań zależy głównie od dokładności oszacowania średniego rocznego przyrostu (na hektar) grubizny w drzewostanach. Dane użyte w tym opracowaniu są danymi opublikowanymi oficjalnie, a zatem mogłyby być uważane za dokładne. Jednakże Marszałek (1991) podkreśla, że "przyrost grubizny w lasach w Polsce nie jest dokładnie znany", więc porównano dane o średnim rocznym przyroście grubizny w Polsce i innych sąsiednich krajach (dane wg GUS, 1989). Dane te wskazują na możliwość niedoszacowania średniego rocznego przyrostu grubizny w Polsce. Zauważmy, że niedoszacowanie w pomiarach leśnych występuje raczej często. Na przykład w Niemczech zasobność lasów na jednostkę powierzchni podwoiła się w okresie od 1961 do 1987, głównie z powodu zastosowania nowej metody pomiaru. Jeżeli to niedoszacowanie istotnie występuje to wówczas błąd z nim związany występuje we wszystkich obliczeniach zawierających  $\Delta G$ .

Przyjmuje się, że współczynniki korekcyjne określono z pomijalnie małym błędem. Dwie niezależne metody pozwoliły uzyskać prawie identyczne wartości współczynnika rozdziału zaabsorbowanego CO<sub>2</sub> pomiędzy nadziemną i podziemną część ekosystemu leśnego. Wartość 0.24 uzyskano na podstawie danych Vyskot (1983) i wartość 0.23 obliczono na podstawie danych Küppers (1992) i Tranquillini (1973). Jednakże podobnych porównań nie udało się zrobić dla pozostałych współczynników.

Obliczenie rocznej absorpcji CO<sub>2</sub> netto we wszystkich ekosystemach leśnych Polski jest wynikiem pomnożenia średnich intensywności absorpcji CO<sub>2</sub> w ekosystemach drzewostanów liściastych i iglastych przez ich

powierzchnię. Wielkość powierzchni tych ekosystemów była szacowana metodami naziemnymi z pomijalnie małym błędem.

Powyższe rozważania uprawniają do stwierdzenia, że względny błąd oszacowania absorpcji CO<sub>2</sub> przez ekosystemy leśne Polski jest w przybliżeniu równy względnemu błędowi rocznego przyrostu grubizny oraz, że oszacowanie to jest najprawdopodobniej oszacowaniem z dołu wielkości rzeczywistej.

### **3.1.2. Oszacowanie metodą "przepływu węgla"**

Uzyskane przy użyciu metody "przepływu węgla" oszacowanie (z dołu tj. dla  $\gamma=1$  t/TJ) średniej rocznej absorpcji CO<sub>2</sub> (na hektar) dla drzewostanu iglastego wynosi 10.61 t CO<sub>2</sub>/ha/rok a dla drzewostanu liściastego 8.42 t CO<sub>2</sub>/ha/rok. Wielkości te odpowiadają niższej wartości wydajności fotosyntetycznej produkcji suchej masy przez ekosystem leśny ( $\gamma$ ) lecz mimo to są one około dwukrotnie wyższe od wyników oszacowania metodą "statystyczną". Wyniki obu metod (mimo tych różnic) są akceptowalne i dobrze pasują do danych literaturowych, gdyż np. Kolchugina i Vinson (1993a) stwierdzają istnienie podobnego zakresu zmienności pomiędzy absorpcją CO<sub>2</sub> przez mieszany las liściasty i laso-step na terenie byłego ZSRR.

Błąd metody "przepływu węgla" zasadniczo zależy od błędu oszacowania wydajności fotosyntetycznej produkcji suchej masy przez ekosystem leśny ( $\gamma$ ). Dla tej wielkości zakres teoretycznie dopuszczalnych wartości jest bardzo szeroki, gdyż górna jego granica równa jest 250% granicy dolnej.

Wyniki oszacowania absorpcji CO<sub>2</sub> uzyskane metodą "przepływu węgla" mogą prawdopodobnie stanowić ograniczenie z góry wartości rzeczywistych. A zatem obydwie te metody przypuszczalnie określają przedział w którym zawarte są rzeczywiste wartości absorpcji CO<sub>2</sub> przez ekosystemy leśne w Polsce.

### **3.2. EMISJA CO<sub>2</sub>**

Emisja CO<sub>2</sub> szacowana była tylko przy użyciu metody "statystycznej" i wynosiła 2.03 t CO<sub>2</sub>/ha/rok. Emisja CO<sub>2</sub> spowodowana rozkładem resztek pozrębowych stanowi 98.2% ogólnej emisji CO<sub>2</sub> z ekosystemów leśnych Polski. Pozostała jej część stanowi emisja CO<sub>2</sub> dokonująca się w czasie pożarów leśnych i rozkładu materii organicznej na pożarzyskach. Wyniki powyższe uzyskano przy przyjęciu założenia, że "eksport" i "im-

port" netto rozkładających się resztek pozrębowych pomiędzy kolejnymi latami był pomijalnie mały. Założenie takie jest uzasadnione faktem, że intensywność cięć w latach 1980 - 1988 była prawie stała, a masa pozyskanego drewna wahała się w małym zakresie od  $22 \times 10^6 \text{ m}^3$  do  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$  (GUS, 1989).

Błąd szacowania emisji  $\text{CO}_2$  zależy zasadniczo od dokładności pomiaru miąższości pozyskanego surowca drzewnego. Wielkość ta jest wielokrotnie sprawdzana w toku pozyskania drewna a zatem można przyjąć, że błąd oszacowania emisji  $\text{CO}_2$  jest pomijalnie mały.

### 3.3. BILANS ROCZNY ABSORPCJI I EMISJI ORAZ TRWAŁE WIAZANIE $\text{CO}_2$ PRZEZ EKOSYSTEMY LEŚNE W POLSCE

Bilans roczny uzyskano przez porównanie wymienionych powyżej źródeł absorpcji i emisji  $\text{CO}_2$  z ekosystemów leśnych (Tab. II). Bilans ten uwidacznia prawie 250% przewagę absorpcji nad emisją. Średnia wartość trwałego wiązania  $\text{CO}_2$  zawarta jest w przedziale od około 3.37 do około 10.14 t  $\text{CO}_2$ /ha/rok w zależności od metody szacowania absorpcji  $\text{CO}_2$ . Dolna granica tego przedziału jest o około 50% niższa od średnich wartości trwałego wiązania  $\text{CO}_2$  dla wszystkich lasów Europy opublikowanej przez Heath et al. (1993). Natomiast górna granica tego przedziału jest również o około 50% niższa od wielkości trwałego wiązania  $\text{CO}_2$  stwierdzonej na powierzchni proveniencyjnej świerka istebniańskiego znajdującej się w południowej Szwecji (Nilsson, 1993). Oba te fakty potwierdzają opinię, że metoda "statystyczna" niedoszacowuje wielkość absorpcji  $\text{CO}_2$  oraz że w metodzie "przepływu węgla" można stosować wartości wydajności fotosyntetycznej produkcji suchej masy przez ekosystem leśny ( $\gamma$ ) wyższe od wartości minimalnych wynikających z prac Cannell (1988) i Rook (1985).

Bilans roczny emisji i absorpcji  $\text{CO}_2$  przez wszystkie ekosystemy leśne w Polsce przedstawiono w Tabeli II. Z bilansu wynika, ekosystemy te trwale wiążą od 29.17 do  $70.30 \times 10^6$  t  $\text{CO}_2$  w ciągu roku, co stanowi od 6 do 15% emisji  $\text{CO}_2$  ze wszystkich źródeł na terenie Polski (wielkość tej emisji przyjęto wg Radwański, Skowroński i Twarowski, b. daty).

### 3.4. RETENCJA $\text{CO}_2$ W EKOSYSTEMACH LEŚNYCH POLSKI

Retencja  $\text{CO}_2$  w żywej i martwej nadziemnej biomase ekosystemów leśnych w Polsce wynosiła  $4071.0 \times 10^6$  t  $\text{CO}_2$  a w glebowej materii organicznej  $4980.5 \times 10^6$  t  $\text{CO}_2$ , co daje łącznie  $9051.5 \times 10^6$  t  $\text{CO}_2$  zgromadzone

we wszystkich ekosystemach leśnych w Polsce. Retencja CO<sub>2</sub> w drzewostanach iglastych stanowi 76.6% tej wielkości.

Przeciętna, całkowita retencja CO<sub>2</sub> w drzewostanach iglastych wynosi 1020.4 t CO<sub>2</sub>/ha, a w drzewostanach liściastych 1131.3 t CO<sub>2</sub>/ha.

Całkowita retencja CO<sub>2</sub> we wszystkich ekosystemach leśnych w Polsce przewyższa 18.9 raza całkowitą roczną emisję CO<sub>2</sub> ze wszystkich źródeł w Kraju (obliczenia dla 1988 roku).

**Tablica I. Wybrane dane statystyczne dotyczące leśnictwa w Polsce w 1988 roku.**

Symbol	Opis	Jednostka	Wielkość
S <sub>C</sub>	Powierzchnia drzewostanów iglastych	10 <sup>3</sup> ha	6797
S <sub>D</sub>	Powierzchnia drzewostanów liściastych	10 <sup>3</sup> ha	1871
S <sub>F</sub>	Powierzchnia pożarów leśnych	10 <sup>3</sup> ha	3
Δ G	Roczny przyrost grubizny w drzewostanach iglastych	m <sup>3</sup> /ha/rok	3.5
	Roczny przyrost grubizny w drzewostanach liściastych	m <sup>3</sup> /ha/rok	3.44
R	Miaższość pozyskanej grubizny iglastej	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	17698
	Miaższość pozyskanej grubizny liściastej	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	4997
W <sub>C</sub>	Zapas grubizny w drzewostanach iglastych	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1096
W <sub>D</sub>	Zapas grubizny w drzewostanach liściastych	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	309

**Tablica II. Zestawienie wyników oszacowań: absorpcji, emisji i trwałego wiązania CO<sub>2</sub> przez wszystkie drzewostany w Polsce w roku 1988. Emisja CO<sub>2</sub> została oszacowana jedynie przy użyciu metody "statystycznej" i oszacowanie to wykorzystano do obliczenia trwałego wiązania CO<sub>2</sub> bez względu na metodę użytą do szacowania absorpcji CO<sub>2</sub>.**

Proces\Metoda		Metoda statystyczna	Metoda przepływu węgla
		10 <sup>3</sup> t CO <sub>2</sub>	10 <sup>3</sup> t CO <sub>2</sub>
<b>Absorpcja</b>			
	Drzewostany iglaste	37698	72116
	Drzewostany liściaste	9040	15754
	Absorpcja całkowita	46738	87870
<b>EMISJA</b>			
	Rozkład pozostałości pozrębowych w lasach iglastych	13725	
	Rozkład pozostałości pozrębowych w lasach liściastych	3514	
	Požary lasów	329	
	Emisja całkowita	17568	
<b>BILANS</b>	Trwałe wiązanie CO <sub>2</sub>	29170	70302



## LITERATURA

- Andersson, F. (1970): Ecological Studies in a Scandinavian Woodland and Meadow Area, Southern Sweden. II Plant biomass, primary production and turn over of organic matter. Bot. Notiser 123, ss. 8-51.
- Anonim (1989): Analiza sytuacji gospodarczej w Lasach Państwowych w 1988 roku. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych - Raport Wewnętrzny.
- Apps, M.J., Kurz, A.W., i Price, T.D. (1991): Estimating Carbon Budgets of Canadian Forest Ecosystems Using a National Scale Model. W: Kolchugina, T. P. i Vinson T. S. (eds) Proceedings of the Workshop on Carbon Cycling in Boreal Forests and Subarctic Ecosystems, 94 Dept. 1991, Corvallis, Oreg., OSU Corvallis, ss. 241-250.
- Cannell, M.G.R. (1988): The Scientific Background. W: Hummel, F.C., Palz, W., i Grassi, G. (red.) Biomass Forestry in Europe: A Strategy for the Future. Elsevier, ss. 8340.
- Ellenberg, H. (1971): Integrated Experimental Ecology. Methods and Results of Ecosystem Research in German Solling Project. Chapman and Hall Ltd London.
- Eriksson, H. (1991): Sources and Sinks of Carbon Dioxide in Sweden. Ambio 20, ss. 146-150.
- GUS (1989): Leśnictwo w 1988 roku. Dane statystyczne. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa - GUS.
- Heath, L.S., Kauppi, P.E., Burschel, P., Gregor, H.-D., Guderian, R., Kohlmaier, G.H., Lorenz, S., Overdieck, D., Scholz, F., Thomasius, H., i Weber, M. (1993): Contribution of Temperate Forests to the World's Carbon Budget. Water, Air, and Soil Pollution 70, ss. 55-69.
- Houghton, J.T., Callander, B.A., i Varney, S.K. (red.) (1992): Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press.
- Houghton, R.A. i Skole, D.L. (1990): Carbon. W: Turner, B.L., Clark, W.C., Kates, R.W., Richards, J.F., Matthews, J.T. i Meyer, W.B. (red.) The Earth as Transformed by Human Action. Cambridge University Press, ss. 393-408.
- IPCC (1990): The IPCC Scientific Assessment. Red.: Houghton, T.T., Jenkins, G.J., i Ephraim, J.J. Cambridge University Press, Cambridge (UK).

- IPCC (1991): Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks. Final Report from the OECD Experts Meeting Prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change. OECD/OCDE.
- Isaev, A.S., Korovin, G.N., Utkin, A.I., Pryazhnikov, A.A., i Zamolodchikov, D.G (1993): Estimation of Carbon Pool and Its Annual Deposition in Phytomass of Forest Ecosystems in Russia. Lesovedenye 5, ss. 3-10.
- Jarvis, P.G., i Leverentz, J.W. (1983): Productivity of Temperate Deciduous and Evergreen Forests. W: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., i Ziegler, H. (red.) Encyclopedia of Plant Physiology (New Series) Vol. 12D: Physiological Plant Ecology IV - Ecosystem Processes: Mineral Cycling, Productivity and Man's Influence. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ss. 233-280.
- Jarvis, P.G., Miranda, H.S., i Mutzfeldt, R.I. (1976): Modelling Canopy Exchanges of Water Vapour and Carbon Dioxide in Coniferous Forest Plantations. W: Hutchison, B.A., i Hicks, B.B. (red.) The Forest-Atmosphere Interaction. Reidel Publishing Co., ss. 521-542.
- Kolchugina, T. P. i Vinson T. S. (1993a): Equilibrium Analysis of Carbon Pools and Fluxes of Forest Biomes in the Former Soviet Union. Can. J. For. Res. 23, ss. 81-88.
- Kolchugina, T. P. i Vinson T. S. (1993b): Carbon Sources and Sinks in Forest biomes of the former Soviet Union. Global Biogeochemical Cycles 23, 2, ss. 291-304.
- Kolchugina, T.P., i Vinston, T.S. (1993c): Comparison of Two Methods to Assess the Carbon Budget of Forest Biomes in the Former Soviet Union. Water, Air, and Soil Pollution 70, ss. 207-221.
- Krzysik, F. (1978): Nauka o drewnie. PWN, Warszawa.
- Küppers, M. (1992): Changes in Plant Ecophysiology Across a Central European Hedgerow Ecotone. W: Hansen, A.J., di Castri, F. (red.): Landscape Boundaries. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ss. 285-303.
- Larcher, W. (1980): Physiological Plant Ecology. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Marszałek, T. (1991): Leśnictwo w Polsce. W: Przewodnik leśniczego. Świat, Warszawa, ss. 13-28.
- McCree, K.J. (1983): Photosynthetically Active Radiation. W: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., i Ziegler, H. (red.) Encyclopedia of Plant

- Physiology (New Series) Vol. 12D: Physiological Plant Ecology IV - Ecosystem Processes: Mineral Cycling, Productivity and Man's Influence. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ss. 41-55.
- Monteith, J.L. (1977): Climate and Efficiency of Crop Production in Britain. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B 281, ss. 277-294.
- Monteith, J.L. (1981): Does Light Limit Crop Production? W: Johnson, C.B. (red.) Physiological Processes Limiting Plant Productivity. Butterworth, London, ss. 23-38.
- Müller, M.J. (1980): Handbuch Ausgewählter Klimastationen der Erde. Forschungstelle Bodenerosion der Universität Trier. Trier.
- Nilsson, L.O. (1993): Carbon Sequestration in Norway Spruce in South Sweden as Influenced by Air Pollution, Water Availability, and Fertilization. Water, Air, and Soil Pollution 70, ss. 177-86.
- Olson, J.S., Watts, J.A., i Allison, L.J. (1983): Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems. Oak Ridge Natl. Lab. Environ. Sci. Div. Publ. No. 1997. ORNL-5862.
- Pisek, A. (1973): Photosynthesis. W: Precht, H., Christophersen, J., Hensel, A., i Larcher, W. (red.) Temperature and Life. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ss. 102-127.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.I., i Statenberger, A.G. (1982): Soil Carbon Pools and World Life Zones. Nature 298 (5870), ss. 156-59.
- Radwański, E., Skowroński, P., i Twarowski, A. (bez daty): Case Study of Greenhouse Gas Emissions in Poland for the Year 1988. Polish Foundation for Energy Efficiency. Warszawa.
- Raynaud, D., Jozuel, J., Barnola, J.M., Chappellaz, J., Delmas, R.J., i Lorius, C. (1993): The Ice Record of Greenhouse Gases. Science 259, ss. 926-934.
- Rook, D.A. (1985): Physiological Constraints on Yield. W: Tigerstedt, P.M.A., Puttonen, P., i Koski, V. (red.) Crop Physiology of Forest Trees. Helsinki University Press, Helsinki, ss. 1-20.
- Sedjo, R.A. (1992): Temperate Forest Ecosystems in the Global Carbon Cycle. Ambio 21(4), ss. 274-277.
- Szeicz, G. (1974): Solar radiation for plant growth. J. Appl. Ecol. 11. ss. 617-636.

- Swedish Environmental Protection Agency (1991): The Greenhouse Gases. Emissions and Countermeasures in an International Perspective. Report 4045.
- Tans, P.P., Fung, I.Y., i Takahashi, T. (1990): Observational Constraints on the Global Atmospheric CO<sub>2</sub> Budget. Science 247, ss. 1431-1438.
- Tranquillini, W. (1973): Physiological Ecology of the Alpine Timberline. Tree Existence at High Altitudes with Special Reference to the European Alps. Ecological Studies 31, Billings, W.D., Golley, F., Lange O.L., i Olson, J.S. (red). Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Vyskot, M. (1983): Young Scotch Pine in Biomass. Rozprawy Cechoslowenske Akademie Ved 93.4.
- Ziegler, F. (1991): Die Bedeutung des organischen Kohlenstoffs im Unterboden -Vorratsberechnungen an Waldböden. Z. Umweltchem. Ökotox. 3 (5), ss. 276-277.

IBS

# ANALIZA SYSTEMOWA I JEJ ZASTOSOWANIE

42859A

## WPROWADZENIE

Leszek Kuźnicki  
Peter E. de Jánosi  
Miroslaw Mossakowski  
Jan Owskiński

## INTERDYSCYPLINARNOŚĆ

Nathan Keyfitz

## DEMOGRAFIA

Christopher Prinz  
Jerzy Z. Holzer

## TRANSFORMACJA GOSPODARCZA

János Gács  
Józef St. Zegar

## ŚRODOWISKO I ZASOBY NATURALNE

Nebojša Nakićenović  
Jacek Marecki  
Janusz Cofała  
Maciej Nowicki  
Sten Nilsson  
Andrzej Szujecki  
Wojciech Galiński i Manfred Küppers  
Laszlo Somlyódy  
Zdzisław Kaczmarek

## METODY I TECHNIKI SYSTEMOWE

Andrzej Ruszczyński  
Marek Makowski  
Andrzej P. Wierzbicki  
Zdzisław Pawlak  
Kurt Fedra i Elisabeth Weigkricht

ISBN 83 - 85847 - 25 - 1