

Józef ZWOLIŃSKI

Instytut Badawczy Leśnictwa  
Zakład Gospodarki Leśnej Rejonów Przemysłowych  
ul. Św. Huberta 35, 40-952 Katowice  
e-mail: kwapiszy@ibles.waw.pl

## OBIEG WĘGLA W BORACH SOSNOWYCH

A CARBON CYCLING IN PINE FORESTS

Wykład habilitacyjny

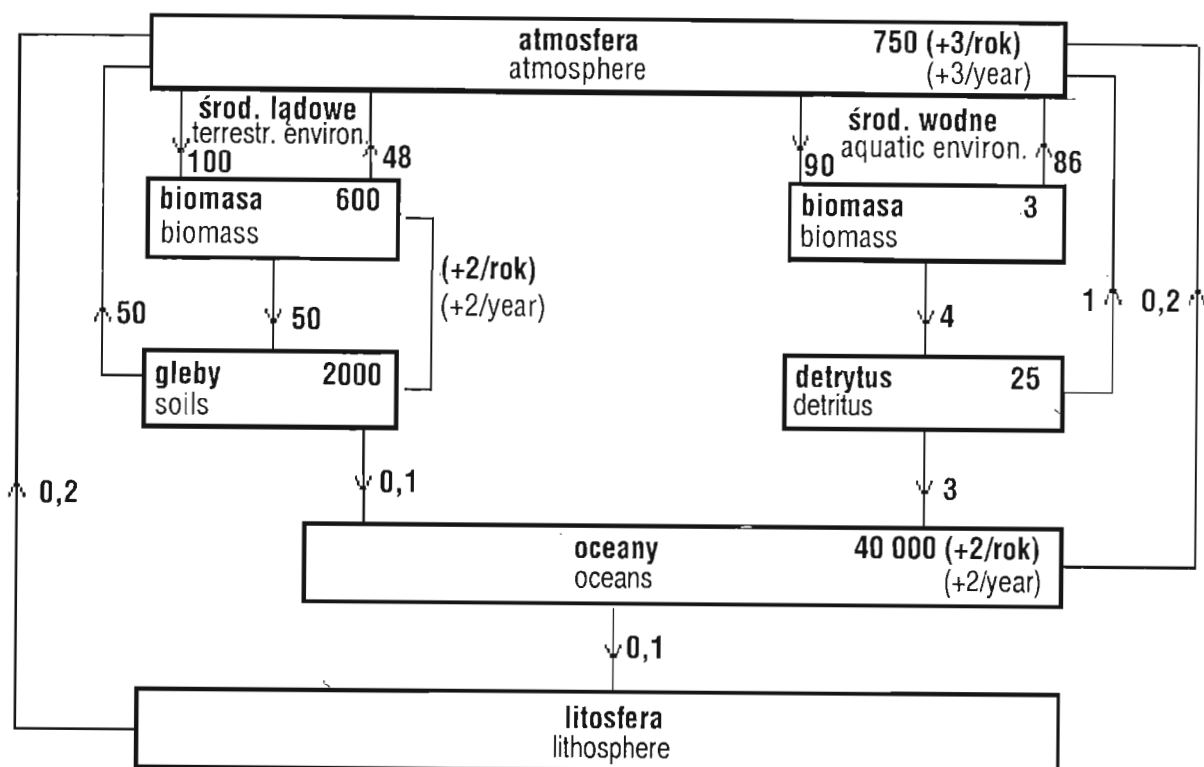
**Abstract.** Results of carbon budget and cycle evaluation in the pine forests are presented. 91 t C of the 148 t C/ha stored in the whole ecosystem was found to be in the phytomass and the remainder in the upper soil horizons. A net primary production of the mature pine stands was estimated to be 4,4 t C/ha year, whereas 1,0 t C/ha in the dendromass and 0,3 t C/ha in mineral soil horizons were immobilized annually.

**Key words:** pine forests, carbon budget, carbon cycling, productivity, microbial biomass.

## 1. WSTĘP

Z pierwiastków krążących w ekosystemie leśnym węgiel zasługuje na szczególną uwagę, ponieważ jest on podstawowym elementem zarówno struktur protoplazmatycznych organizmów żywych jak i substratów wykorzystywanych w metabolizmie energetycznym heterotrofów. Zainteresowanie cyklem geochemicznym węgla wzrosło w ostatnich latach, w związku z dostrzeżonym niebezpieczeństwem jego zakłócenia, wynikającym głównie ze spalania węgla i ropy naftowej, zanieczyszczeń przemysłowych oraz masowego wycinania lasów tropikalnych i subtropikalnych – czynników powodujących postępujący wzrost puli węgla w atmosferze. Konsekwencją tego będzie, jak się powszechnie uważa, ocieplenie klimatu, co przyczyni się do zwiększenia tempa respiracji autotrofów, szybszego rozkładu substancji organicznej w glebach i w rezultacie do dalszego wzrostu poziomu  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Postępujący z tego powodu wzrost (w skali globalnej) średniej temperatury, pociągający za sobą istotne zmiany stosunków hydrologicznych, będzie przyczyną, jak się sądzi, częstszych aniżeli to miało miejsce dotychczas klęsk żywiołowych oraz występowania w niektórych regionach świata katastrof ekologicznych (Europe's Environment 1995). Wachlarz przewidywanych negatywnych skutków, których rozmiar trudno obecnie określić, jest bardzo szeroki. Między innymi, nastąpi podniesienie się poziomu wód mórz i oceanów, co będzie przyczyną permanentnego zalewania niżej położonych obszarów nadmorskich, częściej również będą miały miejsce powodzie, susze i silne wiatry. Zmiany warunków termiczno-wilgotnościowych spowodują także przesunięcie się stref biogeograficznych, co zakłóci prawidłowe funkcjonowanie istniejących obecnie ekosystemów; naruszona zostanie bowiem ich równowaga biologiczna, na skutek redukcji składu jakościowo-ilościowego gatunków roślin i zwierząt, a także degradacji gleb oraz liczniejszego występowania patogenów i szkodników.

Cykl geochemiczny węgla przedstawia rycina 1. Wartości dotyczące zasobów C w poszczególnych zbiornikach jak i jego przepływu pomiędzy zbiornikami w ciągu roku podano w gigatonach ( $1\text{Gt}=10^9$  ton). Dane te trudno uznać za dokładne, o czym świadczy duża ich rozbieżność w różnych publikacjach (SIEGENTHALER i SARMIENTO 1993; Europe's Environment 1995), można natomiast przyjąć, że odpowiadają rzędowi rzeczywistej wielkości. Z ogólnej puli węgla większość jest unieruchomiona czasowo – w biomacie, martwych szczątkach roślin i zwierząt i w glebach, lub prawie całkowicie – w osadach i kopalinach litosfery oraz w oceanach. Szybki obieg węgla ma miejsce pomiędzy atmosferą a biomasą i substancją organiczną gleb. W skali rocznej ilość węgla atmosferycznego wiązana fotosyntetycznie równa jest mniej więcej ilości powracającej do atmosfery w wyniku respiracji autotrofów oraz działalności heterotrofów rozkładających substancję organiczną. Niezakłócony obieg węgla w tym

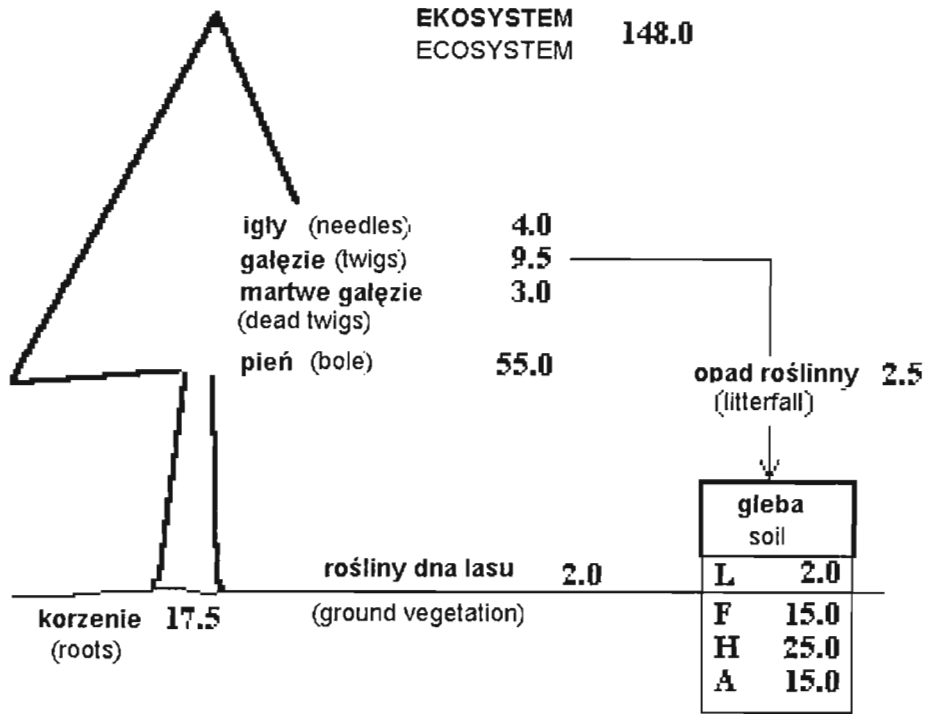


Ryc. 1 Cykl geochemiczny węgla (Gt C) (ORR 1993; SIEGENTHALER, SARMIENTO 1993; Europe's Environment 1995)

Fig. 1. The global carbon cycle (Gt C) (ORR 1993; SIEGENTHALER, SARMIENTO 1993; Europe's Environment 1995)

układzie gwarantuje zatem stały poziom  $\text{CO}_2$  w atmosferze. W rzeczywistości, w naturalnym obiegu saldo jest ujemne, kosztem odkładania około 2 Gt C/rok w oceanach (ORR 1993) oraz około 2 Gt C/rok w fitomasie i w glebach lasów strefy borealnej i umiarkowanej półkuli północnej (CANNEL 1995). Spalanie węgla i ropy naftowej dodaje natomiast 5,5 Gt C/rok, a wycinanie lasów tropikalnych i subtropikalnych około 1,5 Gt C/rok (DETWEILER i HALL 1988; HOUGHTON i WOODWELL 1989; CANNEL 1996), co w rezultacie powoduje wzrost ilości C w atmosferze o około 3 Gt/rok.

Lasy, stanowiąc znaczący składnik biomów lądowych, odgrywają istotną rolę w globalnym cyklu C; zawierają ponad 80% C zmagazynowanego w roślinach lądowych oraz około 70% C skumulowanego w glebach (POST i in. 1982). Sposób gospodarowania zasobami leśnymi wpływa zatem istotnie na poziom  $\text{CO}_2$  w atmosferze; na przykład poprzez zwiększenie powierzchni lasów oraz zasobności istniejących drzewostanów, co prowadzi w efekcie do wzrostu puli C związanego w ekosystemie, można poprawić niekorzystny bilans  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Możliwości takich działań są szczególnie duże, jak się sądzi, na obszarach strefy borealnej i umiarkowanej półkuli północnej, gdzie udział borów sosnowych, będących obiektem badań niniejszej pracy jest znaczący. Przedstawioną dynamikę akumulacji węgla, jego obieg i bilans określono głównie na podstawie wyni-

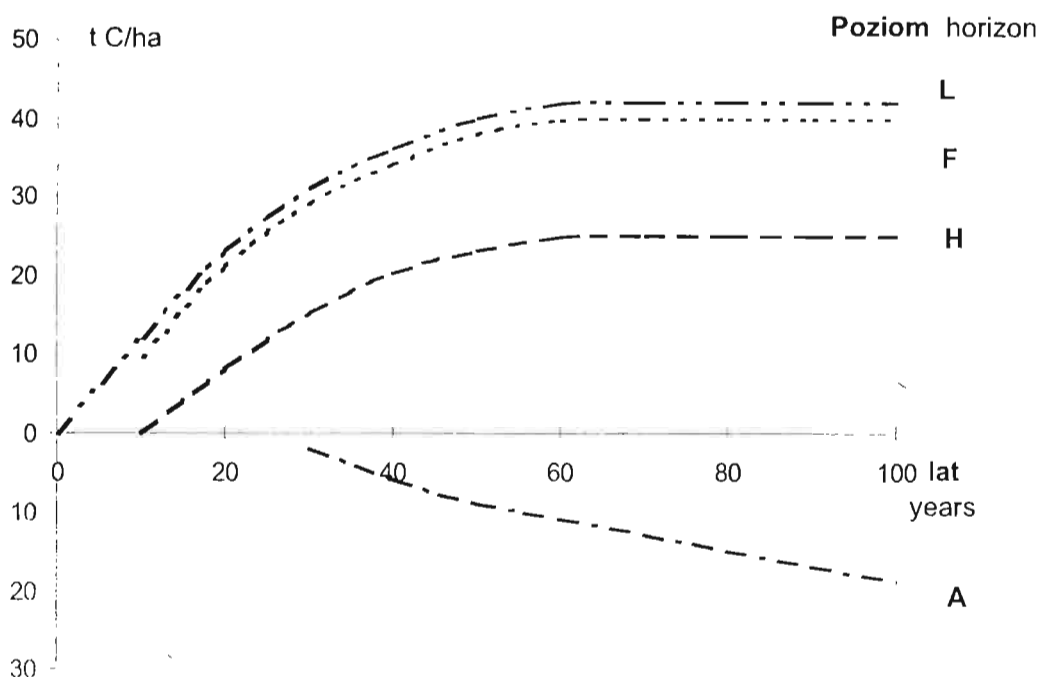


Ryc. 2. Budżet węgla dojrzałych drzewostanów sosnowych (t C/ha)  
Fig. 2. A carbon budget for the mature pine forests (t C/ha)

ków własnych badań, prowadzonych w latach 1986-1993 w drzewostanach sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) II-V klasy wieku, charakteryzujących się zbliżonymi warunkami glebowo-siedliskowymi (gleby bielcowe, bór świeży) na terenie woj. katowickiego (Nadl. Koszęcin), woj. częstochowskiego (Nadl. Złoczew) i woj. legnickiego (Nadl. Lubin). Obejmowały one pomiary opadu roślinnego i akumulacji węgla w glebie metodami opisanymi wcześniej (ZWOLIŃSKI 1995), tempa rozkładu substancji organicznej w warunkach polowych – metodą równowagi masy (OLSON 1963) i laboratoryjnych (ZWOLIŃSKI 1994), oznaczenia biomasy drobnoustrojów glebowych – metodą indukowanej substratem respiracji (ANDERSON, DOMSCH 1978; BEARE i in. 1990) oraz pomiary intensywności oddychania drobnoustrojów glebowych – w warunkach laboratoryjnych na aparacie Warburga. Do szacowania akumulacji węgla w fitomasie wykorzystano wyniki pomiarów zasobności i przyrostu miąższości drzewostanów, prowadzonych na tych samych powierzchniach (ORZEŁ 1995).

## 2. AKUMULACJA WĘGLA W BORACH SOSNOWYCH

Budżet węgla dla dojrzałego drzewostanu sosnowego (V klasa wieku) przedstawia rycina 2. Zawartość C w dendromasie oznaczono na podstawie zmierzonej zasobności drzewostanu (ORZEŁ 1995) zakładając, że 1 m<sup>3</sup> dendro-



**Ryc. 3. Dynamika akumulacji węgla w glebie**

Fig. 3. Dynamics of C accumulation in a soil

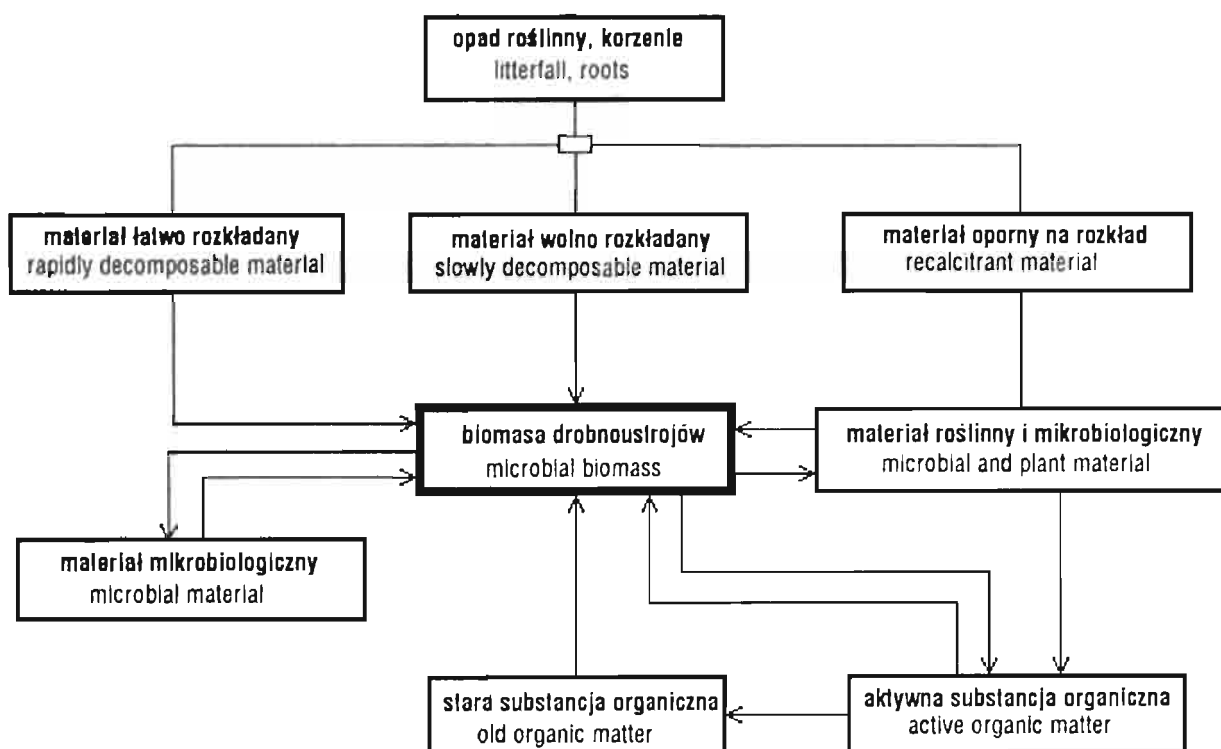
masy = 219 kg C oraz, że stosunek ilości C całego drzewa do C pnia = 1,61 (HAKKILA 1989; TURNER i in. 1995). Udział części podziemnych i nadziemnych drzew w ogólnej biomasy drzewostanu wyliczono wykorzystując publikowane dane na ten temat (OVINGTON 1965; ALBREKTSON 1980; KURTZ i in. 1996; VANNINEN i in. 1996). Podobnie oszacowano zawartość C w roślinach dna lasu, uwzględniając typ siedliska i wiek drzewostanu (OVINGTON 1965; BIRDSEY 1992), natomiast wartości dotyczące zawartości C w glebie i w opadzie roślinnym pochodzą z bezpośredniego pomiaru.

Na ogólną pulę węgla w ekosystemie, wynoszącą 148 t/ha, 91 t przypada na fitomasę, z czego 89 t związanych jest w drzewostanie. Warstwa organiczna gleb zawiera 42 t C, natomiast ilość węgla odłożonego w trakcie rozwoju drzewostanu w górnej warstwie mineralnej (poziom A) wynosi 15 t. Roczny opad roślinny zawiera 2,5 t C i taka ilość wyprodukowana przez część nadziemną drzewostanu dostaje się do gleby. Znaczna część węgla zawartego w glebie pochodzi z biocenozy poprzednio zajmujących teren. Stąd też, z wyjątkiem badań śledzących kolejne stadia sukcesji pierwotnej, a dających obraz tworzenia się poszczególnych poziomów profilu glebowego, zapas węgla wchodzący w skład tzw. starej substancji organicznej – związanej z prowadzoną wcześniej gospodarką leśną czy uprawą gleby, nie powinien być wliczany do puli węgla nagromadzonego w okresie rozwoju badanego drzewostanu. Badania prowadzone w drzewostanach sosnowych różnych klas wieku (II-V) pozwoliły na określenie dynamiki akumulacji substancji organicznej w glebie (ryc. 3). W początkowym okresie tworzy się poziom ściółki właściwej L oraz poziom fermentacyjny F, a następnie poziom hu-

mifikacyjny H. Po około 30 latach następuje wyraźne przechodzenie C do warstwy mineralnej gleb i tworzenie się poziomu próchnicznego A. Z wyjątkiem poziomu L, zapas węgla wzrasta w dalszym ciągu, we wszystkich poziomach, do osiągnięcia stanu równowagi w warstwie organicznej, co w badanych drzewostanach zachodzi po około 50-60 latach. Podobny przebieg kształtowania się poziomów organicznych gleb wykazały niektóre badania (BORMANN, SIDLE 1990; MATSON 1990; EMMER, SEVINK 1994). Po tym okresie ilość C związanego w warstwie organicznej, tj. około 40 t/ha, pozostaje mniej więcej na stałym poziomie, następuje natomiast dalsza akumulacja C w części mineralnej gleb w ilości około 0,3 t/ha·rok, co obliczono z ilości C w poziomie A (15 t) nagromadzonego w ciągu ostatnich 50 lat rozwoju drzewostanów V klasy wieku. Na podobne tempo tworzenia się próchnicy wskazują także inne doniesienia (MC DOWELL, LIKENS 1988; SCHLESINGER 1990; GUGGENBERGER, ZECH 1993; BORMANN i in. 1995).

### 3. OBIEG WĘGLA W GLEBACH

Dostająca się do gleby materia organiczna ulega ciągłym procesom mineralizacji i immobilizacji, prowadzonym przez organizmy glebowe (ryc. 4). Materiał roślinny (pochodzący z opadu i korzeni), a stanowiący główny ich substrat odżywczy, składa się z trzech frakcji: a – łatwo rozkładanej (cukry, aminokwasy), b – wolno rozkładanej (hemicelulozy, błonnik), c – odpornej na rozkład (głównie ligniny), co determinuje przebieg procesu dekompozycji. Cała masa organiczna wprowadzona do gleby rozkładana jest przez drobnoustroje, jako że na ubogich siedliskach borowych udział fauny w ogólnym metabolizmie gleby jest nieznaczący (PERSSON i in. 1980). Na siedliskach bogatszych rola fauny w procesach dekompozycji jest bardziej znacząca i polega głównie na rozdrabnianiu i częściowym rozkładzie masy organicznej oraz wykorzystaniu części biomasy drobnoustrojów jako substratu pokarmowego. Organizmy te po obumarciu, jak i wcześniej ich wydaliny, przechodzą również przez biomasę drobnoustrojów. Gdziekolwiek odbywa się mineralizacja, przebiega jednocześnie proces unieruchomienia, gdyż związany z mineralizacją rozwój organizmów pociąga za sobą pobieranie przez nie składników mineralnych potrzebnych do biosyntezy związków kompleksowych. Produkty mineralizacji są więc wiązane na okres krótki – w biomacie drobnoustrojów, lub dłuższy – w postaci odpornej na rozkład materiału mikrobiologicznego (przetrwalniki bakterii, chlamydospory, sklerocja grzybów) oraz aktywnej (młodej) substancji organicznej gleb (próchnicy), bądź też są wyeliminowane z obiegu, wchodząc w skład tzw. starej substancji organicznej kumulowanej w głębszych poziomach profilu glebowego.



Źródło (Source): Van Veen i in. 1984

Ryc. 4. Przepływ węgla w glebach borów sosnowych

Fig. 4. A carbon flow through the pine forest soils

Oznaczenie ilości CO<sub>2</sub>, jakie uwalniają się w trakcie rozkładu i mineralizacji substancji organicznej w glebach, na drodze bezpośrednich pomiarów jest niemożliwe. Wyniki badań polowych oddychania gleb są bowiem sumą respiracji heterotrofów i korzeni. Respirację heterotrofów w górnych poziomach gleb badanych drzewostanów oszacowano na podstawie wyników pomiarów, w warunkach laboratoryjnych, tempa rozkładu substancji organicznej i ilości uwalnianego CO<sub>2</sub> w jednostce czasu i korzystając z równań regresji dotyczących zależności pomiędzy przebiegiem tych procesów w warunkach laboratoryjnych i polowych (ZWOLIŃSKI 1994, 1995). Z oznaczeń tych oraz z pomiarów opadu roślinnego i akumulacji węgla w glebie wynika, że z 2,5 t C, która rocznie, jako opad roślinny trafia do poziomu L (tab. 1) uwalnia się 1 t C w postaci CO<sub>2</sub>, natomiast 1,5 t C przechodzi do poziomu F, gdzie z kolei uwalnia się 0,8 t C-CO<sub>2</sub>, a 0,7 t C przechodzi do poziomu H, skąd 0,3 t C przechodzi do poziomu mineralnego, a reszta w postaci CO<sub>2</sub> jest uwalniana do atmosfery. Poza opadem roślinnym, znaczna część węgla dostająca się do gleby pochodzi z korzeni (wydzieliny, części obumarłe). Z braku możliwości oznaczenia na drodze bezpośrednich pomiarów, przepływ węgla z korzeni do gleb określono pośrednio. Na węgiel uwalniany w trakcie respiracji heterotrofów składa się C z opadu roślinnego i C z korzeni:

$$C_{\text{respiracja heterotrofów}} = C_{\text{opad roślinny}} + C_{\text{korzenie}}$$

Tabela 1  
Table 1
**Obieg węgla w glebach borów sosnowych**  
 A carbon cycling in pine forest soils

WEJŚCIE INPUT	WYJŚCIE OUTPUT	Zawartość C C content t/ha	Czas obrotu (lata) C turnover time (years)	
			w poziomie in the horizon	w całej warstwie in the whole layer
	<i>opad roślinny</i> <i>litterfall</i>			
3,4	3,1	poziom horizon		
	↓			
	↑			
	L 2,5 → 1,0	L 2	L 0,8	
	↓			
	↑			
	F 1,5 → 0,8	F 15	F 10	
	↓			
	↑			20
	H 0,7	H 25	H	
<i>korzenie</i> <i>roots</i>	→0,9 ⇒ ↓ ⇒ 1,3		25	
	A 0,3	A 15	A	
	⓪			

Podstawiając do powyższego równania wyniki pomiarów opadu roślinnego (2,5 t C/ha rok) i respiracji heterotrofów (3,1 t C/ha rok) oszacowano, że 0,6 t C/ha rok pochodzi z korzeni. Dodając do tego ilość C wiązanej w poziomie nieorganicznym gleb, tj. 0,3 t C/ha rok, uzyskano sumę 0,9 t C, stanowiącą ilość, która przepływa w ciągu roku z korzeni do gleby.

Odniesienie ilości C przechodzącego przez poszczególne poziomy w ciągu roku do ilości C skumulowanego w tych poziomach, pozwala na oszacowanie czasu obiegu węgla w badanym systemie glebowym (VOGT i in. 1986):

$$T = \frac{Z}{D}$$



gdzie:

$T$  – czas obiegu,

$Z$  – zawartość węgla w glebie,

$D$  – dopływ węgla.

Wynosi on 0,8, 10 i 25 lat odpowiednio dla poziomów L, F i H/A, a średni czas obiegu, tj. okres potrzebny do zastąpienia ilości C równoważnej całej zawartości C w tej warstwie, wynosi około 20 lat.

Przez biomasę drobnoustrojów przechodzi cała, trafiająca do gleby, masa organiczna. Jest ona materiałem energetycznym dla drobnoustrojów glebowych wykorzystywanym w różnych reakcjach biochemicznych, związanych z ich utrzymaniem się w stanie fizjologicznie aktywnym oraz z procesami biosyntezy. W wyniku działalności tych organizmów znaczna część zawartego w substancji organicznej węgla zostaje uwolniona w postaci  $\text{CO}_2$ , część natomiast wiązana jest w biomacie. Wydajność wzrostu drobnoustrojów, określająca jaka część dostarczonego substratu użyta jest do biosyntezy, uwarunkowana jest szeregiem czynników środowiskowych oraz stanem fizjologicznym drobnoustrojów. Zakładając, że współczynnik wydajności wzrostu  $Y = 0,35$  (BABIUK, PAUL 1970), tzn. że z dostarczonego substratu 35% C wbudowywane jest w biomasę, oraz biorąc pod uwagę oszacowaną ilość  $\text{CO}_2$  uwalnianą w wyniku respiracji heterotrofów przez poszczególne poziomy gleb w ciągu roku obliczono, że produkcja biomasy drobnoustrojów wynosi odpowiednio: 538, 430 i 700 kg  $C_{\text{biom.}}/\text{ha}\cdot\text{rok}$  w L, F i H/A (tab. 2). Dzieliąc te wartości przez oznaczoną biomasę drobnoustrojów zasiedlających kolejne poziomy, otrzymano liczbę pokoleń drobnoustrojów w ciągu roku. Wynosi ona 21,5, 2,2 i 1,8, odpowiednio w poziomach L, F i H/A; średnio w całej warstwie organicznej oraz w górnym poziomie mineralnym – 2,7. Podobny wynik, tj. 2,9 pokoleń, uzyskano korzystając ze wzoru (GRAY i WILLIAMS 1971):

$$Y(S + xR) = xR$$

gdzie:

$Y = 0,35$ ,

$S$  – ilość (kg C/ha·rok) dostarczonego substratu,

$x$  – biomasa drobnoustrojów (kg  $C_{\text{biom.}}/\text{ha}$ ),

$R$  – liczba pokoleń.

Oznacza to, że część węgla przepływająca przez poszczególne poziomy profilu glebowego przechodzi przez biomasę wielokrotnie, tzn. immobilizowana jest w biomacie, uwalniana w postaci metabolitów oraz w trakcie lizy komórek i powtórnie użyta do biosyntezy. Istnieje zatem dodatkowy obieg wewnętrzny węgla pomiędzy biomasą drobnoustrojów a materiałem mikrobiologicznym (głównie produktami metabolizmu drobnoustrojów) (ryc. 4), z którego, jak wykazują niek-

Tabela 2  
Table 2**Biomasa drobnoustrojów glebowych w borach sosnowych**  
Microbial biomass in pine forest soils

Poziom gleby Soil horizon	C <sub>biom.</sub> (kg/ha)	Produktywność (kgC <sub>biom.</sub> /ha · rok) Productivity (kgC <sub>biom.</sub> /ha · year)	Liczba pokoleń/rok No. of generations/year	
			w poziomie in the horizon	w całej warstwie in the whole layer
L	25	538	21,5	2,7
F	200	430	2,2	
H	250	700	1,8	
A	150			

tóre badania (VAN VEEN i in. 1984), nieznaczna tylko część węgla wypływa do innych zbiorników.

Do przeprowadzenia bilansu węgla w glebach konieczne są dane dotyczące respiracji autotrofów. Respirację korzeni oszacowano, korzystając z modelu RAICHA i NADELHOFFERA (1989), opracowanego na podstawie badań prowadzonych w lasach różnych stref klimatycznych, które wykazały istotną zależność pomiędzy ilością opadu roślinnego (drobnego) a intensywnością oddychania gleb:

$$\text{oddychanie gleb (t C/ha·rok)} = 2,92 \times \text{opad roślinny (t C/ha·rok)} + 1,30$$

Podstawiając do powyższego wzoru oznaczoną ilość opadu igieł sosny (2 t C/ha·rok) wyliczono, że ilość C uwalnianego podczas oddychania gleb badanych borów sosnowych wynosi 7,1 t/ha·rok. Na oddychanie gleb składa się respiracja heterotrofów i korzeni:

$$\text{oddychanie gleb} = \text{oddychanie heterotrofów} + \text{oddychanie korzeni}$$

Z różnicy pomiędzy oddychaniem gleb (7,1 t C/ha·rok) i heterotrofów (3,1 t C/ha·rok) wynika, że ilość C-CO<sub>2</sub> uwalnianego w trakcie oddychania korzeni wynosi 4,0 t C/ha·rok. Stanowi to 56% ogólnej respiracji gleb, co mieści się w zakresie 33-66% podawanym przez autorów niektórych publikacji (NAKANE i in. 1983; EWEL i in. 1987; RAICH, NADELHOFFER 1989). Zakładając, że na oddychanie korzenie drzew iglastych zużywają około 40% całej produkcji fotosyntetycznej

(EIDMANN 1962), produkcja pierwotna brutto badanych drzewostanów sosnowych wynosi około 10 t C/ha·rok.

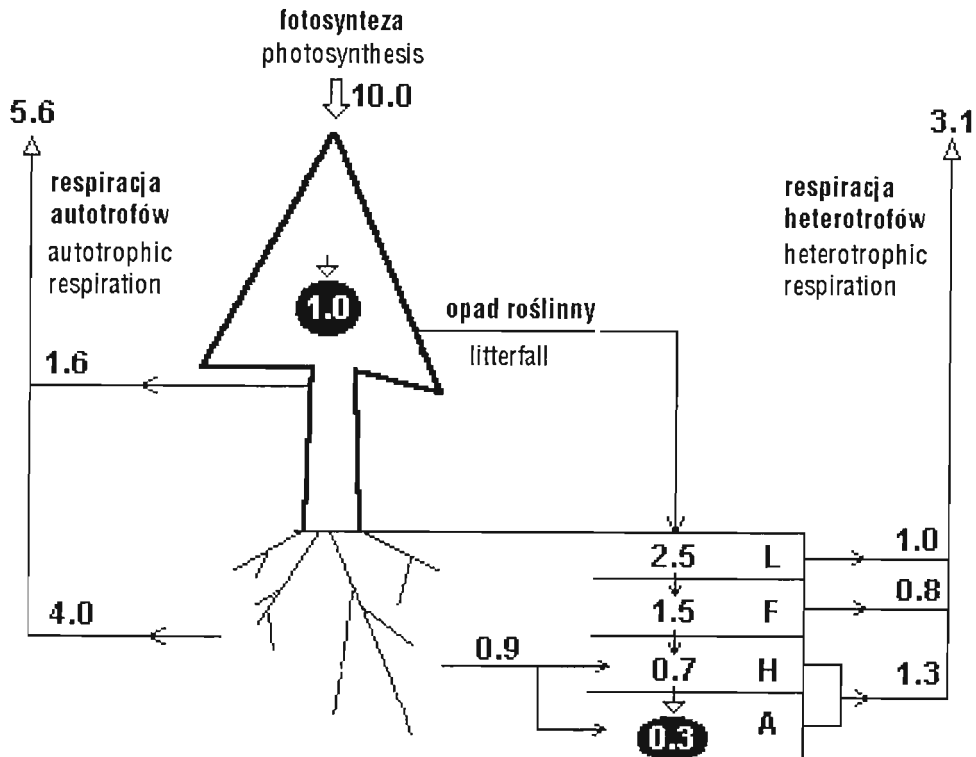
#### 4. BILANS WĘGLA W BORACH SOSNOWYCH

W warunkach równowagi biologicznej ekosystemu, kiedy zapas węgla pozostaje niezmienny, tj. nie następuje dalszy wzrost ilości C w fitomasie i w glebie, roczny dopływ świeżej masy organicznej z opadu roślinnego i z korzeni jest równoważny całkowitej produkcji pierwotnej netto. Sytuacja taka nie występuje na ogół w lasach użytkowanych gospodarczo, ponieważ charakteryzują się one znacznym przyrostem zasobności drzewostanów. W badanych drzewostanach sosnowych V klasy wieku wynosił on około 5 m<sup>3</sup>/ha·rok (ORZEL 1995), co stanowi około 1 t C/ha·rok. Z dodania tej ilości do 3,4 t C/ha·rok, pochodzącego z opadu roślinnego i z korzeni wynika, że produkcja pierwotna netto wynosi 4,4 t C/ha·rok. Przyjmując, że cała produkcja fotosyntetyczna tych drzewostanów wynosi 10 t C/ha·rok i odejmując od tego ilość C wydzielonego w tym czasie podczas respiracji heterotrofów i korzeni (3,1 + 4,0 t/ha·rok) oraz ilość C związanego przez dendromasę i glebę (1,0 + 0,3 t/ha·rok) otrzymujemy 1,6 t C/ha·rok – ilość, która uwalnia się w wyniku oddychania części nadziemnych roślin.

Reasumując, roczny bilans węgla w badanych drzewostanach sosnowych (V klasa wieku) przedstawia się następująco: z 10 t C/ha·rok związanego fotosyntezy, czyli z całej produkcji pierwotnej brutto, 5,6 t C (4,0 t z korzeni i 1,6 t z części nadziemnych) powraca do atmosfery w wyniku respiracji autotrofów (ryc. 5). Węgiel w ilości 2,5 t C/ha·rok z opadu roślinnego oraz 0,9 t C/ha·rok z korzeni – razem 3,4 t/ha·rok – przechodzi przez kolejne poziomy gleby, gdzie jest mineralizowany przez drobnoustroje i skąd, w postaci CO<sub>2</sub>, uwalnia się 3,1 t C/ha·rok. Dendromasa wiąże 1,0 t C/ha·rok, a 0,3 t C/ha·rok kumulowane jest w poziomach mineralnych gleb. Zatem na 10 t C/ha·rok produkcji pierwotnej brutto, produkcja pierwotna netto wynosi 4,4 t C/ha·rok (tj. 44% produkcji brutto), natomiast 1,3 t C/ha·rok (13% produkcji brutto) wiązana jest przez ekosystem.

#### 5. UWAGI KOŃCOWE

Badania obiegu węgla pozwalają na określenie produktywności ekosystemu leśnego oraz możliwości jego unieruchamiania, czyli okresowego wyłączenia tego pierwiastka z obiegu. To ostatnie staje się szczególnie ważne w kontekście oceny roli gospodarki zasobami leśnymi w kształtowaniu poziomu CO<sub>2</sub> w atmos-



Ryc. 5. Roczny bilans węgla w borze sosnowym (t C/ha)  
 Fig. 5. An annual C balance in a pine forest (t C/ha)

ferze. Słabą stroną badań obiegu węgla w ekosystemach leśnych jest brak możliwości ustalenia na podstawie bezpośrednich pomiarów przepływu węgla przez niektóre odcinki szlaku krążenia materii, jak np. z korzeni do gleby. Wymaga to stosowania metod pośrednich, których wyniki muszą zawsze budzić wątpliwości.

W przedstawionym bilansie dla borów sosnowych oszacowana ilość węgla pochodzącego z korzeni wynosi 0,9 t/ha·rok, co stanowi 36% C opadu roślinnego lub 24% całkowitej ilości C zawartego w świeżej masie organicznej napływającej do gleby. Trudno określić, na ile dokładne są te dane, a także czy stwierdzony stosunek ilości węgla z korzeni do węgla z opadu roślinnego występuje niezależnie od typu siedliskowego lasu, jak to ma miejsce w przypadku relacji opad roślinny – respiracja gleb (RAICH, NADELHOFFER 1989). Należy zaznaczyć, że stosowane w badaniach obiegu węgla metody pośrednie oparte są na modelach odnoszących się do ekosystemów zrównoważonych. Warunku tego na ogół nie spełniają lasy użytkowane gospodarczo, stąd błąd w obliczeniach przy korzystaniu z tych metod jest tym większy, im młodszy jest badany drzewostan. Przedstawiony w niniejszej pracy obieg i bilans węgla dotyczy najstarszych z badanych drzewostanów (V klasy wieku), charakteryzujących się ustabilizowanym poziomem węgla w warstwie organicznej gleb (ryc. 3), co pozwala mieć nadzieję, że uzyskane dane szacunkowe nie są obciążone dużym błędem.

## A CARBON CYCLING IN PINE FORESTS

### Summary

For the evaluation of carbon cycling in pine forests, results provided by long-term investigations in pine stands of various age classes conducted in southern Poland, as well as literature data were used.

91 t C of the 148 t C/ha stored in the mature (V age class) pine forests was in the phytomass, of which 89 t C was bound in the dendromass. C content in above-ground litter annual production was estimated to be 2,5 t/ha. Organic soil horizons contained about 42 t C/ha, whereas the amount of C accumulated in upper mineral soil over the course of stand development was 15 t C/ha (fig. 2). The field survey showed, that in the initial phase of stand development successive organic horizons were formed, and after about 30 years a distinct downward transport of C into the mineral soil took place. Meanwhile, the C stock in organic horizons continued to increase until the steady state was reached, i.e., after 50-60 years of stand development. Simultaneously, C accumulation in the mineral soil succeeded all the time in the rate of about 0,3 t/ha·year (fig. 3). Organic matter that enter the soil undergoes the permanent mineralization-immobilization processes, conducted mainly by soil microorganisms (fig. 4). Based on litterfall data, as well as the estimation of heterotrophic respiration (laboratory measurements), it was assessed, that of the 2,5 t C entering, as litterfall, the L horizon each year, 1 t C-CO<sub>2</sub> returned to the atmosphere by heterotrophic respiration, and 1,5 t C was transported to F horizon, where subsequently 0,8 t C-CO<sub>2</sub> was released and the other 0,7 t C passed to H horizon - from where 0,3 t C was transported into the mineral soil horizons, and the rest, as CO<sub>2</sub>, was released (table 1). The annual input of organic C to a soil from roots (root exudates, dead roots) was determined indirectly, using the heterotrophic respiration (3,1 t C/ha·year) and litterfall (2,5 t C/ha·year) data in the equation:

$$C_{\text{heterotrophic respiration}} = C_{\text{litterfall}} + C_{\text{roots}}$$

and including the annual C accumulation in mineral soil (0,3 t/ha). This suggests, that ca 0,9 t C/ha could be added annually from roots, what comprised about 24% of the total C input. Dividing the estimated C content of particular soil horizons by the annual input to these horizons, turnover time of C in the whole investigated soil layer was calculated at about 20 years (table 1). Assuming, that the coefficient of microbial growth yield  $Y = 0,35$ , and taking into account the assessed amount of C-CO<sub>2</sub> released by heterotrophic respiration, it was calculated that the productivity of soil microorganisms amounted to 538, 430 and 700 kg C<sub>biom.</sub>/ha·year in the L, F and H/A horizons, respectively. Dividing these values by the determined microbial biomass in these horizons, turnover rate was evaluated; the number of microorganism generations was found to be about 2,7/year in the investigated soil layer (table 2). This implies, that a part of C entering the particular soil horizons passes through the microbial biomass repeatedly, i.e., is immobilized in biomass, released from cells by autolysis or as microbial metabolic products, and again utilized for biosynthesis (fig. 4). In fitting the Raich and Nadelhoffer's (1989) model:

$$\text{soil respiration (t C-CO}_2\text{/ha·year)} = 2,92 \times \text{litterfall (t C/ha·year)} + 1,30$$

to data of above-ground C input from a fine litter (ca 2 t/ha·year), the total soil respiration was calculated to be 7,1 t C/ha·year. By subtracting from this the heterotrophic respiration (3,1 t C/ha·year) — root respiration rate was found to be about 4,0 t C-CO<sub>2</sub>/ha·year. Assuming that the roots of coniferous trees use about 40% of the whole photosynthetically-reduced C on respiration, one can conclude that the gross primary production of mature pine stands is 10 t C/ha·year. Of this, 5,6 t C/ha·year returns to the atmosphere by autotrophic respiration, while the 2,5 t C/ha·year from litterfall and 0,9 t C/ha·year from roots

are mineralized by microorganisms in soil, from where 3,1 t C-CO<sub>2</sub>/ha is released annually. 1,0 t C/ha-year is stored in the dendromass (stand volume increment) and 0,3 t C/ha-year is accumulated in soil (fig. 5). Then, in the mature pine forests, a gross primary production is about 10 t C/ha-year, a net primary production is 4,4 t/ha-year, whereas 1,3 t C/ha-year (13% of gross primary production) is immobilized in the ecosystem.

## PIŚMIENNICTWO

- ALBREKTSON A. 1980: Relations between tree biomass fractions and conventional silvicultural measurements. W: Structure and function of northern coniferous forest (T. Persson ed), Ecol. Bull. (Stockholm), 32: 315-327.
- ANDERSON J. P. E., DOMSCH K. H. 1978: A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 10: 215-221.
- BABIUK L. A., PAUL E. A. 1970: The use of fluorescein isothiocyanate in the determination of the bacterial biomass of grassland soil. *Can. J. Microbiol.*, 9: 306-308.
- BEARE M. H., NEELY C. L., COLEMAN D. C., HARGROVE W. L. 1990: A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. *Soil Biol. Biochem.*, 22: 585-594.
- BIRDSEY R. A. 1992: Changes in forest carbon from increasing forest area and timber growth. W: Forest and global changes, vol. 1, (R. N. Sampson, D. Hair eds), Washington, USA, 23-39.
- BORMANN B. T., SPALTENSTEIN H., MC CLELLAN M. H., UGOLINI F. C., CROMACK J. R., NAY S.M. 1995: Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests. *J. Ecol.*, 83: 747-757.
- BORMANN B.T., SIDLE R. S. 1990: Changes in productivity and distribution of nutrients in a chronosequence at Glacier Bay. Alaska. *J. Ecol.*, 78: 561-578.
- CANNELL M. G. R. 1995: Forests and the global carbon cycle in the past, present and future. Research Report 2, European Forest Institute, Joensuu, Finland, 66.
- CANNEL M. G. R. 1996: Forests as carbon sinks mitigating the greenhouse effect. *Comm. For. Rev.*, 75: 92-99.
- DETWEILERR. P., HALL C. A. S. 1988: Tropical forests and the global carbon cycle. *Science*, 239: 42-47.
- EIDMANN F. E. 1962: Atmung der unterirdischen Organe und Abgaben an die Mycorrhiza. *Int. Symp. d. Baumphysiologie*, Innsbruck 1961, 43-45.
- EMMER I. M., SEVINK J. 1994: Temporal and vertical changes in the humus form profile during a primary succession of *Pinus sylvestris*. *Plant and Soil*, 167: 281-295.
- Europe's Environment. The Dobříš Assessment, (D. Stanners, Ph. Bordeau eds.). 1995 European Environment Agency, Copenhagen.
- EWEL K. C., CROPPER W. P., GHOLZ H. L. 1987: Soil CO<sub>2</sub> evolution in Florida slash pine plantations. II. Importance of root respiration. *Can. J. For. Res.*, 17: 330-333.
- GRAY T.R.G., WILLIAMS S. I. 1971: Microbial productivity in soil. W: Microbes and biological productivity (D. E. Hughes, A. M. Rose eds.) University Press, Cambridge, 21-255.
- GUGGENBERGER G., ZECH W. 1993: Dissolved organic carbon control in acid forest soils of Fichtelgebirge (Germany) as revealed by distribution patterns and structural composition analyses. *Geoderma*, 59: 109-129.
- HAKKILA P. 1989: Utilization of residual forest biomass. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 354.

- HOUGHTON R. A., WOODWELL G. M. 1989: Global climatic change. *Sci. Am.*, 260: 36-44.
- KURTZ W. A., BEUKEMA S. J., APPS M. J. 1996: Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget of the Canadian forest sector. *Can. J. For. Res.*, 26: 1973-1979.
- MATSON P. 1990: Plant-soil interactions in primary succession at Hawaii Volcanoes National Park. *Oecologia*, 85: 241-246.
- MC DOWELL W. H., LIKENS G. E. 1988: Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley. *Ecol. Monographs*, 58: 177-195.
- NAKANE K., YAMAMOTO M., TSUBOTA H. 1983: Estimation of root respiration rate in a mature forest ecosystem. *Japanese J. Ecol.*, 33: 397-408.
- OLSON J. 1963: Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44: 322-331.
- ORR J. C. 1993: Accord between ocean models predicting uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Water, Air and Soil Poll.*, 70: 465-481.
- ORZEL S. 1995: Dynamika wzrostu drzewostanów sosnowych w wybranych regionach przemysłowych Polski południowej. *Zesz. Nauk. Akad. Roln. w Krakowie*, 204: 3-77.
- OVINGTON J. D. 1965: Organic production, turnover and mineral cycling in woodlands. *Biol. Rev.*, 40: 295-336.
- PERSSON T., BAATH E., CLARHOLM M., LUNKVIST H., SÔDERSTRÔM B., SOHLENIUS B. 1980: Trophic structure, biomass dynamics and carbon metabolism of soil organisms in a Scots pine forest. *Ecol. Bull. (Stockholm)*, 32: 419-462.
- POST W. M., EMANUEL W. R., ZINKE P. I., STAGENBERGER A.G. 1982: Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156-159.
- RAICH J. W., NADELHOFFER K. J. 1989: Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 70: 1346-1354.
- SCHLESINGER W. 1990: Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348: 232-234.
- SIEGENTHALER U., SARMIENTO J. L. 1993: Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365: 119-125.
- TURNER D. P., KOERPER G. J., HARMON M. E., LEE J. J. 1995: A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecol. Appl.*, 5: 421-436.
- VAN VEEN J. A., LADD J. N., FRISSEL M. J. 1984: Modelling C and N turnover through the microbial biomass in soil. *Plant a. Soil*, 76: 257-274.
- VANNINEN P., YLITALO H., SIEVÄNEN R., MÄKELÄ A. 1996: Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 10: 231-238.
- VOGT K. A., GRIER C. C., VOGT D.J. 1986: Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and below-ground detritus of world forests. *Adv. Ecol. Res.*, 15: 303-377.
- ZWOLIŃSKI J. 1994: Rates of organic matter decomposition in forests polluted with heavy metals. *Ecological Engineering*, 3: 17-26.
- ZWOLIŃSKI J. 1995: Wpływ emisji zakładów przemysłu metali nieżelaznych na środowisko leśne – rola metali ciężkich w degradacji lasów. *Prace Inst. Bad. Leśn. Ser. A*, 809: 3-86.