

**RAFAŁ WOJTAN, ROBERT TOMUSIAK, MICHAŁ ZASADA, ALBERT DUDEK,
KAZIMIERZ MICHALAK, LECH WRÓBLEWSKI, SZYMON BIJAK, KAROL BRONISZ**

Współczynniki przeliczeniowe suchej biomasy drzew i ich części dla sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) w zachodniej Polsce

Trees and their components biomass expansion factors for Scots pine
(*Pinus sylvestris* L.) of western Poland

ABSTRACT

Wojtan R., Tomusiak R., Zasada M., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L., Bijak Sz., Bronisz K. 2011. Współczynniki przeliczeniowe suchej biomasy drzew i ich części dla sosny pospolitej (*Pinus sylvestris* L.) w zachodniej Polsce. Sylwan 155 (4): 236-243.

Paper presents trees and their components biomass expansion factors for Scots pine growing in the Lubuskie Forest (western Poland). Elaborated formulae enable to determine aboveground biomass of Scots pine trees and stands basing on stem or merchantable wood volume.

KEY WORDS

biomass expansion factors, Scots pine, Lubuskie Forest, Poland

ADDRESSES

Rafał Wojtan – e-mail: rafal.wojtan@wl.sggw.pl

Robert Tomusiak, Michał Zasada, Albert Dudek, Kazimierz Michalak, Lech Wróblewski, Szymon Bijak, Karol Bronisz

Samodzielny Zakład Dendrometrii i Nauki o Produkcji Lasu; Wydział Leśny; SGGW;
ul. Nowoursynowska 159 bud. 34; 02-776 Warszawa

Wstęp

Obserwowane zmiany klimatu skłaniają do poszukiwania potencjalnych przyczyn ich powstania. Za jeden z ważniejszych czynników, który może przyspieszać ocieplenie klimatu, uważa się wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Możliwości sterowania stężeniem tego gazu w powietrzu upatruje się w ograniczaniu jego emisji i zwiększaniu akumulacji pod postacią biomasy. Spośród ekosystemów lądowych potencjalnie największe możliwości pochłaniania CO₂ posiadają lasy. Dotychczas dokładnie nie określono jak duże ilości węgla akumulują lasy różnych stref klimatycznych. W tym kontekście ważnym zagadnieniem badawczym staje się opracowanie metod służących rozwiązaniu tego problemu oraz określenie wielkości i dynamiki akumulacji biomasy w ekosystemach leśnych. Podejmowane dotychczas analizy dotyczą wybranych obszarów i stopniowo poszerzają zasób informacji z tej dziedziny [Detwiler, Hall 1988; Cost i in. 1990; Birdsey 1992; Alexeyev, Birdsey 1998; Brown i in. 1999]. W Polsce badania nad akumulacją biomasy były dotychczas prowadzone w stosunkowo niewielkim zakresie [Lemke 1973, 1975a, b, 1978, 1983; Oleksyn i in. 1999; Socha, Wężyk 2004, 2007; Orzeł i in. 2005; Bijak, Zasada 2007; Zasada i in. 2008, 2009; Bronisz i in. 2009]. Poznanie dynamiki akumulacji biomasy może przyczynić się do opracowania modelu gospodarki leśnej, w której maksymalizowany jest poziom akumulacji dwutlenku węgla.

Dominującym gatunkiem drzewa w lasach naszego kraju jest sosna pospolita. W ujęciu powierzchniowym jej drzewostany stanowią 60,4% lasów Polski [Raport ... 2010]. Ocena poziomu akumulacji węgla powinna więc w pierwszej kolejności dotyczyć drzewostanów tego gatunku. Celem badań było opracowanie współczynników przeliczeniowych, które mogą posłużyć do określania biomasy nadziemnej części drzew na podstawie informacji o miąższości strzały lub grubizny.

Material badawczy

W niniejszym opracowaniu wykorzystano dane pochodzące z powierzchni próbnych założonych w drzewostanach sosnowych na terenie nadleśnictw Lubsko i Gubin, znajdujących się na terenie administrowanym przez Regionalną Dyрекcję Lasów Państwowych w Zielonej Górze. Do przeprowadzenia pomiarów wybrano 18 drzewostanów reprezentujących trzy typy siedliskowe lasu, na których najczęściej występuje sosna (bór suchy, bór świeży, bór mieszany świeży). Dla każdego typu siedliskowego lasu wybrano po dwa drzewostany reprezentujące trzy zakresy wieku: do 40 lat, od 40 do 80 lat oraz powyżej 80 lat. W drzewostanach tych wytypowano po 5 drzew z całego zakresu zmienności pierśnic, na których po ścięciu przeprowadzono pomiary biomasy różnych komponentów. W efekcie ścięto 90 drzew, na których zmierzono sposobem sekcijnym miąższości strzał oraz określono masy strzał i gałęzi. Pomiar masy gałęzi przeprowadzono w rozbiciu na trzy frakcje: gałęzie suche, żywe i uigłone. Z każdego drzewa pobrano próbki drewna, kory i poszczególnych komponentów korony, na których w laboratorium Instytutu Technologii Drewna w Poznaniu określono ich gęstość i suchą masę. Dane te wykorzystano do określenia suchej masy drzew i ich części.

Metodyka

Metody służące do określania biomasy drzew i drzewostanów można zaklasyfikować do dwóch grup. Pierwsza z nich bazuje na tworzeniu i wykorzystaniu wzorów allometrycznych, które pozwalają określić biomasę na podstawie wartości łatwych do pomierzenia cech biometrycznych, jak pierśnica lub wysokość [Parresol 1999; Zasada i in. 2008]. Drugi sposób bazuje na możliwości wykorzystania informacji o miąższości do uzyskania informacji o biomacie drzew. W tym celu stosuje się współczynniki przeliczeniowe biomasy (Biomass Expansion Factor – BEF). Są one obliczane jako iloraz biomasy drzewa lub jego części do miąższości drewna użytkowego lub zapasu rosnącego [Cost i in. 1990; Brown 1997, 2002; Alexeyev, Birdsey 1998; Lehtonen i in. 2004; Jalkanen i in. 2005, Vande Walle i in. 2005; Vallet i in. 2006]. W niniejszym opracowaniu wykorzystano drugi z wymienionych sposobów. Podjęto próbę opracowania współczynników przeliczeniowych biomasy nadziemnej części drzew i ich części. Współczynniki takie umożliwiają określenie biomasy drzew, drzewostanów lub większych kompleksów leśnych, a na tej podstawie pozwalają na oszacowanie akumulacji węgla przez te obiekty. Źródłem danych do takich analiz mogą być wyniki pomiarów miąższości, dane z okresowej inwentaryzacji zapasu, rezultaty wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu lub bazy Systemu Informatycznego Lasów Państwowych.

Zgodnie z przedstawionym założeniem, biomasę drzewa lub jego komponentów można obliczyć wzorem:

$$M = BEF \cdot V \quad [1]$$

gdzie:

M – biomasa,

BEF – współczynnik przeliczeniowy biomasy,

V – miąższość drzewostanu.

Ponieważ BEF ze wzoru [1] można obliczyć jako iloraz masy drzew próbnych do ich miąższości, to może on przyjąć postać przedstawioną we wzorze [2]:

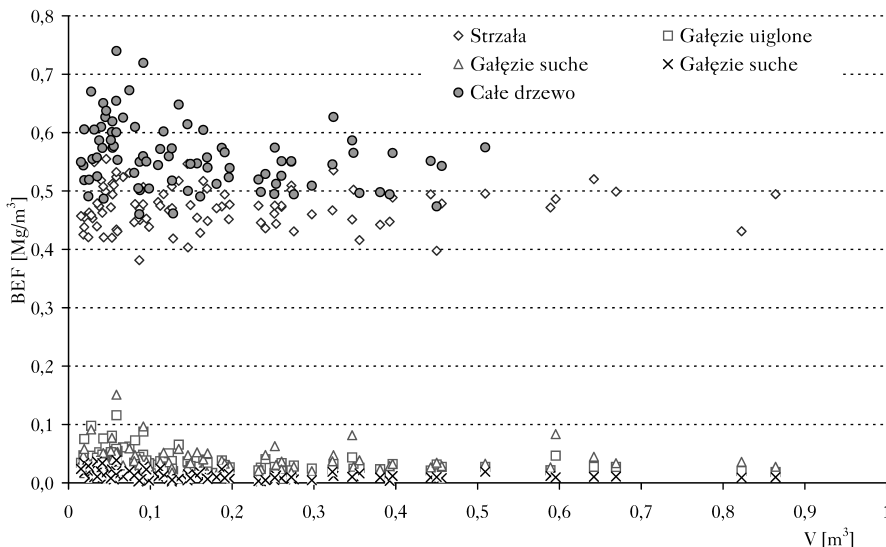
$$M = \frac{\sum m_i}{\sum v_i} \cdot V = \frac{\bar{m}}{\bar{v}} \cdot V \quad [2]$$

gdzie:

- m_i – biomasa drzew próbnych,
- v_i – miąższość drzew próbnych,
- \bar{m} – średnia biomasa drzew próbnych,
- \bar{v} – średnia miąższość drzew próbnych.

Zgodnie ze wzorem [2] współczynnik przeliczeniowy biomasy jest ilorazem biomasy i miąższości. Wynika stąd, że biomasa jest określana w sposób pośredni na podstawie informacji o miąższości. Współczynnik ten jest więc estymatorem ilorazowym parametru, jakim jest biomasa drzewa. Ważną właściwością takich estymatorów jest to, że są one nieobciążone [Cochran 1977; Salas, Gregoire 2010]. Efektywność estymatora, czyli przeciętna zmienność wyników estymacji, zależy będzie od efektywności metody użytej do określania miąższości analizowanego obiektu. A zatem przy zastosowaniu współczynników przeliczeniowych dokładność określenia biomasy zależy przede wszystkim od dokładności metody wykorzystywanej do określenia miąższości.

W poniższym opracowaniu rozważania dotyczyły biomasy całego drzewa oraz poszczególnych części, którymi były strzała oraz uigłone, żywe i suche gałęzie. Ponieważ relacja między wartością współczynników przeliczeniowych biomasy strzały i miąższością strzały praktycznie nie występuje (ryc. 1), to współczynniki te przyjmowałyby stałą wartość niezależnie od miąższości drzew. Wartość BEF można więc obliczyć wykorzystując relację wynikającą z wzoru [1], stosując regresję liniową dla zależności między biomasa a miąższością, której model opisany jest wzorem:



Ryc. 1.

Zależność współczynników przeliczeniowych biomasy od miąższości strzały
Dependence of biomass expansion factors on stem volume

$$M = a \cdot V \quad [3]$$

Obliczony współczynnik a będzie tożsamy z BEF. Taka postać równania pozwala na uwzględnienie relacji logicznej, która polega na tym, że tylko drzewa wykazujące miąższość mają biomasę. Obliczenia wartości współczynników przeliczeniowych przeprowadzono metodą równań pozornie niezależnych (Seemingly Unrelated Equations – SUR) [Zellner 1962]. Pozwala to na uzyskanie spójnego zestawu współczynników, w którym suma biomasy poszczególnych komponentów drzewa będzie równa biomase całego drzewa.

Analiza zależności współczynników przeliczeniowych biomasy drzewa i jego komponentów od miąższości grubizny (ryc. 2) wykazała, że najlepsze dopasowanie, zwłaszcza dla biomasy strzały i całego drzewa, można uzyskać wykorzystując funkcję o równaniu:

$$BEF = a + b/Vg \quad [4]$$

gdzie:

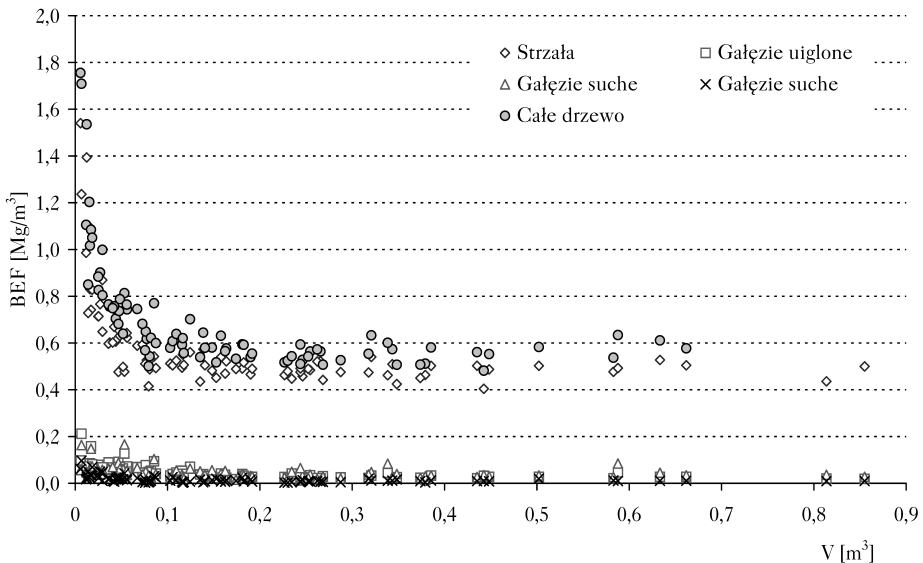
Vg – miąższość grubizny drzewa,
 a, b – współczynniki równania.

Po podstawieniu równania [4] do wzoru [1] otrzymamy zależność przedstawioną równaniem:

$$M = a \cdot Vg + b \quad [5]$$

Również w przypadku równania [5] obliczenie jego współczynników przeprowadzono metodą równań pozornie niezależnych.

Dla każdego z opracowanych równań przeprowadzono ocenę dopasowania do danych empirycznych przez określenie wartości współczynnika determinacji i ocenę jego istotności. Zbadano również istotność błędów procentowych wtórnych, w celu sprawdzenia czy opracowane równania nie dają błędów systematycznych.



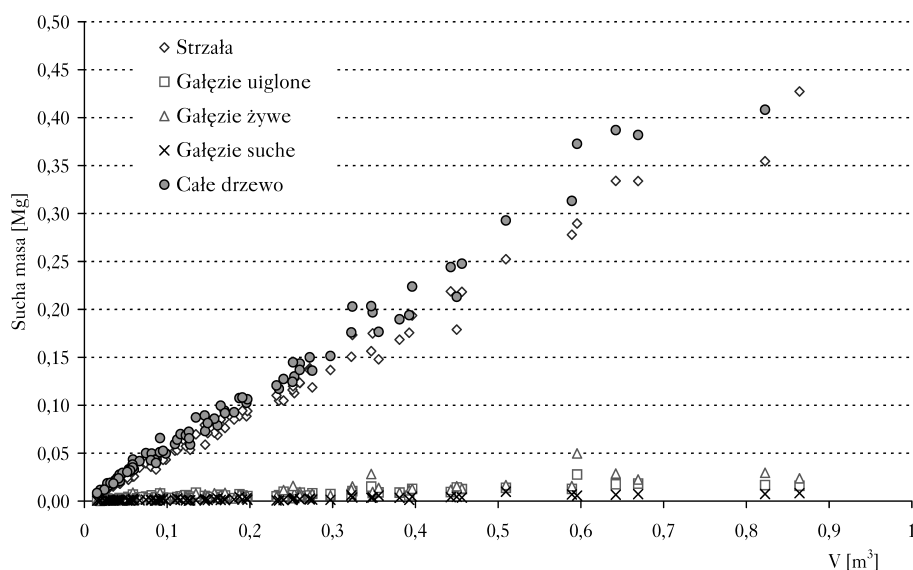
Ryc. 2.

Zależność współczynników przeliczeniowych biomasy od miąższości grubizny strzały
 Dependence of biomass expansion factors on stem merchantable wood volume

Wyniki

Analiza zależności biomasy drzew i poszczególnych ich komponentów od miąższości strzały (ryc. 3) pozwoliły określić wartość poszczególnych współczynników, które prezentuje tabela 1. Zestawiono w niej również wartości współczynników determinacji (r^2) dla każdego ze wzorów. We wszystkich przypadkach obliczone współczynniki są istotne statystycznie. Wartość współczynników opisujących zależności biomasy drzew i ich komponentów od miąższości grubizny (ryc. 4) oraz współczynników determinacji prezentuje tabela 2. Także i w tym przypadku wszystkie wartości są istotne statystycznie.

Opracowane współczynniki przeliczeniowe poddano ocenie, w ramach której przeprowadzono analizę statystyczną błędów procentowych wtórnych w rozbiciu na poszczególne analizowane komponenty (tab. 3, 4). W większości przypadków BEF opracowane dla komponentów korony mogą dawać błędy systematyczne, natomiast wzory na biomasę strzał i całych drzew takich błędów nie będą dawały. Uzyskane BEF są najmniej dokładne dla wyróżnionych w pracy komponentów korony, czyli dla uigłonych, żywych i suchych gałęzi. Jednakże ich udział



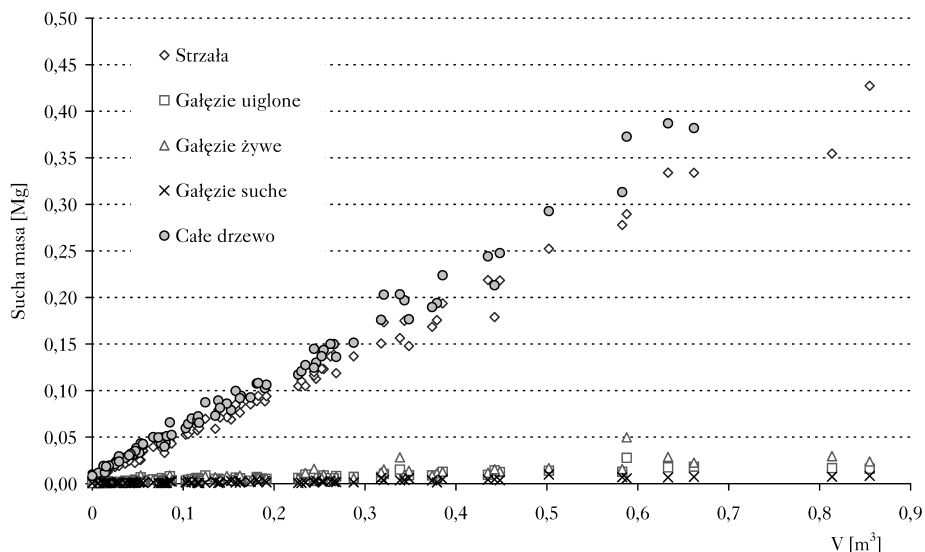
Ryc. 3.

Zależność biomasy drzew i ich części od miąższości strzały
Dependence of biomass on stem volume

Tabela 1.

Współczynniki przeliczeniowe biomasy dla drzew i ich komponentów na podstawie miąższości strzały
Biomass expansion factors for trees and their components based on stem volume

Komponent	Współczynnik [Mg/m^3]	r^2
Sucha masa strzały	0,474149	0,9953
Sucha masa uigłonych gałęzi	0,026811	0,8959
Sucha masa żywych gałęzi	0,036041	0,8326
Sucha masa suchych gałęzi	0,010253	0,8802
Sucha masa całego drzewa	0,547253	0,9940



Ryc. 4.

Zależność biomasy drzew i ich części od miąższości grubizny strzały
Dependence of biomass on stem merchantable wood volume

Tabela 2.

Współczynniki równań dla biomasy drzew i ich komponentów na podstawie miąższości grubizny strzały
Biomass expansion factors for trees and their components based on stem merchantable wood volume

Komponent	Współczynnik a	Współczynnik b	r ²
Sucha masa strzały	0,472105	0,004547	0,9899
Sucha masa ugiłonych gałęzi	0,022839	0,001646	0,7842
Sucha masa żywych gałęzi	0,036835	–	0,8324
Sucha masa suchych gałęzi	0,010468	–	0,8781
Sucha masa całego drzewa	0,540708	0,006759	0,9874

Tabela 3.

Błędy procentowe wtórne współczynników przeliczeniowych biomasy opartych na miąższości strzały
Relative errors of BEFs based on stem volume

Komponent	Średnia	Odczylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Sucha masa strzały	1,00%	7,79%	-14,54%	24,31%
Sucha masa ugiłonych gałęzi	-14,87%*	33,14%	-76,86%	82,88%
Sucha masa żywych gałęzi	21,83%*	55,73%	-76,14%	199,11%
Sucha masa suchych gałęzi	16,49%	85,38%	-73,60%	350,79%
Sucha masa całego drzewa	-1,42%	9,23%	-26,03%	18,89%

* wartości, które różnią się istotnie statystycznie od zera; values significantly different from zero

w całkowitej suchej biomacie drzewa jest niewielki, przez co nie wpływają one w znaczący sposób na dokładność określenia biomasy całego drzewa. Niewielkie błędy średnie uzyskano niezależnie od wariantu dla współczynników służących do określania biomasy strzał i całych drzew. Podjęto zatem próbę znalezienia równań, które pozwalałyby dokładniej określać biomasę elementów korony. Dla żadnej z analizowanych funkcji nie uzyskano znaczącej poprawy dokładności

Tabela 4.

Błędy procentowe wtórne współczynników przeliczeniowych biomasy opracowanych na podstawie miąższości grubizny strzały

Relative errors of BEFs based on stem merchantable wood volume

Komponent	Średnia	Odchylenie standardowe	Minimum	Maksimum
Sucha masa strzały	-2,10%	11,81%	-41,06%	27,50%
Sucha masa uigłonych gałęzi	21,36%*	60,68%	-57,83%	279,92%
Sucha masa żywych gałęzi	15,46%*	54,41%	-75,07%	199,60%
Sucha masa suchych gałęzi	29,45%*	90,72%	-64,89%	416,56%
Sucha masa całego drzewa	-1,64%	10,51%	-31,49%	24,90%

* wartości, które różnią się istotnie statystycznie od zera; values significantly different from zero

uzyskiwanych wyników, dlatego zdecydowano się zastosować wyrównanie liniowe z zastrzeżeniem, że opracowane wzory nie powinny być wykorzystywane do określania biomasy gałęzi u drzew o miąższości mniejszej niż 0,1 m³.

Podsumowanie

Opracowane współczynniki przeliczeniowe można wykorzystać do określenia biomasy drzew i ich komponentów. Konieczne jest do tego określenie miąższości drzewostanów. Informacje te mogą pochodzić nie tylko z bezpośredniego pomiaru, ale również z innych źródeł, np. z inwentaryzacji okresowej czy wielkoobszarowej inwentaryzacji lasu. Współczynniki przeliczeniowe biomasy obliczone na podstawie miąższości grubizny drzew pozwalają na wykorzystanie danych gromadzonych w bazach Lasów Państwowych. Wbudowanie opracowanych wzorów w podsystemy SILP pozwoliłoby na uzyskiwanie informacji o biomase pozyskanego drewna sosnowego. Dane te umożliwiłyby określenie wielkości zasobów zakumulowanego węgla.

Opracowane wzory pozwalają na określenie biomasy nadziemnej części drzewa lub strzały bez błędów systematycznych. Wzory określające biomasę elementów korony nie pozwalają na otrzymanie wartości nieobciążonej dla osobników o małych wymiarach, a więc nie powinny być stosowane dla młodych drzew.

Sosna pospolita jest dominującym gatunkiem drzew w naszych lasach, jednak nie jedynym. By uzyskać wiarygodne informacje o biomase i akumulacji węgla w drzewostanach lasów Polski, konieczne są dalsze badania w nad opracowaniem współczynników przeliczeniowych biomasy dla innych gatunków drzew oraz dla innych regionów kraju.

Literatura

- Alexeyev V. A., Birdsey R. A. 1998. Carbon storage in forests and peatlands of Russia. Gen. Tech. Rep. NE-244. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Bijak Sz., Zasada M. 2007. Oszacowanie biomasy korzeni w drzewostanach sosnowych Borów Lubuskich. Sylwan 152 (12): 21-29.
- Birdsey R. A. 1992. Carbon Storage and Accumulation in United States Forest Ecosystems. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. WO-59.
- Bronisz K., Bronisz A., Zasada M., Bijak Sz., Wojtan R., Tomusiak R., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L. 2009. Biomasa aparatu asymilacyjnego w drzewostanach sosnowych zachodniej Polski. Sylwan, 153 (11): 758-767.
- Brown S. L. 1997. Estimating biomass and biomass change in tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Brown S. L. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges, Environment Pollution 116: 363-372.
- Brown S. L., Schroeder P., Kern J. S. 1999. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. Forest Ecology and Management 123: 81-90.
- Cochran W. 1977. Sampling Techniques. John Wiley and sons.

- Cost N. D., Howard J. O., Mead B., McWilliams W. H., Smith W. B., van Hooser D. D., Wharton E. H. 1990. The Forest Biomass Resource of the United States. USDA Forest Service. General Research Paper WO-57.
- Detwiler R. P., Hall C. A. S. 1988. Tropical forests and the global carbon cycle. *Science* 239: 42-47.
- Jalkanen A., Mäkipää R., Ståhl G., Lehtonen A., Petersson H. 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. *Annals of Forest Science* 62: 845-851.
- Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 211-224.
- Lemke J. 1973. Charakterystyka ilościowa igliwia i ulistnionych gałązek w młodszych drzewostanach sosnowych. *Folia Forestalia Polonica*, ser. A 21: 173-191.
- Lemke J. 1975a. Miąższość gałęzi drzew w drzewostanach sosnowych. *PTPN*. 40: 29-36.
- Lemke J. 1975b. Szacowanie ciężaru świeżego igliwia sosny zwyczajnej. *Sylwan* 119 (6): 37-44.
- Lemke J. 1978. Charakterystyka ilościowa igliwia i ulistnionych gałązek w starszych drzewostanach sosnowych. *Folia Forestalia Polonica*, ser. A 23: 53-66.
- Lemke J. 1983. Tabele do szacowania ciężaru igliwia i uigłonych gałązek sosny zwyczajnej. *Sylwan* 127 (2): 21-30.
- Oleksyn J., Reich P. B., Chalupka W., Tjoelker M. G. 1999. Differential Above- and Below-ground Biomass Accumulation of European *Pinus sylvestris* Populations in a 12-year-old Provenance Experiment. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 7-17.
- Orzel S., Socha J., Forgiel M., Ochał W. 2005. Biomass of underbrush and conditions for its occurrence in stands of the Niepolomice Forest. *EJPAU, Forestry*, 8 (1).
- Parresol B. R. 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and, Critical Comparisons. *Forest Science* 45 (4): 573-593.
- Raport o stanie lasów w Polsce. 2010. Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe, Warszawa.
- Salas C., Gregoire T. 2010. Statistical analysis of ratio estimators and their estimators of variances when the auxiliary variate is measured with error. *European Journal of Forest Research* 129: 847-861
- Socha J., Weżyk P. 2004. Empirical formulae to assess the biomass of the above-ground part of pine trees. *EJPAU, Forestry* 7 (2).
- Socha J., Weżyk P. 2007. Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. *European Journal of Forest Research* 126: 263-270.
- Vallet P., Dhôte J.-F., le Moguédec G., Ravart M., Pignard G. 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management* 229: 98-110.
- Vande Walle I., van Camp N., Perrin D., Lemeur R., Verheyen K., van Wesemael B., Laitat E. 2005. Growing stock-based assessment of the carbon stock in the Belgian forest biomass. *Annals of Forest Science* 62: 853-864.
- Zasada M., Bronisz K., Bijak Sz., Dudek A., Bruchwald A., Wojtan R., Tomusiak R., Bronisz A., Wróblewski L., Michalak K. 2009. Effect of the cutting age and thinning intensity on biomass and carbon sequestration – the Gubin Forest District case study. *Folia Forestalia Polonica*, ser. A, 51 (2): 18-24.
- Zasada M., Bronisz K., Bijak Sz., Wojtan R., Tomasiak R., Dudek A., Michalak K., Wróblewski L. 2008. Wzory empiryczne do określania suchej biomasy nadziemnych części drzew i ich komponentów. *Sylwan* 152 (3): 27-39.
- Zellner A. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association*. 57: 348-368.

SUMMARY

Trees and their components biomass expansion factors for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of western Poland

Paper presents elaboration of biomass expansion factors for trees and their components. Empirical material originated from Scots pine stands of Gubin and Lubsko forest districts (western Poland). All together we used 90 sample trees, for which we determined volume and biomass of stem, different types of branches and the tree as a whole.

We elaborated biomass expansion factors that enable determination of aboveground biomass of the whole tree or its components basing on the stem or merchantable wood volume. Obtained formulae can be applied in State Forest Information System to process results of forest inventory in order to get information about biomass and sequestered carbon stocks.