

EMILIA WYSOCKA-FIJOEK, STANISŁAW ZAJĄC

## Optymalizacja wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla\*

Optimizing the stand rotation age from the point of view of carbon sequestration

### ABSTRACT

Wysocka-Fijorek E., Zajac S. 2017. Optymalizacja wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla. Sylwan 161 (11): 883-891.

The selection of the rotation time of a stand (from planting to final felling), i.e. the age at which stand reaches harvest maturity, is a key decision in forest management due to, *inter alia*, the amount and value of carbon stored in the forest. In this context, the basis for the economic optimisation of the rotation age of forests is to define the goal of forest production and desirable state of forests ensuring the achievement of the adopted aim. Therefore, the choice of the most suitable optimal moment of completing a production cycle and starting the subsequent one is very important in forest management. The aim of the performed analysis is to verify the empirical equations and conversion factors as well as to assess their suitability for determining the volume and value of standing timber and accumulation of carbon in the aboveground woody biomass. The verified equations will be used for modelling the optimal rotation age of forests due to the maximization of the rate of carbon accumulation in the aboveground woody biomass. The input data for the verification of equations and conversion factors were grouped according to the dominant species, 10-years age subclass and site index class. Four methodological approaches were used to analyse and estimate the amount of carbon accumulated in the aboveground woody biomass. With the assumption of a continuous use of forest land for timber production, the generated revenues will be same at the same level of costs in the subsequent production cycles. Analysing the results of the optimization of the age of felling maturity it should be noticed that these are the averaged values relating to the State Forests. They do not take into account local differences in the price of raw wood and production costs including the specific characteristics of individual trees or stands. The accuracy (quality) of calculating the average and current increment of stands and, in consequence, of the amount and value of the accumulated carbon is important for the effectiveness of the optimization of the amount of carbon accumulated in the aboveground woody biomass.

### KEY WORDS

optimization of the rotation age, carbon dioxide accumulation, timber production

### ADDRESSES

Emilia Wysocka-Fijorek <sup>(1)</sup> – e-mail: e.wysocka-fijorek@ibles.waw.pl

Stanisław Zajac <sup>(1, 2)</sup> – e-mail: s.zajac@ibles.waw.pl

<sup>(1)</sup> Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi, Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

\*Praca wykonana w ramach tematu „Optymalizacja użytkowania oraz zasobności drzewostanów z punktu widzenia dochodowej funkcji produkcji drewna oraz kumulacji węgla” zleconego przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych.

<sup>(2)</sup> Instytut Nauk Leśnych, Uniwersytet Łódzki, filia w Tomaszowie Mazowieckim; ul. Konstytucji 3 Maja 65/67, 97-200 Tomaszów Mazowiecki

## Wstęp

Określenie wieku dojrzałości rębnej (okresu od posadzenia do ścinki drzewostanu) jest kluczową decyzją w gospodarce leśnej, również w kontekście bilansu wiązania węgla w ekosystemach leśnych. Na bilans ten ma wpływ przemiana materii organicznej oraz wielkość wpływów i wplywów węgla z różnych elementów lasu [Kaipainen i in. 2004; Brzeziecki, Zajączkowski 2012]. Wiązanie dwutlenku węgla przez las jest rozważane jako możliwość spowolnienia lub nawet odwrócenia trendu zwiększenia jego stężenia w atmosferze [Asante i in. 2011].

Ustalenie celu produkcji oraz pożądanego stanu drzewostanu jest podstawą procesu optymalizacji ilości węgla zakumulowanego w nadziemnej biomacie zdrewniałej. Istotne znaczenie w prowadzeniu gospodarki leśnej ma więc wybór odpowiedniego (optymalnego) momentu zakończenia jednego cyklu produkcyjnego oraz rozpoczęcia kolejnego [Partyka i in. 1994, 1995; Asante 2011; Asante i in. 2011]. Zasadniczą trudnością w rachunku optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanu jest, poza samą metodą optymalizacji, właściwe określenie (ocena) zjawiska, jakim jest tempo wzrostu i rozwoju drzewostanów.

Celem pracy była weryfikacja wzorów empirycznych i współczynników przeliczeniowych do określania ilości węgla związanego w nadziemnej biomacie zdrewniałej drzewostanów sosnowych i bukowych I klasy bonitacji.

## Materiał i metody

Wysocka-Fijorek i Zając [2016] przedstawili warianty kalkulacji wartości wiązania węgla. Zbiory danych wejściowych do weryfikacji wzorów empirycznych i współczynników przeliczeniowych zgrupowane były według gatunku panującego, podklasy wieku i klasy bonitacji. W ocenie wielkości oraz wartości wiązania węgla w nadziemnej biomacie zdrewniałej zastosowano cztery podejścia metodyczne. Pierwsza grupa (E-1, E-2) obejmowała metody wykorzystujące pierśnicę i/lub wysokość drzew, natomiast druga (E-3, E-4) to metody oparte na miąższości drzew lub drzewostanów. Ilość zakumulowanego węgla określano:

– w wariancie E-1 wzorem służącym do obliczania całkowitej nadziemnej biomasy części zdrewniałej (ABW, ang. Aboveground Woody Biomass), w ogólnej postaci:

$$Y = ABW \cdot CF$$

gdzie:

$Y$  – węgiel związany w nadziemnej biomacie zdrewniałej drzewa o przeciętnych wymiarach,  
 $CF$  – udział węgla w biomacie (wartość tego parametru dla drewna iglastego i liściastego wynosi 0,5),

$ABW$  – całkowita biomasa zdrewniała części nadziemnej, którą określano, korzystając z równań opracowanych przez Gaspariniego i in. [2006]:

$$\text{dla sosny:} \quad ABW = 2,7081 + 0,023724 \cdot d^2 \cdot h$$

$$\text{dla buka:} \quad ABW = 0,16885 \cdot d^{2,44639} \cdot h^{-0,1431}$$

gdzie:

$d$  – przeciętna pierśnica w podklasie wieku,

$h$  – przeciętna wysokość w podklasie wieku.

– w wariancie E-2 wzorem allometrycznym opracowanym przez Jagodzińskiego i in. [2011]:

$$\text{dla sosny:} \quad Y = 0,05430435689521 \cdot d^{2,34426396472848}$$

$$\text{dla buka:} \quad Y = 0,10832771721348 \cdot d^{2,37436191020565}$$

– w wariancie E-3 na podstawie gęstości drewna (GWD, ang. Global Wood Density):

$$Y = R(t) \cdot GWD \cdot CF$$

gdzie:

$R(t)$  – średnia zasobność wraz z drobnicą w korze [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ],

$GWD$  – średnia gęstość drewna suchego, która wynosi dla sosny  $0,42189 \text{ t/m}^3$ , a dla buka  $0,58548 \text{ t/m}^3$  [Chave i in. 2009; Zanne i in. 2009].

– w wariancie E-4 zgodnie z metodą przyjętą przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC) [Krajowy... 2014]:

$$Y = R(t_b) \cdot D \cdot BEF_2 \cdot CF$$

gdzie:

$R(t_b)$  – zasobność bez drobnicy [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ],

$D$  – średnia gęstość drewna: dla sosny  $0,43 \text{ t/m}^3$ , dla buka  $0,57 \text{ t/m}^3$ ,

$BEF_2$  – współczynnik przeliczeniowy objętości pozyskanej grubizny na całą biomasę nadziemną (w obu przypadkach =1,4).

Wyniki badań przedstawiono w dwóch wariantach modeli optymalizacyjnych. W wariancie wartościowym (O-W), czyli według kosztów alternatywnych, optymalny wiek wyrębu jest punktem zrównania rocznych kosztów alternatywnych i przyrostu bieżącego wartości węgla związanego w nadziemnej biomasie zdrewniałej. W celu prezentacji wyników dla optymalnego wieku rębności z punktu widzenia maksymalizacji tempa wiązania węgla oblicza się wartość zapasu rosnącego zakumulowanego węgla w nadziemnej biomasie zdrewniałej oraz średnią zasobność drzewostanów na pniu. Z kolei w wariancie przyrostowym (O-P), czyli według kulminacji przyrostu przeciętnego i bieżącego, optymalny wiek wyrębu jest punktem zrównania przyrostu przeciętnego i bieżącego wartości węgla związanego w nadziemnej biomasie zdrewniałej. Następnie oblicza się dla optymalnego wieku rębności wartość zapasu rosnącego (zakumulowanego węgla) i średnią zasobność drzewostanów w wieku optymalnym.

W celu weryfikacji przyjętych założeń metodycznych pobrano z bazy Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP) dane dotyczące powierzchni, zapasu, pierśnicy, wysokości drzew w drzewostanach oraz miąższości pozyskanego drewna. Wielkość zasobów drzewnych przedstawiono dla danych dotyczących Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe według stanu na 1 stycznia 2014 roku, natomiast pozyskanie (sprzedaż drewna) – według stanu na 31 grudnia 2014 roku. W analizie przyjęto stopę procentową równą 1% oraz cenę węgla po przeliczeniu wynoszącą  $140,98 \text{ zł/t}$  czystego węgla (według ceny jednostki redukcji emisji zamieszczonej w europejskim systemie handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych). Analizie poddano I klasę bonitacji w drzewostanach sosnowych oraz bukowych.

W każdej modyfikacji modelu dane wyrównano z wykorzystaniem regresji krzywoliniowej oraz wielomianu trzeciego stopnia. W celu weryfikacji zaproponowanych modeli konieczne było skorygowanie danych źródłowych:

– nieujęcie w analizie miąższości drzewostanów I podklasy wieku (1-10 lat) wynikało głównie z tego, że znaczący wpływ na miąższość drzewostanów w tej podklasie miały przestoje pozostawione na powierzchniach odnowionych,

- wyznaczając wyrównane krzywe wielomianów, zakres danych ograniczono do przedziału 11-140 lat dla sosny i 11-160 lat dla buka, ze względu na małe powierzchnie drzewostanów w ostatnich klasach wieku, których konsekwencją są duże wahania zasobności,
- obliczając średnie koszty pozyskania drewna (ścinki i wyróbki sortymentów), odrzucono dane znacząco odbiegające od średniej (zarówno zaniżone, jak i zawyżone),
- w związku z inną jednostką rachunkową nie uwzględniono w analizie przychodów z tytułu sprzedaży zrębków opałowych i przemysłowych.

Szacunek ilości oraz wartości związanego węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej przeprowadzono z wykorzystaniem rzeczywistych parametrów drzewostanów. Analizie poddano drzewostany sosnowe oraz bukowe, które stanowiły nie mniej niż 80% składu gatunkowego. Do dalszej analizy wybrano klasę bonitacji, która była najliczniej reprezentowana w analizowanym gatunku panującym. Zarówno w drzewostanach z gatunkiem panującym sosną, jak i bukiem była to I klasa bonitacji. Rozpatrując uzyskane wyniki, należy mieć na uwadze, że drzewostany jednej klasy bonitacji zagospodarowane są na różne sposoby.

## Wyniki

Tempo wzrostu drzewostanów sosnowych i bukowych jest odmienne (tab. 1). W początkowym okresie szybciej przyrastają drzewostany sosnowe. Po przekroczeniu 40-60 lat zdecydowanie większym przyrostem charakteryzują się drzewostany bukowe.

Wartość węgla zakumulowanego w nadziemnej biomase zdrewniałej, uzyskana za pomocą różnych modeli optymalizacyjnych, była zróżnicowana zarówno w obrębie gatunku, jak i pomiędzy nimi. Istotne znaczenie miało to, które dane były podstawą do obliczania ilości oraz wartości związanego węgla. W drzewostanach sosnowych otrzymano skrajne wartości wiążanego węgla, opierając się na metodach wykorzystujących pierśnicę oraz wysokość (tab. 2). Najwyższą wartość

**Tabela 1.**

Zmiany z wiekiem (W [lata]) pierśnicy (D [cm]), wysokości (H [m]) i zasobności (V [m<sup>3</sup>/ha]) drzewostanów sosnowych (So) i bukowych (Bk) I klasy bonitacji

Changes over the time (W [years]) of breast height diameter (D [cm]), height (H [m]) and volume (V [m<sup>3</sup>/ha]) of Scots pine (So) and European beech (Bk) of I<sup>st</sup> site index class

W	So			Bk		
	D	H	V	D	H	V
15	6	5	14	2	3	–
25	10	10	113	7	8	54
35	14	14	192	12	13	142
45	19	18	253	17	17	218
55	22	20	299	22	21	284
65	26	23	332	27	24	337
75	30	25	353	32	27	379
85	33	26	366	36	29	409
95	36	27	372	40	31	427
105	38	28	374	45	33	433
115	40	29	374	48	34	425
125	42	30	373	52	35	405
135	44	30	375	54	36	371
145	–	–	–	57	37	323
155	–	–	–	58	37	262

Tabela 2.

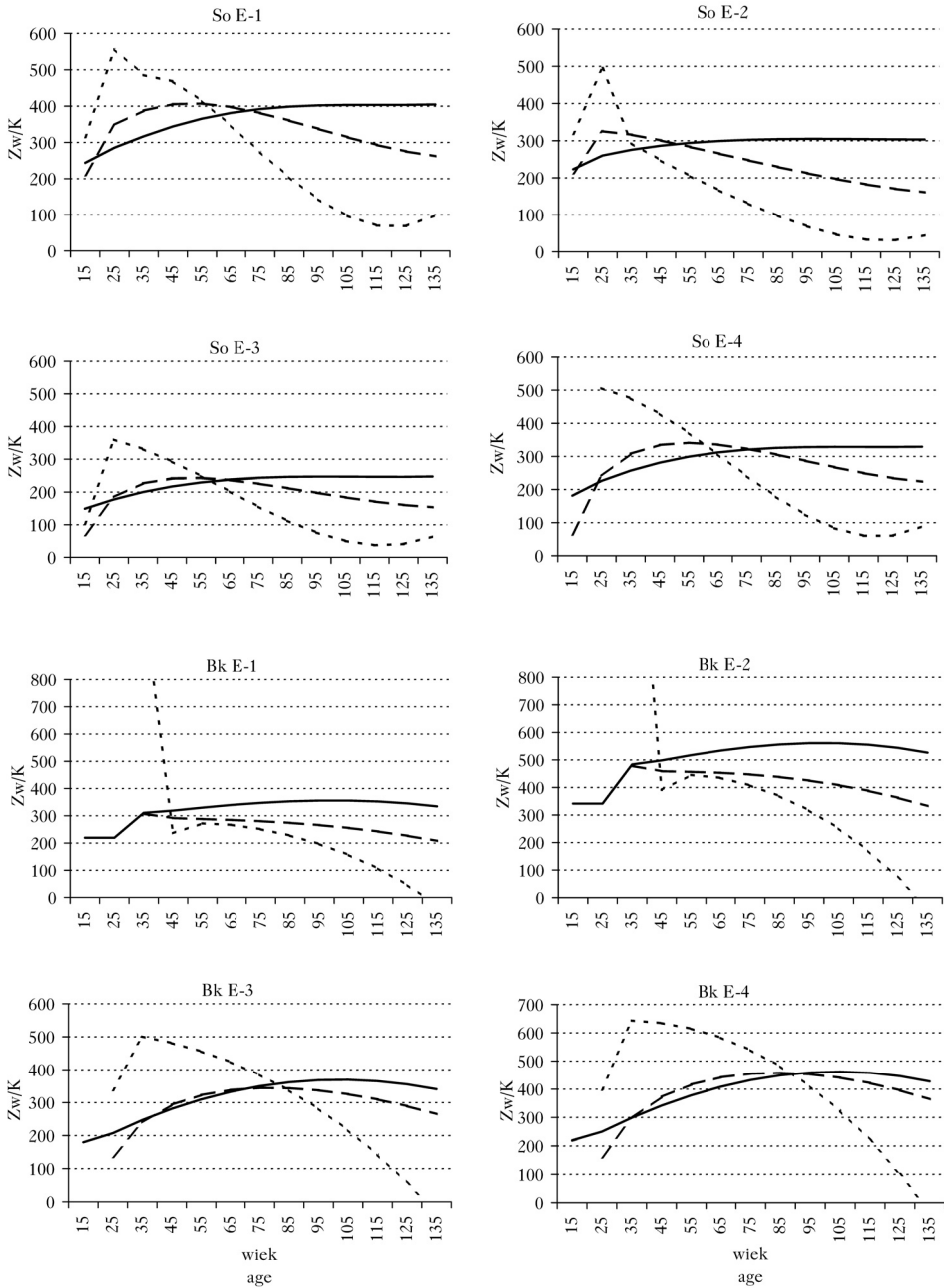
Wartość [zł/ha] węgla związanego w nadziemnej biomase zdrewniałej drzewostanów sosnowych (So) i bukowych (Bk) w zależności od wariantu obliczeń

Value [PLN/ha] of carbon accumulated in aboveground woody biomass in Scots pine (So) and European beech (Bk) stands with regard to calculation method

	So				Bk			
	E-1	E-2	E-3	E-4	E-1	E-2	E-3	E-4
15	2 026	2 051	789	562	–	–	–	–
25	6 205	5 727	3 640	4 450	–	–	2 770	3 065
35	9 316	7 287	5 880	7 558	9 141	14 226	6 743	7 979
45	12 038	8 388	7 582	9 973	9 948	15 689	10 150	12 279
55	14 185	9 147	8 818	11 781	11 053	17 574	12 995	15 949
65	15 767	9 658	9 658	13 068	12 036	19 234	15 283	18 974
75	16 846	9 980	10 177	13 922	12 819	20 549	17 020	21 341
85	17 511	10 156	10 445	14 428	13 367	21 464	18 208	23 033
95	17 855	10 221	10 535	14 674	13 652	21 939	18 854	24 036
105	17 982	10 209	10 518	14 746	13 641	21 926	18 962	24 334
115	17 996	10 152	10 468	14 730	13 303	21 378	18 537	23 913
125	18 001	10 085	10 455	14 714	12 603	20 247	17 583	22 758
135	18 105	10 042	10 553	14 783	11 511	18 488	16 104	20 854
145	–	–	–	–	10 001	16 062	14 107	18 186
155	–	–	–	–	8 059	12 948	11 594	14 738

zakumulowanego węgla uzyskano za pomocą metody uwzględniającej ABW, najniższą natomiast – przy wykorzystaniu wzorów alometrycznych. W drzewostanach bukowych najniższe wartości zakumulowanego węgla osiągnięto również w podejściu E-1, a najwyższe – stosując metodykę IPCC.

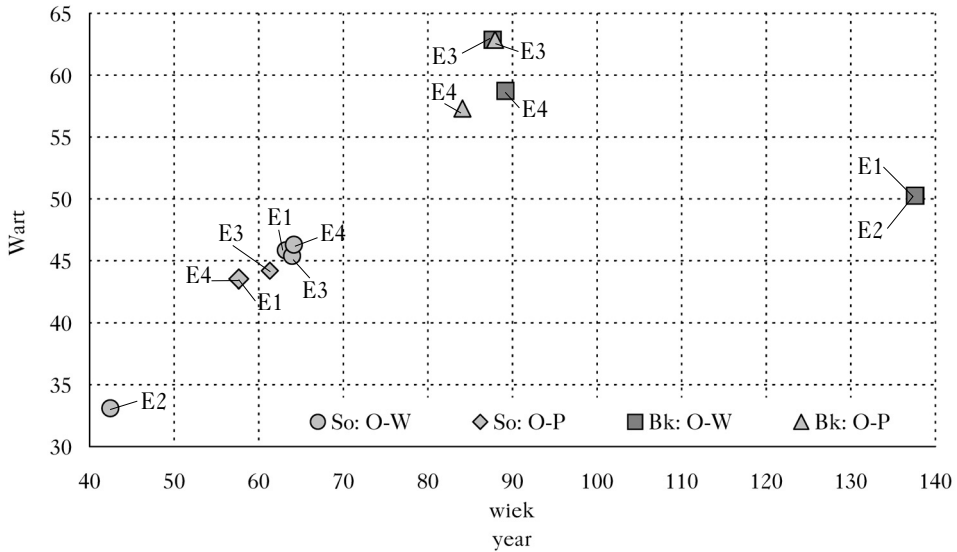
Istotny z punktu widzenia optymalizacji prowadzenia gospodarki leśnej jest rozkład bieżącego oraz przeciętnego przyrostu wartości węgla związanego w nadziemnej biomase zdrewniałej (ryc. 1). W zależności od analizowanego gatunku oraz podejścia do kalkulacji wartości zakumulowanego węgla krzywe przyrostu przeciętnego oraz bieżącego, podobnie jak i kosztu alternatywnego, mają inny przebieg. Optymalny wiek wyrębu, zarówno w wariancie opartym o koszty alternatywne, jak i kulminację przeciętnego i bieżącego przyrostu, jest niższy w drzewostanach sosnowych, a wyższy w drzewostanach bukowych (ryc. 2). Wyniki w wariancie O-W zostały uznane za możliwe do zrealizowania i racjonalne z gospodarczego punktu widzenia. Natomiast w wariancie O-P, ze względu na bardzo niski optymalny wiek wyrębu, odrzucono w drzewostanach sosnowych wynik optymalizacji E-2, a w drzewostanach bukowych – E-1 i E-2. W drzewostanach sosnowych optymalny wiek wyrębu zawierał się w przedziale 42-64 lata. W większości wariantów optymalny wiek wyrębu drzewostanów sosnowych, ze względu na maksymalizację tempa wiązania węgla, przekraczał nieznacznie 60 lat (ryc. 2). W drzewostanach bukowych wyniki optymalizacji wieku wyrębu według kosztów alternatywnych w wariancie E-1 oraz E-2 były zdecydowanie wyższe od uzyskanych w pozostałych wariantach, wyniosły bowiem 138 lat. Jest to w znacznej mierze rezultatem bardzo nietypowego przebiegu przyrostu bieżącego wartości w analizowanych wariantach, co wynikało ze sposobu jego obliczenia. W pozostałych wariantach, niezależnie od podejścia, optymalny wiek wyrębu – ze względu na tempo wiązania węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej – uzyskiwano w wieku nieprzekraczającym 90 lat.



Ryc. 1.

Przeciętny (linia przerywana) i bieżący (linia kropkowana) przyrost wartości węgla wiązanej w nadziemnej biomacie zdrowiałej ( $Z_w$  [zł/ha/rok]) oraz roczny koszt alternatywny ( $K$  [zł/ha/rok]; linia ciągła) w drzewostanach sosnowych (So) i bukowych (Bk) w zależności od wariantu obliczeń

Average (dashed line) and current (dotted line) increment of value of carbon accumulated in aboveground woody biomass ( $Z_w$  [PLN/ha/year]) and opportunity costs ( $K$  [PLN/ha/year]; solid line) in Scots pine (So) and European beech (Bk) stands with regard to calculation method



Ryc. 2.

Optymalny wiek [lata] wyrębu oraz wartość (Wart [tys. zł/ha]) węgla związanego w nadziemnej biomase zdrewniałej w drzewostanach sosnowych (So) i bukowych (Bk) I klasy bonitacji w zależności od wariantu optymalizacyjnego (O-W, O-P)

Optimal rotation age [years] and value (Wart [ $\times 1000$  PLN/ha]) of carbon accumulated in aboveground woody biomass of Scots pine (So) and European beech (Bk) stands of 1st site index class with regard to optimization method (O-W, O-P)

## Dyskusja

Wiek rębności drzewostanu jest jednym z najważniejszych elementów planowania gospodarczego. Jest to wiek, w którym drzewostan osiąga dojrzałość rębna, czyli stan najbardziej pożądany z punktu widzenia realizowanego przez gospodarstwo leśne celu gospodarczego. Kolejność naboru poszczególnych drzewostanów do wyrębu wynika z kompleksowego charakteru wymagań stawianych urzędzeniowej regulacji użytkowania rębnych drzewostanów. Jednocześnie ciągle warunkiem stosowania modelowych rozwiązań w tej dziedzinie jest niedostateczna dokładność określania miąższości drzewostanów oraz brak zasad przeprowadzania ekonomicznej analizy w tym zakresie.

Opracowując założenia projektu, przyjęto, że grunt leśny będzie stale wykorzystywany do prowadzenia gospodarki leśnej – zgodnie z zasadą ciągłości i trwałości prowadzenia produkcji leśnej. Istotne jest też założenie, że w kolejnych cyklach produkcyjnych, przy ponoszeniu kosztów na tym samym poziomie, będą uzyskiwane takie same przychody. Minimalną wartość kosztu alternatywnego stanowi wartość gruntu leśnego (siedliska) określona w momencie braku drzewostanu na gruncie.

Rozpatrując wyniki optymalizacji, należy mieć na uwadze, że są one wartościami uśrednionymi. Nie uwzględniają lokalnego zróżnicowania oraz specyficznych cech danego drzewostanu. Stosując ogólne przeliczniki, niezależnie od przyjętej metody, należy brać pod uwagę naturalną zmienność poszczególnych drzew oraz drzewostanów. Duży wpływ na uzyskany wynik optymalizacji ma dokładność (jakość) określenia przeciętnego oraz bieżącego przyrostu miąższości drzewostanów, a w konsekwencji ilości i wartości zakumulowanego węgla.

Głównym celem pracy było wykazanie, że wynik kalkulacji ilości i wartości wiązane go węgla oraz optymalizacji produkcji w kierunku maksymalizacji wiązania węgla zależy od wielu czynników, m.in. gatunku czy klasy bonitacji. Podobny cel w swoich badaniach przyjął Holtsmark [2012]. Stwierdził on, że kluczowe znaczenie w wymienionych kalkulacjach ma przyjęcie właściwych założeń wejściowych. Pamiętać należy, że w prezentowanym artykule omówiono jedynie problem optymalizacji wartości wiązane go węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej dwóch gatunków: sosny i buka. W kolejnym kroku należałoby podjąć badania mające na celu kompleksowe ujęcie gospodarstwa leśnego (inne gatunki lasotwórcze), z uwzględnieniem także martwej materii organicznej i innych komponentów ekosystemu leśnego. Konieczne jest też podjęcie próby przeanalizowania ilości oraz wartości wiązane go węgla przez drzewostany, w których stosowane są różne sposoby zagospodarowania (rodzaje rębni).

W celu uproszczenia interpretacji wyników ocenie poddano optymalizację funkcji wiązane go węgla w drzewostanach (ochrony powietrza), uwzględniając różne podejścia oraz warianty oceny. Nie analizowano równocześnie innych składników wartości lasu, jak np. wartość funkcji surowcowej oraz funkcji pozaprodukcyjnych (wodochronnej, glebochronnej i innych).

Inny problem zauważył w swoich rozważaniach Gaj [2012], wskazując na brak zharmonizowanej wiedzy z zakresu pochłaniania i uwalniania dwutlenku węgla przez polskie lasy. Zauważył on brak kompleksowego, spójnego modelu umożliwiającego wyjaśnienie sekwestracji CO<sub>2</sub> w warunkach polskiego leśnictwa. Zwrócił też uwagę na korzyści płynące z włączenia lasów do systemu handlu jednostkami pochłaniania, co mogłoby zapewnić dodatkowe środki na zalesienia oraz poprawę jakości gospodarki leśnej. Dyskusja nad znaczeniem lasów w bilansie emisji CO<sub>2</sub>, podejmowana szczególnie intensywnie po szczycie COP21 w Paryżu, sprawiła, że atrakcyjność lasów w tym kontekście znacznie wzrosła.

Analizując uzyskane wartości optymalnego wieku wycięcia ze względu na maksymalizację wartości (ilości) wiązane go węgla, należy, poza stratami w bieżącym przyroście ilości węgla w nadziemnej biomase zdrewniałej, mieć także na uwadze wzrastające rokrocznie ryzyko przeżywalności drzewostanów. W procesie optymalizacji wartości wiązane go węgla powinno się akcentować takie czynniki abiotyczne jak np. pożary czy wartość jednostki emisji pochłaniania [Olschewski i in. 2005; Couture, Reynaud 2011].

Przy ciągle wzrastającym znaczeniu wiązane go węgla przez ekosystemy leśne warto zwrócić uwagę na drzewa i drzewostany poza lasami państwowymi i prywatnymi. Na obszarach miejskich istotne znaczenie w pochłanianiu, a więc i w globalnym bilansowaniu CO<sub>2</sub>, mają drzewa w parkach i lasach miejskich. Możliwość ujęcia ich w równoważeniu ilości CO<sub>2</sub> w atmosferze przeanalizowali m.in. Poudyal i in. [2010] i wydaje się to być istotnym elementem zwiększającym znaczenie drzew i drzewostanów w pochłanianiu dwutlenku węgla.

## Podsumowanie

Weryfikację zaproponowanych metod optymalizacji wiązane go węgla przeprowadzono, wykorzystując dane z Banku Danych o Lasach (opis lasu) oraz z SILP (rozmiar pozyskania drewna). Wykazano, że spośród analizowanych wariantów optymalizacji wieku rębności z punktu widzenia wiązane go węgla metody (podejścia) wykorzystujące wzory allometryczne oraz ABW dają wyniki zasadniczo odstające od pozostałych rozwiązań (podejść). Ponadto wariant bazujący na wzorach allometrycznych (odnoszących się do pojedynczego drzewa) jest trudny do zastosowania w praktyce w kontekście wykorzystania w rachunku optymalizacyjnym danych SILP. Sposoby analizy oparte na gęstości drewna charakteryzują się mniejszą zmiennością osiągniętych wyników optymalizacji. Optymalny wiek rębności, ze względu na maksymalizację wartości węgla zakumulowa-



nego na pniu czy też przyrostu wartości drzewostanów na pniu, jest niższy niż zawarty w Instrukcji urządzenia lasu czy rzeczywisty wiek wyrębu drzewostanów (poza przebudową).

## Literatura

- Asante P.** 2011. Carbon Sequestration and the Optimal Economic Harvest Decision. University of Alberta PHD work.
- Asante P., Armstrong G. W., Adamowicz W. L.** 2011. Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision: A dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. *Journal of Forest Economics* 17(1): 3-17. DOI: 10.1016/j.jfe.2010.07.001.
- Brzeziecki B., Zajączkowski J.** 2012. Obliczenie wielkości zasobów węgla w biomase drzewnej z wykorzystaniem matematycznych modeli lasu. W: *Zmiany klimatu a ekosystemy leśne: zasoby węgla w lasach Polski oraz kierunki adaptacji gospodarki leśnej*. Dokumentacja IBL.
- Chave J., Coomes D. A., Jansen S., Lewis S. L., Swenson N. G., Zanne A. E.** 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12(4): 351-366. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.
- Couture S., Reynaud A.** 2011. Forest management under fire risk when forest carbon sequestration has value. *Ecological Economics* 70(11): 2002-2011. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2011.05.016.
- Gaj K.** 2012. Pochłanianie CO<sub>2</sub> przez polskie ekosystemy leśne. *Leś. Pr. Bad.* 73(1): 17-21.
- Gasparini P., Nocetti M., Tabacchi G., Tosi V.** 2006. Biomass equations and data for forest stands and shrublands of the Eastern Alps. Manuscript.
- Holtmark B.** 2012. Boreal forest management and its effect on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Ecological Modelling* (248): 130-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.006>.
- Jagodziński A. M.** 2011. Raport końcowy z realizacji tematu badawczego „Bilans węgla w biomase drzew głównych gatunków lasotwórczych Polski”. Część III B. Wyniki – Retencja węgla w biomase drzew i drzewostanów. Kórnik.
- Kaipainen T., Liski J., Pussinen A., Karjalainen T.** 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy* 7(3): 205-219. DOI: 10.1016/j.envsci.2004.03.001.
- Krajowy Raport Inwentaryzacyjny.** 2014. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988-2012. Raport wykonany na potrzeby Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz Protokołu z Kioto. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa.
- Olschewski R., Benítez P. C., de Koning G. H. J., Schlichter T.** 2005. How attractive are forest carbon sinks? Economic insights into supply and demand of Certified Emission Reductions. *Journal of Forest Economics* 11(2): 77-94. DOI: 10.1016/j.jfe.2005.04.001.
- Partyka T., Arbatowski S., Sobczak R.** 1994. Optymalizacja wieku rębności drzewostanów dębowych – ekonomiczne problemy programowania hodowlanego. *Sylvan* 138(12): 5-15.
- Partyka T., Arbatowski S., Sobczak R.** 1995. Ekonomiczne problemy programowania hodowlanego – optymalizacja wieku rębności drzewostanów bukowych. *Sylvan*: 139(1): 53-65.
- Poudyal N. C., Siry J. P., Bowker J. M.** 2010. Urban forests' potential to supply marketable carbon emission offsets: A survey of municipal governments in the United States. *Forest Policy and Economics* 12(6): 432-438. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2010.05.002>
- Wysocka-Fijorek E., Zając S.** 2016. Metody optymalizacji wieku dojrzałości rębnej drzewostanów z punktu widzenia wiązania węgla. *Sylvan* 160(9): 720-729.
- Zanne A. E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D. A., Ilic J., Jansen S., Lewis S. L., Miller R. B., Swenson N. G., Wiemann M. C., Chave J.** 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository. DOI: 10.5061/dryad.234.