

ANDRZEJ M. JAGODZIŃSKI, GRZEGORZ JAROSIEWICZ, PIOTR KAROLEWSKI,
JACEK OLEKSYN

Zawartość węgla w biomacie pospolitych gatunków krzewów podszycia leśnego*

Carbon concentration in the biomass of common species of understory
shrubs

ABSTRACT

Jagodziński A. M., Jarosiewicz G., Karolewski P., Oleksyn J. 2012. Zawartość węgla w biomacie pospolitych gatunków krzewów podszycia leśnego. Sylwan 156 (9): 650-662.

Experimental data on carbon concentration in woody plant species biomass are very scarce and value of 50% of dry biomass is widely accepted in carbon storage modeling. On the other hand, some studies have proved that the carbon concentration in woody species biomass is variable and depends on the component. Thus, the main goal of the study was to determine carbon concentration in biomass of 7 understory shrub species (basing on 282 individuals): *Corylus avellana*, *Prunus padus*, *P. serotina*, *Frangula alnus*, *Sambucus nigra*, *Cornus sanguinea* and *Sorbus aucuparia* as well as to analyze variability of carbon concentration among shrub species and biomass components. Carbon concentration was analyzed for leaves, fruits, branches, stemwood, stembark, coarse and fine roots. Our study revealed that the mean carbon concentration in biomass of all species studied was 47.7%. We found statistically significant differences in carbon concentration among the shrub species studied in all biomass components. The mean value for particular species was as follows: *Prunus serotina* – 47.5%, *P. padus* – 47.6%, *Frangula alnus* – 47.7%, *Sambucus nigra* – 47.7%, *Corylus avellana* – 47.8%, *Cornus sanguinea* – 47.8% and *Sorbus aucuparia* – 47.8%. Additionally, we found statistically significant differences in carbon concentration among biomass components within the species studied. The mean carbon concentration in fruit biomass was 46.2%, in fine roots – 47.0%, in leaves – 47.2%, in coarse roots – 47.7%, in branches – 47.9%, in stemwood – 48.5% and in stembark – 48.6%. The variability of carbon concentration in fruit, branches and leaves biomass was higher than in the remaining biomass components. The variability of carbon concentration in biomass of woody species should be considered in carbon storage modeling in forest ecosystems.

KEY WORDS

carbon concentration, shrubs, biomass components

ADDRESSES

Andrzej M. Jagodziński ^(1, 2) – e-mail: amj@man.poznan.pl
Grzegorz Jarosiewicz ⁽²⁾ – e-mail: grigorijjar@wp.pl
Piotr Karolewski ⁽¹⁾ – e-mail: pkarolew@man.poznan.pl
Jacek Oleksyn ⁽¹⁾ – e-mail: oleks001@umn.edu

⁽¹⁾ Instytut Dendrologii PAN; Parkowa 5; 62-035 Kórnik

⁽²⁾ Katedra Łowiectwa i Ochrony Lasu; Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; Wojska Polskiego 71d; 60-625 Poznań

Wstęp

Warstwa krzewów pełni w ekosystemach leśnych szereg ważnych funkcji. Podszyt chroni glebę przed erozją, wpływa na bilans wodny, zmniejszając parowanie wody z powierzchni gleby, a także

* Praca powstała w ramach projektu badawczego pt. „Bilans węgla w biomacie drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski”, finansowanego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych w Warszawie (2007-2011).

ogranicza wnikanie wiatru do wnętrza lasu, poprawiając warunki mikroklimatyczne [Szymański 2000]. Krzewy podszytu stanowią też cenne źródło zróżnicowanej pod względem struktury i składu chemicznego ściółki, która współuczestniczy w przyspieszeniu rozkładu akumulowanej na powierzchni trudno rozkładalnej martwej materii organicznej. Ulegająca dekompozycji ściółka zasila wierzchnie warstwy gleby w związki mineralne, przyczyniając się do zapobieżenia degradacji gleby oraz poprawy jej struktury morfologicznej i składu chemicznego. Wszystkie wymienione powyżej ekologiczne konsekwencje istnienia podszytu w lesie pozostają ze sobą w ścisłym związku i trudno je od siebie oddzielić [Imurzyński, Włoczewski 2003; Berg, McLaugherty 2008].

Jedną z najslabiej poznanych funkcji podszytu jest jego wpływ na bilans węgla (C) w ekosystemach leśnych [Pacala i in. 2001; Houghton 2003; Woodbury i in. 2007]. Ze względu na znaczenie lasów w obiegu węgla, zagadnieniu temu poświęca się coraz więcej miejsca w literaturze [Brantley, Young 2010]. Szacuje się, że globalne zasoby tego pierwiastka w lasach wynoszą 638 Gt C, w tym 283 Gt stanowi węgiel związany w biomase żywej, 38 Gt – węgiel związany w martwym drewnie, a 317 Gt to węgiel związany w glebach (do głębokości 30 cm) i ścióle [State... 2011]. Precyzyjne obliczenie zasobów węgla w biomase roślin jest nieodzownym elementem określenia wkładu ekosystemów leśnych do globalnego budżetu tego pierwiastka. Zasoby węgla w biomase roślin określa się przez obliczenie ich suchej masy oraz przemnożenie tej wartości przez zawartość węgla w biomase poszczególnych komponentów. Stosuje się też pośrednie metody obliczania zawartości C w lasach, polegające na przeliczaniu miąższości drzewostanu na jego masę z uwzględnieniem gęstości drewna, przyjmując jednocześnie, że zawartość C stanowi 45% suchej masy. Finalny przelicznik ma wówczas postać: 1 m³ drewna gatunków iglastych = 280 kg C, natomiast 1 m³ innych gatunków = 340 kg C [Houghton i in. 1983].

W przypadku, gdy nie są dostępne dane empiryczne, przyjmuje się na ogół, że zawartość węgla w zdrewniałych organach drzew wynosi 50%, a w igłach/liściach i drobnych korzeniach 45% ich suchej masy [Whittaker, Likens 1973; Ajtay i in. 1979; Houghton 1996; Gower i in. 2001]. Badania z ostatnich lat wskazują jednak na to, że zawartość węgla w biomase roślin jest wartością bardzo zróżnicowaną i waha się w zależności od organu od mniej niż 40% do przeszło 55% [Fahey, Knapp 2007; Skorupski i in. 2012]. Może ona zależeć też od wielu czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Na przykład podwyższony udział węgla w biomase krzewów może być związany z większym inwestowaniem tego pierwiastka w węglowe związki obronne (np. fenole) chroniące rośliny przed roślinożernymi owadami i patogenicznymi grzybami [Karolewski i in. 2010, 2011]. Jednocześnie okresowo podwyższona w sezonie wegetacyjnym akumulacja cukrów niestrukturalnych może być także przyczyną stwierdzenia obniżonej zawartości C w poszczególnych tkankach i organach [Oleksyn i in. 2000a, b].

Z danych literaturowych wynika, iż w procesie szacowania retencji węgla w ekosystemach leśnych istnieje szereg nieścisłości, które ostatecznie mogą wpływać na dokładność modelowania retencji i obiegu C w środowisku [Bert, Danjon 2006]. Do najważniejszych zmiennych należy jednak nie tylko dokładność szacowania stanu biomasy drzew, ale i dokładność określania zawartości węgla w biomase. Niniejsza praca, skupiająca się na jednym z podniesionych problemów (zawartości węgla w biomase wybranych gatunków krzewów), jest próbą częściowego wypełnienia tej luki. Podstawowym celem badań było określenie zmienności zawartości węgla w biomase siedmiu głównych gatunków krzewów występujących w lasach oraz różnic w zawartości tego pierwiastka pomiędzy analizowanymi gatunkami krzewów i ich organami. Analiza zawartości węgla w biomase badanych gatunków krzewów miała także na celu określenie, na ile przyjmowana w modelach krążenia tego biogenu w ekosystemach leśnych zawartość węgla wynosząca 50% jest uniwersalna dla różnych gatunków roślin drzewiastych.

Materiały i metody

Badania wykonano na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie SGGW w Warszawie. Średnia roczna temperatura powietrza na podstawie 55-letnich obserwacji przeprowadzonych w Stacji Meteorologicznej Strzelna wynosi na omawianym obszarze 7,2°C (−3,2°C w styczniu, 17,3°C w lipcu), natomiast średnie roczne minimum temperatury wynosi −20°C. Przymrozki późne występują nawet w połowie czerwca, wczesne natomiast w drugiej połowie września. Długość okresu wegetacyjnego, określona jako liczba dni ze średnią temperaturą dobową powietrza przekraczającą 5°C, wynosi 212 dni. Roczna suma opadów atmosferycznych waha się od 404 do 832 mm (średnia wieloletnia 597 mm), z czego 70% przypada na okres wegetacyjny [Bednarek 1993; Jagodziński, Banaszcak 2010]. Warunki glebowo-geomorfologiczne, mikroklimatyczne, położenie geograficzne oraz bezpośredni i pośredni wpływ działalności człowieka wpłynęły w istotnym stopniu na zróżnicowanie fitosocjologiczne lasów doświadczalnych Nadleśnictwa Rogów. Dominują tu lasy świeże i lasy mieszane świeże, jednakże większość siedlisk leśnych jest częściowo zniekształcona (rzadziej zdegradowana) [Zielony 1993].

Spośród gatunków krzewów występujących na terenie LZD w Rogowie, do analiz zawartości węgla w ich biomase, wybrano siedem: leszczynę pospolitą (*Corylus avellana* L.), czeremchę zwyczajną (*Prunus padus* L.), czeremchę amerykańską (*Prunus serotina* Ehrh.), kruszynę pospolitą (*Frangula alnus* Mill.), bez czarny (*Sambucus nigra* L.), dereń świdwę (*Cornus sanguinea* L.) oraz jarzab pospolity (*Sorbus aucuparia* L.). W lipcu i sierpniu 2009 roku wybrano nie mniej niż 30 osobników każdego z analizowanych gatunków (282 krzewy), występujących najliczniej w lasach, głównie w starszych drzewostanach sosnowych, dębowych oraz sosnowo-dębowych. Wyboru osobników dokonywano tak, by ująć jak największą zmienność rozmiarów krzewów (pierśnicy i wysokości) (tab. 1). Wybrane krzewy zaetykietowano, a następnie pozyskano wraz z systemem korzeniowym. W zależności od rozmiarów krzewu, korzenie pobrano w promieniu co najmniej 1 m od nasady pnia (do krańca zasięgu korony danego krzewu) do głębokości około 1 m (tylko w nielicznych przypadkach system korzeniowy sięgał głębiej).

Po zmierzeniu pierśnicy (dokładność – 1 mm) oraz wysokości (dokładność – 1 cm), każdy z krzewów został rozdzielony na poszczególne komponenty biomasy, tzn. liście, owoce, gałęzie, pnie, korzenie grube i korzenie drobne. W celu określenia zawartości węgla oddzielnie w biomacie drewna i kory pni, pobrano reprezentatywne krążki o wysokości około 10 cm z trzech wysokości każdego krzewu, tzn. $1/6$, $1/2$ i $5/6$. W warunkach laboratoryjnych oddzielono korę od

Tabela 1.

Pierśnica [cm] oraz wysokość [m] badanych gatunków krzewów pozyskanych na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie

Diameter at breast height [cm] and height [m] of studied shrub species, harvested in the WULS-SGGW Forest Experimental Station in Rogów

Gatunek	Liczba pozyskanych krzewów	Pierśnica			Wysokość		
		min.	maks.	średnia (\pm SE)	min.	maks.	średnia (\pm SE)
<i>Cornus sanguinea</i>	40	0,1	8,5	4,05 \pm 0,38	1,34	5,08	3,16 \pm 0,16
<i>Corylus avellana</i>	40	0,1	15,8	6,33 \pm 0,81	1,44	7,02	4,02 \pm 0,29
<i>Frangula alnus</i>	37	0,4	7,9	3,85 \pm 0,38	1,34	4,22	2,88 \pm 0,14
<i>Prunus padus</i>	41	0,3	16,1	6,48 \pm 0,72	1,45	7,58	3,77 \pm 0,23
<i>Prunus serotina</i>	41	0,5	14,6	6,96 \pm 0,64	1,39	7,25	4,15 \pm 0,24
<i>Sambucus nigra</i>	39	0,1	7,9	3,22 \pm 0,32	1,33	5,65	2,93 \pm 0,18
<i>Sorbus aucuparia</i>	44	0,4	16,7	6,74 \pm 0,64	1,39	6,45	3,95 \pm 0,23

drewna. W przypadku korzeni zabezpieczono reprezentatywne ich próby wraz z glebą, a następnie po ich oczyszczeniu z zanieczyszczeń mineralnych rozdzielono je w laboratorium na dwie klasy grubości: korzenie drobne (o średnicy ≤ 2 mm) oraz grube (>2 mm). Do oddzielnej grupy zaklasyfikowano korzenie martwe, jednak w związku z ich silnym zanieczyszczeniem ziarnami piasku i trudnością z jego usunięciem, zostały one wyłączone z analiz chemicznych. Z każdego krzewu pobrano próbki wszystkich wymienionych komponentów biomasy w celu wykonania na nich analiz chemicznych. W dniu zbioru próbki przechowywane były w lodówce, a następnie po przewiezieniu materiału do laboratorium został on wysuszony (w 65°C do stałej masy) w suszarkach z wymuszonym obiegiem powietrza ULE 600 (Mettler GmbH & Co. KG, Niemcy). Okres suszenia zależał od gatunku, a przede wszystkim od rodzaju komponentu biomasy krzewu. Zawartość węgla w biomase krzewów określono w suchym materiale, sproszkowanym w młynku Mikro-Feinmühle-Culatti MFC (IKA[®]-Labortechnik Staufen, Janke & Kunkel GmbH & Co KG, Niemcy). Zawartość C w analizowanych komponentach biomasy określono przy użyciu analizatora Elemental Combustion System (model ECS CHNS-O 4010; Costech Instruments, Włochy/USA) w Instytucie Dendrologii PAN w Kórniku.

Istotność wpływu badanych efektów (gatunku i organu) na zawartość węgla w tkankach określano przy pomocy jedno- i dwuczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). W związku z tym, iż zawartość węgla w poszczególnych komponentach biomasy krzewów została wyrażona w procentach, analizy wariancji wykonywano po ich przeliczeniu według formuły Bliss [Snedecor, Cochran 1976]. Po wykazaniu statystycznie istotnych różnic między analizowanymi wariantami doświadczenia, zastosowano test Tukeya w celu scharakteryzowania wzajemnych różnic między średnimi z porównywanych grup. Poszczególne warianty doświadczenia łączono i uszeregowano w grupy przy pomocy hierarchicznej analizy skupień wykonanej metodą Warda. W związku z tym, iż na części badanych krzewów nie stwierdzono występowania owoców, w analizie uwzględniono mniejszą liczbę osobników (tab. 4). Wszystkie obliczenia statystyczne wykonano za pomocą programu JMP 8.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA).

Wyniki

Stwierdzono statystycznie istotny wpływ gatunku krzewu na zawartość węgla w biomase, jako średnią dla wszystkich komponentów (tab. 2). Analiza wariancji wykazała istotne różnice w zawartości węgla pomiędzy gatunkami (G) i komponentami (K) biomasy krzewów, a także istotną interakcję $G \times K$ (tab. 3). W kolejności wzrastającej średniej zawartości C w biomase, poszczególne komponenty biomasy można uporządkować następująco: owoce (46,2%), korzenie drobne (47,0%), liście (47,2%), korzenie grube (47,7%), gałęzie (47,9%), drewno pni (48,5%) oraz kora pni (48,6%). W obrębie różnych organów u badanych gatunków występuje też wyraźne zróżnicowanie zawartości C między poszczególnymi próbkami (ryc. 1, 2). Zróżnicowanie to było znacznie większe w przypadku owoców, gałęzi i liści niż w drewnie, korze oraz drobnych i grubych korzeniach. Średni współczynnik zmienności dla owoców wynosi 3,8%, liści – 3,6%, gałęzi – 3,1%, korzeni drobnych – 1,9%, korzeni grubych – 1,7%, kory – 1,4%, a dla drewna – 1,4% (tab. 4).

Wykazano statystycznie istotne różnice w zawartości C między badanymi gatunkami krzewów w każdym z analizowanych komponentów (tab. 2, 3). Średnia zawartość C w liściach wahała się od 46,9% (*Sambucus nigra*) do 48,2% (*Cornus sanguinea*). Najniższą i najwyższą zawartość węgla w pojedynczych próbkach spośród wszystkich wykonanych analiz chemicznych odnotowano w liściach *Sorbus aucuparia* (41,9-51,4%) (ryc. 1, 2). Zawartość węgla w owocach zmieniała się od 45,3% u *Prunus serotina* do 47,8% u *Sambucus nigra*. Z kolei w gałęziach najmniejszą śred-

Tabela 2.

Średnia (±SE) zawartość węgla [%] w poszczególnych komponentach biomasy badanych gatunków krzewów
 Mean (±SE) carbon concentration [%] in biomass components by shrub species

Gatunek	Liście	Owoce	Gałęzie	Drewno pni	Kora pni	Korzenie drobne	Korzenie grube	ANOVA (P)
<i>Cornus sanguinea</i>	48,21(0,26) A ab	45,28(0,40) BC d	47,39(0,20) BC c	48,57(0,11) BC a	48,49(0,10) BC a	47,08(0,14) A c	47,73(0,12) AB bc	<0,0001
<i>Corylus avellana</i>	47,18(0,22) AB b	47,05(0,53) ABC b	48,30(0,28) AB a	48,34(0,09) BC a	48,24(0,13) C a	47,25(0,09) A b	47,48(0,10) AB b	<0,0001
<i>Frangula alnus</i>	46,87(0,27) B d	46,16(0,45) ABC d	47,84(0,23) ABC bc	48,60(0,10) BC bc	48,85(0,11) AB a	47,07(0,11) A cd	47,73(0,13) AB c	<0,0001
<i>Prunus padus</i>	46,92(0,24) B c	47,35(0,31) AB abc	47,86(0,25) AB a	48,25(0,09) BC a	48,12(0,08) C a	47,00(0,12) AB bc	47,70(0,13) AB ab	<0,0001
<i>Prunus serotina</i>	46,95(0,25) B c	45,27(0,45) C d	48,67(0,25) A a	48,16(0,10) C ab	48,05(0,10) C ab	47,09(0,12) A c	47,39(0,13) B bc	<0,0001
<i>Sambucus nigra</i>	46,85(0,28) B cd	47,75(0,53) A bc	46,82(0,13) C cd	49,18(0,13) A a	48,82(0,13) B ab	46,43(0,27) B d	48,02(0,17) A b	<0,0001
<i>Sorbus aucuparia</i>	47,14(0,33) AB c	45,42(0,44) C d	48,48(0,30) A ab	48,66(0,11) B a	49,29(0,10) A a	47,02(0,11) AB c	47,61(0,12) AB bc	<0,0001
ANOVA (P)	0,0053	0,0002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0062	0,0311	

wielkie litery – różnice między gatunkami, małe litery – różnice między komponentami biomasy

capital letters – differences among shrub species, small letters – differences among biomass components

Tabela 4.

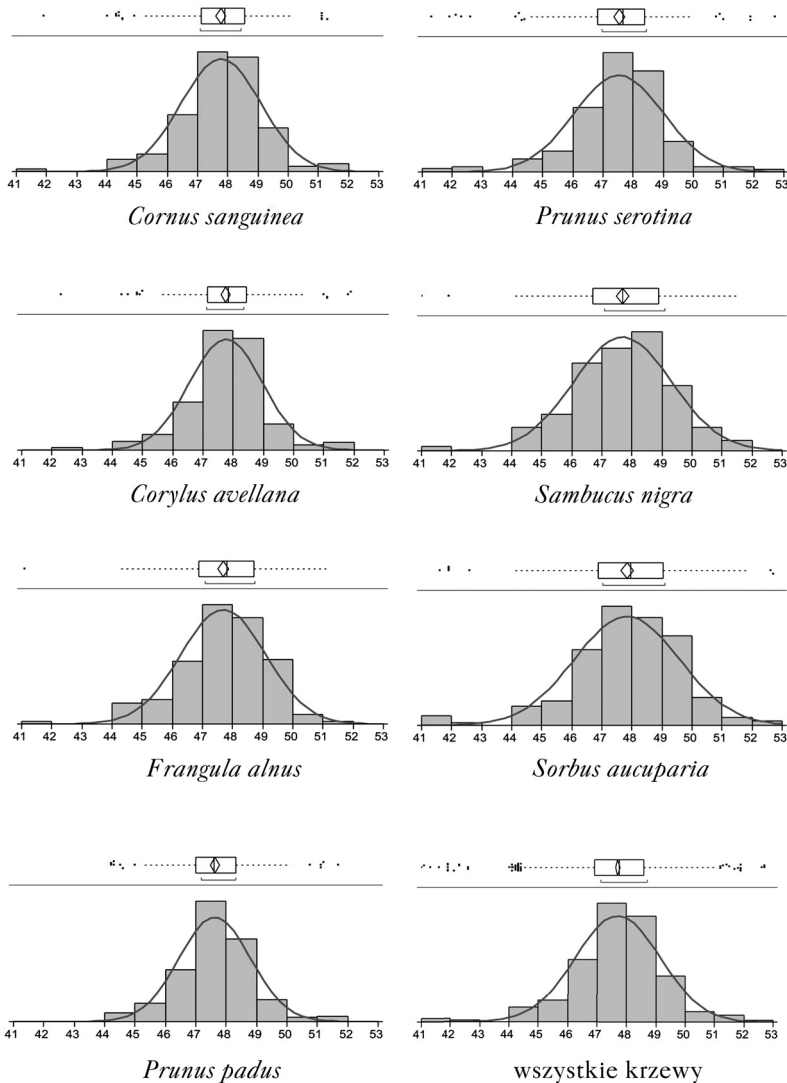
Liczba prób (N) i współczynniki zmienności (CV [%]) zawartości węgla w biomacie krzewów
 Number of samples (N) and coefficients of variation (CV [%]) of carbon concentration in biomass of the studied shrubs species

Gatunek	Liście		Owoce		Gałęzie		Drewno pni		Kora pni		Korzenie drobne		Korzenie grube	
	N	CV	N	CV	N	CV	N	CV	N	CV	N	CV	N	CV
<i>Cornus sanguinea</i>	40	3,40	13	3,16	40	2,68	40	1,40	40	1,24	40	1,82	40	1,64
<i>Corylus avellana</i>	40	2,93	12	3,89	40	3,63	40	1,23	40	1,66	40	1,25	40	1,33
<i>Frangula alnus</i>	37	3,50	20	4,33	37	2,93	37	1,26	37	1,39	37	1,38	37	1,62
<i>Prunus padus</i>	41	3,33	14	2,41	41	3,38	41	1,16	41	1,04	41	1,61	41	1,75
<i>Prunus serotina</i>	41	3,47	21	4,55	41	3,31	41	1,33	41	1,35	41	1,65	41	1,78
<i>Sambucus nigra</i>	39	3,79	13	3,99	39	1,73	39	1,66	39	1,65	39	3,70	39	2,24
<i>Sorbus aucuparia</i>	44	4,59	22	4,53	44	4,04	44	1,54	44	1,38	44	1,58	44	1,69

Tabela 3.

Analiza wariancji (ANOVA)
 Analysis of variance (ANOVA)

	DF	SS	F	P
Gatunek (G)	6	6,2	2,198	0,0407
Komponent (K)	6	277,9	98,582	<0,0001
G×K	36	114,3	6,757	<0,0001



Ryc. 1.

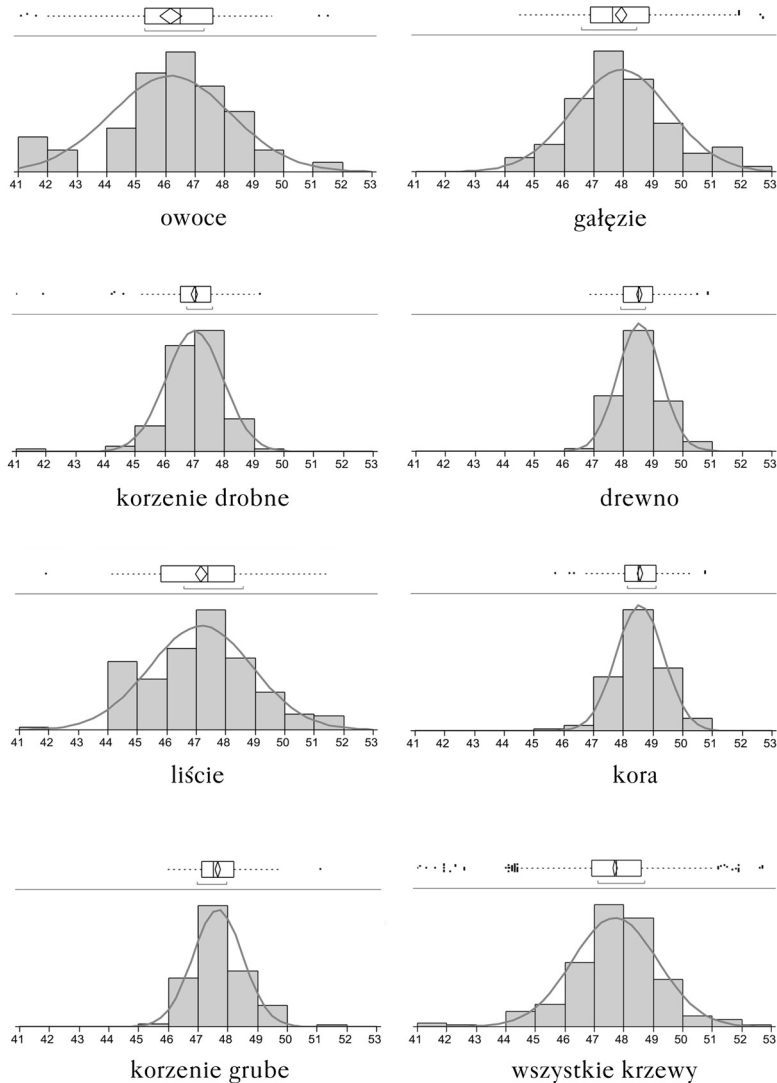
Zawartość węgla [%] w biomase poszczególnych gatunków krzewów

Carbon concentration [%] in biomass of different shrub species

wykras powyżej histogramu przedstawia rozkład empiryczny badanej cechy; punkty – wartości ekstremalne; prostokąt – rozstęp ćwiartkowy (1.-3. kwartył); pionowa linia wewnątrz prostokąta – mediana; linia na histogramie – rozkład normalny

box plot above the histogram shows the sample distribution: points – extreme values (outliers); box – interquartile range (25-75%); line across the middle of the box – median; line on the histogram – normal distribution

nią zawartość tego pierwiastka odnotowano u *Sambucus nigra* (46,8%), najwyższą – u *Prunus serotina* (48,7%). W drewnie pni najmniejszą średnią zawartość C stwierdzono u *Prunus serotina* (48,2%), a najwyższą – u *Sambucus nigra* (49,2%). Średnia zawartość C w korze pni zmieniała się w zakresie od 48,1% u *Prunus serotina* do 49,3% u *Sorbus aucuparia*. Największą zmienność zawartości węgla w biomase korzeni drobnych stwierdzono u *Sambucus nigra* (zakres w obrębie poszczególnych prób od 41,0 do 49,2%; ryc. 1, 2). Z kolei w przypadku korzeni grubych różnice między gatunkami były niewielkie. Najmniejszą średnią zawartość węgla wykazano u *Prunus serotina*



Ryc. 2.

Zawartość węgla [%] w biomase poszczególnych komponentów krzewów

Carbon concentration [%] in biomass of different components

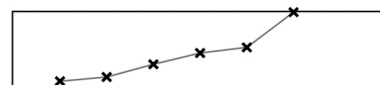
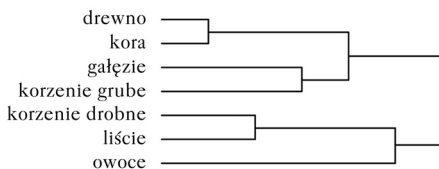
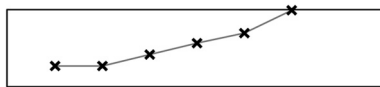
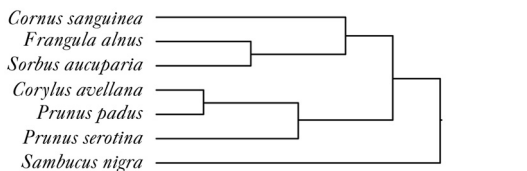
Oznaczenia jak na rycinie 1; denotes as on figure 1

(47,4%), a najwyższą – *Sambucus nigra* (48,0%), jednakże w obrębie każdego z gatunków występowało znaczne zróżnicowanie zawartości C pomiędzy poszczególnymi próbkami korzeni grubych. Analizując pojedyncze próby, najniższą zawartość węgla stwierdzono u *Sorbus aucuparia* i *Corylus avellana* (45,9%), a najwyższą – w korzeniach *Sambucus nigra* (51,1%) (ryc. 1, 2). Biorąc pod uwagę średnią zawartość C w biomase każdego z analizowanych komponentów biomasy siedmiu gatunków krzewów, w oparciu o hierarchiczną analizę skupień wykonaną metodą Warda, uszeregowano badane gatunki według największego podobieństwa. Jedną z wyróżnionych grup tworzą *Cornus sanguinea*, *Frangula alnus* i *Sorbus aucuparia*, drugą grupę jednorodną tworzą *Corylus avellana*, *Prunus padus* i *P. serotina*, a trzecią tworzy tylko jeden gatunek – *Sambucus nigra* (ryc. 3).

W obrębie każdego gatunku krzewu odnotowaliśmy istotne różnice w zawartości węgla pomiędzy analizowanymi komponentami biomasy (tab. 2, 3). U pięciu na siedem gatunków najmniejszą średnią zawartość węgla odnotowano w owocach. W przypadku *Prunus padus* najmniejszą zawartość węgla stwierdzono w liściach, a u *Sambucus nigra* – w korzeniach drobnych. Odnosząc się do komponentów biomasy o najwyższej średniej zawartości węgla, stwierdzono, że u *Cornus sanguinea*, *Corylus avellana*, *Prunus padus* i *Sambucus nigra* najwięcej węgla występuje w drewnie pni, u *Frangula alnus* i *Sorbus aucuparia* w korze, a u *Prunus serotina* – w gałęziach. Biorąc pod uwagę zawartości węgla w tkankach poszczególnych komponentów, średnio u siedmiu gatunków krzewów, w oparciu o hierarchiczną analizę skupień wykonaną metodą Warda, uszeregowano je według największego podobieństwa. Jedną z wyróżnionych grup tworzą drewno, kora, gałęzie i korzenie grube, drugą natomiast – korzenie drobne, liście i owoce (ryc. 4). W obrębie pierwszej z wymienionych grup tworzą się jeszcze dwie podgrupy – jedną z nich stanowią drewno i kora, a drugą – gałęzie i korzenie grube.

Dyskusja

Przedstawione wyniki wskazują na istotne zróżnicowanie zawartości węgla we wszystkich analizowanych komponentach biomasy. W literaturze, w tym w modelach retencji węgla w ekosystemach leśnych, przyjmuje się na ogół, że średnia zawartość C w biomacie roślin drzewiastych wynosi 50% [Nabuurs, Mohren 1995; Nabuurs i in. 1997; Maseri i in. 2003]. Jednak z rezultatów przedstawionych w naszej pracy wynika, iż średnia zawartość C w biomacie krzewów wynosi 47,7%, a więc jest niższa o 2,3 punkta procentowego od wartości przyjmowanej w modelowaniu retencji węgla w ekosystemach leśnych. Jakkolwiek biomasa krzewów stanowi nieznaczną część biomasy drzewostanu, odgrywają one istotną rolę w funkcjonowaniu ekosystemów leśnych, szczególnie na najuboższych siedliskach. Z badań Orła i in. [2005] prowadzonych w lasach Puszczy Niepołomickiej wynika, że średnia biomasa warstwy podszyciu (2,04 Mg/ha) nie ma, poza stosunkowo nielicznymi przypadkami, istotnego wpływu na wielkość biomasy nadziemnej części roślinności drzewiastej w drzewostanach mieszanych. Mimo niewielkiego udziału krzewów w sumarycznej



Ryc. 3.

Podobieństwo zawartości węgla w biomacie analizowanych gatunków krzewów

Similarity of carbon concentration in biomass of analysed shrub species

Rysunek pod dendrogramem przedstawia punkty dla każdej wyróżnionej grupy krzewów. Odległości i nachylenia odcinków między punktami wskazują na dystanse pomiędzy grupami

Plot beneath the dendrogram presents points for each cluster. The distance and curvature between the points represents the distance between clusters

Ryc. 4.

Podobieństwo zawartości węgla w biomacie analizowanych komponentów

Similarity of carbon concentration in biomass of analysed components

Oznaczenia jak na rycinie 3; denotes as on figure 3

biomasie drzew w drzewostanie, rokroczny opad biomasy (głównie liści) na powierzchnię gleby powoduje zasilenie środowiska glebowego znacznymi ilościami węgla organicznego, który w wyniku procesu dekompozycji wprowadzany jest ponownie do obiegu [Nilsson i in. 1999; Prescott i in. 2000]. Istotnym dla obiegu C w lasach jest też fakt pozostawiania znacznej części krzewów na zrębach, co może wpływać na wydłużanie retencji tego pierwiastka.

Pomimo statystycznie istotnych różnic w zawartości węgla, zarówno między gatunkami w ramach poszczególnych komponentów, jak i między komponentami u każdego z gatunków, średnia zawartość C w biomasie analizowanych krzewów jest zbliżona. Istotna interakcja gatunek \times komponent biomasy wskazuje na to, że zawartości węgla w poszczególnych komponentach biomasy różnią się pomiędzy gatunkami. Pomimo tego, średnia zawartość C w biomasie badanych gatunków krzewów wahała się w bardzo niewielkim przedziale – od 47,5% u *Prunus serotina* do 47,8% w przypadku *Sorbus aucuparia*. Nasze wyniki mieszczą się w dolnym zakresie zawartości węgla w biomasie roślin drzewiastych, która zmienia się w szerokim zakresie od 44 do 56% i zależy zarówno od gatunku, jak i komponentu biomasy [Laiho, Laine 1997; Elias, Potvin 2003; Lamloom, Savidge 2003; Bert, Danjon 2006; Thomas, Malczewski 2007; Skorupski i in. 2012].

Na przykład Thomas i Malczewski [2007], analizując zawartość węgla w biomasie 14 gatunków drzew z obszaru Chin, wykazali, że średnia zawartość C w części bielastej pni znacznie różniła się między gatunkami (48,4-51,0%). Ze względu na różnice w strukturze drewna bielastego i twardego, można oczekiwać różnic w zawartości węgla w części twardej (ta nie była analizowana przez cytowanych autorów). Z kolei Zhang i in. [2009], badając 10 gatunków drzew w północno-wschodnich Chinach, stwierdzili istotne różnice w zawartości węgla między gatunkami oraz komponentami biomasy. Na przykład średnia zawartość C w pniach wahała się od 43,4% u *Populus davidiana* do 55,6% u *Phellodendron amurense*, przy czym średnia wartość dla wszystkich gatunków wynosiła 49,9%, a więc była bardzo zbliżona do wartości przyjmowanej w modelach. Przytoczony zakres był jednak szerszy niż podany przez Lamloom i Savidge [2003] dla 41 północnoamerykańskich gatunków drzew (46,3-55,2%) oraz przez Eliasa i Potvina [2003] dla 32 tropikalnych gatunków drzew (44,4-49,4%).

Pod względem zawartości węgla, Zhang i in. [2009] uporządkowali komponenty biomasy od największej do najmniejszej zawartości węgla następująco: igły/liście (51,4%)>młode gałęzie (50,8%)>stare gałęzie (50,3%)>pnie (49,9%)>korzenie grube (48,8%)>korzenie drobne (47,1%). Spośród analizowanych komponentów biomasy największe zróżnicowanie zawartości węgla autorzy ci stwierdzili w korzeniach drobnych (42,7-50,4%). Wyniki naszych badań wskazują natomiast na to, iż poszczególne komponenty biomasy zawierają różny udział węgla i można uporządkować je następująco w kierunku malejących wartości (średnie dla wszystkich gatunków): kora pni – 48,6%, drewno pni – 48,5%, gałęzie – 47,9%, korzenie grube – 47,7%, liście – 47,2%, korzenie drobne – 47,0% i owoce – 46,2%. Stosunkowo niska zawartość C w liściach, drobnych korzeniach i owocach może się wiązać ze znaczną zawartością w nich cukrów niestrukturalnych (TNC). Na przykład w liściach roślin drzewiastych w naszych warunkach klimatycznych zawartość TNC może osiągać przeszło 15% ich suchej masy, a na północy do 30% [Linder 1995; Oleksyn i in. 2000a, b], co znacznie obniża udział w tych organach masy węgla, ze względu na niższą zawartość C w skrobi i cukrach rozpuszczalnych w porównaniu do zawartości tego pierwiastka w biomasie. W cząsteczce glukozy masa C stanowi 40% masy całej cząsteczki, a więc aż o 6-9 punktów procentowych mniej od wyżej wymienionych wartości dla komponentu badanych przez nas krzewów. Istotnym czynnikiem wpływającym na heterogeniczność zawartości C w korzeniach drobnych może być znaczne zróżnicowanie korzeni mikoryzowych pod względem

zawartości C. U tego samego gospodarza (*Pinus sylvestris*) drobne korzenie będące w związku symbiotycznym z grzybem z rzędu kustrzebkwców (*Pezizales*) miały o przeszło 27% wyższą zawartość C niż korzenie pozostające w symbiozie z grzybem *Rhizopogon roseolus* (48,1 vs 35,8% C) [Trocha i in. 2010].

Uzyskane przez nas wyniki wskazują także na to, że poszczególne komponenty biomasy cechują się różną zmiennością zawartości węgla. Zróżnicowanie to było znacznie większe w przypadku owoców (CV=3,8%), liści (CV=3,6%) i gałęzi (CV=3,1%) niż w biomase korzeni drobnych (CV=1,9%), korzeni grubych (CV=1,7%), kory (CV=1,4%) oraz drewna (CV=1,4%). Dane te mogą mieć istotne znaczenie metodyczne – w przypadku komponentów biomasy cechujących się większą zmiennością zawartości węgla, do precyzyjnego ustalenia poziomu C należy uwzględnić większą liczbę prób w trakcie wykonywania analiz chemicznych.

Porównując wyniki przedstawione w niniejszej pracy z przyjmowaną w modelach zawartością węgla wynoszącą 50% biomasy [Dewar, Cannell 1992; Hollinger i in. 1993; Karjalainen 1996], należy stwierdzić, że zawartość C w biomase badanych gatunków jest niższa od niej. Wykazane w naszych badaniach zróżnicowanie zawartości węgla w biomase różnych organów może mieć istotne znaczenie dla modelowania retencji węgla u roślin drzewiastych oraz tempa dekompozycji martwej materii organicznej. Zróżnicowana masa węgla w tych organach może potencjalnie wpływać na przebieg tego procesu. W licznych pracach dotyczących dekompozycji biomasy w ekosystemach leśnych wykazano, że jej tempo jest wyraźnie zróżnicowane w zależności od komponentów drzew i krzewów [np. Tuomi i in. 2009]. Obserwowane we wcześniejszych doświadczeniach [Goebel i in. 2011] znacznie szybsze tempo rozkładu korzeni wyższych rozgałęzień (grubszych) w porównaniu do korzeni najdrobniejszych, u czterech gatunków drzew leśnych (*Acer pseudoplatanus*, *Larix decidua*, *Pinus sylvestris* i *Tilia cordata*), może się wiązać ze zróżnicowaniem w zdolności akumulowania przez nie cukrów niestrukturalnych. Grubsze korzenie wyższych rozgałęzień, które charakteryzują się zarówno wyższymi zawartościami C, jak i od 10 do 30% wyższą od najdrobniejszych korzeni zdolnością akumulacji TNC [Fan, Guo 2010], stanowią bowiem dobrą pożywkę do namnażania mikroorganizmów rozkładających materię organiczną. Dlatego też poznanie chemizmu poszczególnych organów roślin drzewiastych jest kluczowym elementem w zrozumieniu i prognozowaniu retencji C w ekosystemach. Proces dekompozycji może być też w istotnym stopniu związany z globalnymi zmianami klimatycznymi, gdyż tempo dekompozycji zależy od warunków mikro- i makroklimatycznych (wilgotność powietrza i gleby, temperatura) [Kurz-Besson i in. 2006; Hobbie i in. 2007; DeLuca, Boisvenue 2012].

Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują na to, że zawartość węgla w biomase roślin drzewiastych zależy od gatunku i komponentu biomasy i jest niższa od wartości przyjmowanej w modelach obiegu węgla w lasach (50%). Zróżnicowanie zawartości węgla w biomase roślin drzewiastych powinno zostać uwzględnione w modelowaniu krążenia węgla w ekosystemach leśnych.

Literatura

- Ajtay G. L., Ketner P., Duvigneand P. 1979. Terrestrial primary production and phytomass. W: Bolin B., Degens E. T., Kempe S. [red.]. The Global Carbon Cycle. Wiley, New York. 129-182.
- Bednarek A. 1993. Klimat. W: Zielony R. [red.]. Warunki przyrodnicze lasów doświadczalnych SGGW w Rogowie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa. 24-41.
- Berg B., McClaugherty C. 2008. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. 2nd edition. Springer, Berlin - New York.
- Bert D., Danjon F. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). Forest Ecology and Management 222: 279-295.

- Brantley S. T., Young D. R. 2010. Shrub expansion stimulates soil C and N storage along a coastal soil chronosequence. *Global Change Biology* 16: 2052-2061.
- DeLuca T. H., Boisvenue C. 2012. Boreal forest soil carbon: distribution, function and modelling. *Forestry* 85: 161-184.
- Dewar R. C., Cannell M. G. R. 1992. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using U.K. examples. *Tree Physiology* 11: 49-71.
- Elias M., Potvin C. 2003. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1039-1045.
- Fahey T. J., Knapp A. K. [red.]. 2007. Principles and standards for measuring primary production. Oxford University Press. New York.
- Fan P., Guo D. 2010. Slow decomposition of lower order roots: a key mechanism of root carbon and nutrient retention in the soil. *Oecologia* 163: 509-515.
- Goebel M., Hobbie S. E., Bulaj B., Zadworny M., Archibald D. D., Oleksyn J., Reich P. B., Eissenstat D. M. 2011. Decomposition of the finest root branching orders: Linking carbon and nutrient dynamics belowground to fine root function and structure. *Ecological Monographs* 81: 89-102.
- Gower S. T., Krankina O., Olson R. J., Apps M., Linder S., Wang C. 2001. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications* 11: 1395-1411.
- Hobbie S. E., Ogdahl M., Chorover J., Chadwick O. A., Oleksyn J., Zytковиак R., Reich P. B. 2007. Tree species effects on soil organic matter dynamics: the role of soil cation composition. *Ecosystems* 10: 999-1018.
- Hollinger D. Y., Maclaren J. P., Beets P. N., Turland J. 1993. Carbon sequestration in New Zealand's plantation forests. *New Zealand Journal of Forestry* 23: 194-208.
- Houghton R. A. 1996. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio* 25: 267-272.
- Houghton R. A. 2003. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology* 9: 500-509.
- Houghton R. A., Hobbie J. E., Melillo J. M., Moore, B., Peterson B. J., Shaver G. R., Woodwell G. M. 1983. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere. *Ecological Monographs* 53: 236-262.
- Ilmurzyński E., Włoczewski T. 2003. Hodowla lasu. PWRiL, Warszawa.
- Jagodziński A. M., Banaszczyk P. 2010. Stem volume and aboveground woody biomass in noble fir (*Abies procera* Rehder) stands in the Rogów Arboretum (Poland). *Acta Scientiarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 9 (2): 9-24.
- Karjalainen T. 1996. Model computations on sequestration of carbon in managed forests and wood products under changing climatic conditions in Finland. *Journal of Environmental Management* 47: 311-328.
- Karolewski P., Jagodziński A. M., Grzebyta J. 2011. Wpływ wieku drzew oraz wieku i lokalizacji igieł w koronie na zawartość związków fenolowych w igłach młodych sosen. *Sylvan* 155 (12): 797-807.
- Karolewski P., Zadworny M., Mucha J., Napierała-Filipiak A., Oleksyn J. 2010. Link between defoliation and root vitality in five understory shrubs with different resistance to insect herbivores. *Tree Physiology* 30: 969-978.
- Kurz-Besson C., Couteaux M. M., Berg B., Remacle J., Ribeiro C., Romanya J., Thierry J. M. 2006. A climate response function explaining most of the variation of the forest floor needle mass and the needle decomposition in pine forests across Europe. *Plant and Soil* 285 (1-2): 97-114.
- Laiho R., Laine J. 1997. Tree stand biomass and carbon content in an age sequence of drained pine mires in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 93: 161-169.
- Lammlom S. H., Savidge R. A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25: 381-388.
- Linder S. 1995. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletin* 44: 178-190.
- Masera O. R., Garza-Caligaris J. F., Kanninen M., Karjalainen T., Liski J., Nabuurs G. J., Pussinen A., de Jong B. H. J., Mohren G. M. J. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 164 (2-3): 177-199.
- Nabuurs G. J., Mohren G. M. J. 1995. Modeling analysis of potential carbon sequestration in selected forest types. *Canadian Journal of Forest Research* 25 (7): 1157-1172.
- Nabuurs G. J., Paibinen R., Sikkema R., Mohren G. M. J. 1997. The role of European forests in the global carbon cycle – a review. *Biomass and Bioenergy* 13 (6): 345-358.
- Nilsson M. C., Wardle D. A., Dahlberg A. 1999. Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos* 86 (1): 16-26.
- Oleksyn J., Żytkowiak R., Karolewski P., Reich P. B., Tjoelker M. G. 2000a. Genetic and environmental control of seasonal carbohydrate dynamics in trees of diverse *Pinus sylvestris* populations. *Tree Physiology* 20: 837-847.
- Oleksyn J., Żytkowiak R., Reich P. B., Tjoelker M. G., Karolewski P. 2000b. Ontogenetic pattern of leaf CO₂ exchange, morphology and chemistry in *Betula pendula* trees. *Trees* 14: 271-281.

- Orzel S., Socha J., Forgiel M., Ochał W. 2005. Biomasa i roczna produkcja drzewostanów mieszanych Puszczy Niepołomickiej. *Acta Scientiarum Polonorum, Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 4 (2): 63-79.
- Pacala S. W., Hurtt G. C., Baker D., Peylin P., Houghton R. A., Birdsey R. A., Heath L., Sunquist E. T., Stallard R. F., Ciais P., Moorcroft P., Caspersen J. P., Shevliakova E., Moore B., Kohlmaier G., Holland E., Gloor M., Harmon M. E., Fan S. M., Sarmiento J. L., Goodale C. L., Schimel D., Field C. B. 2001. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science* 292: 2316-2320.
- Prescott C. E., Vesterdal L., Pratt J., Venner K. H., de Montigny L. M., Trofymow J. A. 2000. Nutrient concentrations and nitrogen mineralization in forest floors of single species conifer plantations in coastal British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 30 (9): 1341-1352.
- Skorupski M., Jagodziński A. M., Żytkowiak R., Karolewski P. 2012. Differences in chemical composition of needle and leaf litter from exotic and native tree species stands. *Dendrobiology* 68: 101-112.
- Snedecor G. W., Cochran W. G. 1976. *Statistical methods*. Ames, Iowa, USA. The Iowa State University Press.
- State of the World's Forests 2011. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Szymański S. 2000. *Ekologiczne podstawy hodowli lasu*. PWRiL, Warszawa.
- Thomas S. C., Malczewski G. 2007. Wood carbon content of tree species in Eastern China: interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environment Management* 85: 659-662.
- Trocha L. K., Mucha J., Eissenstat D. M., Reich P. B., Oleksyn J. 2010. Ectomycorrhizal identity determines respiration and concentrations of nitrogen and non-structural carbohydrates in root tips: a test using *Pinus sylvestris* and *Quercus robur* saplings. *Tree Physiology* 30: 648-654.
- Tuomi M., Thum T., Järvinen H., Fronzek S., Berg B., Harmon M., Trofymow J. A., Sevanto S., Liski J. 2009. Leaf litter decomposition – Estimated of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling* 220: 3362-3371.
- Whittaker R. H., Likens G. E. 1973. Carbon in the biota. W: Woodwell G. M., Pecan E. V. [red.]. *Carbon and the Biosphere*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington DC. 281-302.
- Woodbury P. B., Smith J. E., Heath L. S. 2007. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management* 241: 14-17.
- Zhang Q., Wang C., Wang X., Quan X. 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *Forest Ecology and Management* 258: 722-727.
- Zielony R. 1993. *Siedliskowe typy lasu*. W: Zielony R. [red.]. *Warunki przyrodnicze lasów doświadczalnych SGGW w Rogowie*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa. 89-108.

SUMMARY

Carbon concentration in the biomass of common species of understory shrubs

Carbon concentration of 50% in woody plant species biomass is widely accepted in carbon storage modeling. However, this estimate is based on very limited experimental data. In the literature, global approximations of carbon storage in forest stands are estimated based on 50% carbon concentration in a dry biomass, but some original studies have proved that the carbon concentration in woody species biomass is not a stable value. Thus, the main goal of this study was to determine carbon concentration in biomass of 7 understory shrub species: *Corylus avellana*, *Prunus padus*, *P. serotina*, *Frangula alnus*, *Sambucus nigra*, *Cornus sanguinea* and *Sorbus aucuparia*, in order to analyze variability of carbon concentration among these species and their biomass components. Carbon concentrations were analyzed for leaves, fruits, branches, stemwood, stem-bark, coarse roots and fine roots. The study was carried out in forest stands of the WULS-SGGW Forest Experimental Station in Rogów (central Poland).

The mean carbon concentration in biomass of all species studied was 47.7%. There were statistically significant differences in carbon concentration among the shrub species in all biomass components. The mean carbon concentration in biomass of the particular shrub species was as follows: *Prunus serotina* – 47.5%, *P. padus* – 47.6%, *Frangula alnus* – 47.7%, *Sambucus nigra* – 47.7%, *Corylus avellana* – 47.8%, *Cornus sanguinea* – 47.8% and *Sorbus aucuparia* – 47.8%.

The mean carbon concentration in fruit biomass was 46.2%, in fine roots – 47.0%, in leaves – 47.2%, in coarse roots – 47.7%, in branches – 47.9%, in stemwood – 48.5% and in stembark – 48.6%. The carbon concentration in all samples ranged from 41.0 to 52.7%. The variability of carbon concentration in biomass of woody species should be considered in carbon storage modeling in forest ecosystems.