



Andrzej M. Jagodziński, Grzegorz Rączka, Paweł Strzeliński, Andrzej Węgiel

SYMULACJA TEMPA AKUMULACJI WĘGLA NA GRUNTACH PRZEZNACZONYCH DO ZALESIENIA W „POWIATOWYM PROGRAMIE ZWIĘKSZENIA LESISTOŚCI MIASTA WROCŁAWIA”

**Simulation of carbon accumulation rate on areas intended
for afforestation in the „Programme for the Augmentation
of Forest Cover in the City of Wrocław”**

Abstract

„The District Programme for the Augmentation of Forest Cover in the City of Wrocław” was drawn up in 2006 as the first regional planning study of its kind in the entire south-western Poland. Current woodiness of Wrocław District is 7.7 %. For the years 2006-2028 over 600 hectares have been planned for afforestation, thus raising woodiness of the region to 11.6 %. For the areas to be afforested a classification of forest habitats was made, species composition was designed and a provisional implementation schedule was developed. The data regarding the areas to be afforested in „The District Programme ...” served as a basis for simulation of carbon accumulation in afforested areas in the perspective of 200 years. The simulation was based on expected forest stand growth on former fields as well as on literature data regarding the rate of carbon accumulation by various tree species.

KEY WORDS: afforestation, city of Wrocław, urban forest, carbon accumulation

Wprowadzenie

Ekosystemy leśne pełnią szereg zróżnicowanych funkcji, dlatego też podjęcie decyzji o zalesieniu określonych obszarów może mieć różne podłoża. Mogą to być zarówno przesłanki ekonomiczne jak również środowiskotwórcze czy społeczne. Jednym z powodów zalesiania gruntów rolnych w przyszłości może być zamiar włączenia ich do systemu raportowania pochłaniania dwutlenku węgla przez ekosystemy leśne (np.: Schaldach i Alcamo 2007, Smith et al. 2000). Jednak, mając na uwadze fakt, że bilans pochłaniania dwutlenku węgla nie zawsze musi być dodatni, warto rozważyć, przynajmniej teoretycznie, różne konsekwencje decyzji o zalesieniu określonych obszarów.

Funkcje pełnione przez lasy występujące na obszarach aglomeracji miejskich są inne niż na terenach, na których prowadzona jest typowa gospodarka leśna. Są to przede wszystkim funkcje: wypoczynkowo-rekreacyjne, ochronne oraz architektoniczno-ozdobne. W przypadku dużych aglomeracji lasy pełnią także funkcje tzw. zieleni wysokiej – oddzielające i osłaniające osiedla mieszkaniowe od obszarów przemysłowych (Carreiro et al. 2008). Istotną rolę zadrzewień i lasów miejskich w redukcji emisji zanieczyszczeń trudno kwestionować (np.: Jim i Chen *w druku*, Nowak et al. 2006, Scott et al. 1998), przy czym szczególne znaczenie przypisuje się zadrzewieniom i lasom miejskim jako ważnemu ogniwu w procesie sekwestracji węgla (Brack 2002, Nowak i Crane 2002, McPherson 1998). Dlatego też na zalesianie gruntów rolnych, leżących w granicach dużych miast, warto spojrzeć także od strony potencjalnych korzyści (w tym finansowych), jakie mogą one dać w przypadku włączenia ich do systemu raportowania pochłaniania CO₂, zgodnie z wymaganiami Protokołu z Kyoto.

Celem niniejszej pracy było prześledzenie tempa akumulacji węgla w dwustuletnim okresie przez drzewostany powstałe w wyniku zalesienia konkretnych gruntów. Jako obiekt symulacji wykorzystano grunty wytypowane do zalesienia w „Powiatowym programie zwiększenia lesistości Miasta Wrocławia” (2006).

Program ten jest wyrazem zapotrzebowania jednego z większych miast w Polsce – Wrocławia, na stworzenie dokumentacji planistyczno-urbanistycznej, w powiązaniu z techniczno-leśnymi uwarunkowaniami wykonania zalesień. Jednocześnie jest pierwszym tego typu regionalnym opracowaniem planistycznym na obszarze południowo-zachodniej Polski, nawiązującym do „Krajowego programu zwiększania lesistości” (Łonkiewicz 1995).

Łączna powierzchnia lasów na terenie Wrocławia wynosi 2286 ha, co daje lesistość na poziomie 7,7% (Program ochrony środowiska... 2004). Lesistość Wrocławia jest niższa od lesistości innych dużych miast Polski (Poznań – 27%, Olsztyn – 21%, Warszawa – 15%, Szczecin – 10%, Łódź – 8%), co daje 0,3 ara gruntów leśnych w przeliczeniu na 1 mieszkańca. Obszary leśne Wrocławia mają charakter rozdrobniony – składają się ze stosunkowo niewielkich kompleksów o powierzchni zwykle nie przekraczającej 100 ha.

Ogólna powierzchnia gruntów przeznaczonych do zalesienia w ramach „Powiatowego programu zwiększenia lesistości Miasta Wrocławia” wynosi 1106 ha. Zadania związane z realizacją programu mają być wykonywane w dwóch etapach: I etap do 2015 r. (486 ha – uwzględnia tereny przeznaczone do zalesień w uchwalonych miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego) i II etap do 2028 r. (620,41 ha – grunty zaproponowane do zalesienia przez w/w program). Wykonanie zadań przewidzianych w programie zwiększenia lesistości pozwoli na zwiększenie powierzchni leśnej do 3392 ha, co podniesie lesistość Miasta Wrocławia do 11,6%.

Material i metody

Jako podstawę przeprowadzonych symulacji wykorzystano grunty, które w „Powiatowym programie zwiększenia lesistości Miasta Wrocławia” (2006) zostały zaprojektowane do zalesień. Stanowiły one obszar o łącznej powierzchni 620,41 ha, dla którego wyróżniono cztery typy siedliskowe lasu (Tab. 1): las mieszany świeży, las mieszany wilgotny, las świeży i las wilgotny. Las mieszany świeży (LMśw) – obejmuje grunty średnio żyzne do żyznych, dominującym typem gleby są gleby rdzawe wytworzone z piasków gliniastych do glin lekkich, rzadziej gleby brunatne. Las mieszany wilgotny (LMw) – także obejmuje grunty średnio żyzne do żyznych, dominującym typem gleby są gleby brunatne, rzadziej rdzawe wytworzone z piasków gliniastych do glin lekkich. Las świeży (Lśw) – obejmuje grunty żyzne do bardzo żyznych, dominującymi typami gleb są gleby brunatne, głównie brunatne właściwe i mady rzeczne właściwe wytworzone przeważnie z utworów gliniastych do glin ciężkich. Las wilgotny (Lw) - obejmuje grunty żyzne do bardzo żyznych, dominującymi typami gleb są gleby brunatne, mady rzeczne i gleby opadowo-glejowe wytworzone z ciężkich utworów gliniastych i ilastych.

Tab. 1. Typy siedliskowe lasu określone w programie zwiększenia lesistości, ich powierzchnia oraz proponowane składy gatunkowe drzewostanów, bonitacja i wiek rębności.

Tab. 1. Area, proposed species composition, site index and cutting age by habitat forest types in the „Programme for the Augmentation of Forest Cover in the City of Wrocław”.

Typ siedliskowy lasu	Powierzchnia [ha]	Przyjęte składy gatunkowe drzewostanu	Bonitacja	Wiek rębności [lata]
LMśw – las mieszany świeży	187,89	dąb - 30%, brzoza - 20%, sosna - 20%, buk - 10%, klon - 10%, lipa - 10%	I	140
LMw – las mieszany wilgotny	54,82	olsza - 30%, dąb - 20%, brzoza - 20%, sosna - 10%, klon - 10%, lipa - 10%	I	100
Lśw – las świeży	174,69	dąb - 20%, grab - 20%, lipa - 20%, brzoza - 10%, buk - 10%, klon - 10%, wiąz - 10%	I	140
Lw – las wilgotny	203,01	dąb - 30%, jesion - 20%, klon - 20%, grab - 10%, lipa - 10%, wiąz - 10%	I	140

Dla poszczególnych typów siedliskowych lasu zaprojektowane zostały gatunki drzew (główne i domieszkowe), które miały być wykorzystane do zalesień. Stały się one podstawą do określenia konkretnych składów gatunkowych drzewostanów dla poszczególnych typów siedliskowych lasu. Przy ich określaniu ograniczono się jedynie do gatunków głównych, podając ich udział w zaokrągleniu do 10% (Tab. 1). Na siedlisku lasu mieszanego wilgotnego gatunkiem dominującym była olsza, dla której przyjęto wiek rębności 100 lat, a w pozostałych trzech typach siedliskowych lasu gatunkiem dominującym był dąb, dla którego przyjęto wiek rębności 140 lat.

Dla gatunków projektowanych do zalesień przyjęto bonitację I. W leśnictwie bonitacja określa zdolności produkcyjne siedliska i ustalana jest przy pomocy tablic, w oparciu o gatunek drzewa, jego wiek i wysokość (Instrukcja... 2003). Im bardziej żyzne siedlisko, tym większą wysokość uzyskują drzewa określonego gatunku w określonym wieku. Bonitacja I oznacza bardzo wysokie zdolności produkcyjne siedliska (wyższa jest tylko, w przypadku sosny, bonitacja Ia).

Dla potrzeb symulacji, wszystkim drzewostanom nadano wskaźnik zadrzewienia równy 1,0. W leśnictwie wskaźnik zadrzewienia wyrażony jest liczbą (najczęściej ułamkową) określającą stosunek miąższości drzewostanu rzeczywistego do miąższości drzewostanu tablicowego, tego samego gatunku, w tym samym wieku i o tej samej bonitacji (Instrukcja... 2003).

Przyjęta bonitacja I i wskaźnik zadrzewienia równy 1,0 to wartości charakterystyczne dla żywnych drzewostanów o wysokiej produktywności. W przypadku obszarów, dla których przeprowadzona została symulacja, wartości te określono na podstawie wskaźników uzyskiwanych przez analogiczne drzewostany w okolicznych lasach nadleśnictw: Miękinia, Oława, Oleśnica Śląska i Oborniki Śląskie, przy czym rzeczywiste parametry drzewostanów zalesianego obszaru prawdopodobnie byłyby jeszcze wyższe niż te przyjęte dla potrzeb symulacji.

Istotą symulacji było określanie miąższości poszczególnych gatunków drzew we wszystkich drzewostanach powstałych w wyniku zalesień, dla kolejnych okresów 10-letnich. Miąższość ta była określana na podstawie tablic zasobności drzewostanów Szymkiewicza (2001) z uwzględnieniem gatunku drzewa, jego udziału, wieku, bonitacji i wskaźnika zadrzewienia. Suma miąższości poszczególnych gatunków stanowiła miąższość drzewostanu. Przyjęto, że dojrzałe drzewostany były użytkowane rębniami częściowymi z długim i bardzo długim okresem odnowienia (30-50 lat).

Suchą masę drewna określono na podstawie znajomości ciężaru właściwego drewna poszczególnych gatunków drzew (Kokociński 2004, Krzysik 1974, Elliott 1970) oraz miąższości drzewostanów w każdym z analizowanych okresów (Tab. 2). Przyjęto średnią zawartość węgla w suchej masie drewna równą 49% (Lamlom i Savidge 2003, Nikić 1966).

Tab. 2. Przyjęte ciężary właściwe drewna i przeliczniki masy węgla związanego w drewnie dla poszczególnych gatunków zaprojektowanych do zalesienia.

Tab. 2. Wood specific gravity and carbon content coefficients for woody species proposed for afforestation.

Rodzaj drzewa	Ciężar właściwy drewna [kg s.m./m ³]	Masa węgla związanego w drewnie [kg/m ³]
dąb	660	323
brzoza	610	299
sosna	480	235
buk	690	338
klon	620	304
lipa	490	240
olsza	490	240
grab	790	387
wiąz	640	314
jesion	750	368

W bilansie uwzględniono jedynie węgiel zakumulowany w drewnie drzew żywych. Nie uwzględniono natomiast drewna martwego, drewna pozyskanego i wywiezionego poza powierzchnię oraz obecności węgla w innych elementach składowych drzew i całych ekosystemów leśnych, takich jak: liście i igły drzew, korzenie, drzewa i krzewy podszytowe, rośliny runa, ściółka i gleba.

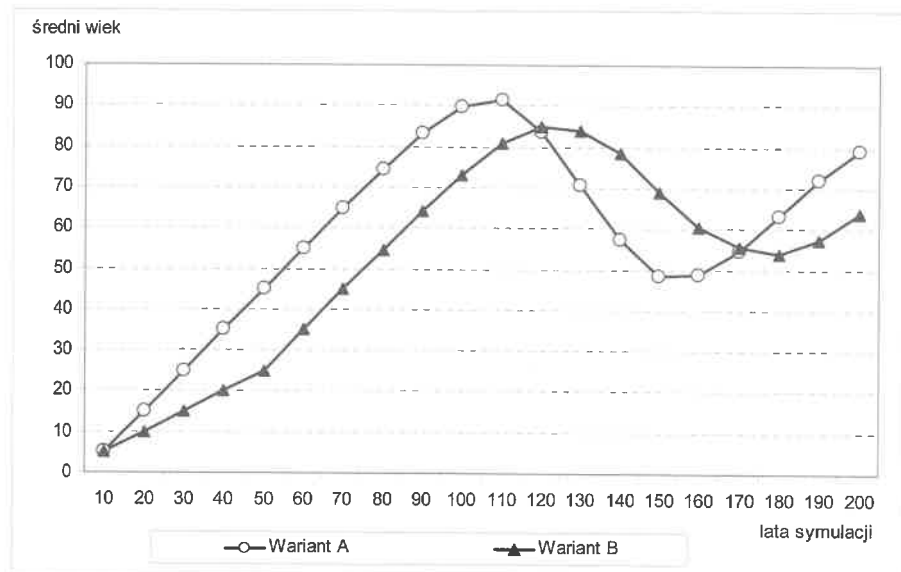
Zastosowano dwa warianty symulacji. W wariantcie A przyjęto, że całość prac zalesieniowych przeprowadzona została w okresie 10 lat, natomiast w wariantcie B założono, że prace zalesieniowe trwały 50 lat.

Wyniki

W efekcie przeprowadzonej symulacji uzyskano charakterystyki liczbowe drzewostanów dla dwudziestu kolejnych okresów 10-letnich, czyli łącznie dla 200 lat. Dla każdego okresu opisany został skład gatunkowy wszystkich drzewostanów, ich powierzchnia, miąższość poszczególnych gatunków drzew i masa węgla związanego w drewnie, przy zastosowaniu dwóch wariantów symulacji A i B.

Przy wariantcie symulacji A (zalesienie w okresie 10 lat) następował szybki wzrost średniego wieku drzewostanów do okresu rozpoczęcia intensywnego użytkowania, czyli do wieku 100 lat (Ryc. 1). Przy wariantcie symulacji B (zalesienie w okresie 50 lat), wzrost średniego wieku był nieco wolniejszy a jego kumulacja nastąpiła później, w wieku około 120 lat od założenia pierwszych zalesień. W obu wariantach po okresie inten-

sywnego wzrostu, następował spadek średniego wieku, spowodowany pojawieniem się odnowień w miejsce wyciętych drzewostanów, z tym że w wariantcie A proces ten miał bardziej intensywny przebieg. W dalszej kolejności następowała zmiana kierunku przebiegu krzywej związana z przejściem większości drzewostanów do starszych klas wieku i zakończeniem użytkowania najstarszych drzewostanów.

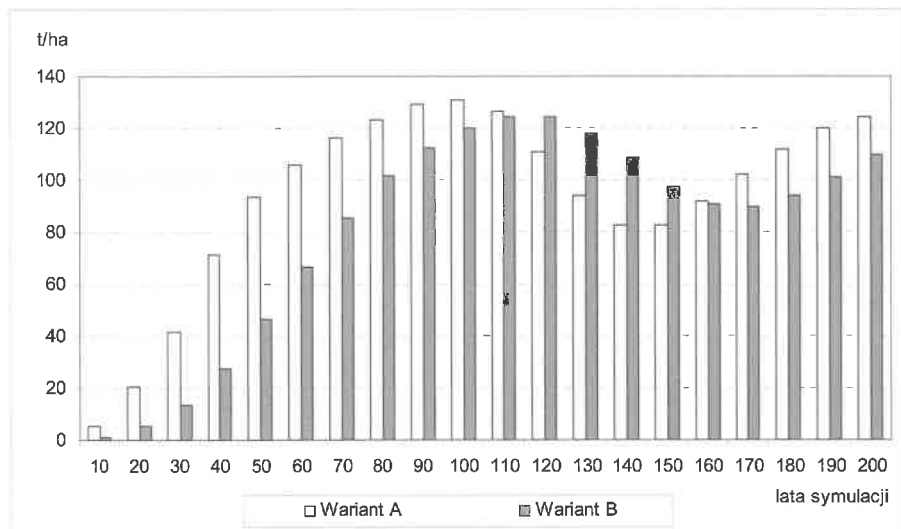


Ryc. 1. Zmiana średniego wieku drzewostanów w okresie 200 lat dla dwóch wariantów symulacji (A – 10-letni okres zalesienia, B – 50-letni okres zalesienia).

Fig. 1. Change of average stand age in the period of 200 years in two executions of simulation (A – 10-year afforestation regime, B – 50-year afforestation regime).

Analogicznie do przebiegu krzywej na wykresie średniego wieku przedstawiała się sytuacja na wykresie dotyczącym masy węgla związanego w drewnie drzewostanów, dla dwóch wariantów symulacji (Ryc. 2). W początkowym okresie, wraz ze wzrostem miąższości drzewostanów następował wzrost masy zakumulowanego węgla. Następnie, po rozpoczęciu użytkowania i odnawiania drzewostanów, występowały okresowe zmiany miąższości drzewostanów, a co za tym idzie zmiany masy węgla związanego w drewnie, przy czym dla wariantu A zmiany te były bardziej dynamiczne, niż dla wariantu B. Maksymalna masa związanego w drewnie węgla na powierzchni jednego hektara (średnio dla całego obszaru) w wariantcie A wynosiła około 130 ton (100 lat od momentu

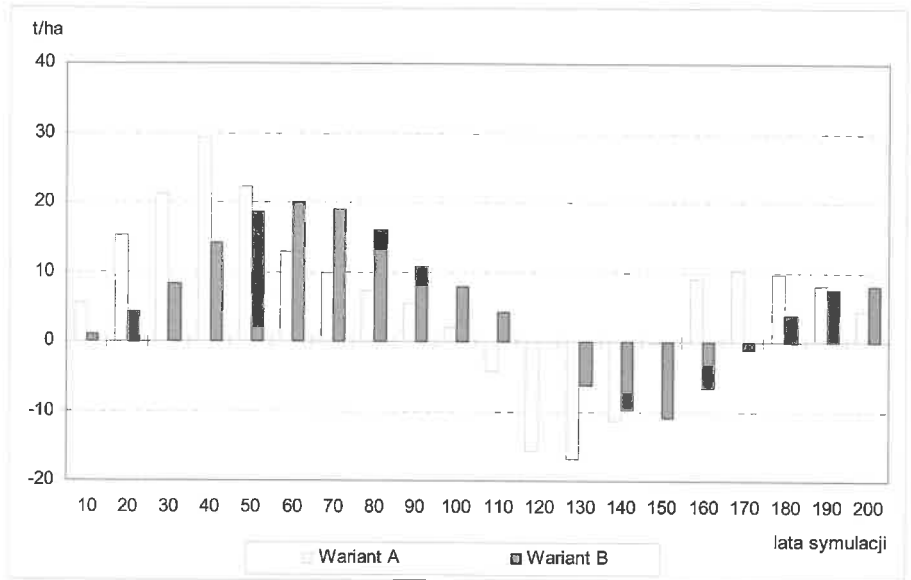
rozpoczęcia zalesień), a dla wariantu B wynosiła około 125 ton (120 lat od momentu rozpoczęcia zalesień).



Ryc. 2. Masy węgla (t/ha) związane w drewnie drzewostanów dla obszaru zalesień w okresie 200 lat dla dwóch wariantów symulacji.

Fig. 2. Carbon storage (t/ha) in stemwood of stands in the period of 200 years in two executions of simulation (A – 10-year afforestation regime, B – 50-year afforestation regime).

Określając zmiany mas związane w drewnie węgla pomiędzy kolejnymi 10-letnimi okresami symulacji (Ryc. 3) możemy oceniać jego bilans w analizowanych drzewostanach, dla dwóch wariantów symulacji. Uzyskane dane wskazują na wyraźnie następujące po sobie okresy, kiedy bilans był dodatni oraz kiedy był ujemny, przy czym w wariacie symulacji A, okresy te były krótsze, a różnice znacznie wyraźniejsze. W wariacie A największy przyrost masy węgla zakumulowanego w drewnie drzewostanów wystąpił po około 40 latach od chwili rozpoczęcia zalesień i wyniósł blisko 30 ton na hektar na 10 lat. W wariacie B maksymalny przyrost masy zakumulowanego węgla wystąpił około 60 lat od rozpoczęcia zalesień i wyniósł około 20 t/ha/10 lat. Największy spadek masy węgla w drewnie pomiędzy kolejnymi okresami nastąpił w wariacie A około 130 lat od rozpoczęcia zalesień i wyniósł około 18 t/ha/10 lat. Z kolei w wariacie B największy spadek masy węgla związane w drewnie nastąpił 150 lat od momentu rozpoczęcia zalesień i wyniósł około 10 t/ha/10 lat.



Ryc. 3. Akumulacja węgla (t/ha) w drewnie drzewostanów w kolejnych 10-letnich okresach dla dwóch wariantów symulacji.

Fig. 3. Carbon accumulation (t/ha) in stemwood of stands in consecutive 10-year periods in two executions of simulation (A – 10-year afforestation regime, B – 50-year afforestation regime).

Porównując kolejne 50-letnie okresy symulacji (Tab. 3), można stwierdzić, że największą zasobność miały drzewostany w okresie 51-100 w wariantcie A i w okresie 101-150 w wariantcie B. Podobnie było ze średnią masą węgla związanego w drewnie na powierzchni jednego hektara. Natomiast bilans zmian masy węgla związanego w drewnie w wariantcie A był najwyższy w okresie 1-50 lat, a w wariantcie B w okresie 51-100 lat. W obu wariantach w okresie 101-150 lat bilans ten był ujemny.

Tab. 3. Charakterystyka drzewostanów w pięćdziesięcioletnich okresach dla dwóch wariantów symulacji (A i B).

Tab. 3. Stand characteristics in 50-year periods in two executions of simulation (A – 10-year afforestation regime, B – 50-year afforestation regime).

Okresy symulacji [lata]	Średnia zasobność drzewostanu [m ³ /ha]		Średnia masa węgla związanego w drewnie na powierzchni 1 ha [t/ha]		Bilans zmian masy węgla związanego w drewnie dla 50-letnich okresów [t/ha]	
	wariant A	wariant B	wariant A	wariant B	wariant A	wariant B
1-50	152,9	59,7	46,5	18,8	93,3	46,4
51-100	478,7	316,8	121,2	97,2	37,7	73,7
101-150	323,9	372,2	99,5	114,5	-48,3	-22,7
151-200	358,1	316,5	110,0	97,1	41,6	12,1
Suma					124,4	109,5

Podsumowanie i wnioski

Rozpatrując tempo akumulacji węgla w ciągu 200 lat przez drzewostany powstałe w wyniku zalesień, można zauważyć jego wyraźnie fluktuacyjny charakter. Największe ilości dwutlenku węgla pochłaniane są w początkowym okresie, kiedy przeważają procesy wzrostu nad procesami wyrębu i odnowienia drzewostanów. W kolejnych okresach akumulacja ta przyjmuje na przemian wartości ujemne i dodatnie, przy czym wielkość zmian i długości tych okresów zależą m.in. od długości okresu prowadzenia zalesień.

Przeprowadzone symulacje akumulacji węgla przez drzewostany powstałe w wyniku zalesień pozwoliły na wysunięcie następujących wniosków:

1. Planując zalesienia na potrzeby pochłaniania CO₂, czy rozważając decyzję o włączeniu jakiegoś obszaru do systemu raportowania węgla, trzeba mieć na uwadze, że wprawdzie w pierwszym okresie po zalesieniu (ok. 100 lat) występuje intensywna akumulacja węgla, to jednak w późniejszym okresie bilans może być ujemny.
2. W krótszej perspektywie czasu (do rozpoczęcia użytkowania drzewostanów) drzewostany powstałe w wyniku zalesień są zdolne do wiązania dużych mas węgla, nawet do 3 ton/ha/rok.
3. Jeżeli zalesienie całego analizowanego obszaru następuje w stosunkowo krótkim czasie, to początkowe tempo akumulacji węgla jest największe, ale też jego wahania w późniejszych okresach są wysokie.

4. Ze względów ekonomicznych, zalesianie gruntów na potrzeby włączenia ich do systemu raportowania pochłaniania dwutlenku węgla, w dłuższej perspektywie czasu może być w pewnych sytuacjach nieopłacalne.

LITERATURA

- BRACK C.L. 2002. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution* 116: 195-200.
- CARREIRO M.M., SONG Y.-C., WU J. (Eds.) 2008. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests. International Perspectives*. Springer. Nowy Jork, USA.
- ELLIOTT G.K. 1970. Wood density in conifers. Technical Communication No 8. Commonwealth Forestry Bureau.
- Instrukcja zarządzania lasu. 2003. Część I. Instrukcja sporządzania planu urządzenia lasu dla nadleśnictwa. CILP. Warszawa.
- JIM C.Y., CHEN W.Y. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management* (w druku, doi:10.1016/j.envman.2007.03.035.).
- KOKOCIŃSKI W. 2004. *Drewno. Pomiar właściwości fizycznych i mechanicznych*. Produkt. Poznań.
- KRZYSIK F. 1974. *Nauka o surowcu drzewnym*. PWN. Warszawa.
- LAMLOM 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.
- ŁONKIEWICZ B. 1995. *Krajowy program zwiększania lesistości*. Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa. Warszawa.
- McPHERSON E.G. 1998. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24: 215-223.
- NIKITIN N.I. 1966. *The chemistry of cellulose and wood*. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem.
- NOWAK D.J., CRANE D.E. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution* 116: 381-389.
- NOWAK D.J., CRANE D.E., STEVENS J.C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening* 4: 115-123.
- Powiatowy program zwiększenia lesistości Miasta Wrocławia. Załącznik do uchwały Nr LII/3183/06 Rady Miejskiej Wrocławia z dnia 8 czerwca 2006 roku. Biuro Usług Leśnych „Hektor” Grzegorz Rączka oraz Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej oddział w Brzegu. Brzeg, 2006 (maszynopis).
- Program ochrony środowiska dla powiatu i gminy Wrocław na lata 2004-2015. Załącznik do uchwały Nr XXIX/2220/04 Rady Miejskiej Wrocławia z dnia 18 listopada 2004 roku. Wrocław, 2004 (maszynopis).
- SCHALDACH R., ALCAMO J. 2007. Simulating the effects of urbanization, afforestation and cropland abandonment on a regional carbon balance: a case study for Central Germany. *Regional Environmental Change* 7(3): 137-148.

- SCOTT K.I., MCPHERSON E.G., SIMPSON J.R. 1998. Air pollutant uptake by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24: 224-233.
- SMITH P., POWLSON D.S., SMITH J.U., FALLON P., COLEMAN K. 2000. Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biology* 6(5): 525-539.
- SZYMKIEWICZ B. 2001. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów ważniejszych gatunków drzew leśnych. PWRiL. Warszawa.

Adresy autorów:

Andrzej M. Jagodziński
Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu
Katedra Łowiectwa i Ochrony Lasu
ul. Wojska Polskiego 71 C, 60-625 Poznań;
Instytut Dendrologii PAN
Pracownia Ekofizjologii
ul. Parkowa 5, 62-035 Kórnik
e-mail: amj@man.poznan.pl

Grzegorz Rączka, Paweł Strzeński, Andrzej Węgiel
Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu
Katedra Urządzania Lasu
ul. Wojska Polskiego 71 C, 60-625 Poznań
e-mail: g.raczka@wp.pl, strzelin@au.poznan.pl, weguel@au.poznan.pl