

Pochłanianie CO₂ przez polskie ekosystemy leśne

Carbon dioxide sequestration by Polish forest ecosystems

Kazimierz Gaj

Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Zakład Ochrony Atmosfery,
Plac Grunwaldzki 9, 50–377 Wrocław

Fax +48 71 3203584, +48 71 3282980, e-mail: kazimierz.gaj@pwr.wroc.pl

Abstract. This paper presents a method for estimating the balance of carbon dioxide (CO₂) emission and absorption by Polish forest ecosystems. Based on the existing literature, a method for estimating the net absorption of CO₂ and a synthetic index to assess this amount per hectare per year was developed. The calculation was derived using two alternative methodologies. The first is based on estimating the amount of CO₂ sequestered over a trees' life, and the second based on estimating the age-dependent biomass growth of trees. Obtained results indicate that total CO₂ sequestration by Polish forest ecosystems is the equivalent of approximately 25% of Polish anthropogenic carbon emissions and suggest that previous calculations may have been underestimated.

Key words: greenhouse effect, forest, carbon dioxide balance

1. Wstęp

Ocieplanie się ziemskiego klimatu w ostatnim 100-leciu jest faktem. Faktem jest również, że stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze wzrosło w tym czasie. Spośród tych gazów, za wzrost temperatury atmosfery odpowiada – ze względu na swoje stężenie i długi czas rozpadu – głównie ditlenek węgla. Według prognozy IPCC (2008), w zależności od przyjętego scenariusza emisji gazów cieplarnianych, temperatura przyziemnej warstwy atmosfery zwiększy się od 1,1 do 6,4°C, a poziom mórz i oceanów podniesie się od 0,2 do 0,6 m w tym stuleciu. Skutkiem tego będzie m.in. nasilenie ekstremalnych zjawisk klimatycznych, z którym już dziś mamy częściowo do czynienia. Potencjalne zagrożenia, a także podejmowane i planowane działania zaradcze zostały obszernie przedstawione w licznych publikacjach na ten temat (m.in. Kornatowska, Smogorzewska 2010; Kundzewicz, Juda-Rezler 2010).

Niezależnie od tego, czy odpowiedzialnym za zmiany klimatu jest człowiek, w interesie ludzkości leży powstrzymanie tej tendencji. Środkiem do tego celu, oprócz ograniczenia zużycia emisjogennych paliw kopalnych (przy zachowaniu zasad zrównoważonego rozwoju) może być intensyfikacja zalesień. Dotychczasowa polityka UE, polegająca m.in. na forsowaniu drogich, technologicznych metod redukcji emisji CO₂

(np. Carbon Capture and Storage – CCS), doprowadzić może – w przypadku krajów takich jak Polska – do silnego zahamowania ich rozwoju. Zbyt mały nacisk kładzie się na rozwój naturalnych mechanizmów pochłaniania CO₂. Globalny ubytek powierzchni leśnej jest – obok spalania paliw węglowodorowych – główną antropogeniczną przyczyną wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze. Roczna powierzchnia wylesień na świecie w latach 2001–2010 wynosiła ok. 13 mln ha, a ubytek netto powierzchni lasów – ok. 5,2 mln ha (FAO 2010). O tym, że zmniejszenie wylesień może znacząco ograniczyć globalne ocieplenie, świadczy udział emisji ditlenku węgla powodowanej deforestacją w światowej emisji gazów cieplarnianych, wynoszący ok. 17% (Katere 2010).

Pod względem lesistości Polska plasuje się nieco poniżej średniej europejskiej i światowej, dysponując jednak znacznym potencjałem w zakresie jej zwiększenia (udział gleb klasy V i VI stanowi ok. 34% całkowitej powierzchni gruntów). Aktualny areał krajowych lasów wynosi 9088 tys. ha, co odpowiada lesistości 29,1% (DGLP 2010). Krajowy Program Zwiększania Lesistości (Ministerstwo Środowiska 2003) przewiduje jej zwiększenie do 30% w r. 2020 i do 33% w r. 2050.

Zwiększanie lesistości i prawidłowa gospodarka leśna należą do najbardziej efektywnych sposobów kompensowania antropogenicznej emisji CO₂ (Rykw-

Tabela 1. Wskaźniki pochłaniania CO₂ dla polskich lasówTable 1. Relative amounts of CO₂ capture by Polish forests

Rodzaj drzewostanu Kind of forest	Rodzaj wskaźnika Kind of indicator	Jednostka Unit	Wartość wskaźnika Indicator value	Źródło Reference
80-letni drzewostan świerkowy 80-year-old spruce stand	brutto	Mg/(ha·a)	35,0	Ostrowska, Porębska 2006
Drzewostan 100-letni (dotyczy pełnego cyklu życia drzewa): 100-year-old stand :	sosna	kg/drzewo	553,2	Mieszkowicz et al. 2008
	świerk		868,3	
	dąb		1287,8	
	buk		899,2	
54-letni drzewostan sosnowy 54-year-old pine stand	netto (asymilacja minus respiracja) NEP (Net Ecosystem Production)	Mg/(ha·a)	30,0	Chojnicki et al. 2009
Lasy polskie ogółem Polish forests, total	netto (uwzględnia gospodarkę produktami lasu i ich rozkład) NSE (Net Sector Exchange)	Mg/(ha·a)	3,3	Nabuurs et al. 2001
Lasy polskie ogółem Polish forests, total	netto NEP	Mg/(ha·a)	5,9–17,0	Veroustraete, Sabie 2001
Lasy polskie ogółem Polish forests, total	netto (metodyka oparta na bilansowaniu węgla w ekosystemie) net carbon balance	g/(m ² ·a)	117,3 ^a	Jansens et al. 2005
		Mg/(ha·a)	4,0 ^b	

^a obliczono na podstawie wskaźnika rocznej ilości węgla akumulowanego przez las w przeliczeniu na metr kwadratowy powierzchni kraju, wynoszącego 32 g C / m² · a / calculated on the basis of the ratio of the annual amount of carbon accumulated by forests per square meter area of the country, amounting to 32 g C / m² · a

^b sekwestracja CO₂ w przeliczeniu na 1 hektar lasu / sequestration of CO₂ per 1 hectare of forest

ski 2008; Van der Werf et al. 2009). W porównaniu do kosztów technologicznych metod redukcji jego emisji są to metody tańsze i bardziej przyjazne środowisku. Tym bardziej, że lasy, oprócz poprawy bilansu CO₂, stanowią źródło biomasy – energii odnawialnej.

Celem pracy był przegląd i analiza wybranych metodyk ilościowej oceny sekwestracji ditlenku węgla przez lasy oraz zaproponowanie odpowiedniego dla warunków polskich modelu bilansowania pochłaniania i wydzielania CO₂.

W artykule przedstawiono przegląd wskaźników stosowanych do oceny pochłaniania ditlenku węgla w warunkach lasów polskich, zaproponowano własną metodologię obliczeń, która posłużyła do określenia wskaźnika pochłaniania netto CO₂ oraz porównano wyniki obliczeń uzyskane opracowanym modelem z odnośnymi danymi raportowanymi przez Krajowego Administratora Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji i Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KASHUE-KOBiZE 2010).

2. Dotychczasowe próby ilościowej oceny pochłaniania CO₂ przez polskie ekosystemy leśne

Intensywność pochłaniania CO₂ przez lasy zależy m.in. od gatunku i wieku drzew, rodzaju gleb i poszycia oraz warunków klimatycznych. Ze względu na złożoność procesu nie opracowano dotychczas uniwersalnego modelu ani wskaźników wiązania CO₂, a dostępne dane literaturowe na ten temat są rozbieżne (tabela 1). Różnice te mogą wynikać z braku ujednoliconych metodyk pomiarowych lub też geograficzno-klimatycznych uwarunkowań. Z licznych danych literaturowych nt. rocznej produktywności biomasy i wiązania węgla przez różne ekosystemy leśne (m.in. Johnson 1992; Dixon et al. 1994; Lal 2005; Ostrowska, Porębska 2006; Ostrowska et al. 2010) wynika, że wahać się ona może w szerokich granicach – od 0,5 do 50 Mg/ha, co odpowiada ilości wiązanego CO₂ w granicach 0,9–92 Mg/ha.

Kompleksowe badania dotyczące bilansu węgla w krajowych lasach rozpoczęły się w Polsce w 2007 r.¹ Jednym z celów tych badań jest opracowanie wskaź-

¹ Projekt p.t. „Bilans węgla w biomase drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski” koordynowany przez Instytut Badawczy Leśnictwa

ników wspomagających raportowanie ilości węgla zakumulowanego przez lasy. Badania są prowadzone dla ośmiu podstawowych gatunków lasotwórczych w Polsce (sosna, świerk, jodła, modrzew, dąb, buk, brzoza i olsza) oraz 12 gatunków podszytowych. Wstępne wyniki badań wykazały, że 1 hektar lasu sosnowego może pochłaniać rocznie do 30 Mg CO₂ (Sawicki 2009a; Chojnicki et al. 2009). Wskaźnik ten dotyczy drzewostanów w wieku powyżej 50 lat i może być obciążony niedokładnościami związanymi m.in. z magazynowaniem CO₂ w pokrywie roślinnej poniżej zainstalowanego systemu pomiarowego (Chojnicki et al. 2009).

3. Pochłanianie brutto CO₂ przez polskie lasy

Poniżej zaproponowano dwie alternatywne metodyki szacowania. Pierwsza bazuje na ilości CO₂ wiązanej przez drzewa różnych gatunków w całym okresie życia, obliczonej na podstawie wskaźników wyznaczonych za pomocą równań alometrycznych (Mieszkwicz et al. 2008), natomiast druga – na zależności przyrostu biomasy od wieku drzew.

Metodyka 1

Korzystając ze wskaźników sekwestracji CO₂ przez drzewa danego gatunku (W_i) opracowanych przez Mieszkwicz (tabela 1), znając udział (U_i) poszczególnych gatunków drzew w polskich lasach (tabela 2) oraz zakładając przeciętną liczbę drzew na hektar ($A = 2000$ szt./ha), można oszacować uśredniony w całym okresie życia drzew (założono wiek rębności 100 lat) wskaźnik pochłaniania brutto CO₂ (W_{CO_2}):

$$W_{CO_2} = \frac{\left(\sum_i W_i \cdot U_i \right) \cdot A \cdot 10^{-3}}{100} = 14,26 \text{ Mg / (ha} \cdot \text{a)},$$

gdzie i – rozpatrywane cztery grupy gatunków drzew (tabela 2).

Tabela 2. Powierzchniowy udział gatunków drzew w lasach polskich (DGLP 2010)

Table 2. Areal share of species tree composition in Polish forests (DGLP 2010)

Sosna Pine	60,7 %
Świerk i pozostałe iglaste Spruce and others conifers	10,3 %
Dąb Oak	6,9 %
Buk i pozostałe liściaste Beech and others leafed	22,1 %

Metodyka 2

Na podstawie danych pomiarowych (Jagodziński 2009) opracowano następujący model do szacowania ilości węgla gromadzonego w biomase nadziemnej drzew sosnowych w zależności od wieku drzewostanu:

$$M_{rC} = -0,018 \cdot \tau^2 + 2,313 \cdot \tau - 11,029$$

gdzie:

M_{rC} – jednostkowa masa węgla retencjonowanego w biomase nadziemnej drzewostanów sosnowych, Mg/ha,
 τ – wiek drzewostanu, a.

Na tej podstawie, wykorzystując znany udział części nadziemnej biomasy w retencji węgla (χ), skonstruowano model do szacowania ilości CO₂ wiązanej rocznie przez las sosnowy (bez uwzględniania niższych pięter ekosystemu leśnego) na powierzchni 1 ha, w zależności od wieku drzewostanu:

$$M_{rCO_2} = (-0,018 \cdot \tau^2 + 2,313 \cdot \tau - 11,029) \cdot \frac{44}{12} \cdot (\chi \cdot \tau)^{-1},$$

w Mg/(ha·a).

Zgodnie z tym modelem, w przypadku drzewostanu sosnowego w wieku $\tau = 55$ lat, którego część nadziemna stanowi 76% (DGLP 2010), szacunkowa ilość CO₂ pochłanianego brutto w ciągu roku wynosi 5,42 Mg/(ha·a).

Zakładając, że:

– produktywność innych gatunków iglastych jest taka sama jak sosny,

– udział drzew iglastych stanowi 71% ogółu drzew w Polsce (tabela 2),

– produktywność biomasy lasów liściastych w naszej strefie klimatycznej wynosi 13,3 Mg/(ha·a) (Ostrowska, Porębska 2006),

– udział wiązania CO₂ przez podszyt i runo leśne w akumulacji węgla przez ekosystemy leśne wynosi 10% (oszacowano wg: Sawicki 2009b; Fronczak 2009; Malinow 2010),

otrzymano przeciętny wskaźnik pochłaniania brutto CO₂ przez polskie lasy:

$$W_{CO_2} = 1,1 \cdot \left(0,71 \cdot 5,42 + 0,29 \cdot 13,3 \cdot 0,5 \cdot \frac{44}{12} \right) = 12,01 \text{ Mg / (ha} \cdot \text{a)}$$

4. Pochłanianie netto CO₂ przez polskie lasy

Obieg węgla w ekosystemach leśnych składa się zarówno z asymilacji CO₂ w procesie fotosyntezy, jak i jego wydzielania w procesach respiracji i rozkładu (tlenowego i beztlenowego) biomasy. Wskaźnik emisji, ze względu na brak odnośnych badań dla warunków polskich, oszacowano na podstawie badań Sonne (2006), który metodą analizy cyklu życia (LCA) określił stosunek emisji gazów cieplarnianych (GHG) do

pochłanianego węgla na poziomie 2,5% dla drzewostanów w wieku 60 lat. Przyjmując za tym autorem 67% udział CO₂ w emitowanych GHG i przeliczając pochłaniany węgiel na CO₂, można wyznaczyć stosunek emisji CO₂ do pochłaniania go przez las na poziomie 6,14%. W praktyce, w warunkach polskich (starsze drzewostany i suchsze lasy niż analizowane przez Sonne) powinien on być niższy.

Uwzględniając ten wskaźnik oraz oszacowany za pomocą wyżej opisanych metodyk średni wskaźnik pochłaniania brutto [13,1 Mg/(ha·a)], uzyskano wskaźnik wiązania netto CO₂ na poziomie 12,3 Mg/(ha·a). Ponieważ drewno pozyskane na cele gospodarcze ulega następnie spaleniowi lub naturalnemu rozkładowi, ostateczny wskaźnik wiązania netto CO₂ powinien być pomniejszony o odnośną wartość emisji tego gazu. Z jednego metra sześciennego drewna, zakładając gęstość suchej masy 500 kg/m³ i 50% udział węgla w biomacie, wydzieli się do atmosfery ok. 917 kg CO₂. Pozyskanie grubizny drewna w polskich lasach w roku 2009 wyniosło 32 702 tys. m³ (DGLP 2010), co w przeliczeniu na powierzchnię lasów daje 3,6 m³/ha rocznie. Odpowiadająca tej wartości emisja CO₂ wynosi zatem ok. 3,3 Mg/(ha·a).

Ostateczny wskaźnik pochłaniania netto CO₂ dla polskiego ekosystemu leśnego wynosi zatem 12,3 – 3,3 = 9 Mg/(ha·a). Oznacza to pochłanianie ok. 81 800 Gg CO₂ rocznie, tj. 25% antropogenicznej jego emisji w Polsce, która wg raportu KASHUE-KOBiZE (2010) wyniosła w 2008 roku 32 3831 Gg. Zawarta w tym raporcie roczna wielkość krajowego pochłaniania netto CO₂ przez grunty leśne jest o ok. 35% niższa – wynosi 52 400 Gg, co odpowiada wskaźnikowi sekwestracji netto CO₂ na poziomie 5,7 Mg/(ha·a).

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza danych literaturowych dotyczących prognozowania pochłaniania i wydzielania CO₂ wykazała brak spójności dotychczasowego stanu wiedzy (o czym świadczy np. rozrzut wielkości wskaźników pochłaniania CO₂) oraz brak kompleksowego modelu szacowania sekwestracji CO₂ przez ekosystemy leśne w warunkach polskich. Zaproponowany model, oparty na danych literaturowych i obliczeniach własnych autora, stanowi próbę syntezy i weryfikacji istniejącego stanu wiedzy. Nadzieję na pełniejsze, empiryczne ujęcie całości analizowanej problematyki daje wspomniany w niniejszym artykule, prowadzony od trzech lat przez międzyuczelniany, interdyscy-

plinarny zespół polskich naukowców projekt badawczy, którego wyniki mają zostać wkrótce opublikowane.

Na podstawie obliczeń przeprowadzonych opracowanym modelem można szacować, że lasy w Polsce pochłaniają rocznie ok. 80 mln ton ditlenku węgla, co w przeliczeniu na pozwolenia emisyjne¹ odpowiada obecnie kwocie ponad 1,3 mld euro. Wobec tego wydaje się, że warto powrócić do zarzuconego pomysłu handlu jednostkami pochłaniania (czego nie przewiduje obecna ustawa o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji – Dz.U. 2009.130.1070). Otworzyłyby to nowe szanse dla polskiej gospodarki oraz pozwoliło, przynajmniej częściowo, finansować dalsze zalesienia i poprawę jakości gospodarki leśnej (zysk PGL Lasów Państwowych z handlu drewnem wynosi jedynie ok. 100 mln zł rocznie).

Uzyskane wyniki obliczeń i ich porównanie do danych literaturowych świadczyć mogą o większym potencjale pochłaniania ditlenku węgla przez polskie lasy, niż do tej pory sądzono. Raportowane w związku z tym wielkości pochłaniania CO₂ w ramach sektora V – LULUCF (KASHUE-KOBiZE 2010) mogą być zaniżone.

Literatura

- Chojnicki B.H., Urbaniak M., Danielewska A., Strzeliński P., Olejnik J. 2009. Pomiary wymiany dwutlenku węgla oraz biomasy w ekosystemach leśnych – stacja pomiarowa w Tucznie. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*, 11, 2 (21): 247–256.
- Dixon R.K., Brown S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C., Wisniewski J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263 (5144): 185–190.
- Fronczak K. 2009. Zielony magazyn węgla. *Przyroda Polska*, 1: 8–9.
- Jagodziński A. 2009. Ile węgla w lesie. *Echa Leśna*, 5: 13–15.
- Janssens I.A., Freibauer A., Schlamadinger B., Ceulemans R., Ciais P., Dolman A.J. et al. 2005. The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale – a European case study. *Biogeosciences*, 2: 15–26.
- Johnson, D.W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, and Soil Pollution*, 64 (1–2): 83–120.
- Kornatowska B., Smogorzewska M. 2010. Zmiany klimatu a ekosystemy leśne: aktualna polityka klimatyczna. *Leśne Prace Badawcze*, 71 (4): 415–421.
- Kundzewicz Z.W., Juda-Rezler K. 2010. Zagrożenia związane ze zmianami klimatu. *Nauka*, 4: 69–76.
- Lal R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220 (1–3): 242–258.
- Malinow A. 2010. Badania nad ilością absorbowanego CO₂. Ile węgla pochłania las. *Las Polski*, 1: 20–21.

¹ wg notowań na giełdzie BlueNext-EUA z dn. 1.04.2011: 16,3 euro/MgCO₂

- Mieszkowicz J., Trojanek J., Gąsiorek M. 2008. Kalkulator CO₂. Metodyka szacowania akumulacji CO₂ przez drzewa. Fundacja Aeris Futuro, www.aeris.eko.org.pl [dostęp 13.08.2011].
- Nabuurs G.J., Pussinen A., Liski J., Karjalainen T. 2001. Upscaling based on forest inventory data and EFISCEN. w: Kramer K., Mohren G.M.J. (eds), Long term effects of climate change on carbon budgets of forests in Europe. Alterra rapport 194. Wageningen, Alterra, Green World Research: 220–234.
- Ostrowska A., Porebska G. 2006. Wiązanie węgla w ekosystemach leśnych w świetle literatury. Rola lasów i gospodarki leśnej w kształtowaniu bilansu węgla w ekosystemach leśnych w Polsce. Mat. Konf., IBL, Warszawa: 101–115.
- Ostrowska A., Porebska G., Kanafa M. 2010. Carbon accumulation and distribution in profiles of forest soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19 (6): 1307–1315.
- Rykowski K., 2008. Climate change, forest, forestry relationships. Warszawa, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 1–70. ISBN 9788389744968.
- Sawicki A. 2009a. Rola lasu w bilansie węgla oraz jej odzwierciedlenie w badaniach naukowych. *Przegląd Leśniczy*, 4: 5.
- Sawicki A. 2009b. Rola lasu w bilansie węgla. *Las Polski*, 7: 8.
- Sonne E. 2006. Greenhouse Gas Emissions from Forestry Operations: A Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Quality*, 35, 4: 1439–1450.
- Van der Werf G.R., Morton D.C., DeFries R.S., Olivier J.G., Kasibhatla P.S., Jackson R.B. et al. 2009. CO₂ emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2: 737–738.
- Veroustraete F., Sabie H. 2001. Upscaling using remote sensing. w: Kramer K., Mohren G.M.J. (eds), Long term effects of climate change on carbon budgets of forests in Europe. Alterra rapport 194. Wageningen, Alterra, Green World Research: 244–280.
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica, Monographs*, 4: 1–63.

Dokumenty

- FAO. 2010. Global Forest Resources Assessment 2010, Main report. Roma, FAO Forestry Paper 163.
- DGLP. 2010. Raport o stanie lasów w Polsce 2009. Warszawa, Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych.
- IPCC. 2008. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- KASHUE-KOBIZE. 2010. Poland's National Inventory Report 2010, Greenhouse Gas Inventory for 1988–2008, Submission under the UN Framework Convention on climate Change and its Kioto Protocol. Warszawa, KASHUE-KOBIZE, Institute of Environmental Protection.
- Katere Y. 2010. Introduction. w: Perspectives on REDD+. Geneva, Switzerland. UN-REDD Programme Secretariat, International Environment House.
- Ministerstwo Środowiska. 2003. Krajowy Program Zwiększania Lesistości. Warszawa, Ministerstwo Środowiska.