

JAROSŁAW SOCHA

Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich

Site index curves for Norway spruce on mountain habitats

ABSTRACT

Socha J. 2011. Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich. Sylwan 155 (12): 816-826.

The aim of the study was to develop a site index model for mountain spruce stands. The research material contained the height growth data obtained from stem analysis of 95 trees. The collected material was used to calculate the parameters of four dynamic growth equations, which allowed to determine site productivity and predict height growth based on age and height of stands. The equation that best describes the height growth of the examined spruces was selected from among different solutions using statistical criteria for assessing the accuracy of fitting empirical data and biological realism. The developed model can be used to predict the height growth and determine the site index for mountain spruce stands.

KEY WORDS

site index model, base-age invariant dynamic equation, height growth, *Picea abies* (L.) Karst.

ADDRESSES

Jarosław Socha – e-mail: rlsocha@cyf-kr.edu.pl

Katedra Dendrometrii; Uniwersytet Rolniczy; Al. 29 listopada 46/409; 31-425 Kraków

Wstęp

Dla prowadzenia zrównoważonej gospodarki leśnej uwzględniającej wielofunkcyjną rolę lasów, której podstawowe cele to zapewnienie trwałości ekosystemów leśnych i produkcja drewna, konieczna jest znajomość produktywności siedlisk. Potencjalna produktywność siedliska, która jest informacją o znaczeniu strategicznym [Kukuła i in. 1997], powinna być podstawowym kryterium uwzględnianym przy podejmowaniu specyficznych dla danych siedlisk i gatunków decyzji gospodarczych dotyczących planowania składu gatunkowego, zabiegów hodowlanych, wielkości etatu oraz ustalania wieku rębności [Kayahara i in. 1998; Splechtna 2001; Socha, Orzeł 2011]. Prawidłowa ocena produktywności siedlisk ma szczególnie duże znaczenie dla planowania gospodarczego na obszarach leśnych, których celem jest produkcja drewna [Kayahara i in. 1998; Socha 2010]. Najczęściej wykorzystywaną i najszerzej akceptowaną metodą oceny potencjalnej produktywności siedliska jest wskaźnik bonitacji [Hägglund, Lundmark 1977; Skovsgaard, Vanclay 2008]. Wskaźnik bonitacji siedliska ustalany jest na ogół w postaci wysokości drzewostanu w określonym wieku bazowym, którą wylicza się za pomocą modeli bonitacyjnych. Modele bonitacyjne to najczęściej wzory matematyczne opisujące zmianę z wiekiem wysokości drzewostanu. Poza zastosowaniem do określania bonitacji siedliska modele bonitacyjne są kluczowym komponentem modeli wzrostu drzewostanów [Bruchwald 1985, 1988; Pretzsch i in. 2002]. Z tego względu budowa krzywych bonitacyjnych jest podstawowym zagadnieniem w badaniach nad zróżnicowaniem jakości siedlisk [Palahi i in. 2004] i produktywności lasu [Elfving, Kiviste 1997].

Bonitacja drzewostanów winna być jednym z kryteriów wykorzystywanych w typologii do kartowania siedlisk leśnych. Zalecenie uwzględniania bonitacji drzewostanu przy ustalaniu typu siedliskowego lasu nie jest w praktyce doceniane [Buchwald, Kliczkowska 2000]. Z dotychczasowych badań wynika, że określany w praktyce urządzania typ siedliskowy lasu w wielu przypadkach nie odzwierciedla możliwości produkcyjnych siedliska dla określonych gatunków [Buchwald, Kliczkowska 1997; Lasota 2004]. Według Kliczkowskiej i Bruchwalda [2000] na terenach górskich typ gleby i jej wilgotność nie dają wystarczających podstaw do precyzyjnej oceny potencjalnej produktywności siedlisk górskich. Z badań Bruchwalda i Kliczkowskiej [2000] wypływa wniosek, że aby typ siedliskowy lasu określał możliwości produkcyjne siedliska, należałoby precyzyjniej powiązać go z właściwie zbudowanym systemem krzywych bonitacyjnych.

Odmienne warunki geoklimatyczne, które modyfikują przebieg wzrostu drzewostanów, sprawiają często, że modele bonitacyjne opracowane dla terenów nizinnych nie nadają się do zastosowania w górach [Chen, Klinka 2000]. Stosowanie systemów krzywych bonitacyjnych niedostosowanych do siedliska może być przyczyną błędów oszacowania typu siedliskowego lasu i potencjalnej produktywności siedlisk, a w konsekwencji – niewłaściwych decyzji gospodarczych.

Rozwiązaniem tego problemu jest opracowanie specyficznych dla siedlisk lokalnych modeli bonitacyjnych. Modele bonitacyjne opisujące wzrost wysokości jako funkcję wieku drzewostanów mogą być budowane z wykorzystaniem równań statycznych – zależnych od wieku bazowego, bądź dynamicznych – niezmiennych z wiekiem [Cieszewski, Zasada 2002; Dieguez-Aranda i in. 2005]. Modelowanie wzrostu wysokości przy założeniu stałego wieku bazowego narusza założenia modeli regresyjnych opisane między innymi przez Goelza i Burka [1996] oraz Struba i Cieszewskiego [2002, 2006], a na ostateczną postać modelu duży wpływ ma przyjęcie jego wielkości [Cieszewski i in. 2000]. Problem ten był dostrzeżony już przez Bailey'a i Cluttera [1974], którzy zaproponowali niezmienny od wieku bazowego sposób wyprowadzania modeli bonitacyjnych, nazywany metodą różnic algebraicznych (ang. Algebraic Difference Approach, ADA). W zależności od tego, który parametr równania zostanie przyjęty za parametr siedliskowy, uzyskuje się krzywe bonitacyjne cechujące się poliformizmem bądź zmiennymi asymptotami. Zaproponowana przez Cieszewskiego i Bailey'a [2000] uogólniona metoda różnic algebraicznych (ang. Generalized Algebraic Difference Approach, GADA) pozwala na uwzględnienie więcej niż jednego parametru siedliskowego, co umożliwi opracowanie modeli bonitacyjnych charakteryzujących się równocześnie polimorfizmem i zmiennymi asymptotami dla różnych siedlisk [Cieszewski, Zasada 2002, 2003].

Wbrew światowym standardom w Lasach Państwowych bonitację siedliska dla poszczególnych gatunków, w tym świerka, określa się w praktyce wyrażając ją nadal w zaokrągleniu do klas za pomocą krzywych bonitacyjnych zestawionych przez Szymkiewicza na podstawie tablic opracowanych przez Baura i zmodyfikowanych przez Schwappacha [1912], które w Niemczech zostały wycofane z praktyki leśnej jeszcze w okresie przed II wojną światową [Pretzsch 2003]. Tablice te opisują między innymi zmianę z wiekiem przeciętnej wysokości drzewostanów. Ze względu na zależność od intensywności prowadzonych zabiegów hodowlanych, przeciętna wysokość nie jest dobrym miernikiem produktywności [Assmann 1969].

Bruchwald i współpracownicy [1999] opracowali model bonitacyjny dla świerka w Polsce bazujący na wysokości górnej drzewostanu. Opisuje on uśredniony przebieg wzrostu wysokości górnej drzewostanów świerkowych dla całego obszaru Polski, w związku z tym w specyficznych warunkach wzrostu panujących w górach może niekiedy powodować błędy ustalenia bonitacji

zależne od wieku drzewostanów [Socha 2008, 2010]. Dlatego podjęto próbę opracowania lokalnego modelu bonitacyjnego dla świerka dostosowanego do specyfiki warunków wzrostu w górach.

Materiał i metody

Materiał badawczy stanowią dane z analizy strzał pochodzących z 54 stałych powierzchni badawczych Katedry Dendrometrii UR w Krakowie założonych w latach 1992-1996 w nadleśnictwach Jeleśnia, Ujsoły, Ustroń, Węgierska Górka i Wisła [Socha 1998; Orzeł i in. 1999]. Na każdej powierzchni z górnej warstwy drzewostanu wybrano i ścięto po 3 drzewa próbne (górujące lub panujące). Z każdego drzewa próbnego pobrano krążek z podstawy i pierśnicy oraz z wysokości 0,5 m, a następnie z: 2,0, 4,0, 6,0 m i dalej co 2 m aż do wierzchołka drzewa. Przebieg wzrostu wysokości poszczególnych drzew odtworzono na podstawie wysokości położenia krążków i policzonej na nich liczby słoju rocznych. W związku z tym, że długość sekcji nie pokrywa się z okresowym przyrostem wysokości, wysokość osiąganą przez drzewa w poszczególnych latach skorygowano stosując sposób zaproponowany przez Carmeana [1972]. Opracowane na tej podstawie krzywe wzrostu poddano wstępnej analizie, mającej na celu wyeliminowanie drzew o zakłóconym rytmie wzrostu, wynikającym zarówno z konkurencji międzyosobniczej, jak i innych nieznanymi czynników. W tym celu wzrost poszczególnych drzew był między innymi porównywany z przebiegiem wzrostu grupy drzew o zbliżonej wysokości w wieku 50 lat. W dalszych analizach nie uwzględniano drzew, których krzywa wzrostu gwałtownie przecinała przebieg krzywej dla danej grupy. Pominięto również drzewa, których wzrost w ostatnim okresie uległ znacznemu zahamowaniu, wynikiem czego było silne spłaszczenie krzywych wzrostu. Po przeprowadzonej selekcji spośród zebranego materiału do dalszych analiz wybrano 95 drzew. Ich średni wiek wynosił 77 lat i wahał się od 50 do 154 lat. Średnia wysokość była równa 25,3 m. Najniższe drzewo miało 14,9 m, zaś najwyższe – 34,8 m.

Wybrane drzewa posłużyły do opracowania parametrów modelu bonitacyjnego dla świerka. Na przestrzeni lat do opisu wzrostu wysokości drzewostanów stosowano szereg funkcji matematycznych. Kiviste i in. [2002] udokumentowali 74 przykłady równań matematycznych wykorzystywanych do tego celu. W ostatnim okresie wyprowadzono szereg nowych rozwiązań do opisu wzrostu wysokości różnych gatunków lasotwórczych między innymi w USA [Cieszewski 2003], Szwecji [Elfvig, Kiviste 1997], Finlandii [Karlson 2000], Hiszpanii [Palahí i in. 2004; Barrio Anta, Diéguez-Aranda 2005; Bravo-Oviedo i in. 2007] i Polsce [Bruchwald i in. 1999, 2000; Buchwald, Zasada 2010]. Z uwagi na dużą liczbę dostępnych w literaturze postaci funkcji bonitacyjnych, w przeprowadzonych badaniach nie wyprowadzono nowych modeli, lecz analizy prowadzono w kierunku wyłonienia spośród istniejących rozwiązania najbardziej przydatnego do opisu wzrostu wysokości górskich drzewostanów świerkowych. Na podstawie analizy literatury do budowy modelu bonitacyjnego wybrano wstępnie 4 funkcje. Przy wyborze potencjalnych postaci modeli bonitacyjnych przyjęto założenie, że system bonitacyjny powinien się charakteryzować następującymi właściwościami [Nord-Larsen 2006; Socha, Orzeł 2011]:

- dobre dopasowanie krzywych modelowych do danych empirycznych,
- polimorfizm, który pozwala na uwzględnienie ewentualnych różnic w przebiegu wzrostu, wynikających ze zmienności warunków siedliskowych,
- zmienne asymptoty dla różnych siedlisk,
- równość wartości wskaźnika bonitacji i wysokości w określonym wieku bazowym,
- możliwość stosowania tej samej funkcji jako modelu wzrostu wysokości i modelu bonitacji,
- możliwość biologicznej interpretacji parametrów równania.

Wybrane funkcje, oznaczone dalej symbolami od M1 do M4, były w ostatnich latach z powodzeniem stosowane do modelowania bonitacji licznych gatunków lasotwórczych, w tym świerka pospolitego. Oryginalne symbole zmiennych i parametrów stosowane przez autorów funkcji zastąpiono ujednoliconymi oznaczeniami: H_1 – wysokość w wieku T_1 , H_2 – wysokość w wieku T_2 , H_{100} – średnia wysokość 100 najgrubszych drzew na 1 ha, T_{SI} – wiek bazowy, SI – wskaźnik bonitacji siedliska (wysokość górna H_{SI} w wieku bazowym T_{SI}) oraz β_1 , β_2 , β_3 – parametry równań. Analizie poddano następujące równania:

M1 – wzór zaproponowany przez Elfvinga i Kiviste [1997]:

$$H_2 = \frac{(H_1 + d + r)}{\left[\frac{4 \cdot \frac{\beta_1}{T_2^{\beta_2}}}{(H_1 - d + r)} \right]} \quad [1]$$

gdzie: $d = \frac{\beta_1}{T_{SI}^{\beta_2}}$ [1.1]

$$r = \sqrt{\left[(H_1 - d)^2 + 4 \cdot \beta_1 \cdot \frac{H_1}{T_1^{\beta_2}} \right]} \quad [1.2]$$

Jest to rozszerzona wersja równania wyprowadzonego przez Cieszewskiego i Bellę [1989] na podstawie wzoru Hossfelda, określanego najczęściej w literaturze jako „Hossfeld II” [Peschel 1938; Cieszewski, Zasada 2002]. Pozwala na opracowanie modeli polimorficznych z różnymi asymptotami dla różnych siedlisk. Elfving i Kiviste [1997] wybrali je spośród 13 innych wzorów jako najlepsze do budowy krzywych bonitacyjnych dla sosny zwyczajnej w Szwecji. Równanie to było testowane przy opracowywaniu wcześniejszych wersji modelu bonitacyjnego dla świerka z Beskidów Zachodnich [Socha 2008, 2010].

M2 – formuła wyprowadzona przez Cieszewskiego i in. [2007] w celu opisu historycznych krzywych wzrostu wysokości sosny zwyczajnej opracowanych przez Schwappacha [1912]:

$$H_2 = H_1 \frac{T_2^{\beta_1} (T_1^{\beta_1} R + e^{\beta_2})}{T_1^{\beta_1} (T_2^{\beta_1} R + e^{\beta_2})} \quad [2]$$

gdzie:

$$R = \beta_3 + H_1 + \sqrt{(\beta_3 + H_1)^2 + \frac{2 \cdot H_1 \cdot e^{\beta_2}}{T_1^{\beta_1}}} \quad [2.1]$$

M3 – równanie różnicowe wyprowadzone z funkcji Hossfelda [Peschel 1938]:

$$H_2 = \frac{T_2^2}{\beta_1 + T_2 \left(\frac{T_1}{H_1} - \beta_3 \cdot T_1 - \frac{\beta_1}{T_1} + \beta_3 \cdot T_2 \right)} \quad [3]$$

Wzór ten był zastosowany do budowy modelu bonitacyjnego dla sosny zwyczajnej z północno-wschodniej Hiszpanii [Palahí i in. 2004].

M4 – równanie zbudowane na bazie funkcji wzrostu Korfa [Barrio Anta, Diéguez-Aranda 2005]:

$$H_2 = \beta_1 \left(\frac{H_1}{\beta_1} \right)^{\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\beta_2}} \quad [4]$$

Parametry wybranych równań obliczono w oparciu o dane, jakimi były wysokości analizowanych drzew w poszczególnych latach ich życia. Wyboru najlepszego równania dokonano w oparciu o kryteria statystyczne opisujące dokładność dopasowania modeli do danych empirycznych [Palahí i in. 2004; Socha, Wężyk 2007]. Zastosowano:

– błąd średni

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \hat{H}_i)}{n} \quad [5]$$

– średni błąd kwadratowy

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \hat{H}_i)^2}{n - p}} \quad [6]$$

– dopasowany współczynnik determinacji

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad [7]$$

– rozkład wartości resztowych względem przewidywanych według modelu.

Opracowane modele poddano również analizie biologicznej poprawności, polegającej na ocenie wiarygodności osiąganych wartości modelowych i zgodności przebiegu krzywych wzrostu oraz krzywych bieżącego rocznego przyrostu wysokości z ogólnie znanymi prawidłowościami. Na podstawie wymienionych kryteriów spośród 4 równań wybrano funkcję najbardziej adekwatną, którą wykorzystano do budowy ostatecznej wersji modelu bonitacyjnego.

Wyniki

W wyniku oszacowania parametrów poszczególnych funkcji wzrostu (tab.) uzyskano 4 dynamiczne modele bonitacyjne, które z uwagi na właściwości zastosowanych równań różnicowych są jednocześnie modelami wzrostu wysokości. Uzyskane modele wykazują rozbieżności w przebiegu wzrostu wysokości zależne zarówno od wieku drzewostanu, jak i siedliska.

Na podstawie przyjętych kryteriów oceny dokładności ustalono, że najlepszymi właściwościami charakteryzują się systemy krzywych bonitacyjnych zbudowane na bazie równań M1 i M2, w przypadku których stwierdzono najmniejsze wartości średniego błędu kwadratowego oraz najwyższe współczynniki determinacji ($R_{adj}^2 = 0,98501$). Pod względem możliwości ekstrapolacji danych i poprawności biologicznej uzyskanych krzywych przyrostu wysokości lepszymi właściwościami charakteryzowało się jednak równanie M2, w związku z czym model statystyczny zbudowany na jego podstawie zastosowano do opracowania lokalnego systemu krzywych bonitacyjnych dla górskich drzewostanów świerkowych (wzór [8], ryc. 1):

$$H_2 = H_1 \frac{T_2^{1,95817} (T_1^{1,95817} R + 66568,71)}{T_1^{1,95817} (T_2^{1,95817} R + 66568,71)} \quad [8]$$

gdzie:

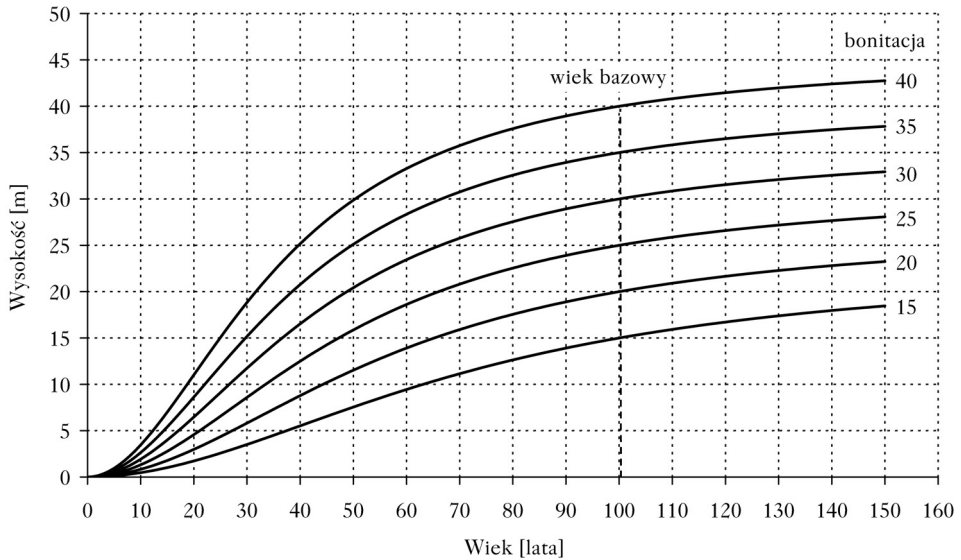
$$R = -15,03036 + H_1 + \sqrt{(-15,03036 + H_1)^2 + \frac{2 \cdot H_1 \cdot 66568,71}{T_1^{1,95817}}} \quad [8.1]$$

Tabela.

Parametry analizowanych równań, dokładność ich oszacowania oraz statystyki charakteryzujące stopień dopasowania do danych empirycznych

Parameters of analysed equations, accuracy of estimation and statistics describing goodness of fit to empirical data

Równanie	Parametr	Ocena	Błąd standardowy	ME	RMSE	R^2_{adj}
M1	β_1	32099,1	1703,02	0,036555	1,1123	0,98501
	β_2	1,9567	0,0196			
M2	β_1	1,9521	0,0210	0,036368	1,1122	0,98501
	β_3	14,3395	1,5584			
M3	β_1	36,6732	0,9178	-0,017364	1,1138	0,98496
	β_3	0,0247	0,0006			
M4	β_0	83,830	3,7000	-0,223418	1,3760	0,97705
	β_2	0,6467	0,0181			



Ryc. 1.

Krzywe bonitacyjne świerka dla siedlisk górskich

Site index curves of Norway spruce for mountain habitats

Liczby po prawej stronie odnoszą się do wysokości w wieku bazowym 100 lat

Number on the right refer to the height at base age of 100 years

Korzystając z omawianego modelu, na podstawie wieku i wysokości drzewostanu (T_1, H_1) można wyliczyć wysokość drzewostanu H_2 w dowolnym wieku T_2 . Przy obliczaniu bonitacji zgodnie ze standardami europejskimi za wartość wieku bazowego T_2 przyjmuje się na ogół 100 lat, jednak z uwagi na właściwości zastosowanej funkcji w przypadku opracowanego modelu istnieje możliwość stosowania dowolnego wieku bazowego. Na podstawie opracowanych krzywych bonitacyjnych obliczono krzywe przyrostu wysokości drzewostanów świerkowych Beskidów Zachodnich (ryc. 2). Wiek kulminacji przyrostu wysokości górskich drzewostanów świerkowych jest związany z bonitacją i wynosi od około 20 lat dla najwyższych bonitacji wynoszących około 40 m do około 40 lat dla bonitacji najniższych zbliżonych do 15 m (ryc. 2).

Zastosowanie do budowy modelu bonitacyjnego równania wyprowadzonego uogólnioną metodą różnic algebraicznych sprawia, że opracowany model jest funkcją trójwymiarową (ryc. 3), która w zależności od sformułowania może być stosowana jako model bonitacyjny pozwalający wyliczyć bonitację (SI) jako funkcję wieku (T) i wysokości (H) drzewostanu:

$$SI = H_1 \frac{8247,84 \cdot (T_1^{1,95817} \cdot R + 66568,71)}{T_1^{1,95817} \cdot (8247,84 \cdot R + 66568,71)} \quad [9]$$

gdzie:

$$R = -15,03036 + H_1 + \sqrt{(-15,03036 + H_1)^2 + \frac{2 \cdot H_1 \cdot 66568,71}{T_1^{1,95817}}} \quad [9.1]$$

lub jako model wzrostu wysokości pozwalający na prognozowanie przebiegu wzrostu wysokości dla danej bonitacji siedliska:

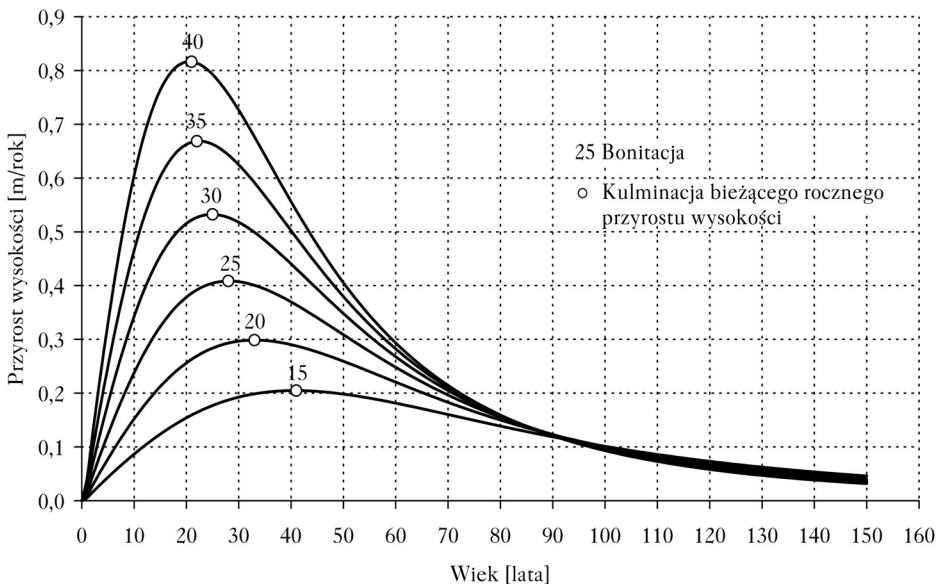
$$H = SI \frac{T_1^{1,95817} (8247,84 \cdot R + 66568,71)}{8247,84 \cdot (T_1^{1,95817} \cdot R + 66568,71)} \quad [10]$$

gdzie:

$$R = -15,03036 + SI + \sqrt{(-15,03036 + SI)^2 + \frac{2 \cdot SI \cdot 66568,71}{8247,84}} \quad [10.1]$$

Dyskusja

Modele opisujące bonitację i wzrost wysokości mogą być budowane na podstawie danych o wieku i wysokości pochodzących z trzech źródeł [Raulier i in. 2003; Garcia 2005]: czasowych powierzchni próbnych (TSP), stałych powierzchni próbnych (PSP) oraz analizy strzał (SA). Dane z TSP są relatywnie najłatwiejsze do uzyskania, gdyż mogą pochodzić z pomiarów, które okresowo



Ryc. 2.

Przyrost wysokości świerka na różnych siedliskach obliczony według opracowanego modelu bonitacyjnego
Height increment of Norway spruce on different sites calculated according to developed site index model

wykonuje się w lasach w ramach prac inwentaryzacyjnych. Na ich podstawie przez wykreślenie i ekstrapolację krzywej wiodącej [np. Mathiasen i in. 2006], można opracować modele anamorficzne. Stosowanie modeli opracowanych tą metodą jest jednak często przyczyną systematycznych błędów określenia bonitacji związanych z wiekiem drzewostanów. Obserwuje się wówczas ujemną korelację pomiędzy wiekiem a bonitacją drzewostanu. Związek ten może być przyczyną zaniżania bonitacji dla drzewostanów młodszych od przyjętego wieku bazowego oraz jej zawyżania dla drzewostanów starszych [Biging 1985; Walters i in. 1989; Natang, Nunifu 1999], co obniża wartość TSP jako źródła danych do budowy krzywych bonitacyjnych [Karlson 2000]. Niewątpliwie najlepszym źródłem danych o wzroście wysokości drzewostanów są pomiary wykonywane okresowo na stałych powierzchniach próbnych. Ten sposób pozyskiwania danych jest jednak bardzo pracochłonny i wymaga długotrwałego prowadzenia zaplanowanych doświadczeń.

Względnie łatwo dostępnym i jednocześnie najczęściej wykorzystywanym źródłem danych o wzroście wysokości drzew są informacje uzyskane na podstawie analiz strzał. Liczba słoł przyrostu rocznego z różnych wysokości pnia stanowi ciągły zapis zmian wysokości drzewa wraz z wiekiem, który można odtworzyć metodą analizy strzały. Dane z SA pozwalają na budowę polimorficznych krzywych bonitacyjnych [Monserud 1984]. Różnice stwierdzone w przebiegu wzrostu wysokości drzew i drzewostanu [Raulier i in. 2003; García 2005] wskazują na konieczność zachowania ostrożności przy interpretacji wyników uzyskanych na podstawie tak zebranego materiału empirycznego. Przy budowie krzywych bonitacyjnych opracowanych na podstawie danych o wzroście drzew uzyskanych metodą analizy strzał, szczególną uwagę należy zwrócić na odpowiednią selekcję drzew. Nie wszystkie drzewa należące w momencie ścięcia do górnej warstwy drzewostanu przez cały czas swojego życia do niej należały. Konieczna więc jest nie tylko ocena przebiegu krzywej wzrostu każdego drzewa w świetle ogólnych prawidłowości wzrostu wysokości, lecz także skonfrontowanie pojedynczych krzywych wzrostu z ogólnym trendem wzrostu wysokości reprezentowanym przez grupę drzew o zbliżonej bonitacji (wysokości w określonym wieku bazowym). W prezentowanych badaniach omawianej oceny dokonano stosując we wstępnych analizach wiek bazowy 50 lat i porównując przebieg wzrostu wysokości każdego z drzew z ogólnym trendem wzrostu reprezentowanym przez pozostałe drzewa o zbliżonej bonitacji. Z dalszych analiz odrzucono drzewa, dla których krzywa wzrostu gwałtownie przecinała krzywe wzrostu pozostałych, co zmniejszyło prawdopodobieństwo, że wykorzystane do budowy modelu drzewa górujące i panujące w młodym wieku należały do drzew współpanujących, opanowanych bądź przygłuszonych. Dzięki tak przeprowadzonej weryfikacji danych empirycznych zmniejszono prawdopodobieństwo, że opracowany model będzie zawyżał bonitację drzewostanów młodych i zaniżał bonitację drzewostanów najstarszych klas wieku. Zjawisko takie obserwowane jest wówczas, gdy model bonitacyjny jest opracowany na podstawie drzew pochodzących w momencie ścięcia z górnej warstwy drzewostanu, ale które wcześniej zajmowały niższe stanowiska biosocjalne [Raulier i in. 2003].

Z licznych przykładów funkcji stosowanych do budowy krzywych bonitacyjnych wybrano jedynie dynamiczne postaci modeli, których parametry oszacowano bez konieczności wyboru stałego wieku bazowego. Przy wyborze modelu opisującego bonitację, poza jakością dopasowania, która, jak się wydaje, jest przez licznych autorów przeceniana, pod uwagę brano również zgodność uzyskanego przebiegu wzrostu wysokości ze znanymi powszechnie prawidłowościami. Równanie M2, które wykazywało najlepsze dopasowanie do danych empirycznych, okazało się jednocześnie wiarygodne z punktu widzenia biologicznej poprawności, ocenionej na podstawie wielkości i przebiegu bieżącego przyrostu wysokości. Określony na jego podstawie wiek

kulminacji bieżącego przyrostu wysokości rośnie wraz z pogarszaniem się jakości siedliska, a wartość przyrostu w wieku kulminacji dla poszczególnych bonitacji przyjmuje wartości realne dla warunków siedliskowych występujących w górach. Ponadto, dla dość szerokiego zakresu wieku wynoszącego od 0 do 150 lat, przyrost bieżący osiąga tym wyższe wartości, im wyższa jest bonitacja drzewostanu. Zbliżoną dokładność dopasowania do danych empirycznych stwierdzono w przypadku równań M1, M2 i M3. Ze względu jednak na przebieg określonego na ich podstawie przyrostu, wiek jego kulminacji oraz wartość przyrostu w wieku kulminacji, równania M1 i M3 okazały się mniej adekwatne. Wybrane do budowy modelu bonitacyjnego równanie dynamiczne opracowane przez Cieszewskiego i in. [2007] charakteryzuje się zarówno polimorfizmem, jak i zmiennymi asymptotami, co z prawdopodobnie miało kluczowe znaczenie dla dobrego dopasowania do danych empirycznych i poprawność biologiczną.

Podsumowanie

Opracowany w ramach prezentowanych badań model bonitacyjny dla świerka, który jest równocześnie modelem wzrostu wysokości, może być stosowany do określania bonitacji siedliska i prognozowania wzrostu wysokości na podstawie wieku i wysokości drzewostanu. Istnieje jednak potrzeba podjęcia badań nad modelami bonitacyjnymi specyficznymi dla siedlisk, które poza cechami drzewostanów powinny uwzględniać zmienne siedliskowe.

Literatura

- Assmann E. 1968. Nauka o produktywności lasu. PWRiL, Warszawa.
- Bailey R. L., Clutter J. L. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *For. Sci.* 20 (2): 155-159.
- Barrio Anta M., Diéguez-Aranda U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). *Eur. J. For. Res.* 124 (1): 19-28.
- Biging G. S. 1985. Improved estimates of site index curves using a varying-parameter model. *For. Sci.* 31 (1): 248-259.
- Bruchwald, A. 1985. Model wzrostowy MDI-1 dla sosny. *Las Pol.* 9: 10-15.
- Bruchwald, A. 1988. Introductory program of the MDI-1 growth model for Scots pine. *Ann. Warsaw Agric. Univ. – SGGW-AR, For. Wood Technol.* 36: 3-9.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wroblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. *Sylvan* 143 (1): 19-31.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 1997. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. *Prace IBL* s. A 838.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 2000. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. W: *Prze-strzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*, Fundacja Rozwój SGGW. 30-41.
- Buchwald A., Zasada M. 2010. Model wzrostu modrzewia europejskiego. *Sylvan* 154 (9): 615-624.
- Carmean W. H. 1972. Site index curves for upland oaks in the central states. *For. Sci.* 18 (2): 109-120.
- Chen H. Y., Klinka K. 2000. Height growth models for high-elevation subalpine fir, Engelmann spruce, and lodgepole pine in British Columbia. *West. J. For. Sci.* 15 (2): 62-69.
- Cieszewski C. J. 2003. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y^3=(ax^m)/(c+x^{m-1})$, a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *For. Sci.* 49 (4): 539-554.
- Cieszewski C. J., Bailey R. L. 2000. Generalized algebraic difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *For. Sci.* 46 (1): 116-126.
- Cieszewski C. J., Bella I. E. 1989. Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Can. J. For. Res.* 19: 1151-1160.
- Cieszewski C. J., Harrison M. W., Martin S. W. 2000. Examples of practical methods for unbiased parameter estimation in self-referencing functions. *1st Int. Conf. on Measurements and Quantitative Methods and Management*, Jekyll Island, Georgia, 17-18 Nov. 1999. 1-10.
- Cieszewski C. J., Strub M., Zasada M. 2007. New dynamic site equation that fits best Schwappach data for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Central Europe. *For. Ecol. Manage.* 243 (1): 83-89.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2002. Dynamiczna forma anamorficznego modelu bonitacyjnego dla sosny pospolitej w Polsce. *Sylvan* 146 (7): 17-24.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2003. Wyprowadzanie ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych za pomocą uniwersalnej metody różnic algebraicznych. *Sylvan* 147 (3): 40-46.

- Diéguez-Aranda U., Álvarez González J. G., Barrio Anta M., Rojo Alboreca A. 2005. Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (north-western Spain). *Ann. For. Sci.* 62 (2): 143-152.
- Elfving B., Kiviste A. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *For. Ecol. Manage.* 98 (2): 125-134.
- García O. 2005. Comparing and combining stem analysis and permanent sample plot data in site index models. *For. Sci.* 51 (4): 277-283.
- Goelz J. C. G., Burk T. E. 1996. Measurement error causes bias in site index equations. *Can. J. For. Res.* 26: 1586-1593.
- Hägglund B., Lundmark J. E. 1977. Site index estimation by means of site properties of Scots pine and Norway spruce in Sweden. *Stud. For. Suec.* 138: 5-38.
- Karlsson K. 2000. Height growth patterns of Scots pine and Norway spruce in the coastal areas of western Finland. *For. Ecol. Manage.* 135 (1-3): 205-216.
- Kayahara G. J., Klínka K., Marshall P. L. 1998. Testing site index-site-factor relationships for predicting *Pinus contorta* and *Picea engelmannii* × *P. glauca* productivity in central British Columbia, Canada. *For. Ecol. Manage.* 110 (1-3): 141-150.
- Kliczkowska A., Bruchwald A. 2000. Kształtowanie się bonitacji drzewostanów świerkowych na terenach górskich. *Sylvan* 144 (9): 5-15.
- Kukuła J., Miś R., Ważyński B., Żółciak E. 1997. Zagadnienia praktyczne z urządzania lasu. Wyd. AR, Poznań.
- Lasota J. 2004. Gleby siedlisk leśnych Żywiecczyny. I. Siedliska niskiego regła dolnego. *Sylvan* 148 (2): 3-10.
- Mathiasen R. L., Olsen W. K., Edminster C. B. 2006. Site index curves for white fir in the southwestern United States developed using a guide curve method. *West. J. Appl. For.* 21 (2): 87-93.
- Monserud R. A. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *For. Sci.* 30 (4): 943-965.
- Nanang D. M., Nunifu T. K. 1999. Selecting a functional form for anamorphic site index curve estimation. *For. Ecol. Manag.* 118 (1-3): 211-221.
- Nord-Larsen T. 2006. Developing Dynamic Site Index Curves for European Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *For. Sci.* 52 (2): 173-181.
- Orzeł S., Socha J., Ochał W. 1999. Produkcyjność górskich drzewostanów świerkowych średnich klas wieku w zależności od ich położenia nad poziomem morza. *Sylvan* 143 (5): 37-45.
- Palahí M., Tomé M., Pukkala T., Trasobares A., Montero G. 2004. Site index model for *Pinus sylvestris* in north-east Spain. *For. Ecol. Manage.* 187 (1): 35-47.
- Peschel W. 1938. Die mathematischen Methoden zur Herleitung der Wachstums-gesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. *Tharandter Forstl. Jahrbuch* 89: 169-274.
- Pretsch H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model.* Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Pretsch H., Biber P., Ďurský J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For. Ecol. Manage.* 162 (1) : 3-21.
- Raulier F., Lambert M., Pothier D., Ung Ch. 2003. Impact of dominant tree dynamics on site index curves. *For. Ecol. Manage.* 184: 65-78.
- Schwappach A. 1912. *Ertragstabellen der wichtigeren Holzarten in tabellarischer und graphischer form.* Verlag J. Neumann, Neudamm.
- Skovsgaard J. P., Vanclay J. K. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81 (1): 13-31.
- Socha J. 1998. Zależność bonitacji drzewostanów świerkowych od wysokości położenia nad poziomem morza. *Sylvan* 142 (9): 25-31.
- Socha J. 2008. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23 (3): 203-213.
- Socha J. 2010. Metoda modelowania potencjalnych zdolności produkcyjnych świerka w górach. *Zesz. Nauk. Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie – rozprawy* 461.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylvan* 155 (5): 301-312.
- Socha J., Wężyk P. 2007. Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. *Eur. J. For. Res.* 126 (2): 263-270.
- Splechtna B. E. 2001. Height growth and site index models for Pacific silver fir in southwestern British Columbia. *B. C. Journal of Ecosystems and Management* 1 (1): 1-14.
- Strub M., Cieszewski C. J. 2006. Base-age invariance properties of two techniques for estimating the parameters of site index models. *For. Sci.* 52 (2): 182-186.
- Walters D. K., Gregoire T. G., Burkart H. E. 1989. Consistent estimation of site index curves fitted to temporary plot data. *Biometrics* 45 (1): 24-33.

SUMMARY

Site index curves for Norway spruce on mountain habitats

The potential site productivity should be the primary criterion taken into consideration while making economic decisions relating to planning the species composition, silvicultural treatments, prescribed cut and rotation age determination for a given site and tree species. Site index which is described by site index curves based on the age and height of stands is the most common measure of potential site productivity. To reliably determine site productivity it is necessary to develop a site index model adapted to site conditions. The aim of the study was to develop a site index model for mountain spruce stands.

The research material consisted of data from stem analysis of 95 spruce trees from 54 permanent research plots located in the Western Beskid Mountains. The growth of individual trees was determined on the basis of the height position of discs on the stems and the number of annual rings. To develop a site index model, four dynamic growth equations were initially adopted. On the basis of the statistical criteria for assessing the accuracy of fitting empirical data (tab.) and biological realism, the equation that best describes the height growth of the examined spruces was selected from among various solutions. The selected function was used to develop a dynamic system of site index curves for mountain spruce stands.

Due to the dynamic nature of the base function, the resultant model is a polymorphic model with different asymptotes for different sites (fig. 1). The developed system of site index curves allows both to calculate the site index [eq. 8] and predict the height growth [eq. 9] based on stand age and height.