

ZBIGNIEW SIEROTA

## Wpływ grzybów rozkładających korzenie drzew leśnych na uwalnianie CO<sub>2</sub> – próba waloryzacji

Effect of fungi decomposing roots of forest trees on CO<sub>2</sub> release  
– an attempt of evaluation

### ABSTRACT

Sierota Z. 2012. Wpływ grzybów rozkładających korzenie drzew leśnych na uwalnianie CO<sub>2</sub> – próba waloryzacji. Sylwan 156 (2): 128-136.

On the basis of literature data and own research, algorithms for the calculation of the amount of released CO<sub>2</sub> and C per hectare per year were developed taking into consideration 1) the share of trees infected by root pathogens in 80-year-old pine stands, 2) the weight of tree roots, 3) the share of cellulose in the wood of roots and 4) the loss of cellulose degraded by fungi. The developed model after transformations contains only a) the merchantable timber volume of trees per hectare to be harvested based on measurements or SILP database and b) the area of occurrence of fungi causing wood decay in roots and stumps (here: *Heterobasidion* spp., *Armillaria* spp. and *Phlebiopsis gigantea*). These data can also provide estimates of the level of carbon sequestration in the non-infested forest stands.

### KEY WORDS

CO<sub>2</sub> estimation, carbon sequestration, root decay, pathogens, *P. gigantea*

### ADDRESSES

Zbigniew Sierota – e-mail: z.sierota@ibles.waw.pl

Zakład Ochrony Lasu; Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3; 05-090 Raszyn

### Wstęp

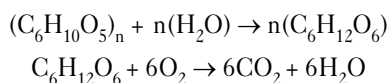
Jednym z istotnych, lecz na ogół rzadko branych pod uwagę elementów ekosystemu, który wpływa na światowy obieg węgla i bilans dwutlenku węgla, zwłaszcza w kontekście efektu szklarniowego i zmian klimatu, są organizmy grzybowe. Zwykle w opracowaniach odnoszących się do tej problematyki podawane są ogólne informacje o świecie roślin, wpływie oceanów, procesów destrukcji materii organicznej czy gleby [Jobbagy, Jackson 2000; Lal 2008; Rykowski 2008, Paul, Clark 1996]. Informacje szczegółowe odnoszą się natomiast do badań specyficznych układów biologicznych i zazwyczaj dostarczają danych o oddychaniu i fotosyntezie części nadziemnych, korzeni drobnych czy drobnoustrojów glebowych w warunkach kontrolowanych [Cairns i in. 1997; Oleksyn i in. 1999; Weigenand i in. 2008]. W tak złożonych ekosystemach jak lasy, pomiar zawartości węgla w biomase korzeni czy ilości CO<sub>2</sub> uwalnianego w procesach oddychania i rozkładu substancji organicznej w glebie jest niezmiernie trudny z metodycznego punktu widzenia [Rykowski 1999; Janssens i in. 2000].

Zagadnieniu wartościowania metod wyliczania biomasy części podziemnej drzewostanu poświęcono wiele prac, omówionych szczegółowo przez Bijaka i Zasadę [2007]. Autorzy ci przedyskutowali także dokładność przeliczników allelometrycznych i wskaźnikowych (R/S), odnoszących się do biomasy części nadziemnej lub do miąższości grubizny żywych drzew stojących. Ocena biomasy części podziemnej – pniaka, korzeni grubszych i korzeni drobnych – stanowi

bowiem interesujące wyzwanie metodologiczne [Cairns i in. 1997]. Utrudnieniem zaś jest fakt, że biomasa korzeni wyrażana bezpośrednio lub ekstrapolowana z użyciem wskaźnika R/S z biomasy części nadziemnej drzewostanu w danym wieku (rozumianej jako miąższość grubizny i drobnicy części nadziemnej) jest wypadkową wielu elementów. Należy do nich biomasa drzew aktualnie rosnących, miąższość wykonanych w przeszłości z różną intensywnością cięć pielęgnacyjnych i cięć przygodnych (trzebienie), jak i uzyskany z tego tytułu przyrost z prześwietlenia. W przypadku oceny biomasy systemów korzeniowych należy mieć dodatkowo na uwadze fakt, iż część korzeni wraz z wiekiem obumiera w sposób naturalny na skutek zaniku auksyn i cytokinin, wzrostu ilości polifenoli oraz zamierania merystemów [Barzdajn, Wesoły 1993; Henry 1987; Watteau 2002]. Część z nich może ulec porażeniu przez organizmy pasożytnicze, co zwiększa intensywność ich procesów fizjologicznych, także oddychania [Gansert 1994], a część ulega bezpowrotnej dekompozycji przez saprotroficzne grzyby rozkładające drewno [Sierota 1995].

Udział grzybów w procesie uwalniania dwutlenku węgla wynika z ich formuły życia. Energię niezbędną do funkcjonowania czerpią bowiem głównie w trakcie rozkładu substancji organicznej, najczęściej celulozy i ligniny, których najprostszą składową jest cząsteczka glikozy. Grzyby bytujące w lesie korzystają z różnych źródeł energii, jednak najliczniejszą grupę stanowią grzyby glebowe, grzyby związane z ryzosferą korzeni oraz grzyby powodujące rozkład drewna drzew stojących i leżących [Orłóš 1966; Mańka 2005].

Przypomnieć należy, że strukturę drewna tworzą średnio w 74% polimery cukrów (celuloza 51% i hemicelulozy 23%) oraz w 22% polimery aromatyczne, czyli lignina [Krzysik 1978; Prosiński 1984]. Celulozy jest zatem w drewnie ponad dwukrotnie więcej niż ligniny i to ona łatwiej poddaje się dekompozycji przez liczne enzymy grzybowe [Gilbertson, Ryvarden 1986; Żółciak i in. 2008]. Dla wyjaśnienia przebiegu reakcji biochemicznych zachodzących w rozkładanym drewnie można przytoczyć uproszczony wzór reakcji hydrolizy celulozy, przebiegającej w dwóch etapach:



Rozkład enzymatyczny celulozy przez endo- i egzocelulazy oraz celobiozy prowadzi kolejno do powstania celodekstryn, celotetroz, celobiozy i D-glikozy, a w dalszej kolejności (utlenowanie) do uwalniania dwutlenku węgla oraz energii [Chapin i in. 2002].

W naszych lasach występuje wiele gatunków grzybów powodujących biały (ligniny), brunatny (celulozy) czy pleśniowy rozkład drewna. Niektóre grzyby chętniej zasiedlają drewno drzew liściastych, inne gatunków iglastych, jedne z nich są patogenami lub pasożytami słabości, inne zaś typowymi saprotrofami. Ich aktywność jest warunkowana zarówno przez gospodarza (rodzaj, wiek, struktura drewna, genetycznie determinowane enzymy i sposób bytowania), jak i warunki środowiska (sposób gospodarki, emisje przemysłowe, klimat) [Orłóš 1966; Sierota 1996; Mańka 2005]. W stymulowaniu zasiedlaniu porażonych tkanek i rozwoju choroby w drzewostanie nie bez znaczenia jest wpływ dwutlenku węgla powstającego w trakcie rozkładu drewna korzeni drzew [Hintikka 1970].

Utrata masy w trakcie 3-miesięcznego rozkładu drewna korzeni przez *Phlebiopsis* wynosi około 20%. W ciągu roku, w przypadku rozkładu przez *Polyporus*, może dochodzić do 60%, a *Phlebiopsis* nawet do 80% [Kirk, Moore 1972; Sierota 1995, 1997]. Rozkład poszczególnych elementów chemicznych drewna jest w tym czasie jeszcze bardziej intensywny, gdyż przy rozkładzie zaledwie 10-12% suchej masy grzyb może wykorzystywać nawet 45% masy węglowodanów (*Serpula lacrymans*) [Liese, Stamer 1932], a także 34,9% ligniny (*Ischnoderma resinosum*) [Kirk, Moore 1972].

W procesie zasiedlania systemów korzeniowych drzew przez grzyby nie bez znaczenia jest charakter ich rozprzestrzeniania się w drzewostanie, a zwłaszcza rozwoju choroby powodowanej przez patogeny korzeni. Sprzyja temu ogniskowy charakter tego zjawiska oraz fakt przemieszczania się grzybni patogena na drodze infekcji wtórnych przez sąsiadujące ze sobą korzenie drzew już zasiedlonych ze zdrowymi. Takimi korzeniami zasiedlonymi przez patogeny są zarówno korzenie drzew znajdujących się aktualnie w fazie infekcji lub generalizacji patogenu, jak i korzenie drzew usuniętych w okresie ostatnich zabiegów pielęgnacyjnych (czyszczeń czy trzebieży), na co wskazuje obecność owocników *Heterobasidion* spp. czy ryzomorfy i grzybnia *Armillaria* spp. na pniakach po tych drzewach [Zółciak i in. 2006]. Uważa się równocześnie, że ukryty charakter infekcji i brak specyficznych symptomów choroby w tym okresie wyraża się niedoestymowaniem rzeczywistego rozmiaru zagrożenia, które podlega rejestracji jedynie w określonych warunkach zapisanych w Instrukcji Ochrony Lasu [2004]. Oznacza to, że proces dekompozycji materii organicznej w lesie, wyrażany tylko stopniem zasiedlenia i rozkładu korzeni drzew, w krótkim okresie prowadzi do uwalniania znacznych ilości dwutlenku węgla, zwiększając wpływ na tworzenie się tzw. efektu szklarniowego, a przy tym zmniejszając sekwestrację węgla w przyrodzie [Jobbagy, Jackson 2000; Rykowski 2008].

Celem pracy było określenie rocznej wielkości uwalnianego dwutlenku węgla i węgla pod wpływem działalności grzybów rozkładających drewno korzeni w drzewostanie sosnowym IV klasy wieku.

## Material i metody

Dla realizacji celu niniejszego opracowania przyjęto, że całkowitą biomasę systemów korzeniowych drzewostanu stanowi suma biomasy korzeni drzew stojących żywych i martwych o zasobności wyrażonej grubizną całej masy w korze (grubizny i drobnicy) oraz biomasa korzeni po drzewach ściętych w trzebieży i cięciach przygodnych w ostatnim 5-leciu o zasobności wyrażonej masą grubizny i drobnicy.

Do oszacowania ilości dwutlenku węgla i węgla uwalnianego z korzeni drzew porażonych przez grzyby pasożytnicze w wyniku rozkładu celulozy w badanym drzewostanie zastosowano schemat kolejno wynikających z siebie obliczeń (etapów), zapisanych w postaci iloczynu wielu zbiorów (produkt kartezjański):

$$E_i = \sum_{i=1}^n E_{i-1} \cdot k_i$$

gdzie:

$E_i$  – oczekiwana wartość  $i$ -tego etapu obliczeń,

$k_i$  – współczynnik właściwy dla  $i$ -tego etapu obliczeń.

W efekcie miąższość celulozy rozłożonej przez obecne w korzeniach grzyby określono wzorem:

$$RW = w \cdot c \cdot k \cdot G_r(u + p)$$

Za Czurajem [1990] przyjęto, że miąższość grubizny drzew usuniętych w ostatnim 5-leciu ( $u$ ) stanowi 60% zasobności drzewostanu ( $G_r$ ), a miąższość korzeni drzew ( $k$ ) – 20% miąższości grubizny części nadziemnej [Husch i in. 2003; Bijak, Zasada 2007]. Porażenie sosen w wyniku huby korzeni ( $p$ ) wynosi 20% [Bruchwald 1984; Sierota 1995; Małecka, Sierota 2000]. Udział celulozy i hemicelulozy ( $c$ ) wynosi w drewnie średnio 72% jego masy [Krzysik 1978; Prosiński 1984]. W ciągu roku grzyby rozkładają ( $w$ ) około 80% dostępnych węglowodanów (celulozy i ligniny) zawartych w drewnie korzeni [Liese, Stamer 1934; Kirk, Moore 1972; Gilbertson, Ryvardeen 1987; Sierota 1997].

Dodatkowo przyjęto, że metr sześcienny drewna sosnowego waży średnio 800 kg [Krzysik 1978]. Masa cząsteczkowa celulozy (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> wynosi 162u, masa dwutlenku węgla – 44u, a masa węgla – 12u. Zatem ilość CO<sub>2</sub> powstającego w wyniku rozkładu celulozy wynosi 163%, a węgla – 44,4% [Krzysik 1978; Prosiński 1984].

## Wyniki

Miąższość celulozy rozłożonej przez grzyby obecne w korzeniach RW=0,1G<sub>p</sub>, co po przeliczeniu na kilogramy wyniosło 80 G<sub>p</sub>. Zatem ilość dwutlenku węgla i węgla uwalnianych w wyniku rozkładu celulozy przez grzyby zasiedlające korzenie drzew na powierzchni jeden hektar drzewostanu wynosi odpowiednio 130,4 G<sub>p</sub> i 35,5 G<sub>p</sub> (tab.).

Przyjmując za Czurajem [1990], że w wieku 80 lat zasobność drzewostanu sosnowego I bonitacji wynosi 462 m<sup>3</sup>/ha, to zgodnie z powyższymi wyliczeniami ilość dwutlenku węgla uwolnionego w wyniku rozkładu celulozy przez patogeny grzybowe obecne w systemach korzeniowych wynosi około 60,25 t/ha, węgla zaś – 16,4 t/ha.

Powierzchnia występowania w Polsce patogenów korzeni w układzie klas wieku nie była dotychczas szacowana. W ramach corocznej oceny występowania chorób infekcyjnych w Polsce [Krótkoterminowa... 2010], wykonywanej na podstawie danych dostarczanych od ponad 30 lat przez nadleśnictwa, ZOL i RDLP, powierzchnia występowania tych chorób, w tym także sprawców chorób korzeni, określana jest jedynie w dwu kategoriach wiekowych: do i ponad 20 lat. W drzewostanach powyżej 20 lat powierzchnia występowania huby korzeni i opieńkowej zgnilizny korzeni wynosi aktualnie łącznie około 270 tys. hektarów [Krótkoterminowa... 2010; Mykhayliv, Sierota 2010]. Przyjmując, że powierzchnia drzewostanów sosnowych IV klasy wieku wynosi 993 tys. ha [Leśnictwo 2009], można oszacować z trudnym do określenia błędem, że w Polsce patogeny korzeni w drzewostanach sosnowych tej klasy wieku notowane są na obszarze około 55 tys. ha. Oznaczałoby to, że z powodu obecności huby korzeni i opieńki ilość wydzielanego dwutlenku węgla tylko w omawianym typie drzewostanów kształtuje się na poziomie 3,3 Mt, a węgla – 0,9 Mt.

## Dyskusja

Należy mieć świadomość, że przedstawione obliczenia wymagały pewnego uśredniania danych, opartych na analizach i pomiarach cząstkowych oraz ich interpolacji. Nie są bowiem znane badania komplementarne odnoszące się do całych drzewostanów, we wszystkich klasach wieku, w danej strefie geograficznej, a jedynie pewne uogólnienia, których implikacją są ogólnoświatowe rekomendacje [Eggelston i in. 2006]. Dane rzeczywiste w łatwy sposób można jednak uzyskać z aktualnego Operatu Urządzenia Lasu czy z SILP lub na podstawie wyników analiz, ocen i pomiarów drzewostanu. W taki sposób można wyliczyć ilość uwalnianego dwutlenku węgla dla dowolnego obiektu leśnego o znanych parametrach i określonych dla niego współczynnikach korygujących.

W prezentowanych obliczeniach przyjęto za Bruchwaldem [1984], że udział drzew z hubą korzeni (*p*) w 80-letnim drzewostanie sosnowym wynosi 20%, podczas gdy Małecka i Sierota [2000] podają, że zależnie od intensywności choroby stopień zagrożenia drzewostanu w tej klasie wieku przez patogeny korzeni może zawierać się w przedziale 3,5-36,5%. Według innych badań Sieroty i Małeckiej [2003] w 55-letnich drzewostanach sosnowych, z aktywnie rozwijającą się hubą korzeni, udział drzew porażonych osiąga nawet 80%, co jest zgodne z wynikami badań innych autorów odnoszącymi się do zagrożonych drzewostanów sosnowych w II-III klasie

Tabela.

Sposób wyliczenia uwalniania CO<sub>2</sub>  
Calculation of CO<sub>2</sub> release

Obliczenia danego etapu	Wzór	Wynik
Mięszość korzeni [m <sup>3</sup> ] obecnych w glebie w drzewostanie o wieku $t$	$K_D = K_{G_t} + K_{G_{t-5}} = k G_t + k G_{t-5}$ $= k(G_t + G_{t-5}) = k(G_t + uG_t)$ $= k[G_t(1+u)]$	$K_D = 0,2[G_t(1+0,6)]$ $= 0,2 \times 1,6 \times G_t$ $K_D = 0,32 \times G_t$
Mięszość korzeni [m <sup>3</sup> ] porażonych (PK)	$PK = p K_{G_t} + K_{G_{t-5}} = p k G_t + k G_{t-5}$ $= p k G_t + k u G_t = k G_t (u+p)$	$PK = 0,2G_t(0,6+0,2)$ $= 0,2 \times 0,8 \times G_t = 0,16G_t$ $PK = 0,16G_t$
Udział celulozy [m <sup>3</sup> ] w korzeniach z hubą korzeni (C <sub>PK</sub> )	$C_{PK} = c PK = c k G_t (u+p)$	$C_{PK} = 0,72 \times 0,16G_t = 0,1152G_t$ w zaokrągleniu $C_{PK} = 0,12G_t$
Rozkład celulozy [m <sup>3</sup> ] przez grzyby obecne w korzeniach (RW)	$RW = w C_{PK} = w c k G_t (u+p)$	$RW = 0,8C_{PK} = 0,8 \times 0,12G_t = 0,096 G_t$ w zaokrągleniu $RW = 0,1 G_t$ [m <sup>3</sup> ]
Przeliczenie rozłożonej celulozy (RW) na kilogramy [kg]	$RW_{m^3} = 800 RW_{kg}$	$RW = 800 \times 0,1G_t = 80G_t$ $RW = 80G_t$ [kg]
Ilość CO <sub>2</sub> [kg] uwalniana w wyniku rozkładu celulozy (RW) przez grzyby zasiedlające korzenie drzew na powierzchni 1 ha drzewostanu (DW)	$DW = 1,63 \times RW$	$DW = 1,63 \times 80G_t = 130,4G_t$
Ilość węgla C [kg] uwolniona w wyniku rozkładu celulozy (RW) przez grzyby zasiedlające korzenie drzew na powierzchni 1 ha drzewostanu (W)	$W = 0,444 \times RW$	$W = 0,444 \times 80G_t = 35,5 G_t$

wieku [Petrylaite, Ronnberg 2004]. Podobne uwagi można odnieść do wartości pozostałych współczynników korygujących. Oznacza to, że w celu uzyskania właściwego i powtarzalnego wyniku należy każdorazowo dostosować współczynniki proponowanego algorytmu do rzeczywistej sytuacji w danej skali pomiarowej. Tym niemniej, na podstawie wyżej przedstawionego schematu można uzyskać w miarę wiarygodną informację o wpływie grzybowego rozkładu celulozy zawartej w drewnie korzeni na uwalnianie dwutlenku węgla oraz węgla. Przynajmniej taka sama pula ulega sekwestracji w systemach korzeniowych drzew w zdrowych, wolnych od patogenów drzewostanach.

Opisany sposób może być również pomocny przy przeliczaniu innych interesujących cech i parametrów dotyczących relacji systemu korzeniowe – dwutlenek węgla. Jako przykład można podać oddychanie korzeni, grzyby mikoryzowe w zasiedlonych korzeniach drobnych, rozkład drewna pozostającego na powierzchni itp.

Jednym z praktycznych zastosowań proponowanych algorytmów w ocenie ogólnego bilansu węgla może być wyliczenie udziału CO<sub>2</sub> uwalnianego z korzeni pniaków zabezpieczanych z użyciem grzyba *Phlebiopsis gigantea* w biologicznej metodzie ochrony przed patogenami korzeni. Jest to metoda апробована i stosowana powszechnie w zagrożonych drzewostanach w wielu krajach Europy jako skuteczny i naturalny sposób walki z hubą korzeni i opieńką zgnilizną korzeni [Rishbeth 1951; Rykowski, Sierota 1977]. Jej istota wyraża się wprowadzeniem do zagrożonego przez patogeny drzewostanu kolejnego grzyba, tyle że pożytecznego konkurenta (w Polsce do niedawna w biopreparacie PgIBL). Jest to organizm o sile rozkładu drewna pniaków i korzeni, zwłaszcza sosny, przewyższającej aktywność patogenów, co zresztą jest przesłanką do stosowania tego właśnie gatunku grzyba już od ponad 50 lat w Europie, a od 35 lat w Polsce [Pratt i in. 2000; Sierota 2001].

Powyższe stwierdzenia pozwalają na uściślenie roli grzybów w bilansie CO<sub>2</sub> przez wykorzystanie w przedstawionych wyliczeniach kolejnych założeń. Metoda biologiczna stosowana była na gruntach porolnych corocznie, średnio na powierzchni 26 tys. hektarów, głównie w drzewostanach II klasy wieku [Krótkoterminowa... 2010], co wynika z konieczności wykonywania zadań zapisanych Zasadach Hodowli Lasu [2003] oraz w Instrukcji Ochrony Lasu [2004]. Ponieważ zabieg dotyczył średnio 400 pniaków/ha ( $u=0,55$ ), oznacza to, że łącznie zabezpieczano rocznie około 10,4 mln pniaków. Według Bijaka i Zasady [2007] masa systemów korzeniowych drzew w tym wieku wynosi średnio około 32 t/ha. W stanie absolutnie suchym wynosi to około 12 t/ha [Fraszewski 1993], czyli po uwzględnieniu współczynnika  $c$  zawiera 8,68 t/ha celulozy. Rozkład korzeni i pniaka po 6 miesiącach od inokulacji wynosi średnio 40%, a po roku 80% jego masy [Sierota 1995, 1997], czyli  $w=0,8$ . Powyższe wartości doprowadzają do informacji o 7 t/ha rozłożonej przez *P. gigantea* celulozy korzeni, czyli emisji 11,4 t CO<sub>2</sub>/ha. W skali kraju stosowanie grzybów rozkładających pniaki oznacza wydzielanie 296,4 kt dwutlenku węgla rocznie, co dodatkowo zwiększa pulę tego gazu w atmosferze. Wartość ta stanowi co prawda jedynie 9% puli dwutlenku węgla wytwarzanego przez patogeny, jednak przy ogólnej ocenie czynników kształtujących „efekt szklarniowy” winna być brana pod uwagę.

Wpływ tylko trzech wymienionych wyżej organizmów grzybowych (*Heterobasidium* spp., *Armillaria* spp., *P. gigantea*) na bilans CO<sub>2</sub> w lasach gospodarczych w Polsce wyraża się zatem wzrostem ogólnej zawartości tego gazu przynajmniej o 3,6 Mt CO<sub>2</sub>. W rzeczywistości jest on jednak jeszcze większy. Nie jest bowiem brane pod uwagę w tych wyliczeniach uwalnianie dwutlenku węgla z rozkładanej przez grzyby masy drewna pozostającego w lesie (korzenie i pniaki pozrębowe, przygodne), tzw. leżaniny (odpady pościnkowe, jałowy posusz, a nawet niewywiezione pozyskane drzewa), ocenianej przez Fraszewskiego [1993] w drzewostanach 35-letnich na 2,5 t/ha, czy też tzw. „martwego drewna”, świadomie pozostawianego w drzewostanie z innych przesłanek. W tym ostatnim przypadku ilość pozostającej do biologicznego rozkładu substancji organicznej nie jest sprecyzowana. Ranius i Fahrig [2006] podają, że w starszych lasach naturalnych może ona wynosić nawet 20-100 m<sup>3</sup>/ha. Powyższe rozważania wskazują, że ilość węgla uwalnianego w postaci CO<sub>2</sub> w procesach rozkładu drewna powinna być zwielokrotniona w stosunku podawanych w literatury szacunkowych wyliczeń [Good, Darrah 1967], aby oddać rzeczywistą skalę problemu.

Czy powyższe oznacza, że należałoby ograniczyć stosowanie metody biologicznej, czy nie pozostawiać martwego drewna w lesie? Obecność patogenów i saprotrofów w ekosystemie leśnym jest zjawiskiem naturalnym. Bez poprawnie funkcjonującego systemu dekompozycji substancji organicznej z udziałem grzybów nie byłoby sprawnego obiegu materii i przepływu energii w ekosystemach leśnych, jako rezultatu naturalnych zjawisk konkurencji, adaptacji i przemiany pokoleń. Zarówno grzyby rozkładające drewno, jak i inne mikroorganizmy uczestniczące w tym procesie, są pożądanym i niezbędnym elementem naszego środowiska, zarówno w lasach naturalnych, jak i w drzewostanach zagospodarowanych. Ich wpływ na światowy bilans dwutlenku węgla, w porównaniu z erupcjami wulkanów czy oceanami, nie jest duży [Lal 2008]. Odgrywają jednak fundamentalną rolę w przebiegu zjawisk glebotwórczych, w przebiegu procesu tworzenia lasu oraz w zachowaniu jego trwałości [Rykowski 2006].

## Wnioski

- ✦ Obecność patogenów korzeni w drzewostanie wyraża się uwalnianiem dwutlenku węgla powstającego w wyniku rozkładu celulozy zawartej w drewnie korzeni zaatakowanych drzew. Zastosowanie proponowanych algorytmów do oceny emisji CO<sub>2</sub> na przykładzie drzewostanów

sosnowych IV klasy wieku pozwoliło na określenie ilości wytwarzanego dwutlenku węgla rzędu 60,25 t/ha (węgla zaś na 16,4 t/ha), co w skali kraju oznacza 3,3 Mt CO<sub>2</sub> i 0,9 Mt węgla.

- ✦ Obecność pożądanych w drzewostanie grzybów saprotroficznych również oznacza uwalnianie dwutlenku węgla do atmosfery. Stosowanie grzyba *Phlebiopsis gigantea* w biologicznej metodzie ochrony zagrożonych drzewostanów przed patogenami korzeni wyraża się uwalnianiem 11,4 t/ha CO<sub>2</sub>. W skali kraju oznacza to emisję 296,4 kt dwutlenku węgla.
- ✦ Grzyby zasiedlające korzenie drzew w drzewostanach II i IV klasy wieku zwiększają uwalnianie dwutlenku węgla o około 3,6 Mt rocznie. W prezentowanej pracy nie uwzględniano innych klas wieku dla sosny, jak również drzewostanów innych gatunków drzew zasiedlanych przez patogeny korzeni. Nie brano również pod uwagę emisji CO<sub>2</sub> powstającej w wyniku rozkładu przez grzyby drewna pozostającego w lesie jako pniaki, tzw. leżanina oraz „martwe drewno”. Oznacza to, że prezentowane dane należałoby znacznie zwielokrotnić.

## Podziękowanie

Dziękuję prof. Ewie Ratajczak z Instytutu Technologii Drewna w Poznaniu, dr. Andrzejowi Szczepkowskiemu z Wydziału Leśnego SGGW, prof. Piotrowi Witomskiemu z Wydziału Technologii Drewna SGGW oraz prof. Andrzejowi Klockowi i dr. Markowi Jabłońskiemu z Instytutu Badawczego Leśnictwa za materiały pozwalające na uściślenie powyższego opracowania oraz interesujące dyskusje.

## Literatura

- Barzdajn W., Wesoly W. 1993. Biologia sosny zwyczajnej. W: Białobok S., Boratyński A., Bugała W. [red.]. Sorus, Poznań – Kórnik.
- Bijak Sz., Zasada M. 2007. Oszacowanie biomasy korzeni w drzewostanach sosnowych Borów Lubuskich. Sylwan 151 (12): 21-29.
- Bruchwald A. 1984. Estimation of attacking spruce trees by root rot (*Fomes annosus* Fr.) in spruce-pine stands of Puszcza Romincka. Ann. WAU - For. 32.
- Cairns M. A., Brown S., Helmer E. H., Baumgardner G. A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia 111: 1-11.
- Chapin F. S., Matson P. A., Mooney H. A. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer Verl., N.Y.
- Domański S. 1983. Lignicolous macrofungi occurring on felled pine wood in forests injured by air pollutants in Upper Silesia Industrial Region. Revista de Biol. 12: 121-130.
- Eggelston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. [red.]. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC.
- Fraszewski D. 1993. Ustalenie obciążenia ogniowego drzewostanów II III klasy wieku w zależności od rodzaju pokryw dła lasu, rodzaju pożaru oraz realizowania zabiegów pielęgnacyjnych. NCR 530, Inst. Bad. Leśn., Warszawa.
- Gansert D. 1994. Root respiration and its importance for the carbon balance of the beech saplings (*Fagus sylvatica* L.) in a montane beech forest. Plant Soil 167: 109-119.
- Gilbertson R. L., Ryvarden L. 1987. North American Polypores. Oslo Fungiflora 1-2.
- Good H. M., Darrah J. A. 1967. Rates of decay in wood measured by carbon dioxide production Ann. Appl. Biol. 59 (3): 463-472.
- Henry G. 1987. The ecological significance of fructans in contemporary flora. New Phytol. 106: 201-216.
- Hintikka V. 1970. Stimulation of spore germination of wood-decomposing *Hymenomyces* by carbon dioxide. Karstenia 11: 23-27
- Husch B., Beers T. W., Kershaw J. A. 2003. Forest Mensuration. J. Wiley & Son Inc., Hoboken, NJ.
- Instrukcja Ochrony Lasu. 2004. CILP, Warszawa.
- Janssens I. A., Kowalski A., Longdoz B., Ceulemans R. 2000. Assessing forest soil CO<sub>2</sub> efflux: an *in situ* comparison of four techniques. Tree Physiol. 20 (1): 23-32.
- Jobbagy E. G., Jackson R. B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecol. Applicat. 10 (2): 423-436.
- Kirk T. K., Moore W. E. 1972. Removing lignin in wood with white rot fungi and digestibility of resulting wood. Wood. Fiber 4: 72-79.
- Kolk A., Sierota Z. 1979. Z badań nad wpływem żywicowania na stan zdrowotny drzew. Prace IBL 548:177-187.
- Krótkoterminowa prognoza występowania ważniejszych szkodników i chorób infekcyjnych drzew leśnych w Polsce. 2010. IBL, Sękocin.

- Krzysik F. 1978. Nauka o drewnie. PWN, Warszawa.
- Lal R. 2008. Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. *Energy and Environm. Sci.* 1: 86-100.
- Leśnictwo. 2009. GUS, Warszawa.
- Liese J., Stamer J. 1934. Vergleichende Versuche über die Zerstörungsintensität einiger wichtiger holzerstörender Pilze und die hierdurch verursachte Festigkeitverminderung des Holzes. *Angew. Bot.* 16: 363-372.
- Małecka M., Sierota Z. 2000. Znaczenie monitoringu fitopatologicznego w drzewostanach gospodarczych i Parku Narodowego „Bory Tucholskie”. W: Lisiewska M., Ławrynowicz M. [red.]. Monitoring grzybów. PTB, Poznań-Lódź.
- Mańka K. 2005. Fitopatologia leśna. PWRiL, Warszawa.
- Mykhayliv O., Sierota Z. 2010. Zagrożenie drzewostanów ze strony huby korzeni w zależności od temperatury gleby i opadów. *Leś. Pr. Bad.* 71 (1): 51-59.
- Oleksyn J., Reich P., Chałupka W., Tjoelker M. 1999. Differentiation above- and below-ground biomass accumulation of European *Pinus sylvestris* populations in a 12-year-old provenance experiment. *Scan. J. For. Res.* 14: 7-17.
- Orłoś H. 1966. Grzyby leśne na tle środowiska. PWRiL, Warszawa.
- Paul E. A., Clark F. E. 1998. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Acad. Press Inc. San Diego.
- Petrylaitė E., Rönnerberg J. 2004. Presence of *Heterobasidion* spp. and the need for stump treatment in monocultures of Scots pine in Southern Sweden. W: Mańka M., Łakomy P. [red.]. Root and Butt Rots of Forest Trees. A. Cieszkowski Agric. Univ. 356-362.
- Pratt J. E., Niemi M., Sierota Z. 2000. Comparison of three products based on *Phlebiopsis gigantea* for the control of *Heterobasidion annosum* in Europe. *Biocontrol Sci. & Technol.* 10: 467-477.
- Prosiński S. 1984. *Chemia drewna*. PWRiL Warszawa.
- Rayner A. D. M., Boddy L. 1988. *Fungal decomposition of wood. Its biology and ecology*. J. Wiley & Sons. Chichester.
- Rykowski K. 1999. Rola ekosystemów leśnych oraz drewna w kontrolowaniu absorpcji i emisji węgla. W: *Zmiany i zmienność klimatu Polski, ich wpływ na gospodarkę, ekosystemy i człowieka*. Łódź.
- Rykowski K. 2006. *O leśnictwie trwałym i zrównoważonym*. CILP, Warszawa.
- Rykowski K. 2008. Climate change, Forest, Forestry Relationships. CILP, Warszawa.
- Rykowski K., Sierota Z. 1977. Badania nad przygotowaniem do produkcji biopreparatu z grzybem *Phlebia gigantea* (Fr.) Donk. *Prace IBL* 534: 74-90.
- Sierota Z. 1995. Rola grzyba *Phlebiopsis gigantea* (Fr.:Fr.) Julich w ograniczaniu huby korzeni w drzewostanach sosny zwyczajnej (*P. sylvestris* L.) na gruntach porolnych. *Prace IBL* 840.
- Sierota Z. 1996. Choroby infekcyjne w drzewostanach gospodarczych – przyczyny i przebieg w okresie ostatniego dwudziestolecia. W: Mańka M. [red.]. *Choroby Roślin a Środowisko*. PTFit. Poznań. 59-66.
- Sierota Z. 1997. Dry weight loss of wood after the inoculation of Scots pine stumps with *Phlebiopsis gigantea*. *Eur. J. For. Path.* 27: 179-185.
- Sierota Z. 2001. Efficiency of *Phlebiopsis gigantea* in PgIBL preparation to control the root rot disease in threatened Scots pine stands in the last decade of 2000.
- Sierota Z., Małecka M. 2003. Ocena zmian w drzewostanie sosnowym na gruncie porolnym po 30 latach od wykonania pierwszych cięć pielęgnacyjnych bez zabiegu ochronnego przeciw hubie korzeni. *Sylvan* 147 (12): 19-26.
- Watteau F., Villemain G., Ghanbaja J., Genet P., Pargney J. C. 2002. In situ ageing of fine beech roots (*Fagus sylvatica*) assessed by transmission electron microscopy and electron energy loss spectroscopy: description of microsites and evolution of polyphenolic substances. *94 (2)*: 55-63.
- Weigenand O., Humar M., Daniel G., Militz H., Mai C. 2008. Decay resistance of wood treated with amino-silicone compounds. *Holzforsch.* 62: 112-118.
- Zasady Hodowli Lasu. 2003. ORW LP, Bedoń.
- Żółciak A., Kornilowicz-Kowalska T., Sierota Z., Iglík H. 2008. Enzymatic activity of *Phlebiopsis gigantea* isolates. *Acta Mycol.* 43 (1): 41-48.
- Żółciak A., Sierota Z., Małecka M. 2006. Przebieg choroby w uprawie sosny zwyczajnej w następstwie sztucznej inokulacji pniaków grzybnią korzeniowca wieloletniego. *Leśn. Pr. Bad.* 1: 37-55.

## SUMMARY

### Effect of fungi decomposing roots of forest trees on CO<sub>2</sub> release – an attempt of evaluation

The participation of fungi decomposing wood, mainly cellulose and lignin in the carbon dioxide release process is often ignored, usually for methodological reasons. Fungi use different energy



sources in the forest. The largest group are soil fungi and fungi associated with the rhizosphere, as well as fungi causing degradation of wood of standing and fallen trees. Enzymatic degradation of cellulose leads, in successive stages, to the formation of D-glucose and release of carbon dioxide. In order to calculate the amount of the released CO<sub>2</sub>, the weight of tree roots colonised by pathogens, the share of cellulose in the wood of roots and cellulose loss caused by wood-decay fungi were determined on the basis of the literature data and own research relating to a pine stand aged 61-80 years (age class IV).

The proposed algorithm allows to determine the expected values calculated per hectare per year, solely on the basis of merchantable timber volume of trees and the area of occurrence of wood-decay fungi in stumps and roots (*Heterobasidion* spp., *Armillaria* spp. *Phlebiopsis gigantea*). These data can also provide estimates of the level of carbon sequestration in the non-infested forest stands. The amount of carbon dioxide produced during root degradation by fungal pathogens was found to be 60.25 t/ha (16.4 t/ha of carbon), which is 3.3 Mt (0.9 Mt of carbon) at the country level. Saprotrophic fungi (e.g. *Phlebiopsis gigantea* in 21-40 year-old (age class II) pine stands) release additional 11.4 t/ha of CO<sub>2</sub> which means the emission of 296.4 kt of carbon dioxide at the country level. The total share of root colonising fungi in forest stands (e.g. 21-40 year-old (age class II) and 61-80 year-old (age class IV) pine stands) increases the release of carbon dioxide by about 3.6 Mt of CO<sub>2</sub> annually.

In this study, no consideration was given to other age classes of pine stands and other tree species colonised by root pathogens. The CO<sub>2</sub> emissions resulting from the decomposition of wood remaining in forests by fungi, such as stumps and deadwood were not taken into account. This indicates that the presented data should be multiplied.