

JAROSŁAW SOCHA, WOJCIECH OCHAŁ, STANISŁAW GRABCZYŃSKI, MAREK MAJ

Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności*

Site index models for forest-forming tree species in Poland developed basing on the yield tables

ABSTRACT

Socha J., Ochał W., Grabczyński S., Maj M. 2015. Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności. Sylwan 159 (8): 639-649.

The objectives of this work was to develop a site index models for main forest-forming tree species in Poland based on data from published yield tables. The research material include growth series of birch, European beech, common oak, red oak, European hornbeam, European ash, Norway maple, small-leaved lime, black alder, trembling aspen, locust, Douglas fir, silver fir, European larch, Scots pine, and Norway spruce. Six algebraic difference models were preliminary selected for the construction of site index model. When selecting a potential models an assumption was made, that the index system should be characterized by good fit to the empirical data, polymorphism, variable asymptotes for different sites and equality of the site index and height at a certain base age. To estimate parameters of individual models all possible combinations among height-age pairs for each tree were used. The selection of the best model was based on fit criteria describing: proportion of variance explained, error range and standard deviation of the residuals. Best fitting model was selected basing on the sum of ranks from individual criteria and for each individual tree species a separate model was selected, which fits the best growth series from the yield tables. For 16 out of 19 species, the best fit statistics were demonstrated by the model developed on the base of the function [2]. Developed models may be used both in forestry practice and forestry research in order to estimate site index for analyzed tree species.

KEY WORDS

site index, site index model, height growth models

ADDRESSES

Jarosław Socha – e-mail: rsocha@cyf-kr.edu.pl
 Wojciech Ochał – e-mail: rlochal@cyf-kr.edu.pl
 Stanisław Grabczyński – e-mail: rlgrabcz@cyf-kr.edu.pl
 Marek Maj – e-mail: marek.maj@radom.lasy.gov.pl

Zakład Biometrii i Produkcji Lasu, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

Wstęp

W praktyce leśnej bonitacja traktowana jest jako miara potencjalnej zdolności produkcyjnej siedliska. Jest ona konieczna do formułowania strategicznych celów gospodarczych, a także do planowania bieżących działań uwzględniających postulaty trwałej i zrównoważonej gospodarki leśnej

*Badania przeprowadzono w ramach projektu nr N N309 066939 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki oraz w ramach tematu DS-3418/ZBiPL/15.

[Kukuła i in. 1997; Cieszewski i in. 2000]. Skovsgaard i Vanclay [2008] wyróżniają dwie grupy metod określania bonitacji: geocentryczne i fitocentryczne. W metodach geocentrycznych bonitację wyraża się poprzez charakterystyki siedliska, takie jak cechy klimatu, topografii i gleby. W metodach fitocentrycznych do oszacowania bonitacji wykorzystuje się cechy roślinności, najczęściej liczbowe miary charakteryzujące drzewostan. Ze względu na prostotę i praktyczną użyteczność metody fitocentryczne zostały powszechnie zaadaptowane w leśnictwie. Już od końca XIX wieku za najbardziej przydatną w gospodarce leśnej miarę potencjalnej zdolności produkcyjnej siedliska uznaje się bonitację określoną na podstawie wysokości i wieku drzewostanu, wyrażoną jako wskaźnik lub klasa bonitacji [Assmann 1968; Skovsgaard, Vanclay 2008]. Klasa bonitacji obejmuje grupę drzewostanów o zbliżonym przebiegu wzrostu wysokości wyznaczoną przez arbitralnie przyjęte granice. Ustala się ją, porównując wysokość drzewostanu osiągniętą w danym wieku z empirycznym wzorcem wzrostu wysokości opracowanym dla siedlisk o zbliżonej bonitacji. Zaletą tego sposobu wyrażania bonitacji jest prostota i łatwość praktycznego zastosowania. Wadą jest zbyt ogólny wynik określenia bonitacji – wynikający ze skokowego (dyskretnego) charakteru skali, który nie uwzględnia wystarczająco precyzyjnie różnic pomiędzy drzewostanami, przez co drzewostany zaliczone do tej samej klasy często różnią się zdolnościami produkcyjnymi bardziej niż drzewostany zaliczone do sąsiednich klas bonitacji. Ponadto stosowana skala utrudnia interpolację i ekstrapolację wyników oraz użycie tak określonej bonitacji w analizach z wykorzystaniem modelowania statystycznego.

Innym sposobem przedstawiania bonitacji drzewostanu jest jej bezpośrednie wyrażenie w postaci wysokości, jaką osiągnie lub osiągnął drzewostan w przyjętym wieku bazowym. Bonitacja wyrażona w postaci wysokości w wieku bazowym nazywana jest wskaźnikiem bonitacji. Określenie wskaźnika bonitacji wymaga jednak dysponowania matematycznym modelem wzrostu wysokości umożliwiającym przeliczanie wysokości drzewostanu w danym wieku na wysokość w wieku bazowym. Modele takie nazywane są modelami bonitacyjnymi lub siedliskowymi [Cieszewski, Zasada 2002; Socha, Orzeł 2011].

Pierwsze próby matematycznego opisanie krzywych wzrostu wysokości podejmowano już w XIX wieku [Hossfeld 1822 za Cieszewski 2001; Seidl 1837 za Peschel 1938; Gram 1879 za Nord-Larsen 2006]. Zasadniczy rozwój badań dotyczących modelowania wzrostu wysokości nastąpił z początkiem XX wieku i był inspirowany przez prace Hugershoffa, Korsuńa, Pettersona, Robertsona i Schumachera [Korf 1953; Meyer 1959]. Na przestrzeni lat rozwijano i doskonalono metody budowy modeli bonitacyjnych. Najprostsze modele, określane mianem statycznych lub „zależnych od wieku” [Cieszewski, Zasada 2002, 2003b], były opracowywane dla jednego arbitralnie ustalonego wieku bazowego. Zaproponowana przez Bailey'a i Cluttera [1974] metoda różnic algebraicznych pozwala uzyskać modele dynamiczne, umożliwiające przewidywanie wysokości dla dowolnego wieku bazowego [Cieszewski, Zasada 2002, 2003b]. W pierwszym okresie do budowy modeli bonitacyjnych wykorzystywano funkcje anamorficzne, które dla różnych warunków wzrostu (bonitacji) posiadały ten sam kształt, lecz różniły się asymptotami [Cieszewski, Zasada 2003b], później funkcje te zastąpiono formami polimorficznymi o zmiennym kształcie i różnych asymptotach [Cieszewski, Strub 2007; Cieszewski i in. 2007].

W Polsce opracowano dotychczas statyczne [Bruchwald 1977; Bruchwald i in. 1999, 2003, 2011] oraz dynamiczne [Socha 2011; Socha, Orzeł 2011, 2013] modele bonitacyjne opisujące zmianę wysokości górnej drzewostanów. W krajowej praktyce zarządzania lasu do oceny potencjalnych zdolności produkcyjnych wykorzystuje się jednak wysokość przeciętną i empiryczne wzorce jej zmian z wiekiem zamieszczone w tablicach zasobności [Schwappach 1943; Szymkiewicz 1948, 2001; Czurał 1997]. Zawarte w tablicach dane liczbowe, opisujące zmianę przeciętnej

wysokości drzewostanu wraz z wiekiem dla siedlisk różnych bonitacji, pozwalają na opracowanie matematycznych postaci modeli bonitacyjnych i wykorzystanie ich do wyznaczania wskaźnika bonitacji. Dotychczas podejmowano już próby matematycznego sformalizowania zawartych w tablicach danych liczbowych. Jarosz i Kłapeć [2002] ocenili dokładność i przydatność krzywej Gompertza do opisu wzrostu wybranych cech drzewostanów zawartych w tablicach zasobności. Cieszewski i Zasada [2003] opracowali model bonitacyjny dla sosny z wykorzystaniem dynamicznej formy równania bonitacyjnego opracowanego przez Cieszewskiego [2001], charakteryzującej się polimorfizmem i różnymi asymptotami. Bijak i in. [2014] przedstawili matematyczny model wzrostu wysokości brzozy. Pomimo starań wielu autorów nadal brakuje modeli bonitacyjnych opisujących zmianę z wiekiem przeciętnej wysokości drzewostanów dla wielu głównych gatunków lasotwórczych Polski. Opracowanie modeli bonitacyjnych na podstawie tablic może wypełnić obecną lukę, a także poszerzyć możliwości wykorzystania informacji zawartych w tablicach. Z jednej strony umożliwi dokładniejsze wyznaczanie bonitacji przez wyrażenie jej za pomocą ciągłej skali liczbowej, co jest nieodzowne w modelowaniu produktywności, z drugiej strony pozwoli praktykom na szybsze i wygodniejsze wyznaczanie bonitacji za pomocą algorytmów, które można zaimplementować w stosowanych obecnie systemach informatycznych.

Celem pracy jest opracowanie modeli bonitacyjnych odzwierciedlających możliwie precyzyjnie zawarte w tablicach zasobności dane liczbowe opisujące zmianę z wiekiem przeciętnej wysokości drzewostanu. Opracowane w ten sposób modele mogą być stosowane w praktyce oraz badaniach naukowych do określania wskaźnika bonitacji siedliska do czasu opracowania nowych modeli bonitacyjnych bazujących na wysokości górnej.

Material i metody

Materiał badawczy wykorzystany w badaniach stanowiły dane pochodzące z „Tablic zasobności i przyrostu drzewostanów” [Schwappach 1943; Czura 1997; Szymkiewicz 2001] dla następujących gatunków: sosna zwyczajna (silniejsze i słabsze zabiegi), jodła, jesion, osika, brzoza, olsza (według tablic Schwappacha i tablic Tiurina), dąb (silniejsze i słabsze zabiegi), buk, modrzew, świerk, robinia akacjowa, dąb czerwony, daglezwia, grab, lipa i klon. W analizach wykorzystano następujący zestaw cech: gatunek, wiek oraz odpowiadające mu wysokości. Dla każdego gatunku zestawiono wysokości drzewostanów (H_1) w określonym wieku (T_1) oraz odpowiadające im wysokości (H_2) w wieku bazowym (T_2).

W literaturze istnieje bardzo duża liczba funkcji, które mogą być potencjalnie stosowane do budowy modeli bonitacyjnych [Peschel 1938; Elfving, Kiviste 1997; Cieszewski, Bailey 2000; Cieszewski 2002; Kiviste i in. 2002; Barrio Anta, Dieguez-Aranda 2005]. W przeprowadzonych badaniach nie wypracowano nowych równań różnicowych, lecz prowadzono analizy w kierunku wyłonienia spośród istniejących funkcji rozwiązań najlepiej opisujących dane liczbowe zawarte w tablicach. Przy wyborze funkcji bazowych przyjęto założenie, że system krzywych bonitacyjnych powinien się charakteryzować następującymi właściwościami [Palahí 2004; Socha, Orzeł 2013]:

- dobrym dopasowaniem krzywych modelowych do danych empirycznych,
- polimorfizmem, który pozwoli na uwzględnienie ewentualnych różnic w przebiegu wzrostu, wynikających ze zmienności warunków siedliskowych,
- zmiennymi asymptotami dla różnych siedlisk,
- równością wartości wskaźnika bonitacji i wysokości w określonym wieku bazowym,
- możliwością stosowania tej samej funkcji jako modelu wzrostu wysokości i modelu bonitacji.

Na podstawie studiów literatury wybrano do wstępnych analiz sześć funkcji spełniających większość założonych kryteriów. Wybrane funkcje były stosowane do modelowania bonitacji licznych gatunków lasotwórczych. Stosowane w nich oryginalne symbole zmiennych i parametrów zastąpiono następującymi ujednoczonymi oznaczeniami: H_1 – wysokość w wieku T_1 , H_2 – wysokość w wieku bazowym T_2 , natomiast kolejne wartości parametrów oznaczono jako β_1 , β_2 , a w przypadku funkcji z trzema parametrami β_3 .

Modele bonitacyjne opracowano, wykorzystując następujące funkcje:

– funkcję wyprowadzoną przez Cieszewskiego [2001] na bazie funkcji Monseruda:

$$H_2 = H_1 \frac{T_2^{\beta_1} (T_1^{\beta_1} R + \beta_2)}{T_1^{\beta_1} (T_2^{\beta_1} R + \beta_2)} \quad [1]$$

gdzie:

$$R = Z + \left(Z^2 + \frac{2\beta_2 H_1}{T_1^{\beta_1}} \right)^{0,5} \quad [1.1]$$

$$Z = H_1 - \beta_3 \quad [1.2]$$

– funkcję wyprowadzoną przez Cieszewskiego [2001] wykorzystaną do budowy modelu bonitacyjnego dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza [Cieszewski, Zasada 2003a]:

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

gdzie:

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

– równanie różnicowe wyprowadzone z funkcji Hossfelda [Palahí i in. 2004]:

$$H_2 = \frac{T_2^2}{\beta_1 + T_2 \left(\frac{T_1}{H_1} - \beta_2 \cdot T_1 - \frac{\beta_1}{T_1} + \beta_2 \cdot T_2 \right)} \quad [3]$$

– funkcję wykorzystywaną do budowy modeli bonitacyjnych w Kolumbii Brytyjskiej [Nigh, Courtin 1998; Nigh i in. 2011]:

$$H_2 = H_1 \frac{1 + e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot \log(T_1) - \beta_3 \cdot \log(H_1)}}{1 + e^{\beta_1 - \beta_2 \cdot \log(T_2) - \beta_3 \cdot \log(H_1)}} \quad [4]$$

– funkcję wyprowadzoną z funkcji wzrostu Korfa [Barrio Anta, Diéguez-Aranda 2005]:

$$H_2 = \beta_1 \left(\frac{H_1}{\beta_1} \right)^{\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\beta_2}} \quad [5]$$

– zmodyfikowaną postać funkcji Chapmana-Richardsa [Payandeh 1974; Cieszewski 2003]:

$$H_2 = H_1 \left(\frac{1 - e^{\beta_2 \cdot T_2}}{1 - e^{\beta_2 \cdot T_1}} \right)^{\beta_3 \cdot H_1^{\beta_1}} \quad [6]$$

W celu uzyskania niezmienniczości od wieku bazowego [Strub, Cieszewski 2006] do oszacowania parametrów wykorzystano wszystkie możliwe pary wartości wiek-wysokość (T_2 - H_2 , T_1 - H_1).

Ocenę dokładności dopasowania analizowanych dynamicznych modeli wzrostu do danych tablicowych przeprowadzono, uwzględniając wartość skorygowanego współczynnika determinacji, wartości skrajne błędów i ich rozstęp oraz wielkość błędu standardowego (RMSE) [Palahí i in. 2004]. Wybór najlepszego modelu bonitacyjnego dla poszczególnych gatunków wynikał z sumy rang przypisanych do zastosowanych kryteriów dobroci dopasowania. Rangi przypisywano w ten sposób, że modele uszeregowane według malejącej wartości współczynnika determinacji oraz według rosnących wartości rozstępu błędów i błędu standardowego otrzymywały kolejno wartości od 1 do 6. O ostatecznej ocenie modeli decydowała suma rang.

Wyniki

W wyniku parametryzacji funkcji [1]-[6] dla każdej z 19 serii wzrostowych obejmujących 16 gatunków otrzymano łącznie 114 modeli bonitacyjnych – po 6 modeli dla każdego gatunku, które pozwalają na obliczenie wskaźnika bonitacji siedliska na podstawie wieku i wysokości przeciętnej drzewostanu. Z uwagi na identyczne wartości parametrów β_1 i β_3 , jak również takie same wartości udziałów wariancji wyjaśnionej oraz charakterystyk reszt uzyskiwanych przez zastosowanie modeli [1] i [2], w tabelach wyników zrezygnowano z zamieszczania modelu [1]. Ponadto w przypadku sosny prowadzonej silniejszymi zabiegami pielęgnacyjnymi zamieszczono w tabeli 1 parametry modelu [2], opracowane i opublikowane wcześniej przez Cieszewskiego i Zasadę [2003a].

Na podstawie udziału wariancji wyjaśnionej oraz analizy reszt stwierdzono, że w przypadku aż 16 serii wzrostowych najlepszym dopasowaniem do danych tablicowych, wyrażającym się najwyższym udziałem wariancji wyjaśnionej oraz najmniejszymi wartościami błędów resztowych, charakteryzuje się model bonitacyjny opracowany na podstawie funkcji [2] wyprowadzonej przez Cieszewskiego [2001] i zmodyfikowanej przez Cieszewskiego i Zasadę [2003b] (tab. 2).

Jedynie w trzech przypadkach lepszym dopasowaniem do danych empirycznych charakteryzowały się modele opracowane na bazie innych funkcji. W przypadku danych o wroście olszy czarnej pochodzących z tablic Schwappacha najlepszymi parametrami dopasowania charakteryzował się model bonitacyjny opracowany na podstawie wzoru [5] wyprowadzonego z funkcji wzrostu Korfa [Barrio Anta, Dieguez-Aranda 2005] oraz danych dotyczących osiki i sosny zwyczajnej prowadzonej słabszymi zabiegami pielęgnacyjnymi, dla których nieznacznie lepszym dopasowaniem charakteryzowała się zmodyfikowana funkcja [6] Chapmana-Richardsa [Payandeh 1974; Cieszewski 2003]. We wszystkich wymienionych wyjątkach jakość dopasowania wzoru [2] do danych tabelarycznych tylko nieznacznie odbiegała od najlepszego rozwiązania, a suma rang przyznana tej funkcji klasyfikowała ją na drugiej lub co najmniej trzeciej pozycji (tab. 2). Ponadto w przypadku modelu [2] skrajne wartości błędów stwierdzano na ogół dla najmłodszych drzewostanów najniższych klas bonitacji (ryc. 1). Pozostałe funkcje charakteryzowały się często dość dobrym dopasowaniem do danych tablicowych dla jednych gatunków, podczas gdy dla innych ich zastosowanie obarczone było stosunkowo dużymi błędami, w związku z tym poza wzorem [2] trudno wskazać inne równanie, które można uznać za uniwersalne w stosunku do większości gatunków. Biorąc pod uwagę powyższe, w przypadku osiki, olszy i sosny w tabeli 1 zamieszczono oprócz parametrów najlepszego wzoru także parametry funkcji [2].

Dyskusja

Stosowane do oceny produktywności drzewostanów klasy bonitacji, ze względu na dyskretny (skokowy) charakter danych, mają ograniczone zastosowanie w używanych obecnie systemach informatycznych, jak i w statystycznym modelowaniu produktywności siedlisk. Użyteczna miara

Tabela 1.

Parametry ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) i ocena dopasowania (R^2_{adj} , minimum (min), maksimum (max) i RMSE reszt) najlepszych modeli bonitacyjnych

Parameters ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) and goodness-of-fit measures (R^2_{adj} , minimum (min), maximum (max) and RMSE of residuals) of the best site index models

Gatunek Species	Funkcja Function	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	min	max	RMSE
Rb	[2]	0,88	7,4064	-3,920	0,9965	-1,20	1,02	0,39
Bk	[2]	1,65	10,9402	19,340	0,9991	-0,90	2,60	0,36
Brz	[2]	1,41	8,9694	5,790	0,9980	-1,35	1,90	0,43
Dbcz	[2]	1,95	10,7052	-0,960	0,9993	-0,59	0,53	0,21
Db(A)	[2]	1,33	7,8449	39,770	0,9994	-0,97	1,04	0,29
Db(B)	[2]	1,35	7,9624	35,820	0,9996	-1,16	1,10	0,22
Gb	[2]	1,87	11,2189	15,616	0,9992	-0,81	1,15	0,30
Js	[2]	1,74	9,4330	22,200	0,9997	-0,41	0,51	0,18
Kl	[2]	1,15	8,7494	10,593	0,9993	-0,41	0,42	0,16
Lp	[2]	1,23	8,5783	8,000	0,9976	-0,98	1,01	0,33
Ol(Sch)	[2]	0,81	-2,9335	46,320	0,9986	-0,76	0,73	0,25
	[5]	83,75	0,3145	-	0,9989	-0,69	0,73	0,22
Ol(Tiu)	[2]	1,19	7,5862	10,860	0,9977	-2,50	1,14	0,45
Os	[2]	1,11	9,2673	-29,270	0,9956	-1,92	1,64	0,69
	[6]	0,00	-0,0212	0,995	0,9960	-2,98	1,89	0,66
Dg	[2]	1,85	-0,3363	44,680	0,9989	-1,23	1,03	0,39
Jd	[2]	2,96	15,1681	14,530	0,9982	-1,55	2,38	0,52
Md	[2]	1,43	10,4282	-31,140	0,9998	-0,51	0,74	0,15
So(A)*	[2]	1,446	10,1971	-5,1543	0,9996	-0,97	1,45	0,23
So(B)	[2]	1,18	13,9780	-3024,130	0,9996	-1,33	0,70	0,22
Św	[6]	0,01	-0,0143	1,107	0,9998	-0,88	0,53	0,16
	[2]	1,90	10,0952	35,250	0,9992	-1,40	1,20	0,35

Rb – *Robinia pseudoacacia*; Bk – *Fagus sylvatica*; Brz – *Betula*; Dbcz – *Quercus rubra*; Db(A) – *Quercus* (silniejsze zabiegi; heavy thinning); Db(B) – *Quercus* (słabsze zabiegi; moderate thinning); Gb – *Carpinus betulus*; Js – *Fraxinus excelsior*; Kl – *Acer*; Lp – *Tilia*; Ol(Sch) – *Alnus glutinosa* (tablice Schwappacha; Schwappach yield tables); Ol(Tiu) – *Alnus glutinosa* (tablice Tiurina; Tiurin yield tables); Os – *Populus tremula*; Dg – *Pseudotsuga*; Jd – *Abies alba*; Md – *Larix decidua*; So(A) – *Pinus sylvestris* (silniejsze zabiegi; heavy thinning); So(B) – *Pinus sylvestris* (słabsze zabiegi; moderate thinning); Św – *Picea abies*

* [Cieszewski, Zasada 2003a]

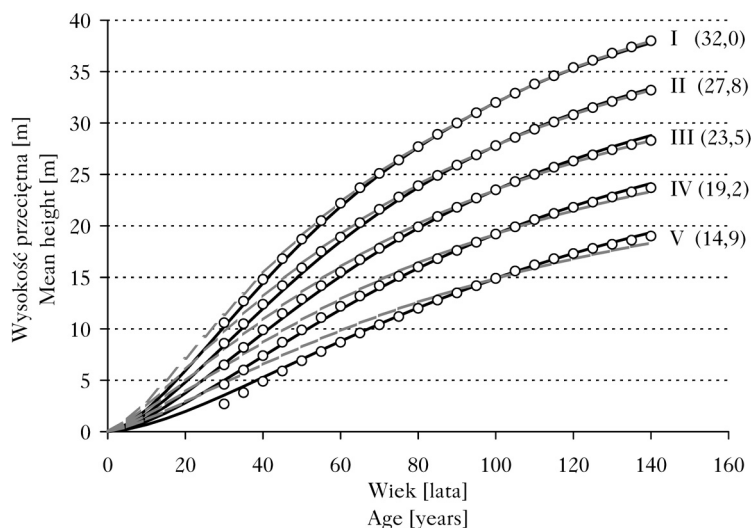
Tabela 2.

Ranking dokładności modeli bonitacyjnych opracowanych na bazie funkcji [2]-[6]

Accuracy ranking of site index models developed with the use of functions [2]-[6]

Funkcja Function	Pozycja w rankingu Ranking position					Suma rang Sum of rank
	1	2	3	4	5	
[2]	16	2	1			68
[3]		4	6	6	3	201
[4]		2	5	5	7	224
[5]	1	6	2	3	7	191
[6]	2	5	5	5	2	170

produkcyjności powinna mieć charakter ilościowy, to znaczy powinna być wyrażona za pomocą liczb rzeczywistych [Burkhardt, Tome 2011]. Obecnie niemal na całym świecie stosuje się wskaźniki bonitacji, które w odróżnieniu od klas charakteryzują produktywność siedlisk w sposób ciągły. Wymienione wyżej argumenty oraz brak w polskim leśnictwie praktyki stosowania



Ryc. 1.

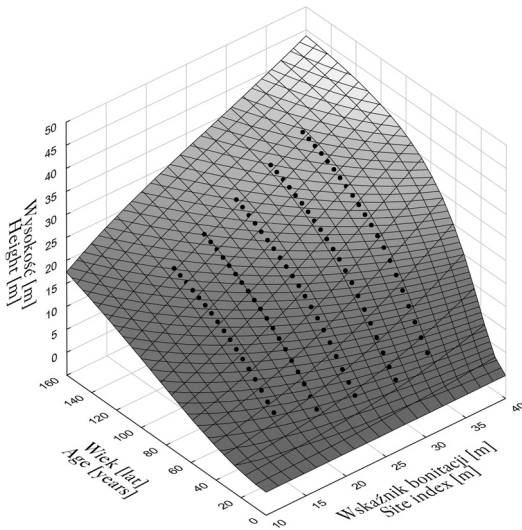
Zmiany z wiekiem przeciętnej wysokości drzewostanów bukowych dla różnych klas bonitacji (w nawiasach odpowiadające klasom wartości wskaźnika bonitacji) opisanych za pomocą modeli opracowanych na bazie funkcji [2] (linia ciągła) i [4] (linia przerywana) na tle wartości tablicowych (kółka)

Changes in mean height of the beech stands for different site classes (corresponding site index value in brackets) described with models developed on the base of function [2] (solid line) and [4] (dashed) in relation to heights from the yield tables (circles)

wskaźników bonitacyjnych były inspiracją do wykorzystania zawartych w tablicach zasobności danych liczbowych do opracowania modeli bonitacyjnych. Wykorzystanie danych tabelarycznych uzasadnione jest ze względu na praktyczne stosowanie ich do określania klas bonitacji oraz na to, że zawarte w nich dane dotyczą większości gatunków lasotwórczych kraju. Część danych zawartych w tablicach zestawionych przez Szymkiewicza [1948, 2001] oraz Czuraja [1997] pochodzi z ekstrapolacji. Przy opracowywaniu modeli dla poszczególnych gatunków stwierdzano na ogół bardzo duże błędy dopasowania modeli w zakresie danych ekstrapolowanych. W związku z tym przy parametryzacji korzystano z danych oryginalnych, wyłączając dane pochodzące z ekstrapolacji. Podobne rozwiązanie zastosowali Cieszewski i Zasada [2003a, b], eliminując dane dotyczące ekstrapolowanej klasy Ia przy opracowaniu modelu bonitacyjnego dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza.

Spośród analizowanych modeli najlepszym dopasowaniem do danych tablicowych w 16 na 19 przypadków charakteryzował się dynamiczny model [2] opracowany na podstawie funkcji wyprowadzonej przez Cieszewskiego. Dzięki dynamicznej postaci modelu jego parametry oszacowano bez konieczności wyboru stałego wieku bazowego. Jednocześnie model ten jest wiarygodny z biologicznego punktu widzenia [Nord-Larsen 2006], a ponadto charakteryzuje się polimorfizmem i zmiennymi asymptotami, co miało z pewnością znaczenie dla jego bardzo dobrego dopasowania do danych tablicowych.

Opracowane dynamiczne modele bonitacyjne, które są w rzeczywistości funkcjami trójwymiarowymi (ryc. 2), pozwalają na łatwe przejście z bonitacji określonej w postaci klas na wskaźniki bonitacji. Poza tym ważną zaletą opracowanych rozwiązań jest możliwość zastosowania ich do interpolacji i ekstrapolacji danych tablicowych zarówno pod względem żyzności siedlisk, jak i pod względem wieku (ryc. 2). Przeciętne wysokości osiągnięte przez drzewostany często prze-



Ryc. 2.

Interpolacja i ekstrapolacja wysokości świerka za pomocą modelu bonitacyjnego opracowanego na bazie wzoru [2]

Interpolation and extrapolation of Norway spruce height with the use of site index model developed on the base of equation [2]

wyższają wartości przewidywane w tablicach zasobności nawet o kilkanaście metrów, co powoduje problemy z ustaleniem klasy bonitacji siedliska. W praktyce urzędzeniowej problemem jest również brak danych dla drzewostanów najstarszych klas wieku. Dzięki możliwości ekstrapolacji poza zakres wartości podanych w tablicach zasobności opracowane wzory mogą częściowo wypełniać wspomniane luki do czasu opracowania nowych modeli bonitacyjnych.

W ramach badań prowadzonych obecnie w Zakładzie Biometrii i Produkcyjności Lasu Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie we współpracy z Instytutem Badawczym Leśnictwa oraz Biurem Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej planowane jest opracowanie nowych modeli bonitacyjnych opartych na danych empirycznych. Ponadto dla sosny (najważniejszego gatunku lasotwórczego w Polsce) podjęte zostaną badania nad regionalnym zróżnicowaniem krzywych bonitacyjnych, które mogą przyczynić się do podniesienia dokładności oceny produktywności siedlisk dla tego gatunku. Potrzeba opracowania nowych modeli bonitacyjnych wynika z obserwowanych w Europie zmian w dynamice wzrostu drzewostanów, która w ostatnich dziesięcioleciach była szczególnie duża. Trend polegający na wzmószonym przyroście był ostatnio raportowany przez wielu badaczy [Elfving, Tegnhammar 1996; Albert, Schmidt 2010; Nothdurft i in. 2012; Sharma i in. 2012; Yue i in. 2014]. Zmiany w dynamice przyrostu wynikają z takich czynników jak depozycja azotu, wzmószona koncentracja CO₂ i zmiany klimatu [Elfving, Tegnhammar 1996; Hasenauer i in. 1999; Fries i in. 2000; Solberg i in. 2009; Nothdurft i in. 2012; Sharma i in. 2012; Bontemps, Bouriaud 2013; Yue i in. 2014]. W wyniku obserwowanych zmian produktywności siedlisk obserwowany obecnie przebieg wzrostu wysokości i przyrostu drzewostanów niekiedy znacznie odbiega zarówno od wartości tablicowych, jak i wartości obserwowanych kilka dziesięcioleci wcześniej. W związku z tym dla zapewnienia adekwatnej oceny produktywności siedlisk istnieje pilna potrzeba podjęcia wspólnych działań na poziomie krajowym, których celem byłoby opracowanie nowych tablic zasobności oraz budowa modeli wzrostu dla głównych gatunków lasotwórczych Polski. Do czasu opracowania nowych modeli bonitacyjnych można do określania wskaźnika bonitacji dla poszczególnych gatunków (zarówno w celach naukowych, jak i w praktyce) stosować modele zaprezentowane w artykule, które opracowano na podstawie szeregów wzrostowych z tablic zasobności i przyrostu drzewostanów [Schwappach 1943; Czuraj 1997; Szymkiewicz 2001].

Wnioski

- ✦ Wszystkie wykorzystane w badaniach modele matematyczne charakteryzują się wysoką dokładnością odwzorowania krzywych wzrostu wysokości zawartych w tablicach zasobności i przyrostu drzewostanów.
- ✦ Spośród analizowanych sześciu wzorów aż w 16 przypadkach na 19 najlepsze dopasowanie do danych tablicowych uzyskano, stosując funkcję wyprowadzoną przez Cieszewskiego na podstawie modelu Monseruda. Jedynie w trzech analizowanych seriach wzrostowych lepszym dopasowaniem charakteryzowały się modele opracowane na podstawie innych funkcji: w dwóch przypadkach był to model opracowany na podstawie zmodyfikowanej funkcji Chapmana-Richardsa, w jednym model opracowany na podstawie funkcji wzrostu Korfa.
- ✦ Matematyczne opisanie krzywych wzrostu wysokości zawartych w tablicach zasobności pozwala na łatwe przejście z określania bonitacji wyrażonej za pomocą klas na wskaźnik bonitacji będący zmienną ciągłą. Z uwagi na to, że opracowane modele są trójwymiarowymi modelami krzywych bonitacyjnych, są one szczególnie przydatne do interpolacji bądź ekstrapolacji danych tablicowych.
- ✦ Modele bonitacyjne opracowane na podstawie szeregów wzrostowych zawartych w tablicach zasobności mogą być stosowane do określania wskaźnika bonitacji zarówno w celach naukowych, jak i w praktyce do czasu opracowania nowych modeli siedliskowych opartych na aktualnym materiale empirycznym.

Literatura

- Albert M., Schmidt M. 2010. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). For. Ecol. Manage. 259: 739-749. doi:10.1016/j.foreco.2009.04.039.
- Assmann E. 1968. Nauka o produktywności lasu. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Bailey R. L., Clutter J. L. 1974. Base age invariant polymorphic site curves. For. Sci. 20 (2): 155-159.
- Barrio Anta M., Dieguez-Aranda U. 2005. Site quality of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Galicia (northwest Spain). Eur. J. For. Res. 124: 19-28. doi:10.1007/s10342-004-0045-3.
- Bijak S., Bronisz K., Szydłowska P., Wojtan R. 2014. Wpływ jakości siedliska na dynamikę wydzielania brzozy na gruntach porolnych. Sylwan 158 (6): 423-430.
- Bontemps J. D., Bouriaud O. 2013. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. Forestry 87: 109-128. doi:10.1093/forestry/cpt034.
- Bruchwald A. 1977. Change in top height of pine forest stands with age. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Biol. 5: 335-342.
- Bruchwald A., Dmyterko E., Wojtan R. 2011. A growth model for European larch (*Larix decidua* Mill.) based on stand characteristics. For. Res. Pap. 72: 77-81. doi:10.2478/v10111-011-0009-6.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzińska T., Wróblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. Sylwan 143 (1): 19-31.
- Bruchwald A., Dudzińska M., Wirowski M. 2003. Model wzrostu dla olszy czarnej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Sylwan 147 (8): 3-10.
- Burkhardt H. E., Tomé M. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London.
- Cieszewski C. J. 2001. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. Can. J. For. Res. 31: 165-173.
- Cieszewski C. J. 2002. Comparing fixed- and variable-base-age polymorphic site equations having single versus multiple asymptotes. For. Sci. 48 (1): 7-23.
- 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: 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., 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. 2007. Parameter Estimation of Base – Age Invariant Site Index Models?: Which Data Structure to Use? – A Discussion. *For. Sci.* 53: 552-555.
- 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. *Sylwan* 146 (7): 17-24.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2003a. Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. *Sylwan* 147 (1): 51-62.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2003b. Wyprowadzanie ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych za pomocą uniwersalnej metody różnic algebraicznych. *Sylwan* 147 (3): 40-46.
- Czuraj M. 1997. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów. Wydawnictwo Świat, Warszawa.
- 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.
- Elfving B., Tegnhammar L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953-1992: An analysis based on sample trees from the national forest inventory. *Scand. J. For. Res.* 11: 26-37. doi:10.1080/02827589609382909.
- Fries A., Lindgren D., Ying C. C., Ruotsalainen S., Lindgren K., Elfving B., Karlmatz U. 2000. The effect of temperature on site index in western Canada and Scandinavia estimated from IUFRO *Pinus contorta* provenance experiments. *Can. J. For.* 30: 921-929.
- Hasenauer H., Nemani R. R., Schadauer K., Running S. W. 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *For. Ecol. Manage.* 122: 209-219. doi:10.1016/S0378-1127(99)00010-9.
- Jarosław K., Kłapeć B. 2002. Modelowanie wzrostu drzewostanów z wykorzystaniem funkcji Gompertza. *Sylwan* 146 (4): 35-41.
- Kiviste A. K., Álvarez González J. G., Rojo A., Ruiz A. D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid.
- Korf V. 1953. Dendrometrie. Státní Zemědělské Nakladatelství, Praha.
- Kukuła J., Miś R., Ważyński B., Żółciak E. 1997. Zagadnienia praktyczne z urządzania lasu. Agricultural University Press, Poznań.
- Meyer H. A. 1959. Forest Mensuration. Pennsylvania Valley Publishers, State College, Pennsylvania.
- Nigh G. D., Courtin P. J. 1998. Height models for Red alder (*Alnus rubra* Bong.) in British Columbia. *New For.* 16: 59-70. doi:10.1023/A:1006561502635.
- Nigh G. D., Krestov P. V., Klinka K. 2011. Height growth of black spruce in British Columbia. *The Forestry Chronicle* 78 (2): 306-313.
- Nord-Larsen T. 2006. Developing Dynamic Site Index Curves for European Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *For. Sci.* 2: 173-181.
- Nothdurft A., Wolf T., Ringeler A., Böhner J., Saborowski J. 2012. Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *For. Ecol. Manage.* 279: 97-111. doi:10.1016/j.foreco.2012.05.018.
- Palahí M. 2004. Site index model for *Pinus sylvestris* in north-east Spain. *For. Ecol. Manage.* 187: 35-47. doi:10.1016/S0378-1127(03)00312-8.
- 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: 35-47.
- Payandeh B. 1974. Formulated Site Index Curves for Major Timber Species in Ontario. *For. Sci.* 20: 143-144.
- Peschel W. 1938. Die mathematischen Methoden zur Herteitung der Wachstums-gesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. *Tharandter Forstl. Jahrbuch.* 89: 169-274.
- Schwappach A. 1943. Ertragstafeln der wichtigeren Holzarten. Druckerei Merkur, Praga.
- Sharma R. P., Brunner A., Eid T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scand. J. For. Res.* 27: 619-636. doi:10.1080/02827581.2012.685749.
- Skovsgaard J. P., Vanclay J. K. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81: 13-31. doi:10.1093/forestry/cpm041.
- Socha J. 2011. Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich. *Sylwan* 155 (12): 816-826.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylwan* 155 (5): 301-312.
- Socha J., Orzeł S. 2013. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z południowej Polski. *Sylwan* 157 (1): 26-38.
- Solberg S., Dobbertin M., Reinds G. J., Lange H., Andreassen K., Fernandez P. G., Hildingsson A., de Vries W. 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *For. Ecol. Manage.* 258: 1735-1750. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.057.
- 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.
- Szymkiewicz B. 1948. Niektóre zagadnienia dotyczące tablic zasobności drzewostanów sosnowych. *Pr. IBL A* 67.

- Szymkiewicz B.** 2001. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Yue C., Mäkinen H., Klädtke J., Kohnle U.** 2014. An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on spatially and temporally disjunct measurement series. *For. Ecol. Manage.* 323: 10-19. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.031.