

ANNA GAZDA, STANISŁAW MIŚCICKI

Prognoza rozwoju drzewostanów lasu naturalnego z wykorzystaniem modelu według klas wymiarów

Forecast of the development of natural forest resources using a size-class growth model

ABSTRACT

Gazda A., Miścicki S. 2016. Prognoza rozwoju drzewostanów lasu naturalnego z wykorzystaniem modelu według klas wymiarów. Sylwan 160 (3): 207-218.

The size-class growth model is an empirical model applicable for the prediction of the dynamics of natural forest growth. It is based on the following assumptions: (1) changes in the forest condition are determined on the basis of the sum of the changes that take place in individual size classes, (2) the trees in a given class are represented by single average tree, (3) the calculation of the future tree density distribution in size classes (fig. 1) is the main element of the prediction, and (4) the future tree density distribution is estimated on the basis of the initial structure, actual growth and mortality of trees in individual size classes. The aim of the research was to develop a size-class growth model to be used for the preparation of a medium-term forecast of natural forest dynamics. The study site is located on the Bukowa Góra Mt in the Roztoczański National Park (SE Poland). For the analyses we took all uneven-aged stands (128 ha in total) composed mostly of silver fir and European beech. The material was collected on 65 permanent sample plots every five years in the period 1991-2011. Trees with the breast height diameter (DBH) ≥ 8 cm were measured on each sample plot (500 m²), while smaller trees – on three smaller concentric plots. We calculated, separately for fir and beech, the relationship between the mortality of trees and their diameter (fig. 2), the relationship between the diameter increment of trees and their DBH (figs. 3-4), the rate of saplings ($h=0.3-1.3$ m) growth into the first DBH class (DBH=0.1-1.9 cm). On the basis of these data, we elaborated a size-class growth model that we used to predict the development of timber resources (trees with DBH ≥ 8 cm) at 10-year intervals in the period 2001-2041. In 2011, the predicted average standing volume was lower than the one actually measured. The forecast indicated an increase in the average standing volume (fig. 5), a reduction in the volume of ingrowth (fig. 6), an increase in the proportion of beech in the standing volume and ingrowth (figs. 5 and 7) and the maintenance of a similar density structure (fig. 8) throughout the period 2001-2041. The low accuracy of the prediction after 10 years (in 2011) was caused by the difference between the predicted and actual values of tree growth and mortality in the period 2001-2011.

KEY WORDS

European beech, silver fir, increment, mortality, Roztoczański National Park

ADDRESSES

Anna Gazda ⁽¹⁾ – e-mail: rlgazda@cyf-kr.edu.pl

Stanisław Miścicki ⁽²⁾ – e-mail: Stanislaw.Miscicki@wl.sggw.pl

⁽¹⁾ Zakład Bioróżnorodności Leśnej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

⁽²⁾ Katedra Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie;

ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

Według Burkhartha i Tomé [2012] głównym celem modeli wzrostu jest oszacowanie wartości cech drzewostanu w określonym punkcie czasu. Były one wykorzystywane w lasach zagospodarowanych dla potrzeb określania możliwości produkcyjnych, aktualizacji danych inwentaryzacyjnych, oceny alternatywnych zabiegów hodowlanych, planowania urzędzeniowego czy planowania pozyskania drewna. Z tego powodu stały się narzędziami wspomagania procesu decyzyjnego [Brzeziecki 2002]. Ważnymi przykładami modeli różnej konstrukcji i przeznaczonych do różnych celów mogą być: model drzewa indywidualnego [Bruchwald 1986], prognoza produkcji i rozwoju zasobów drzewnych gospodarstwa zrębowego [Poznański 1985], ekologiczny model drzewostanu [Brzeziecki 1999] oraz długookresowa prognoza zmian zasobów drzewnych [Zasada 2007].

Według Penga [2000] znacznie więcej modeli wzrostu opracowano dla drzewostanów jednowiekowych niż dla różnowiekowych i wielogatunkowych. Rzadsze było zastosowanie modeli do prognozowania rozwoju lasu naturalnego [Kozak i in. 2005]. Ich przeznaczenie jest inne niż modeli dla lasów zagospodarowanych i może obejmować określenie zmian różnorodności gatunkowej drzew, reakcji drzewostanów na zabiegi ochronne oraz zmian struktury drzewostanów i ich odnowienia.

Jednym z typów modeli, które mogą być stosowane w obu rodzajach lasów, jest model wzrostu według klas wymiarów. Wraz z pokrewnym modelem macierzowym, który w Polsce stosował Drozdowski [2006], jest zaliczany do grupy modeli empirycznych. Ze względu na podejście metodyczne jest rozwiązaniem pośrednim między modelem dla drzewostanu a modelem drzewa indywidualnego [Burkhardt, Tomé 2012].

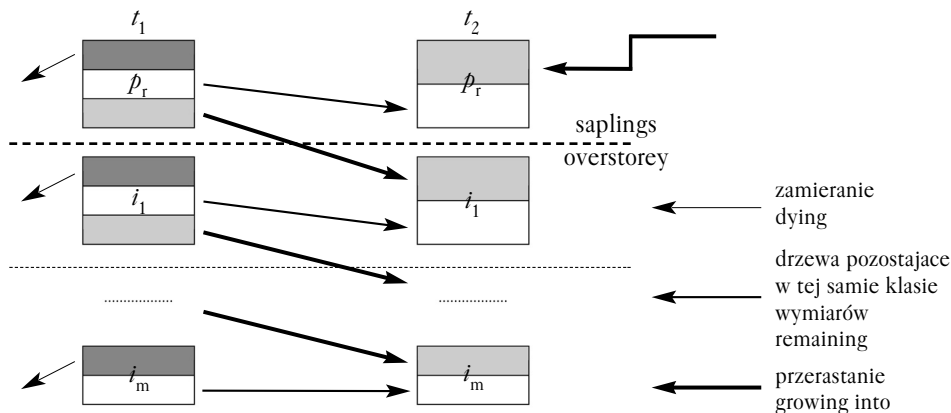
Celem pracy było opracowanie modelu wzrostu według klas wymiarów i przedstawienie jego wykorzystania do sporządzenia średnioterminowej prognozy rozwoju lasu naturalnego, złożonego z wielu różnowiekowych drzewostanów.

Materiał i metody

MODEL WZROSTU WEDŁUG KLAS WYMIARÓW. W modelu wzrostu według klas wymiarów populacja drzew jest dzielona na klasy (na ogół klasy pierśnic) o określonej szerokości. Niekiedy podział jest bardziej złożony, na przykład z uwzględnieniem gatunków. Zmiany stanu jednostki leśnej są określane na podstawie sumy zmian poszczególnych klas wymiarów. Z kolei drzewa danej klasy wymiarów są reprezentowane przez jedno przeciętne drzewo. Główną częścią prognozy jest obliczenie przyszłego rozkładu liczebności drzew w klasach wymiarów. Wykonywane jest ono na podstawie wyjściowego stanu oraz ustalonego empirycznie przyrostu i śmiertelności drzew w poszczególnych klasach wymiarów. Struktura liczebności drzew w klasach wymiarów w terminie t_j (wcześniejszym) i t_{j+1} (późniejszym) umożliwia obliczenie m.in. zasobności, a z różnicy stanu lasu w tych terminach prognozowanie jego dynamiki w okresie $\Delta t_k = t_{j+1} - t_j$.

Przyjmuje się, że sąsiadujące klasy wymiarów (pierśnic) są ze sobą dynamicznie powiązane (ryc. 1). W okresie Δt_k z daną klasą wymiarów i są związane następujące kategorie drzew:

- pozostające: w terminach t_j i t_{j+1} zaliczone do klasy i , ponieważ przeżyły dany okres, ale nie zmieniły wymiarów na tyle, aby być zaliczone do wyższej klasy wymiarów $i+1$,
- przerastające: w terminie t_j zaliczone do klasy i , a w terminie t_{j+1} do klasy $i+1$, ponieważ przeżyły dany okres i zwiększyły swoje wymiary tak, że zaliczono je do wyższej klasy,



Ryc. 1.

Schemat dynamicznego powiązania klas wymiarów w okresie między dwoma terminami t_1 i t_2 . Liczba drzew danej klasy wymiarów i zmniejsza się w następstwie zamierania, a także przerastania części z nich do następnej klasy $i+1$, a zwiększa się w następstwie dorastania drzew z klasy wcześniejszej $i-1$ (w klasie $i-1$ są to drzewa „przerastające”); część drzew pozostaje w tej samej wymiarów; w klasie m (najgrubszej) nie ma drzew przerastających

Dynamics of trees in size classes between two time points t_1 and t_2 . The number of trees in a given size class i decreases as a result of tree mortality and moving of some of them into the next class $i+1$ (upgrowth), while it increases as a result of moving of trees from the prior class $i-1$ (size-class ingrowth; trees in class $i-1$ are upgrowth); some of the trees remain in the same class; there is no upgrowth in the class m (thickest trees)

- dorastające: w terminie t_j zaliczone do niższej klasy $i-1$, a w terminie t_{j+1} do klasy i , ponieważ przeżyły dany okres i zwiększyły swoje wymiary tak, że zostały zaliczone do klasy i (rozpatrując klasę $i-1$, są to drzewa przerastające),
- zmarłe: w terminie t_j zaliczone do klasy i , a w terminie t_{j+1} nieistniejące.

Oznacza to, że liczba drzew w danej klasie wymiarów i na końcu okresu prognozy t_{j+1} składa się z drzew pozostających i dorastających, co można zapisać:

$$n_{i,t_{j+1}} = (n_{i,t_j} \cdot (1 - f_i)) \cdot (1 - u_i) + (n_{i-1,t_j} \cdot f_{i-1}) \cdot (1 - u_{i-1}) \quad [1]$$

gdzie:

- n_{i,t_j}, n_{i-1,t_j} – zagęszczenie drzew w klasie wymiarów i lub w klasie poprzedniej $i-1$ w terminie t_j na początku prognozy,
- u_i, u_{i-1} – frakcja drzew zmarłych (śmiertelność) w okresie Δt_k w klasie wymiarów i lub w klasie poprzedniej $i-1$ (u przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 1),
- f_i, f_{i-1} – frakcja drzew przerastających do następnej klasy wymiarów w okresie Δt_k z klasy i lub z klasy $i-1$, obliczana np. na podstawie tempa przyrostu pierśnicy drzew.

$$f_i = (z d_i \cdot \Delta t_k) / b_i \quad [2]$$

gdzie:

- $z d_i$ – roczny przyrost pierśnicy drzewa w klasie wymiarów i ,
- Δt_k – długość okresu prognozy w latach,
- b – szerokość klasy wymiarów i .

Na podstawie schematu powiązania poszczególnych klas wymiarów (ryc. 1) można zorientować się, że specjalnymi przypadkami są klasy: pierwsza i_1 (drzew najcieńszych) oraz ostatnia i_m (drzew

najgrubszych). W klasie i_1 liczba drzew, które do niej dorosły w okresie Δt_k , może być szacowana na podstawie danych charakteryzujących strukturę zasobów, np. zwarcia koron, zasobności, tempa zamierania drzew lub obliczana na podstawie stanu niższych warstw, złożonych z drzew o wymiarach mniejszych niż przyjęta dolna granica klasy i_1 . W klasie i_m zwykle konieczne jest wprowadzenie ograniczenia, które zapobiega tworzeniu kolejnych, jeszcze grubszych klas.

METODYKA SPORZĄDZENIA PROGNOZY ZMIAN DRZEWOSTANÓW NATURALNYCH BUKOWEJ GÓRY. Obiektem badań były drzewostany rosnące na terenie Bukowej Góry na Roztoczu (50°35'30"N 22°57'35"E). Ścisły rezerwat leśny o tej nazwie został utworzony w roku 1934 roku. W roku 1974 wszedł w skład Roztoczańskiego Parku Narodowego i obecnie jako Obszar Ochrony Ścisłej Bukowa Góra zajmuje powierzchnię 128 ha. Na znaczną część zapasu składają się tylko dwa gatunki: jodła pospolita *Abies alba* (62%) i buk zwyczajny *Fagus sylvatica* (33%). Domieszkę stanowią sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* (3%) i świerk pospolity *Picea abies* (2%). Pozostałe gatunki: wierzba iwa *Salix caprea*, grab pospolity *Carpinus betulus*, czereśnia *Cerasus avium* i jarzab pospolity *Sorbus aucuparia*, występują pojedynczo.

Materiał empiryczny po raz pierwszy zebrano w roku 1991 na 65 stałych powierzchniach próbnych o wielkości 500 m², rozmieszczonych w więźbie 100×200 m. Mierzono drzewa o pierśnicy $d_{1,3}$ co najmniej 8,0 cm. W zakres pomiarów włączono także nalot i podrost – mierzone na współśrodkowych kołach (drzewa: o wysokości $h < 0,3$ m na powierzchni 5 m²; o wysokości $0,3 \leq h \leq 1,3$ m lub pierśnicy $0,1 \leq d_{1,3} < 2,0$ cm na 20 m²; $2,0 \leq d_{1,3} < 8,0$ cm na 50 m²). Następne pomiary przeprowadzano co pięć lat (1996, 2001, 2006 i 2011). Pomiary pierśnic (z zaokrągleniem do 1 mm) lub wysokości drzew (z warstwy nalotu lub podrostu) wraz z rejestracją faktu ich zamarcia lub przekroczenia progu dorostu ($d_{1,3} = 8$ cm) umożliwiły obliczenie tempa przyrostu grubości i tempa śmiertelności drzew w danym okresie w zależności od ich wymiarów.

Badania związane z opracowaniem i oceną modelu podzielono na cztery etapy:

- kalibracji modelu – estymowania jego parametrów na podstawie danych empirycznych,
- weryfikacji – sprawdzenia poprawności działania modelu na podstawie danych zależnych, użytych do skonstruowania i ewentualnego skorygowania modelu,
- walidacji – oceny, na podstawie danych niezależnych, w jakim stopniu wyniki prognozowane, uzyskane na podstawie modelu, zgadzają się z wynikami obserwowanymi,
- wykonania właściwej prognozy.

Przyjęto, że podstawą prognozy będzie obliczenie zagęszczenia jodły (z domieszką gatunków iglastych) i osobno buka (z domieszką gatunków liściastych) w wyróżnionych klasach pierśnic (8-11,9, 12-19,9, 20-27,9, 28-35,9, 36-47,9, 48-59,9, 60-71,9, 72-87,9, 88-103,9 i 104-119,9 cm) w kolejnych terminach t_1, \dots, t_5 odległych o 10 lat – łącznie dla okresu 40 lat. Stan zasobów w terminie t_1 , określony na podstawie danych empirycznych, był punktem wyjścia do prognozy stanu zasobów w terminie t_2 . Z kolei stan prognozowany w terminie t_2 był podstawą wykonania prognozy w terminie t_3 itd. Prognozę dynamiki zasobów wykonano dla czterech dziesięcioletnich okresów $\Delta t_1, \dots, \Delta t_4$. Przyjęcie okresu 40 lat wiązało się ze sposobem prognozowania liczby drzew dorastających w danym okresie z najgrubszej klasy podrostu do pierwszej klasy drzew warstwy macierzystej i_1 (o dolnej granicy $d_{1,3} = 8$ cm). Drzewa warstwy podrostu podzielono na cztery klasy wymiarów: p_1 (o wysokości $h = 0,3-1,3$ m), p_2 (o pierśnicy $d_{1,3} = 0,1-1,9$ cm), p_3 ($d_{1,3} = 2-3,9$ cm) i p_4 ($d_{1,3} = 4-7,9$ cm). Aby określić zagęszczenie drzew w klasie wymiarów p_1 w terminie t_2 , konieczna byłaby znajomość liczby drzew, które w pierwszym okresie Δt_1 (między terminem t_1 a t_2) przerosły z warstwy nalotu (drzew o wysokości $h < 0,3$ m) do klasy podrostu p_1 . Liczba drzew

przerastających z warstwy nalotu zależy nie tylko od ich zagęszczenia w terminie t_1 , ich śmiertelności i tempa wzrostu, ale także od liczby drzew, które wykiełkowały i przeżyły w danym okresie. Kielkowanie i przeżywanie drzew jest uważane za cechę trudną do przewidzenia i podlegającą dużej zmienności [Hasenauer 2006]. Nie dysponując wystarczająco pewnymi danymi, już dla okresu Δt_1 nie wykonano prognozy przerastania drzew z warstwy nalotu (drzewa $h < 0,3$ m) do klasy podrostu p_1 , lecz tylko z klasy p_1 do p_2 , z p_2 do p_3 , z p_3 do p_4 i z p_4 do i_1 . Konsekwentnie dla okresu Δt_2 nie wykonano prognozy przerastania drzew z klasy p_1 do p_2 , dla okresu Δt_3 z klasy p_2 do p_3 , a dla okresu Δt_4 z klasy p_3 do p_4 . Tak więc okres Δt_4 był ostatnim, dla którego można było wykonać prognozę liczby drzew dorastających z warstwy podrostu do najmniejszej klasy drzew warstwy macierzystej i_1 .

Prawdopodobieństwo zamierania drzew (śmiertelności) u w danym okresie obliczono dla każdego gatunku, w zależności od pierśnicy drzew. Zastosowano regresję logistyczną. Ze względu na fakt, że długość każdego okresu obserwacji drzew na stałych powierzchniach próbnych wynosiła pięć lat, wprowadzono korektę k , aby uzyskać wynik dla okresu 10 lat:

$$u = (1 / (1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot (\log(d + 1))^1 + \dots + b_n \cdot (\log(d + 1))^n)))^{(k/10)} \quad [3]$$

gdzie:

- b_0, b_1, \dots, b_n – współczynniki,
- d – pierśnica drzewa,
- k – okres obserwacji ($k=5$).

Współczynniki równania b_0, b_1, \dots, b_n obliczono, stosując regresję wieloraką krokową wsteczną. Przyjęto, że prawdopodobieństwo zamierania drzew w najgrubszej klasie pierśnic i_m wynosi 1, co oznaczało (zgodnie ze wzorem 1), że po upływie danego okresu prognozy liczba drzew w tej klasie zależy tylko od liczby drzew przerastających z klasy i_{m-1} . Za klasę i_m przyjmowano najgrubszą, w której w jakimkolwiek terminie pomiarów powierzchni próbnych zarejestrowano obecność drzewa danego gatunku.

Okresowy przyrost grubości drzew zd , służący później do obliczenia f tempa przerastania drzew do następnej klasy wymiarów w danym okresie Δt_k , obliczono osobno dla każdego gatunku jako zależność średniego (w danym okresie) rocznego przyrostu grubości od pierśnicy na początku tego okresu. Przyjęto wzór o ogólnej postaci:

$$zd = 10^{(b_0 + b_1 \cdot \log(d) + \dots + b_n \cdot (\log(d))^n)} \quad [4]$$

Umożliwił on przedstawienie (w analizowanym zakresie pierśnic) różnej postaci zależności zd od $d_{1,3}$: jako krzywej stałe wznoszącej się lub jako asymetrycznej krzywej dwubocznej. Było to zgodne z sugestią Vanclaya [1994], który – omawiając różne wzory zależności przyrostu pierśnicy od grubości drzewa – sugerował, aby wybrane równanie dobrze odwzorowywało tę zależność dla całego zakresu wymiarów drzew.

Zależność zd od $d_{1,3}$ dla drzew warstwy podrostu obliczono, stosując wzór:

$$zd = 10^{(b_0 + b_1 \cdot (d + c))} \quad [5]$$

gdzie:

- c – stała.

Wartość c przyjęto na podstawie interpretacji graficznej zależności zd od $d_{1,3}$. Krzywe dla drzew podrostu i dla drzew grubszych (tzw. warstwy macierzystej) połączono, stosując regresję przedziałową. Założono także, że w przypadku istnienia dwóch lub więcej generacji drzew warstwy

macierzystej, różniących się tempem przyrostu grubości, zostaną one wyodrębnione, a zależność z/d od $d_{1,3}$ zostanie obliczona osobno dla każdej generacji.

Udział – w stosunku do początkowej liczby – drzew, które w danym okresie Δt_k przerosły z klasy wymiarów p_1 ($h=0,3-1,3$ m) do klasy p_2 ($d_{1,3}=0,1-1,9$ cm), obliczono na podstawie wzoru:

$$p_{pas_1.3} = N_{pas_1.3} / N_{h=0.3-1.3} \quad [6]$$

gdzie:

$N_{pas_1.3}$ – liczba drzew, które w okresie Δt_k przerosły z klasy p_1 do klasy p_2 ,
 $N_{h=0,3-1,3}$ – liczba drzew w klasie p_1 w terminie t_j .

Takie rozwiązanie wynikało z tego, że w okresie 10 lat z klasy $h=0,3-1,3$ m do klasy $d_{1,3}=0,1-1,9$ cm przerastają także drzewa, które wykiełkowały w danym okresie, a więc jeszcze nie istniały w terminie t_j .

Prognozowana liczba drzew, które w okresie Δt_k w danej klasie wymiarów i zamarły, a także tych, które przerosły do klasy $i+1$, pozwoliła oszacować miąższość „ubytków” (sumę miąższości drzew zamarłych), „dorostów” (miąższość drzew dorastających do klasy i_1 z klasy p_4 ($d_{1,3}=4-7,9$ cm) warstwy podrostu) oraz bieżący przyrost miąższości.

Po wstępnym opracowaniu modelu przeprowadzono jego weryfikację. W tym celu, przyjmując strukturę zasobów drzewnych w roku 1991 za początek prognozy, obliczono prognozowane zasobności obu gatunków drzew w roku 2001. Wykorzystano dane zależne – te same, które służyły do obliczenia parametrów modelu. Postanowiono, że w przypadku wystąpienia różnicy między prognozowaną a zmierzoną zasobnością gatunków w roku 2001 będzie przeprowadzona korekta śmiertelności drzew. W takiej sytuacji w każdej klasie wymiarów i współczynnik śmiertelności podnoszono do potęgi w (w jednakowe w każdej klasie wymiarów, $w>0$): u_i^{wp} . Wartość w obliczono metodą kolejnych przybliżeń, aby w roku 2001 zasobność prognozowana była taka jak zmierzona. Zastosowanie korekty śmiertelności drzew wynikało z przyjęcia, że ta cecha jest oszacowana mniej dokładnie niż przyrost grubości drzew. Dane użyte do parametryzacji, jak i walidacji modelu traktowano jako bezbłędne, choć były obciążone błędem próby (np. w roku 2011 średnią zasobność drzewostanów Bukowej Góry oszacowano z błędem $\pm 10,6\%$ przy poziomie istotności $\alpha=0,05$).

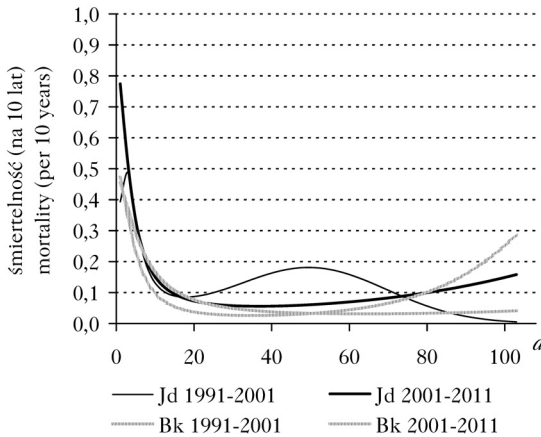
Stan początkowy t_1 właściwej prognozy przyjęto według rezultatów pomiarów powierzchni próbnych w roku 2001. Walidację modelu przeprowadzono przez porównanie prognozowanego stanu zasobów drzewnych w roku 2011 (t_2) i ich dynamiki w okresie 2001-2011 z wynikami uzyskanymi z pomiaru powierzchni próbnych w roku 2011 (stan) i w okresie 2001-2011 (dynamika). Te dane pomiarowe były niezależne – to znaczy, że nie wykorzystano ich do parametryzacji modelu. Do oceny zgodności zagęszczenia drzew w klasach pierśnic zastosowano obliczenie residuum [Zingg, Duc 1998; Kwezclich, Miścicki 2006].

Wyniki

Zależność śmiertelności buka od pierśnicy w okresie 10 lat miała w obu okresach (1991-2001 i 2001-2011) postać niesymetrycznej linii U-kształtnej (ryc. 2). W latach 1991-2001 najmniejsza była śmiertelność drzew średniej grubości (około 25-45 cm) i stopniowo zwiększała się w przypadku drzew coraz grubszych. W okresie 2001-2011 najmniejsza była śmiertelność buków dość grubych (o pierśnicy około 60-80 cm). Zależność śmiertelności jodły od pierśnicy w okresie 1991-2001 była bardziej złożona. Istniały dwa lokalne maksima: dotyczące drzew o pierśnicy około 3 cm i około 50 cm. Drzewa grubsze odznaczały się niewielką śmiertelnością. W okresie 2001-

-2011 zależność śmiertelności jodeł od pierśnicy miała U-kształtny przebieg. Najmniejsza była śmiertelność drzew o pierśnicy około 35 cm.

Jodła i buk różniły się ze względu na typ zależności średniego okresowego (rocznego) przyrostu grubości drzew od ich pierśnicy. W przypadku jodły krzywa obrazująca tę zależność była dwuboczna, niesymetryczna (ryc. 3). W okresie 2001-2011 ogólny przebieg zależności przyrostu grubości drzew od ich pierśnicy był podobny do odnotowanego w latach 1991-2001, ale w grupie drzew średnich i grubych (o pierśnicy powyżej około 20 cm) był większy. W przypadku buka osobno określono przyrost grubości drzew młodej generacji, a osobno starszej (ryc. 4). W młodej generacji zmieniał się wraz ze zwiększaniem pierśnicy i był mniejszy w drugim dziesięcioletnim okresie. W starszej generacji drzewa odznaczały się mniejszym przyrostem, jego zależność od pierśnicy była mało zróżnicowana i podobna w obu dziesięcioletnich okresach.



Ryc. 2.

Śmiertelność jodły (Jd) i buka (Bk) w analizowanych dekadach w zależności od pierśnicy drzew (d [cm])

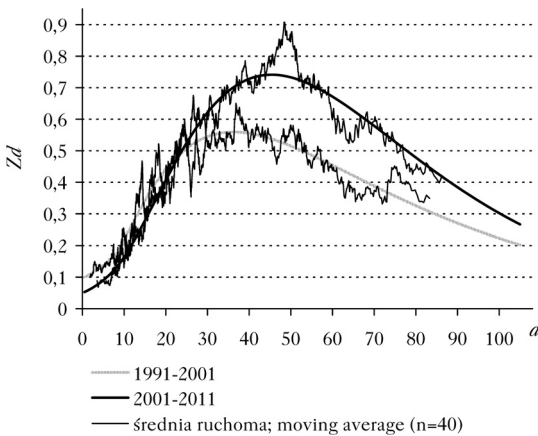
Mortality of silver fir (Jd) and European beech (Bk) in the analysed decades with regard to the diameter at the breast height (d [cm])

Krzywe wyrównujące przyjęte w modelu według klas wymiarów na podstawie danych z okresu 1991-2001:

Smoothing curves adopted in the size-class growth model based on the data from the period 1991-2001:

$$u_{Jd} = 1 - (1 / (1 + \exp(-2,27 + 24,03 \cdot (\log(d+1))^2 - 53,4 \cdot (\log(d+1))^3 + 37,8 \cdot (\log(d+1))^4 - 8,86 \cdot (\log(d+1))^5)))$$

$$u_{Bk} = 1 - (1 / (1 + \exp(-0,89 - 3,66 \cdot (\log(d+1))^3 - 1,77 \cdot (\log(d+1))^4)))$$



Ryc. 3.

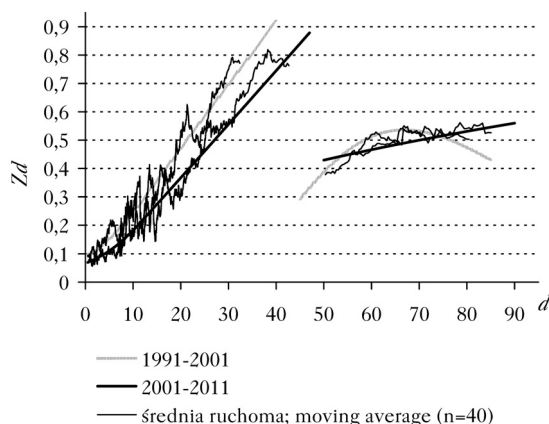
Roczny przyrost grubości jodły (Zd [cm]) w zależności od pierśnicy drzew (d) na początku okresu

Silver fir annual diameter increment (Zd [cm]) with regard to the diameter at the breast height (d) at the beginning of the period

Krzywe wyrównujące przyjęte w modelu według klas wymiarów na podstawie danych z okresu 1991-2001 dla drzew o $d < 9$ cm i $d \geq 9$ cm: Smoothing curves used in the size-class growth model based on the data from the period 1991-2001 for trees with $d < 9$ cm and $d \geq 9$ cm:

$$Zd_{Jd,d < 9} = 10^{-1,34 + 0,032 \cdot \log(d+10)}$$

$$Zd_{Jd,d \geq 9} = 10^{-1,66 + 1,73 \cdot (\log(d))^2 - 0,74 \cdot (\log(d))^3}$$



Ryc. 4.

Roczny przyrost grubości buka (Zd [cm]) w zależności od pierśnicy drzew (d) na początku okresu i daty obliczeń ($year$)

European beech annual diameter increment (Zd [cm]) with regard to the diameter at the breast height (d) at the beginning of the period and the date of calculation ($year$)

Krzywe wyrównujące przyjęte w modelu według klas wymiarów na podstawie danych z okresu 1991-2001 dla drzew o $d < 9$ cm, drzew młodej generacji o $d \geq 9$ cm (górną granicą przedziału w 2011 roku 50 cm, w 2021 roku 54 cm, w 2031 roku 57,5 cm) i drzew starej generacji. Smooth curves used in the size-class growth model based on the data from the period 1991-2001 for trees with $d < 9$ cm, trees from young generation and $d \geq 9$ cm (upper limit of the d range in 2011 - 50 cm, in 2021 - 54 cm, in 2031 - 57.5 cm), and old generation trees

$$Zd_{Bk_d<9} = 10^{-1,48+0,045 \cdot \log(d+10)}$$

$$Zd_{Bk_d \geq 9} = 10^{1,90,8+0,97 \cdot \log(d) - 58,3 \cdot \log(year)}$$

$$Zd_{Bk_old} = 10^{-29,8+32,4 \cdot (\log(d) - 8,86 \cdot (\log(d))^2)}$$

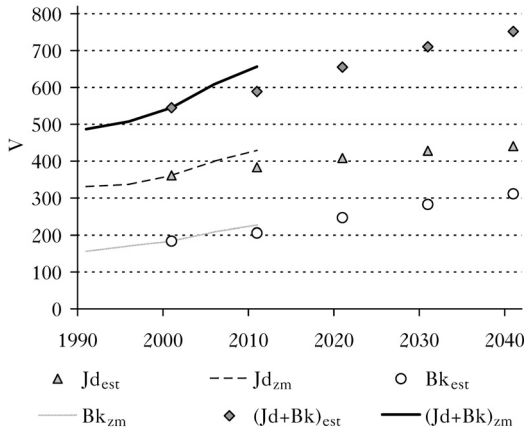
W okresie 1991-2001 tempo przerastania jodeł z klasy wysokości podrostu p_1 ($h=0,3-1,3$ m) do klasy pierśnic p_2 ($d_{1,3}=0,1-1,9$ cm) wyniosło 0,7%/rok (przyjmując zagęszczenie drzew w klasie $h=0,3-1,3$ m takie jak w 1991 roku: 1,5 drzew/ha/rok). W przypadku buka to tempo było większe – wyniosło 1,4%/rok – co oznaczało przerastanie 7,1 drzew/ha/rok.

Średnia zasobność prognozowana w roku 2001 różniła się od zmierzonej o 12 m³/ha (2%). W przypadku jodły była większa o 18 m³/ha (5%). W przypadku buka – odwrotnie – była mniejsza o 6 m³/ha (-3%). Po skorygowaniu tempa śmiertelności obu gatunków, aby w roku 2001 ich zasobności prognozowane były takie jak zmierzone, przewidywane wartości cech dynamicznych w okresie 1991-2001 były zbliżone do wartości zmierzonych. Łącznie dla obu gatunków dorost prognozowany wyniósł 0,39 m³/ha/rok, zmierzony 0,32 m³/ha/rok, ubytki 6,5 i 6,1 m³/ha/rok, a przyrost miąższości 12,8 i 11,3 m³/ha/rok.

Średnia zasobność drzewostanów, prognozowana w roku 2011 (na podstawie zagęszczenia drzew w klasach pierśnic w roku 2001, a na podstawie danych z lat 1991-2001 dla śmiertelności drzew, przyrostu grubości i przerastania drzew podrostu przez próg wysokości $h=1,3$ m), była mniejsza od zasobności zmierzonej o 67 m³/ha (-10%) (ryc. 5). W przypadku jodły ta różnica wynosiła -46 m³/ha (-11%), a buka -21 m³/ha (-9%).

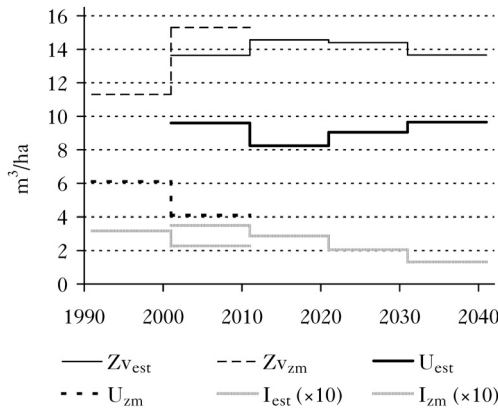
W okresie 2001-2011 śmiertelność jodeł średnich klas grubości i buków klas grubych była mniejsza niż w okresie 1991-2001 (ryc. 2). W rezultacie wielkość ubytków w drugim okresie była o około 1/3 mniejsza niż w okresie pierwszym (ryc. 6). Jednocześnie przyrost grubości obu gatunków (zwłaszcza jodeł) ze średnich i grubych klas pierśnic był większy w okresie 2001-2011 niż w okresie 1991-2001 (ryc. 3 i 4). W następstwie tego przyrost miąższości drzew w drugim dziesięcioletnim okresie był o około 1/3 większy niż w okresie pierwszym (ryc. 6). Mniejsza – niż według danych użytych do prognozy – zmierzona śmiertelność i większe tempo przyrostu znacznej części drzew wpłynęły łącznie na różnicę między prognozowaną a zmierzoną zasobnością.

Na podstawie prognozy na okres 2001-2041 należało spodziewać się ciągłego zwiększania zasobności jodły i buka, przy czym zmiany miałyby być szybsze w przypadku buka (ryc. 5). Z powodu różnic tempa zmian zasobności udział jodły zmniejszyłby się z 66% w roku 2001 do



Ryc. 5.

Prognozowana średnia zasobność (V [m^3/ha]) jodły, buka i łącznie (odpowiednio Jd_{est} , Bk_{est} i $(Jd+Bk)_{est}$) w odniesieniu do zasobności w okresie 1991-2011 zmierzonych na stałych powierzchniach próbnych (odpowiednio Jd_{zm} , Bk_{zm} i $(Jd+Bk)_{zm}$) Estimated average standing volume (V [m^3/ha]) of fir, beech, and both species together (Jd_{est} , Bk_{est} and $(Jd+Bk)_{est}$ respectively) compared to values measured on permanent sample plots in the period 1991-2011 (Jd_{zm} , Bk_{zm} and $(Jd+Bk)_{zm}$ respectively)



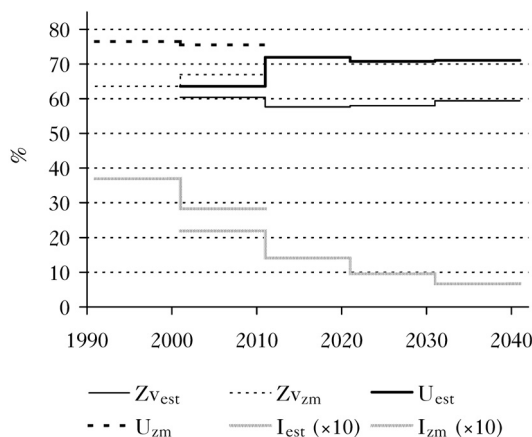
Ryc. 6.

Prognozowana średnia roczna miąższość dorostów do klasy pierśnic $d=8,0-11,9$ cm, ubytków i bieżącego przyrostu (odpowiednio I_{est} , U_{est} i Zv_{est}) w odniesieniu do wartości w latach 1991-2011 zmierzonych na stałych powierzchniach próbnych (odpowiednio I_{zm} , U_{zm} i Zv_{zm}) Estimated average annual volume of ingrowth into the $d=8-11.9$ cm class, loss and current increment (I_{est} , U_{est} i Zv_{est} respectively) compared with the values measured on permanent sample plots in 1991-2011 (I_{zm} , U_{zm} and Zv_{zm} respectively)

59% w roku 2041. Łącznie zasobność drzewostanów zwiększałaby się coraz szybciej w okresie 2001-2021, ale w okresie 2021-2041 to tempo uległoby zmniejszeniu.

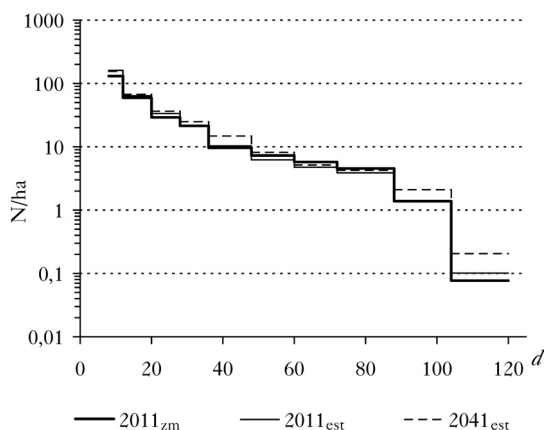
Relacje między prognozowanymi: miąższością ubytków a przyrostem miąższości (ryc. 6), wyjaśniają spodziewane zmiany zasobności w kolejnych dziesięcioletnich okresach. Przyrost miąższości w okresie 2011-2021 w niewielkim stopniu zwiększy się w stosunku do tego w okresie 2001-2011, a potem będzie w niewielkim stopniu się zmniejszać. Przeciwną relację prognozowano dla ubytków: zmniejszenie ich miąższości w drugim dziesięcioleciu, a potem zwiększanie. Miąższość dorostu będzie zmniejszać się stopniowo w kolejnych dziesięcioleciach. Relacja wartości tej cechy między pierwszym a ostatnim dziesięcioleciem prognozy miałyby kształtować się jak około 3:1. W całym okresie 2001-2041 udział jodły w przyroście miąższości miałby być na zbliżonym poziomie (ryc. 7). W przypadku miąższości ubytków byłby większy, bardziej zróżnicowany, ale w okresie 2011-2041 pozostawałby na niemal niezmiennym poziomie. Niewielki, i zmniejszający się w kolejnych dziesięcioleciach objętych prognozą do około $1/3$ początkowej wartości, byłby udział jodły w dorocie.

W roku 2011 prognozowane zagęszczenie drzew w klasach pierśnic w stosunku do zmierzonego było większe w zakresie $d_{1,3}=8-27,9$ cm, podobne w zakresie $d_{1,3}=28-47,9$ cm i $d_{1,3} \geq 88$ cm, a mniejsze w zakresie $d_{1,3}=48-87,9$ cm (ryc. 8). Wartości prognozowane różniły się od zmierzonych z powodu różnic śmiertelności oraz przyrostu grubości drzew między latami 1991-2001 (dane użyte do sporządzenia prognozy) a 2001-2011 (ryc. 2-4).



Ryc. 7.

Prognozowany udział jodły w miąższości dorostów do klasy pierśnic $d=8,0-11,9$ cm, ubytków i bieżącego przyrostu (odpowiednio I_{est} , U_{est} i ZV_{est}) w odniesieniu do wartości w latach 1991-2011 zmierzonych na stałych powierzchniach próbnych (odpowiednio I_{zm} , U_{zm} i ZV_{zm})



Ryc. 8.

Krzywa zagęszczenia drzew w klasach wymiarów prognozowana na lata 2011 i 2041 (odpowiednio 2011_{est} i 2041_{est}) w odniesieniu do wartości w roku 2011 zmierzonych na stałych powierzchniach próbnych (2011_{zm})

klasy nierównej szerokości stanowią wielokrotność 4 cm, dla potrzeb prezentacji graficznej wyniki przedstawiono z uwzględnieniem szerokości klas, np. aby uzyskać wynik w całej klasie $d=12-19,9$ cm, wynik z wykresu należy pomnożyć przez 2

classes of unequal width, which are a multiple of 4 cm, for graphical presentation, the results took into account the width of the classes, e.g. to obtain the result for the whole class $d=12-19.9$ cm, the result from the graph should be multiplied by 2

Niemal we wszystkich klasach pierśnic prognozowane w roku 2041 zagęszczenie drzew miałyby być większe niż prognozowane w roku 2011, a także większe niż zmierzone w roku 2011 (ryc. 8). Różnice były nieduże ($res=0,23 < 0,5 = \text{krytyczna}$; można przyjąć, że rozkłady liczebności drzew w klasach pierśnic były zbliżone). W żadnej z klas prognozowane zagęszczenie drzew w roku 2041 nie różniło się więcej niż o 6 drzew/ha w stosunku do zagęszczenia prognozowanego w roku 2011.

Dyskusja

Po opracowaniu prognozy właściwe wydaje się pytanie o jej trafność. Pełna odpowiedź może nastąpić dopiero po upływie okresu objętego prognozą i choć wtedy ciągle może mieć znaczenie poznawcze, to zwykle ma już znikome znaczenie praktyczne. Z tego powodu ocena trafności jest niekiedy wykonywana po upływie tylko części okresu objętego prognozą.

Długi okres zbierania danych na stałych powierzchniach próbnych na terenie Bukowej Góry umożliwił rozpoczęcie prognozy w roku 2001 i dokonanie sprawdzenia jej trafności po upływie 10 lat. Ponieważ zastosowano model empiryczny – dokładniejszy w prognozowaniu niż model procesów, choć z założenia ograniczony do terenu, z którego zebrano dane do parametry-

zacji [Porté, Bartelink 2002] – można było oczekiwać dużej zgodności prognozowanego i zmierzonego stanu lasu. Jednak uzyskany wynik należy ocenić jako nie w pełni satysfakcjonujący. O ile dość dobrze została przewidziana struktura zagęszczenia drzew w klasach pierśnic, o tyle jako zbyt małą prognozowano zasobność obu gatunków: jodły i buka. To ostatnie wynikało z tego, że w okresie 2001-2011 przyrost grubości drzew okazał się większy niż przyjęto w prognozie, a śmiertelność drzew mniejsza. Trudno jest wskazać jednoznaczną przyczynę większego przyrostu drzew. Na terenie Bukowej Góry to zjawisko obserwowano od połowy lat 90. – podobnie jak nieco wcześniej w wielu częściach Europy [von Teuffel i in. 2006]. Z kolei liczba ubywających drzew nawet w lesie zagospodarowanym podlega dużej zmienności na powierzchni, jak i z upływem czasu [Przybylska 1993], a w lesie naturalnym jest jeszcze bardziej zróżnicowana.

Najważniejsze elementy prognozowanej zmiany stanu zasobów drzewnych Bukowej Góry w okresie 2001-2014 można przedstawić następująco: zwiększanie się średniej zasobności, zwiększanie się udziału buka, zmniejszanie się ilości dorostu oraz utrzymywanie się podobnej struktury zagęszczenia drzew w klasach pierśnic. Ocenę tej prognozy można wykonać tylko pośrednio, odwołując się do zjawisk i trendów poznanych dzięki pomiarom wykonywanym na stałych powierzchniach próbnych. Zwiększanie się zasobności następowało od roku 1974 – to jest od chwili gwałtownego jej zmniejszenia (z 618 do 424 m³/ha) w następstwie huraganu. Poznanie tego zjawiska było możliwe dzięki temu, że pierwsze pomiary drzewostanów Bukowej Góry przeprowadzono w 1974 roku – 5 miesięcy przed huraganem. Wówczas były to 33 stałe powierzchnie próbne o wielkości 500 m². Gdyby wyniki prognozy sprawdziły się, byłyby to niemal 70-letni okres (1974-2041) zwiększania się średniej zasobności drzewostanów. Wydaje się to możliwe ze względu na duży udział drzewostanów zaliczonych do naturalnej fazy rozwojowej optymalnej wczesnej lub późnej (47% powierzchni w roku 2011), a więc tych, które według Leibundguta [Miścicki 1994] odznaczają się zwiększaniem zasobności. Coraz większy (według prognozy) udział buka wynikał nie tylko z mniejszej (niż jodły) śmiertelności i większego tempa przyrostu grubości drzew tego gatunku, ale także ze zwiększania się jego udziału w warstwie odnowienia (75% według sumy wysokości drzew w 1991 roku, 84% w 2011 roku), a stąd później w najcieńszych klasach drzew warstwy macierzystej. Prognozowane zmniejszanie się ilości dorostu miałyby być następstwem coraz mniejszej ilości odnowienia: w roku 1991 średnia suma wysokości drzew wynosiła 6064 ± 2232 m/ha (czyli taka, którą można uznać za dobrą), zaś w roku 2011 tylko 3289 ± 658 m/ha.

Do oceny trafności prognozy (z wykorzystaniem modelu według klas wymiarów) zmian drzewostanów Bukowej Góry wykorzystano dane dotyczące spodziewanych wyników średnich. Świadomość niepewności tych wyników, uzewnętrzniana przez ich szacowany rozrzut (nie wykorzystany w niniejszej pracy) – tym większy, im dłuższy jest okres objęty prognozą – skłania niekiedy do stawiania pytania o zasadność stosowania modeli wzrostu drzewostanów. Jednak znaczna liczba tych, które stosowano z sukcesem, wskazuje, że są one dobrym narzędziem, pozwalającym na liczbowy opis skutków procesów zachodzących w lasach pod wpływem czynników naturalnych, jak i gospodarczych, weryfikują dotychczasową wiedzę o lesie i przyczyniają się do zdobywania nowej [von Teuffel i in. 2006]. Ponadto – według tych autorów – spodziewane zmiany warunków wzrostu lasów, a w związku z tym np. naturalnych zmian składu gatunkowego drzewostanów i sposobu gospodarowania pewnymi gatunkami drzew, spowodowały zwiększenie zainteresowania modelami wzrostu. Takie zmiany – na terenie Bukowej Góry wyrażające się szybszym zwiększaniem zasobności buka niż jodły – prognozowano na podstawie modelu według klas wymiarów. I choć wyniki pomiarów powierzchni próbnych potwierdziły ten trend, to jednak prognozowane tempo zmian różniło się od rzeczywistego. Wskazuje to z jednej strony na potrzebę doskonalenia rozwiązań metodycznych, ale z drugiej na konieczność uświadamia-

nia sobie, że uproszczenia – konieczne w modelach – jak i trudne do ujęcia zdarzenia losowe ograniczają wiarygodność wyników prognoz uzyskiwanych z modeli wzrostu drzewostanów.

Wnioski

- ✦ Stan i dynamika zasobów naturalnego lasu bukowo-jodłowego, prognozowane z wykorzystaniem modelu wzrostu według klas wymiarów, w okresie 2001-2011 ogólnie były zgodne z trendami rozwojowymi określonymi na podstawie danych z pomiarów terenowych. Jednak – zwłaszcza w przypadku zasobności drzewostanów – wyniki nie były w pełni satysfakcjonujące. Mała dokładność prognozy zasobności wynikała z różnic między przewidywanymi a rzeczywistymi wartościami przyrostu i śmiertelności drzew w okresie objętym walidacją.
- ✦ Opracowywanie empirycznego modelu wzrostu może przyczyniać się do pogłębienia poznania struktury i funkcjonowania lasu na obszarze ochrony ścisłej. Może to być traktowane jako spełnianie zadań stawianych lasom wyłączonym spod użytkowania – w zakresie dostarczania wiedzy potrzebnej do prowadzenia lasów zagospodarowanych.

Literatura

- Bruchwald A. 1986. Simulation growth model MDI-1 for Scots pine. *Annals of Warsaw Agricultural University – SGGW-AR, Forestry and Wood Technology* 34: 47-52.
- Brzeziecki B. 1999. Ekologiczny model drzewostanu. Zasady konstrukcji, parametryzacji, przykłady zastosowań. Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa.
- Brzeziecki B. 2002. Rola Systemów Wspomagania Decyzji (SWD) w praktycznym wdrażaniu zasad leśnictwa ekosystemowego. W: Stepien E. [red.]. *Urządzenie lasu wielofunkcyjnego – opinie – poglądy – propozycje*. Fundacja „Rozwój SGGW”, Warszawa. 135-156.
- Burkhardt H. B., Tomé M. 2012. *Modeling forest trees and stands*. Springer, Dordrecht.
- Drozdowski S. 2006. Wykorzystanie modelu macierzowego do prognozowania rozwoju drzewostanów o złożonej postaci. *Sylvan* 150 (2): 3-13.
- Hasenauer H. 2006. Concepts within tree growth modeling. W: Hasenauer H. [red.]. *Sustainable forest management. Growth models for Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg: 3-17.
- Kozak I., Menshutkin V., Parpan V., Shparyk Y., Parpan T., Viter R., Kozak O., Senko Z. 2005. Computer simulation of natural beech forest dynamics in the Boberka river basin in the Ukrainian Beskids. W: Commarmot B., Hamor F. D. [red.]. *Natural Forests in the Temperate Zone of Europe – Values and Utilisation*. Conference 13-17 October 2003, Mukachevo, Ukraine. *Proceedings*. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL; Rakhiv, Carpathian Biosphere Reserve. 121-129.
- Kweczlich I., Miścicki S. 2006. Określenie przy pomocy krzywej równowagi pożądanej struktury liczby drzew w lesie różnowiekowym. *Sylvan* 150 (3): 17-30.
- Miścicki S. 1994. Naturalne fazy rozwojowe drzewostanów – podstawa taksacji leśnych rezerwatów przyrody. *Sylvan* 138 (4): 29-39.
- Peng C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management* 132: 259-279.
- Porté A., Bartelink H. H. 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological Modelling* 150: 141-188.
- Poznański R. 1985. Prognozowanie produkcji i rozwoju zasobów drzewnych w świetle zjawisk przeżywania i wyrębu drzewostanów. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Rozprawa habilitacyjna* 98.
- Przybylska K. 1993. Poznanie i praktyczne znaczenie autokorelacji miąższości drzew na kontrolnych powierzchniach próbnych. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie. Rozprawa habilitacyjna* 175.
- von Teuffel K., Hein S., Kotar M., Preuhlsler P., Puumalainen J., Weinfurter P. 2006. End User Needs and Requirements. W: Hasenauer H. [red.]. *Sustainable forest management. Growth models for Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg. 19-38.
- Vancly J. K. 1994. *Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. CAB International, Wallingford, UK.
- Zasada M. 2007. Zastosowanie modeli wzrostu do prognozowania długookresowych zmian zasobów leśnych na podstawie danych z wielkoobszarowej inwentaryzacji lasu. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Zingg A., Duc P. 1998. Beurteilung des Gleichgewichtszustandes in Plenterwaldversuchsflächen. W: Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. *Jahrestagung vom 25.-27. Mai 1998, Kevelaer*. Freiburg i. Br. *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten*. 147-156.