

Józef Zwoliński¹

Rozkład pionowy biomasy drobnoustrojów w glebach leśnych

Vertical distribution of microbial biomass in forest soils

Abstract. Distribution of microbial biomass down soil profiles was studied in Scots pine (*Pinus sylvestris*) and oak (*Quercus robur*) stands located in southwestern Poland. Both microbial biomass concentration ($\mu\text{g } C_{\text{mic}} \text{ g}^{-1}$ soil) and content ($\text{kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$), estimated by substrate-induced respiration (SIR) method, decreased exponentially down to the 60 cm of mineral soil and the function $y = e^{-bx}$ (y – a fraction of C_{mic} in x depth (cm) of that in the topsoil, b – coefficient of vertical distribution) gave a close fit to the obtained data. The values of coefficient b were found to be depended on the forest site type and were distinctly higher in oak stands, indicating more drastically decline of microbial biomass with depth of soil in deciduous than in coniferous forests. In pine forests considerable amounts of microbial biomass were located both in Ofh horizon ($80\text{--}231 \text{ kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$) and in 0–10 cm of mineral soil ($35\text{--}60 \text{ kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$), but significant amounts of C_{mic} were also found in deeper layers down to 40 cm. In oak stands most of microbial biomass was concentrated in the upper 10 cm of mineral soil ($137\text{--}314 \text{ kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$) and dramatically decreased in 10–20 cm layer to $23\text{--}48 \text{ kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$. Due to a various vertical distribution of microbial biomass in forest soils, adjusting a sampling procedure to forest site types is necessary when assessing microbial characteristics. Soil samples for analyses should be taken from horizons of a high ecological relevance – in coniferous forests from the whole Ofh horizon and at least 0–10 cm layer of mineral soil, and in deciduous forests from the top 10 cm of mineral soil and possibly from organic layer when Ofh level is distinctly formed.

Key words: forest sites, soil profiles, substrate-induced respiration method.

1. Wstęp

Drobnoustroje glebowe, których biomasa stanowi niewielką część, bo na ogół nie przekraczającą 3% substancji organicznej gleb leśnych (Vance et al. 1987, Martikainen i Palojuuri 1990), odgrywają kluczową rolę w obiegu węgla i składników pokarmowych w ekosystemach leśnych. Ich udział w procesach rozkładu i mineralizacji substancji organicznej zapewnia utrzymanie niezbędnego dla roślin zapasu składników pokarmowych (Zak et al. 1990). Parametry mikrobiologiczne, w tym biomasa drobnoustrojów, które uważa się za dobry wskaźnik jakości gleb (Shouten et al. 2000, Oberholzer et Höper 2001, Nielsen et Winding 2002), nie znalazły dotąd szerszego zastosowania w diagnostyce gleb leśnych. Przyczyną tego jest brak standaryzowanych metod analitycznych, a zwłaszcza wyboru warstwy gleby, z której pobierane są próby. Z przeglądu licznie publiko-

wanych prac dotyczących biomasy drobnoustrojów gleb leśnych wynika, że niezależnie od typu siedliska, analizowane były tylko poziomy organiczne (np. Smolander et Kitunen 2002, Temper et al. 2003) lub organiczne z górną warstwą mineralną różnej miąższości (np. Aikio et al. 2000, Raubuch et Beese 2005) lub jedynie górne warstwy mineralne (np. Hackl et al. 2000, Bååth et Anderson 2003), co znacznie ogranicza możliwość interpretacji i porównania prezentowanych wyników badań. Niewiele jest doniesień dotyczących aktywności mikrobiologicznej, w tym biomasy drobnoustrojów, w głębszych poziomach gleb leśnych (Ekelund et al. 2001, Agnelli et al. 2004, Castellazzi et al. 2004).

Zawarta w glebie substancja organiczna, stanowiąca substrat odżywczy dla drobnoustrojów, pochodzi głównie z opadu roślinnego oraz z obumierających korzeni i ich wydzielin. Istotny wpływ na jej jakość i w konsekwencji na biomasę drobnoustrojów glebowych ma

¹ Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Gospodarki Leśnej Rejonów Przemysłowych, ul. Św. Huberta 35, 40-952 Katowice, e-mail: zwolinsj@ibles.waw.pl

skład gatunkowy drzewostanu. Materiał roślinny z drzew liściastych dzięki mniejszemu udziałowi frakcji odpornej na dekompozycję (głównie lignin) jest, w porównaniu z materiałem z drzew iglastych, bardziej przyswajalny dla drobnoustrojów, a tym samym szybciej rozkładany i mineralizowany (Finer et al. 1997, Priha et Smolander 1997, Côté et al. 2000). Ze ściółki liściastej szybciej także wymywane są rozpuszczalne związki węgla i makroskładników w głąb profilu glebowego (Harris et Safford 1996, Honque 1999). Sugeruje to, że dyslokacja biomasy drobnoustrojów w glebie uwarunkowana jest typem siedliskowym lasu.

Celem pracy była analiza rozkładu pionowego biomasy drobnoustrojów w glebach leśnych i ustalenie na jego podstawie poziomów (warstw) gleb, których badanie jest niezbędne do miarodajnej oceny stanu mikrobiologicznego w różnych warunkach siedliskowych.

2. Obiekt i metodyka badań

Badania wykonano na sześciu powierzchniach zlokalizowanych na terenie RDLP Katowice (tab. 1), z których cztery reprezentują siedliska borowe: bór świeży (Bśw) i bór mieszany świeży (BMśw) – z litymi drzewostanami sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), a dwie siedliska lasowe: las świeży (Lśw) i las mieszany świeży (LMśw), gdzie gatunkiem dominującym drzewostanu jest dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.), z niewielkim udziałem buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.) i sosny zwyczajnej. W drzewostanach sosnowych występują gleby bielcowe, z próchnicą typu mor (Bśw) lub moder-mor (BMśw) z dobrze wykształconym

poziomem organicznym (butwinowo-epihumusowym – Ofh), natomiast na siedliskach lasowych – gleba rdzawa właściwa (LMśw) lub rdzawa brunatna (Lśw), z próchnicą typu moder mulłowy, z warstwą organiczną o miąższości < 1 cm, składającą się głównie z nierozłożonych resztek roślinnych. Dokładną charakterystykę powierzchni przedstawiono we wcześniej publikowanych pracach (Zwoliński et Orzeł 2000, Zwoliński 2001, Olszowska et al. 2007).

We wrześniu 2007 r. na każdej powierzchni wykonano odkrywkę glebową o długości 1,5 m, pobierając za pomocą laski glebowej o średnicy 5 cm po 5 objętościowych próbek glebowych, w odstępach 20 cm, z całej warstwy organicznej (poziom Ofh) w drzewostanach sosnowych oraz na wszystkich powierzchniach po 5 próbek objętościowych z głębokości 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 i 50–60 cm gleby mineralnej. Próbkę pobierano z góry, usuwając po poborze kolejne warstwy gleby. Do analiz użyto próby zbiorcze, w skład których wchodziło po 5 próbek pobranych z każdej warstwy.

Biomasę drobnoustrojów, wyrażoną jako C biomasy (C_{mic}), oznaczono metodą pomiaru respiracji indukowanej substratem (Anderson et Domsch 1978), rejestrując ilość uwalnianego CO_2 przy użyciu chromatografu gazowego Perkin Elmer – Clarus 500. Szczegółowy opis oznaczenia C_{mic} przedstawiono we wcześniejszej pracy (Zwoliński 2005). Biomasa drobnoustrojów podano w przeliczeniu na jednostkę wagową gleby ($\mu g C_{mic} g^{-1}$ gleby) oraz w odniesieniu do powierzchni ($kg C_{mic} ha^{-1}$), wykorzystując do obliczeń wagę suchej masy pobranych objętościowo próbek glebowych. Do oznaczeń suchej masy suszono naważki gleby w temp. 80°C do stałej wagi.

Tabela 1. Wykaz i charakterystyka powierzchni badawczych

Table 1. Specification of the study plots

Pow. (nr) Site (No)	Nadleśnictwo Forest district	Leśnictwo, oddział Forest range, compartment	Typ gleby Soil type	Typ siedliskowy lasu Forest site type	Dominujący gatunek drzewa, wiek (lata) Predominant tree species, age (years)
1	Świerklaniec	Miasteczko Śląskie 201j	Gleba bielcowa właściwa Haplic Podzols	Bśw fresh coniferous forest	<i>Pinus sylvestris</i> , 68
2	Koszęcin	Dyrdy 39c	Gleba bielcowa właściwa Haplic Podzols	Bśw fresh coniferous forest	<i>Pinus sylvestris</i> , 70
3	Kędzierzyn	Kędzierzyn 196d	Gleba bielcowa właściwa Haplic Podzols	BMśw fresh mixed coniferous forest	<i>Pinus sylvestris</i> , 81
4	Rudy Raciborskie	Kuźnia Raciborska 124b	Gleba bielcowa właściwa Haplic Podzols	BMśw fresh mixed coniferous forest	<i>Pinus sylvestris</i> , 80
5	Namysłów	Gręboszów 396a	Gleba rdzawa właściwa Haplic Arenosols	LMśw fresh mixed broadleaved forest	<i>Quercus robur</i> , 71
6	Namysłów	Polkowskie 195i	Gleba rdzawa brunatna Haplic Arenosols	Lśw fresh broadleaved forest	<i>Quercus robur</i> , 63

Odczyn gleby oznaczano w H₂O metodą potencjometryczną; stosunek objętości gleby do objętości roztworu (w/v) wynosił 1 : 10 w poziomie Ofh i 1 : 2,5 w warstwie mineralnej, węgiel organiczny (C_{org}) oznaczano metodą suchego spalania na analizatorze węgla SC132 Leco, po uprzednim usunięciu węgla mineralnego przez przemycie prób 10% HCl i wysuszeniu.

Wszystkie analizy (mikrobiologiczne i chemiczne) wykonano w trzech powtórzeniach, obliczając średnią arytmetyczną uzyskanych wyników. Do analizy statystycznej wyników badań wykorzystano program Statistica 98. Zależność pomiędzy C_{org} i C_{mic} w glebie oceniono na podstawie analizy korelacyjnej, wyznaczając współczynniki korelacji Pearsona i przyjmując 95% granice ufności ($p < 0,05$) do weryfikacji istotności. Rozkład pionowy C_{org} i C_{mic} w profilu glebowym określono poprzez ustalenie modelu (funkcji) wyrażającego w sposób najbardziej istotny ich spadek wraz z głębokością gleby.

3. Wyniki i dyskusja

W glebach borów sosnowych, w odróżnieniu od powierzchni reprezentujących siedliska lasowe, obecny był w pełni wykształcony poziom organiczny Ofh charakteryzujący się kwaśnym odczynem, o pH w H₂O od 3,7 do 4,0, oraz koncentracją węgla w granicach od 19,4 do 29,8% (tab. 2). W glebie mineralnej, niezależnie od typu siedliska, obserwowano na ogół wzrost pH wraz z głębokością w profilu glebowym, z 3,5–3,8 w warstwie 0–10 cm do prawie 4,3 w warstwie 50–60 cm na siedliskach borowych i odpowiednio z 4,0–4,2 do 4,3–4,6 na siedliskach lasowych. Jednocześnie, wraz z głębokością, następował na wszystkich siedliskach spadek koncentracji węgla organicznego z 1,5–7,1% do 0,1–0,6% (tab. 2). Podobną tendencję obserwowano w

przypadku koncentracji C biomasy drobnoustrojów (C_{mic}), która zmniejszała się na siedliskach borowych z 47–76 µg C_{mic} g⁻¹ gleby w warstwie 0–10 cm do 3–7 µg C_{mic} g⁻¹ gleby w warstwie 50–60 cm, a na dwóch powierzchniach na siedliskach lasowych odpowiednio z 137 i 314 µg C_{mic} g⁻¹ gleby do 3 i 7 µg C_{mic} g⁻¹ gleby (tab. 3). Na wszystkich powierzchniach koncentracja C_{mic} w glebie mineralnej była silnie skorelowana z koncentracją C_{org} (tab. 4), co potwierdza ogólnie przyjęty i dobrze udokumentowany fakt, że rozwój drobnoustrojów jest ściśle związany z zawartością C_{org} w glebie, będącym dla nich podstawowym substratem energetycznym. Na istotną zależność C_{mic} od C_{org} wskazuje także szereg doniesień (np. Alvares et Alvares 2000, Leirós et al. 2000), a notowany często w badaniach porównawczych brak korelacji pomiędzy tymi parametrami (np. Zak et al. 1994, Taylor et al. 1999) wynika prawdopodobnie z istotnego zróżnicowania analizowanych powierzchni leśnych pod względem jakości substancji organicznej gleb, determinującej przebieg procesów biosyntezy drobnoustrojów (Insam et Domch 1988, Bachus et al. 1998). Udział procentowy C biomasy drobnoustrojów w C_{org}, który w glebach leśnych wynosi zwykle powyżej 0,5% (Wardle 1992, Leirós et al. 2000), był na badanych powierzchniach niższy, czego przyczyną może być niskie pH gleb (Bauhus et Khanna 1999, Raubuch et Beese 2005). W poziomie Ofh %C_{mic} w C_{org} kształtował się w granicach od 0,22 do 0,47%, a w górnej, 0–10 cm warstwie mineralnej gleb od 0,11 do 0,44%, po czym wyraźnie spadał w warstwie 10–20 cm. W kolejnych, niższych warstwach stwierdzono na ogół wzrost udziału C_{mic} w C_{org} (tab. 3), co trudno wytłumaczyć na podstawie wyników uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań. Na podobną tendencję wskazują także niektóre doniesienia (Lavahum et al. 1996, Agnelli et al. 2001, Agnelli et al. 2004), sugerujące, że spowodowane to

Tabela 2. Odczyn gleby (pH-H₂O) i koncentracja węgla organicznego (%C_{org}) w profilu glebowym

Table 2. Soil reaction (pH-H₂O) and organic carbon concentration (%C_{org}) in soil profile

Pow. (nr) Site (No)	Poziom Ofh Ofh Level		Warstwa mineralna (cm) Mineral horizon (cm)											
			0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60	
	pH	C _{org}	pH	C _{org}	pH	C _{org}	pH	C _{org}	pH	C _{org}	pH	C _{org}	pH	C _{org}
1	4,02	23,35	3,57	5,88	3,66	3,27	3,97	1,11	4,03	1,57	4,14	0,50	4,24	0,17
2	3,68	19,40	3,75	1,46	4,21	0,51	4,03	0,77	4,28	0,49	4,33	0,26	4,29	0,14
3	3,76	29,76	3,47	4,95	3,71	3,54	3,57	3,02	3,80	1,63	4,16	0,82	4,26	0,54
4	3,68	26,32	3,65	3,55	4,06	1,18	4,21	0,71	4,22	0,70	4,25	0,72	4,25	0,55
5	n.d.		4,04	3,60	4,37	1,72	4,54	1,51	4,54	0,62	4,53	0,38	4,55	0,20
6	n.d.		4,22	7,09	4,31	2,80	4,26	1,47	4,39	0,83	4,33	0,41	4,31	0,22

n.d. – nie oznaczono
not determined

Tabela 3. Biomasa drobnoustrojów w profilu glebowym

Table 3. Distribution of microbial biomass down soil profiles

Pow. (nr) Site (nr)	Poziom Ofh Ofh Level			Warstwa mineralna Mineral horizon (cm)																	
				0-10			10-20			20-30			30-40			40-50			50-60		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c			
1	516,0	0,221	80,13	62,3	0,106	56,70	21,8	0,067	25,55	10,8	0,097	14,53	10,6	0,068	15,74	10,4	0,208	15,80	6,7	0,394	10,82
2	634,4	0,327	111,1	47,3	0,324	59,69	13,0	0,255	15,97	12,4	0,161	16,68	11,3	0,231	15,62	6,7	0,258	9,94	4,2	0,300	6,86
3	1403,0	0,471	230,7	51,9	0,105	35,26	11,9	0,034	11,03	14,3	0,047	14,12	13,1	0,080	15,47	5,2	0,063	7,03	4,9	0,091	6,72
4	570,7	0,217	116,7	76,3	0,215	79,35	11,1	0,094	14,91	11,9	0,168	15,67	15,0	0,214	20,53	3,5	0,064	4,73	3,0	0,055	4,37
5	n.d.			137,3	0,381	150,1	18,3	0,106	22,73	23,6	0,156	31,88	12,4	0,200	17,22	9,9	0,261	14,58	2,9	0,145	4,33
6	n.d.			314,0	0,443	285,6	39,3	0,140	48,48	25,4	0,172	34,78	13,4	0,161	18,65	10,7	0,261	15,38	7,1	0,323	11,05

a – mg C_{mic}×g⁻¹gleby (soil), b – %C_{mic} w (in) C_{org}, c – kg C_{mic}×ha⁻¹, n.d. – nie oznaczono not determined

Tabela 4. Współczynniki korelacji (r_{yx}) określające zależność pomiędzy C_{mic} (y) a C_{org} (x) w profilu glebowymTable 4. Correlation coefficients (r_{yx}) determining relationships between C_{mic} (y) and C_{org} (x) in soil profile

Pow. (nr) Site (No)	r _{yx}	p
1	0,951	0,004
2	0,977	0,001
3	0,831	0,040
4	0,980	0,001
5	0,927	0,007
6	0,964	0,002

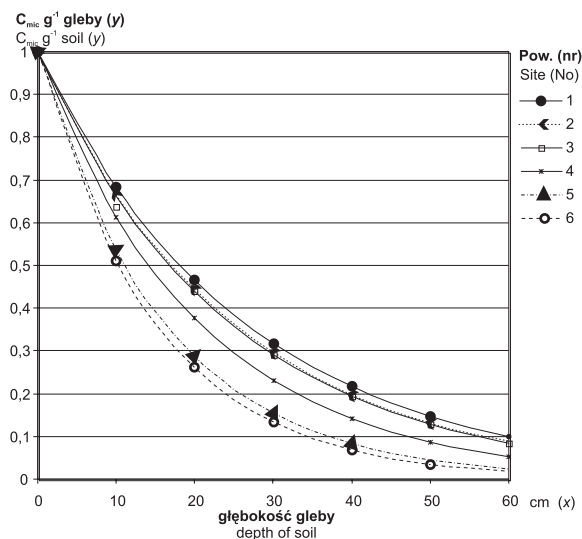
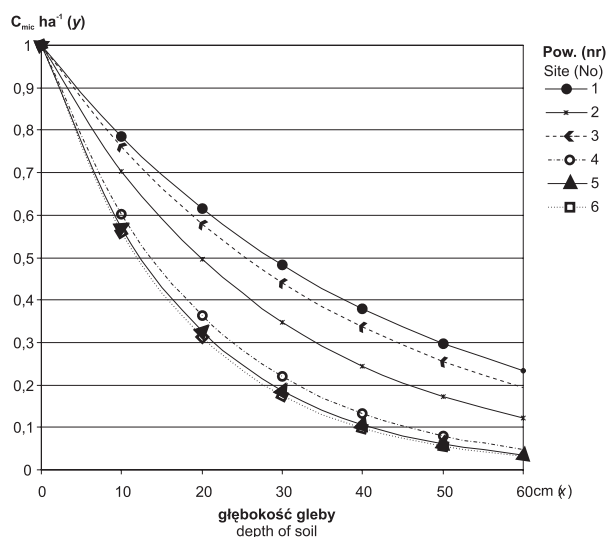
może być zmianą warunków edaficznych, zwłaszcza wzrostem pH, oraz odmiennym składem gatunkowym drobnoustrojów – zdolnych do efektywniejszego wykorzystania w procesach biosyntezy odpornej na dekompozycję substancji organicznej zawartej w głębszych warstwach gleby. W porównaniu z koncentracją C biomasy obraz dyslokacji w profilu glebowym C_{mic} w przeliczeniu na jednostkę powierzchni jest nieco inny (tab. 3), co wynika ze wzrostu gęstości objętościowej gleby wraz z głębokością. Szczególnie wyraźnie widać to w borach sosnowych, gdzie koncentracja C_{mic} w poziomie Ofh, wynosząca od 516 do 1043 μg C_{mic} g⁻¹ gleby, była od 7 do 27 razy wyższa niż w górnej warstwie mineralnej (0–10 cm), natomiast jej zawartość, kształtująca się w granicach od 80 do 231 kg C_{mic} ha⁻¹ – od 1,4 do 6,5 razy wyższa. W niższych warstwach gleby zawartość biomasy była zdecydowanie niższa, lecz utrzymywała się na zbliżonym poziomie w warstwach 10–20, 20–30 i 30–40 cm, po czym spadała w warstwach 40–50 i 50–60 cm. Na siedliskach lasowych większość C_{mic}, bo ponad 60% zawartej w całej badanej warstwie

(0–60 cm), ulokowana była w górnej 10 cm warstwie gleby, gdzie wynosiła 150 i 286 kg C_{mic} ha⁻¹ – odpowiednio na siedlisku LMśw i Lśw. W warstwach 10–20 i 20–30 cm zawartość C_{mic} była zbliżona, lecz kilkakrotnie (5–8 razy) niższa niż w warstwie 0–10 cm i systematycznie spadała wraz z głębokością.

Analizując rozkład pionowy koncentracji i zawartości C_{mic} w glebie mineralnej ustalono, że w sposób najbardziej istotny wyraża go funkcja wykładnicza: $y = e^{-bx}$, gdzie y – stosunek C_{mic} na głębokości x (cm) do C_{mic} na powierzchni gleby (0 cm), a b – współczynnik określający rozkład pionowy. W obliczeniach przyjęto za x dolną granicę zakresu głębokości poszczególnych warstw, np. 30 dla warstwy 20–30 cm. Spadek wykładniczy w profilu glebowym stwierdzono także w przypadku koncentracji C_{org}. Określona funkcją wykładniczą zależność biomasy drobnoustrojów i koncentracji węgla organicznego od głębokości gleby była statystycznie istotna ($r=0,825-0,997$; $p<0,04-0,001$) na wszystkich powierzchniach (tab. 5). W większości przypadków wartości współczynnika b były wyższe dla biomasy drobnoustrojów wyrażonej w jednostkach wagowych gleby (C_{mic} g⁻¹ gleby) aniżeli w przeliczeniu na powierzchnię (C_{mic} ha⁻¹), co wynika, o czym już wspomniano, ze wzrostu gęstości objętościowej gleby wraz z głębokością. Stwierdzili to także Castellazzi et al. (2004), którzy jednocześnie uważają, że niezależnie od typu gleby, a nawet typu ekosystemu, wartość b jest zbliżona i wynosi około 0,046. Nie potwierdzają tego niniejsze badania, z których wynika, że wartość b zależy od typu siedliska. Na siedliskach borowych wartość b kształtowała się w granicach 0,0383–0,0489 dla C_{mic} g⁻¹ gleby oraz 0,0242–0,0506 dla C_{mic} ha⁻¹, a na siedliskach lasowych odpowiednio 0,0622 i 0,0671 oraz 0,0562 i 0,0581 (tab. 5). Wyższe wartości b na siedliskach lasowych wskazują, że spadek biomasy drobnoustrojów wraz z głębokością gleby zachodzi tam bardziej zdecydowanie.

Tabela 5. Współczynniki (b) spadku wykładniczego ($y=e^{-bx}$)^{*} węgla organicznego i C biomasy drobnoustrojów w profilu glebowymTable 5. Coefficients (b) for exponential decline ($y=e^{-bx}$)^{*} of organic C and microbial biomass C in soil profile

Pow. (nr) Plot (No)	Węgiel organiczny Organic carbon			Biomasa C Microbial biomass C					
	b	r	p	$\mu\text{g C}_{\text{mic}} \text{g}^{-1} \text{soil}$			$\text{kg C}_{\text{mic}} \text{ha}^{-1}$		
				b	r	p	b	r	p
1	0,0657	-0,961	0,002	0,0383	-0,897	0,015	0,0242	-0,825	0,043
2	0,0406	-0,927	0,041	0,0406	-0,930	0,007	0,0352	-0,899	0,015
3	0,0459	-0,983	0,001	0,0411	-0,895	0,016	0,0273	-0,835	0,039
4	0,0309	-0,846	0,031	0,0489	-0,864	0,027	0,0506	-0,885	0,019
5	0,0568	-0,991	0,001	0,0622	-0,921	0,010	0,0562	-0,909	0,008
6	0,0677	-0,997	0,001	0,0671	-0,921	0,010	0,0581	-0,924	0,008

* x – głębokość (cm)
depth (cm)**Rycina 1. Spadek koncentracji biomasy drobnoustrojów ($C_{\text{mic}} \text{g}^{-1}$ gleby) w profilu glebowym ($y = e^{-bx}$)**Figure 1. Decrease in microbial biomass concentration ($C_{\text{mic}} \text{g}^{-1}$ soil) in soil profile ($y = e^{-bx}$)**Rycina 2. Spadek biomasy drobnoustrojów ($C_{\text{mic}} \text{ha}^{-1}$) w profilu glebowym ($y = e^{-bx}$)**Figure 2. Decrease in microbial biomass ($C_{\text{mic}} \text{ha}^{-1}$) down the soil profiles ($y = e^{-bx}$)

dowanie niż borach sosnowych, co ilustrują ryciny 1 i 2. Wartość b w modelu wykładniczym rozkładu pionowego węgla organicznego, która kształtowała się w granicach 0,0309–0,0677, nie pozostawała natomiast w wyraźnym związku z typem siedliskowym lasu (tab. 5).

Wielkość i rozmieszczenie biomasy drobnoustrojów w profilu glebowym może świadczyć o ekologicznym znaczeniu poszczególnych warstw gleby odnośnie do ich produktywności, czy funkcjonowania ekosystemu leśnego. Biomasa drobnoustrojów, poza dominującym udziałem w procesach metabolicznych gleb, jest bowiem również magazynem i źródłem pokarmu dla

roślin (Jenkinson i Ladd 1981, McGil et al. 1986). Dla miarodajnej oceny aktywności mikrobiologicznej gleb leśnych istotne znaczenie ma zatem wybór odpowiednich poziomów czy warstw gleby, z których pobierane są próby do analiz. W badanych borach sosnowych znaczna część biomasy drobnoustrojów ulokowana była w poziomie organicznym (Ofh), gdzie jej wielkość odpowiadała mniej więcej zawartości w całej badanej warstwie mineralnej (0–60 cm) gleby. W glebie mineralnej z kolei, zdecydowanie największą biomasą drobnoustrojów odznaczała się górna, 0–10 cm warstwa, z tym, że w następnych warstwach, do głębokości 40 cm,

w odniesieniu do warstwy wierzchniej, biomasa drobnoustrojów była jeszcze znacząca. Na siedliskach lasowych natomiast, ponad 60% biomasy drobnoustrojów obecnej w glebie do głębokości 60 cm zgromadzona była w górnej (0–10 cm) warstwie mineralnej gleby, a jej wielkość, w odróżnieniu od siedlisk borowych, gwałtownie spadała w niższych warstwach. Zakładając, że ocena aktywności mikrobiologicznej gleb leśnych powinna być oparta na wynikach badań prób pobranych z warstw gleby charakteryzujących się znaczącą wielkością biomasy drobnoustrojów, można przyjąć, że na siedliskach borowych badania te powinny dotyczyć całego poziomu Ofh oraz górnej, co najmniej 10 cm warstwy mineralnej, a na siedliskach lasowych – górnej (0–10 cm) warstwy mineralnej gleby, a jeśli poziom Ofh jest dobrze wykształcony – także warstwy organicznej. Należy poza tym dodać, że w badaniach biomasy drobnoustrojów w kontekście funkcjonowania ekosystemu leśnego wyniki oznaczeń w przeliczeniu na powierzchnię są bardziej właściwe do interpretacji niż wyrażone w jednostkach wagowych gleby, na które wpływ ma gęstość objętościowa gleby (Aikio et al. 2000).

4. Stwierdzenia i wnioski

1. Koncentracja biomasy drobnoustrojów ($\mu\text{g } C_{\text{mic}} \text{ g}^{-1}$ gleby) w glebach leśnych jest istotnie skorelowana z koncentracją węgla organicznego ($\%C_{\text{org}}$) i drastycznie spada wraz z głębokością.

2. Biomasa drobnoustrojów ($\text{kg } C_{\text{mic}} \text{ ha}^{-1}$) w przeważającej części skumulowana jest w górnych warstwach gleb: na siedliskach borowych w poziomie Ofh i w warstwie mineralnej (0–10 cm), a na siedliskach lasowych w warstwie mineralnej (0–10 cm),

3. Spadek koncentracji i wielkości biomasy w glebie mineralnej wyraża funkcja wykładnicza: $y = e^{-bx}$, gdzie y oznacza stosunek C_{mic} na głębokości x (cm) do C_{mic} na powierzchni gleby (0 cm), a b – współczynnik określający rozkład pionowy.

4. Wartości współczynnika b są zależne od typu siedliskowego lasu; wyższe wartości na siedliskach lasowych niż borowych wskazują, że na siedliskach lasowych spadek biomasy drobnoustrojów wraz z głębokością ma bardziej zdecydowany przebieg.

5. Do miarodajnej oceny stanu mikrobiologicznego gleb leśnych konieczna jest analiza górnych warstw gleby – na siedliskach borowych całego poziomu organicznego (Ofh) oraz górnej, co najmniej 10 cm warstwy mineralnej, a na siedliskach lasowych górnej 0–10 cm warstwy mineralnej i ewentualnie warstwy organicznej, jeśli obecny jest dobrze wykształcony poziom Ofh.

Literatura

- Agnelli A., Ugolini F.C., Corti G., Pietramellara G. 2001: Microbial biomass-C and basal respiration of fine earth and highly altered rock fragments of two forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 613–620.
- Agnelli A., Asher J., Corti G., Ceccherini M.T., Nannipieri P., Pietramellara G. 2004: Distribution of microbial communities in a forest soil profile investigated by microbial biomass, soil respiration and DGGE of total and extracellular DNA. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 859–868.
- Aikio S., Väre H., Strömmer R. 2000: Soil microbial activity and biomass in the primary succession of a dry heath forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 1091–1100.
- Alvarez R., Alvarez C.R. 2000: Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 184–189.
- Anderson J.P.E., Domsch K.H. 1978: A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 10: 215–221.
- Bauhus J., Paré D., Côte L. 1998: Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in southern boreal forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 30: 1077–1089.
- Bauhus J., Khanna P.K. 1999: The significance of microbial biomass in forest soils. [W:] Going underground – ecological studies in forest soils (eds: N. Rastin and J. Bauhus), Research Signpost, Trivandrum, India, 77–110.
- Bååth E., Anderson T.H. 2003: Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 955–963.
- Castellazzi M.S., Brookes P.C., Jenkinson D.S. 2004: Distribution of microbial biomass down soil profiles under regenerating woodland. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 1485–1489.
- Côté L., Brown S., Paré D., Fyles J., Bauhus J. 2000: Dynamics of carbon and nitrogen mineralization in relation to stand type, stand age and soil texture in boreal mixedwood. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 1079–1090.
- Ekelund F., Rønn R., Christensen S. 2001: Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 475–481.
- Finér L., Messier C., De Grandpré L. 1997: Fine-root dynamics in mixed boreal conifer-broad leafed forest stands at different successional stages after fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 304–314.
- Hackl E., Bachmann G., Zechmeister-Boltenstern S. 2000: Soil microbial biomass and rhizosphere effects in natural forest stands. *Phyton (Austria)*, 40: 83–90.
- Harris M.M., Safford L.O. 1996: Effects of season and four tree species on soluble carbon content in fresh and decomposing litter of temperate forests. *Soil Science*, 161: 130–135.
- Honque D. 1999: Production of dissolved organic carbon in forested catchments. *Journal of Hydrology*, 224: 91–99.
- Insam H., Domsch K.H. 1988: Relationship between organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, 15: 177–188.

- Jenkinson D.S., Ladd J.N. 1981: Microbial biomass in soil: measurement and turnover. [W:] *Soil Biochemistry* (eds: E.A. Paul and J.N. Ladd), Marcel Dekker, New York, 5: 415–471.
- Lavahum M.F.E., Joergensen R.G., Meyer B. 1996: Activity and biomass of soil microorganisms at different depths. *Biology and Fertility of Soils*, 23: 38–42.
- Leirós M.C., Trasar-Cepeda C., Seoane S., Gil-Sotres F. 2000: Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): general parameters. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 733–745.
- Martikainen P., Palojarvi A. 1990: Evaluation of fumigation extraction method for the determination of microbial biomass C and N in a range of forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 22: 797–802.
- McGill W.B., Cannon K.R., Robertson J.A., Cook F.D. 1986: Dynamics of soil microbial biomass and water soluble C in Breton L after 50 years of cropping to two rotation. *Canadian Journal of Soil Science*, 66: 1–19.
- Nielsen M.N., Winding A. 2002: Microorganisms as indicators of soil health. NERI Technical Report No. 388, National Environmental Research Institute, Denmark, 82 p.
- Oberholzer H.R., Höper H. 2000: Reference systems for the microbiological evaluation of soils. *VDLUFA-Schriftenreihe*, 55/II: 19–34.
- Olszowska G., Zwoliński J., Matuszczyk I., Syrek D. 2007: Zastosowanie biochemicznych charakterystyk gleb w diagnostyce typologicznej siedlisk leśnych. *Leśne Prace Badawcze*, 4: 83–105.
- Priha O., Smolander A. 1997: Microbial biomass and activity in soil and litter under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at originally similar field afforestation sites. *Biology and Fertility of Soils*, 24: 45–51
- Raubuch M., Beese F. 2005: Influence of soil acidity on depth gradients of microbial biomass in beech forest soils. *European Journal of Forest Research*, 124: 87–93.
- Schouten A.J., Bloem J., Didden W.A.M., Rutgers M., Siepel H., Posthuma L., Breure A.M. 2000: Development of biological indicators for soil quality. SETAC Globe July-August: 30–32.
- Smolander A., Kitunen V. 2002: Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 651–660.
- Taylor L.A., Arthur M.A., Yanai R.D. 1999: Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 31: 431–439.
- Templer P., Findlay S., Lovett G. 2003: Soil microbial biomass and nitrogen transformation among five tree species of the Catskill Mountains, New York, USA. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 607–613.
- Vance E.D., Brookes P.C., Jenkinson D.S. 1987: An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 19: 703–707.
- Wardle D.A. 1992: A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 67: 321–358.
- Zak D.R., Grigal D.F., Gleeson S., Tilman D. 1990: Carbon and nitrogen cycling during old-field succession: constraints on plant and microbial biomass. *Biogeochemistry*, 11: 111–129.
- Zak D.R., Tilman D., Parmenter R.R., Rice C.W., Fisher F.M., Vose J., Milchunas D., Martin C.W. 1994: Plant production and soil microorganisms in late-successional ecosystems: a continental-scale study. *Ecology*, 75: 2333–2347.
- Zwoliński J., Orzeł S. 2000: Produkcyjność drzewostanów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) w gradiencie skażeń przemysłowych. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, A, 892: 75–98.
- Zwoliński J. 2001: Reakcja borów sosnowych na kwaśne opady. I. Gleba i aparat asymilacyjny drzew. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, A, 912: 113–137.
- Zwoliński J. 2005: Oznaczanie udziału grzybów i bakterii w biomacie drobnoustrojów gleb leśnych. *Leśne Prace Badawcze*, 4: 7–18.