

**BOGDAN BRZEZIECKI**

## **Ekologiczny model wzrostu lasu: niektóre problemy metodyczne i kalibracyjne\***

**Ecological Growth Model of the Forest: Some Methodical and Calibration Problems**

### **Wstęp**

**D**ynamiczne, symulacyjne modele drzewostanów rozwijane są ze szczególną intensywnością od początku lat sześćdziesiątych (5,9). W chwili obecnej istnieje szerokie spektrum modeli matematycznych drzewostanów, odpowiadające wielkiej różnorodności ekosystemów leśnych istniejących w przyrodzie.

Jak wskazują wyniki badań niektórych autorów (np. 2, 15, 16), w przypadku drzewostanów o stosunkowo prostej strukturze (w przybliżeniu jednogatunkowych i równowiekowych, odnawianych sztucznie) dużą użyteczność wykazują modele empiryczne (indukcyjno-statystyczne). Modele takie tworzy się na podstawie korelacji poznanych w trakcie zbierania szczegółowych danych empirycznych (12). Pozwalają one na ocenę spodziewanego przyrostu miąższości oraz sumarycznej produkcji drzewostanu (16), a także na opracowanie optymalnych sposobów postępowania hodowlanego, szczególnie w zakresie trzebieży i regulacji użytkowania rębego drzewostanów (2).

Prognozowanie rozwoju drzewostanów mniej lub bardziej naturalnych (z reguły wielogatunkowych i różnowiekowych) oraz ocena wpływu zmiennych warunków środowiska na wzrost lasu wymaga zbudowania modeli o bardziej otwartej strukturze i, częściowo przynajmniej, o ekologicznym i dedukcyjnym charakterze. Modele dedukcyjne tworzone są bowiem w oparciu o analizę logiczną podstawowych związków przyczynowych (zależności ekologicznych) występujących w badanym obiekcie (12). Stwarzają one tym samym lepsze podstawy do zrozumienia zasad funkcjonowania badanego obiektu oraz, docelowo, do sterowania jego zachowaniem (3, 7).

---

\*Praca wykonana w ramach CPBP 04.10., w temacie 04.10.07.01 "Badania porównawcze rozwoju drzewostanów naturalnych i zagospodarowanych"

Do modeli ostatniego typu należą tzw. modele gapowe, które swą nazwę zawdzięczają założeniu, że podstawowymi jednostkami przestrzennymi dynamiki lasu naturalnego są luki (ang. gap), powstające w drzewostanach w rezultacie wydzielenia się pewnej liczby drzew z górnego piętra drzewostanu (1, 13, 14). Modele gapowe cechuje względna łatwość estymacji parametrów. Wynika, to m.in. stąd, że przy ich konstrukcji nie korzysta się z obszernych zbiorów danych empirycznych, lecz określa się główne parametry modelu na podstawie najważniejszych właściwości ekologicznych i hodowlanych poszczególnych gatunków drzew.

Celem tej pracy jest przedstawienie głównych założeń, tkwiących u podstaw równań wzrostu drzew, wykorzystywanych w ramach gapowych modeli rozwoju lasu, oraz ich weryfikacja empiryczna dla gatunków występujących w Białowieskim PN. Prezentowana praca stanowi fragment szerszych badań, mających na celu skonstruowanie modelu, opartego na założeniach modeli gapowych, i sprawdzenie jego przydatności w warunkach lasów Polski.

## Podstawy metodyczne

### Wzrost drzew w optymalnych warunkach biocenotycznych i siedliskowych

W modelach gapowych, podobnie jak w innych modelach wzrostu lasu opierających się na symulacji wzrostu poszczególnych drzew, wykorzystuje się równanie pozwalające na obliczanie zmian wymiarów (pierśnicy i wysokości) drzew w określonych jednostkach czasu (najczęściej jeden rok). Równanie takie konstruuje się przy założeniu, że w optymalnych warunkach wzrostu przyrost biomasy (objętości) drzewa jest proporcjonalny do wielkości powierzchni asymilacyjnej pomniejszonej o pewien czynnik redukcyjny związany z aktualnymi wymiarami drzewa (1, 13, 14):

$$\frac{d(D^2H)}{dt} = rLa \left\{ 1 - \frac{DH}{D_{\max}H_{\max}} \right\} \quad (1)$$

gdzie:

$D$  – pierśnica,

$H$  – wysokość,

$t$  – czas,

$r$  – stała zależna od gatunku drzewa,

$La$  – powierzchnia aparatu asymilacyjnego drzewa,

$D_{\max}$  i  $H_{\max}$  – maksymalna pierśnica i wysokość dla danego gatunku drzewa,

$D^2H$  – indeks objętości drzewa.

Zgodnie z powyższym równaniem zmiana objętości ( $D^2H$ ) drzewa w jednostce czasu (jeden rok) jest proporcjonalnie do wielkości powierzchni asymilacyjnej ( $La$ ) pomniejszonej o czynnik redukcyjny wyrażający "koszty utrzymania" drzewa – oddychanie żywych tkanek ( $1 - \frac{DH}{D_{\max}H_{\max}}$ ). "Koszty utrzymania" są tym większe, im bardziej

aktualne wymiary drzewa ( $D$  i  $H$ ) zbliżają się do wymiarów maksymalnych. Specyfika gatunku ukryta jest w stałej  $r$  oraz w maksymalnych rozmiarach, jakie mogą osiągać drzewa danego gatunku ( $D_{\max}$  i  $H_{\max}$ ).

Z powyższego równania można wyeliminować jedną zmienną, zakładając następujący związek między wysokością i pierśnicą drzewa (8):

$$H = 130 + b_2 D - b_3 D^2 \quad (2)$$

gdzie:

130 – wysokość pomiaru pierśnicy (w cm),  
 $b_2$  i  $b_3$  – parametry równania zależne od gatunku drzewa.

Według Botkina i in. (1) powyższe parametry można wyznaczyć z następujących równań:

$$b_2 = 2 \left\{ \frac{H_{\max} - 130}{D_{\max}} \right\}; \quad b_3 = \frac{H_{\max} - 130}{D_{\max}^2} \quad (3)$$

przy założeniu, że dla  $D = D_{\max}$ ,  $H = H_{\max}$  oraz  $dH/dD = 0$

W równaniu (1) występuje jedna zmienna, mianowicie wielkość powierzchni asymilacyjnej drzewa ( $La$ ). Botkin i in. (1), a za nimi Shugart i West (14) proponują następującą zależność między wielkością powierzchni asymilacyjnej i pierśnicowym polem przekroju:

$$La = cD^2 \quad (4)$$

gdzie:

$c$  – stała dla gatunku.

Wykorzystując zależności (2) i (4), po odpowiednich podstawieniach i przekształceniach (1), równanie (1) można sprowadzić do następującej postaci:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{GD (1 - DH(D_{\max} H_{\max}))}{(260 + 3b_2 D - 4b_3 D^2)} \quad (5)$$

gdzie:

$G = rc$  jest parametrem wzrostu stałym dla określonego gatunku drzewa.

Stałą  $G$  można obliczyć na podstawie maksymalnej pierśnicy ( $D_{\max}$ ), maksymalnej wysokości ( $H_{\max}$ ) oraz maksymalnego wieku ( $AGE_{\max}$ ), możliwych do osiągnięcia przez drzewa danego gatunku. Przy założeniu, że  $dD/dt = 0$ , gdy wiek drzewa =  $AGE_{\max}$ , oraz  $D = 2/3D_{\max}$ , gdy wiek drzewa =  $1/2AGE_{\max}$ . Botkin i in. (1) wyprowadzili następujący wzór na stałą  $G$ :

$$G = \frac{4 H_{\max}}{AGE_{\max}} \left\{ \ln [2 (2D_{\max} - 1)] + \frac{a}{2} \ln \left[ \frac{\frac{9}{4} + \frac{a}{2}}{4D_{\max}^2 + 2a D_{\max} - a} \right] \right\} +$$

$$+ \frac{a + \frac{a^2}{2}}{\sqrt{a^2 + 4a}} \ln \left[ \frac{(3 + a - \sqrt{a^2 + 4a})(4D_{\max} + a + \sqrt{a^2 + 4a})}{(3 + a + \sqrt{a^2 + 4a})(4D_{\max} + a - \sqrt{a^2 + 4a})} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$$a = 1 - 130/H_{\max}.$$

## Wpływ czynników ekologicznych na wzrost drzew

Równanie (5) skonstruowano przy założeniu, że wzrost drzewa odbywa się w optymalnych warunkach biocenotycznych i siedliskowych. Ponieważ w rzeczywistości takie warunki zdarzają się bardzo rzadko, wyraża ono raczej tylko potencjalne (bardziej fizjologiczne niż ekologiczne) możliwości wzrostu drzew. Pod wpływem oddziaływania różnych czynników środowiska drzewa osiągają na ogół mniejsze rozmiary niż te, które są teoretycznie możliwe do osiągnięcia dla drzew danego gatunku. Fakt ten uwzględniono w rozpatrywanym równaniu, w którym przewidziano możliwość modyfikacji wzrostu pod wpływem takich czynników jak konkurencja między drzewami o światło, konkurencja o zasoby pokarmowe środowiska oraz zmiany sumy ciepła w sezonie wegetacyjnym.

### Konkurencja o światło

Jednym z głównych typów interakcji między drzewami rosnącymi w bliskim sąsiedztwie jest ich wzajemne ocienianie. Zacienianie powoduje, że ilość światła docierającego do określonego drzewa jest uszczuplona w stosunku do warunków otwartej powierzchni o wielkość proporcjonalną do wielkości powierzchni aparatu asymilacyjnego drzew wyższych od danego i znajdujących się w najbliższym otoczeniu tego drzewa. Tym samym zmniejsza się wielkość fotosyntezy i przyrost objętości drzewa.

Aby obliczyć wielkość współczynnika uszczuplenia ilości światła dla określonego drzewa, należy najpierw określić, jaka jest całkowita suma powierzchni listowia (igliwia) drzew wyższych od danego na podstawie zależności:

$$S_{la} = aD^b \quad (7)$$

gdzie:

$a$  i  $b$  – stałe współczynniki, których wartości liczbowe można wyznaczyć na drodze empirycznej (14).

Na podstawie wielkości powierzchni ocieniającej dane drzewo można teraz obliczyć ilość dostępnego światła docierającego do tego drzewa (1):

$$Al = PHI e^{-k S_{la}} \quad (8)$$

gdzie:

$$PHI = 1,0,$$

$$k = 0,25.$$

Ostatnim krokiem jest obliczenie współczynnika redukcji wzrostu związanego z warunkami świetlnymi ( $r(AI)$ ). Ponieważ gatunki cieniożośne reagują inaczej na zmiany intensywności światła niż gatunki światłożądne, dlatego w omawianym równaniu zastosowano dwa różne wzory do obliczenia współczynnika świetlnego redukcji wzrostu (1, 13):

a) dla gatunków światłożądnych

$$r(AI) = 2,24 \{1 - \text{EXP}[-1,136(AI - 0,08)]\} \quad (9)$$

b) dla gatunków cieniożośnych

$$r(AI) = 1,0 - \text{EXP}[-4,64(AI - 0,05)] \quad (10)$$

### Konkurencja o zasoby środowiska

Wpływ konkurencji o zasoby środowiska na wzrost drzew uwzględnia się przy założeniu, że w określonych warunkach przyrodniczych (siedliskowych, fizjograficznych) istnieje pewna graniczna, maksymalna wartość biomasy, której drzewostan nie może przekroczyć. Zakłada się, że w miarę wzrostu aktualnej biomasy drzewostanu następuje stopniowe wyczerpywanie się zasobów środowiska, prowadzące zahamowania wzrostu poszczególnych drzew.

W celu określenia wartości współczynnika redukcji wzrostu drzewa związanego z konkurencją o zasoby środowiska należy najpierw określić aktualną biomasę drzewostanu. Shugart i West (14) wykorzystują w tym celu następującą zależność empiryczną:

$$BIO = 0,1193 D^{2,393} \quad (11)$$

gdzie:

$BIO$  – biomasa drzewa,  
 $D$  – pierśnica drzewa.

Po obliczeniu biomasy całego drzewostanu, współczynnik redukcji wzrostu otrzymuje się według wzoru:

$$S(BIO) = 1 - \frac{BIO}{SOILQ} \quad (12)$$

gdzie:

$SOILQ$  – maksymalna biomasa drzewostanu, możliwa do osiągnięcia w danych warunkach, określona empirycznie.

Gdy aktualna biomasa drzewostanu ( $BIO$ ) jest niewielka, wówczas współczynnik redukcji wzrostu ( $S/BIO$ ) jest bliski jedności i wzrost drzew jest ograniczony tylko w niewielkim stopniu. Na odwrót, gdy aktualna biomasa drzewostanu zbliża się do wartości maksymalnej ( $SOILQ$ ), wówczas współczynnik redukcji wzrostu zbliża się do zera i wzrost drzew jest silnie ograniczany.

## Wpływ temperatury

Jednym z najważniejszych czynników klimatycznych wpływających na wzrost drzew są zmiany temperatury, a ściślej biorąc dynamika sum temperatur efektywnych (4) w poszczególnych sezonach wegetacyjnych. W celu wyskalowania reakcji drzew na zmiany temperatury należy najpierw określić minimalną sumę temperatur efektywnych, potrzebnych do rozwoju danego gatunku. Botkin i in. (1) wyprowadzili wzór pozwalający na obliczenie sumy temperatur efektywnych na podstawie izoterm stycznia i lipca związanych z północną (minimalna suma temperatur) i południową (maksymalna suma temperatur) granicą zasięgu geograficznego gatunku:

$$DEGD = \frac{365}{2\Pi} (T_{lipca} - T_{stycznia}) - \frac{365}{2} \left\{ 5^{\circ} - \frac{T_{lipca} + T_{stycznia}}{2} \right\} + \frac{365}{\Pi} \frac{\left\{ 5^{\circ} \frac{T_{lipca} + T_{stycznia}}{2} \right\}^2}{T_{lipca} - T_{stycznia}} \quad (13)$$

gdzie:

$DEGD$  – suma temperatur efektywnych,

$T_{lipca}$  i  $T_{stycznia}$  – średnie temperatury najcieplejszego i najzimniejszego miesiąca roku,

$5^{\circ}$  – próg termiczny dla sezonu wegetacyjnego.

Optimum termiczne gatunku znajduje się w tych miejscowościach, które charakteryzują się przeciętną dla zasięgu danego gatunku sumą temperatur efektywnych. Dla dowolnej miejscowości położonej w granicach zasięgu można obliczyć współczynnik informujący jaki jest w danych warunkach wpływ temperatury na wzrost drzew określonego gatunku (1):

$$T(DEGD) = \frac{4(DEGD - DEGD_{\min}) (DEGD_{\max} - DEGD)}{(DEGD_{\max} - DEGD_{\min})^2} \quad (14)$$

gdzie:

$T(DEGD)$  – współczynnik termiczny wzrostu,

$DEGD$  – suma temperatur efektywnych dla danej miejscowości,

$DEGD_{\min}$  – minimalna suma temperatur dla gatunku,

$DEGD_{\max}$  – maksymalna suma temperatur.

Na podstawie obliczonej wartości współczynnika  $T(DEGD)$  można stwierdzić, jak dalece przeciętne warunki termiczne danej miejscowości odbiegają od optimum dla danego gatunku. Im współczynnik  $T(DEGD)$  jest bliższy jedności, tym bardziej dane warunki zbliżają się do optimum. Na północnej i południowej granicy zasięgu wartości współczynnika  $T(DEGD)$  zbliżają się do zero.

Współczynnik  $T(DEGD)$  pozwala ponadto określić, jaki wpływ na wzrost danego gatunku drzewa mają zmiany temperatury w danej miejscowości (odchylenia od średniej).

# Kalibracja równań wzrostu

W związku z projektowaną weryfikacją modelu gapowego na podstawie danych pochodzących ze stałych powierzchni próbnych, założonych w drzewostanach Białowieskiego PN, zasady kalibracji parametrów powyższych równań przedstawiono na przykładzie głównych gatunków drzew występujących w Puszczy Białowieskiej.

Do podstawowych danych potrzebnych w celu oszacowania wartości liczbowych parametrów równań wzrostu należą informacje dotyczące maksymalnych wymiarów (pierśnicy i wysokości) oraz maksymalnego wieku drzew różnych gatunków. W Polsce zagadnieniem tym zajmowało się kilku autorów, m.in. Paczoski (11), Karpiński (7), Ząbek i Zaręba (18), Zaręba (17), Faliński i Hereźniak (6). Opierając się na informacjach podawanych przez tych autorów oraz na wynikach badań prowadzonych w Katedrze Hodowli Lasu, w tab. 1 (kolumny 3–5) zestawiono dane dotyczące 12 gatunków drzew

TABELA 1

Podstawowe parametry równań wzrostu dla ważniejszych gatunków drzew występujących w Białowieskim Parku Narodowym (objaśnienia w tekście)

Gatunek	$D_{max}$ [cm]	$H_{max}$ [m]	$AGE_{max}$ [lata]	$b_2$	$b_3$	G
Sosna	170	42	350	47,9	141	104,1
Świerk	140	55	300	76,7	274	156,3
Dąb sz.	230	42	500	35,4	077	73,2
Grab	100	30	400	57,4	287	65,8
Olsza	100	40	250	77,4	387	137,7
Jesion	130	42	350	62,6	241	103,6
Wiąz górski	150	37	400	47,6	159	80,7
Lipa dr.	200	42	350	40,7	102	104,4
Brzoza br.	100	30	120	57,4	287	219,2
Brzoza im.	70	30	120	82,0	586	217,1
Osika	100	40	100	77,4	387	344,3
Klon zw.ycz.	110	38	350	66,7	303	93,9

leśnych odgrywających najważniejszą rolę w drzewostanach BPN. Można zauważyć, że istnieje duże zróżnicowanie między gatunkami pod względem uwzględnionych parametrów. W grupie rozważanych gatunków największą maksymalną pierśnicę w warunkach zwartego drzewostanu osiągają dąb szypułkowy i lipa drobnolistna; najmniejszą maksymalną pierśnicą charakteryzuje się natomiast brzoza omszona. Pod względem wysokości zdecydowanie przewyższa inne gatunki świerk, który może osiągać wysokości niemal dwukrotnie większe niż takie gatunki jak grab i obie brzozy.

Maksymalny wiek drzew jest z reguły trudniejszym do oszacowania parametrem niż maksymalne wymiary. Większość autorów jest jednak zgodna, że największą długo-

wiecznością charakteryzuje się dąb szypułkowy. Z kolei najbardziej krótkowieczne gatunki to osika oraz obie brzozy. Na okres życia jednego pokolenia dębu przypada 3–5 pokoleń brzoź i osiki.

Powyższe dane posłużyły do obliczenia parametrów  $b_2$  i  $b_3$  równania przedstawiającego zależność między pierśnicą i wysokością (wg wzoru 3) oraz parametru wzrostu  $G$ , określającego tempo wzrostu drzew gatunku (wg wzoru 6). Wyniki zestawione są w tab. 1 (kolumny 6–8).

Jak wynika z obliczonych wartości, największym tempem wzrostu odznacza się osika. Gatunek ten wyraźnie góruje pod względem tempa wzrostu nad innymi, co wynika stąd, że przy najkrótszym wieku maksymalnym (100 lat) osiąga stosunkowo dużą wysokość (40 m) i dość znaczną pierśnicę (100 cm). Do gatunków o dużym tempie wzrostu należą także obie brzozy oraz, chociaż już w mniejszym stopniu, świerk. Olsza, sosna, lipa, jesion i klon stanowią grupę gatunków o pośrednim tempie wzrostu. Najmniejsze tempo wzrostu charakteryzuje takie gatunki jak wiąz górski, dąb szypułkowy i grab.

Do specyficznych cech gatunku, które należy uwzględnić przy konstrukcji rozważanych równań, należy także północna i południowa granica zasięgu geograficznego i związane z nimi izotermy najzimniejszego (styczeń) i najcieplejszego (lipiec) miesiąca roku. Odpowiednie dane zestawione są w tab. 2 (kolumny 2–5). Uzyskano je porównując mapy zasięgów drzew z mapami klimatycznymi, przedstawiającymi przebieg izoterm stycznia i lipca na terenie Europy i Azji. Dane te należy traktować jako orientacyjne, ze względu

TABELA 2

Przeciętna temperatura najzimniejszego (styczeń) i najcieplejszego (lipiec) miesiąca na północno-wschodniej (N) i południowej (S) granicy zasięgu, minimalna ( $DEGD_{\min}$ ) i maksymalna ( $DEGD_{\max}$ ) suma temperatur oraz termiczny współczynnik redukcji wzrostu ( $T/DEGD$ ) dla ważniejszych gatunków drzew Białowieskiego Parku Narodowego\* (objaśnienia w tekście)

Gatunek	Styczeń		Lipiec		$DEGD_{\min}$ (N)°	$DEGD_{\max}$ (S)°	T(DEGD)
	S°	N°	S°	N°			
Sosna	0	-36	20	10	207	2220	0,799
Świerk	0	-20	20	12	512	2220	0,877
Dąb sz.	8	-16	24	16	1038	3816	0,699
Grab	8	-6	24	16	1279	3816	0,516
Olsza	10	-18	24	14	760	4199	0,776
Jesion	10	-14	24	14	819	4199	0,750
Wiąz górski	6	-18	20	12	532	2805	0,999
Lipa dr.	8	-20	24	16	973	3816	0,737
Brzoza br.	6	-38	20	12	374	2805	0,996
Brzoza om.	6	-40	20	10	186	2805	0,983
Osika	10	-40	26	10	186	4530	0,898
Klon zwyczaj.	2	-18	22	16	1004	2725	0,946

\*Przeciętna suma temperatur dla Białowieży = 1665°



na sposób ich określenia i fakt, że nie uwzględniają one m.in. zróżnicowanych wymagań klimatycznych poszczególnych ekotypów i ras geograficznych. W przyszłości mogą one zostać określone bardziej precyzyjnie, w miarę uzyskiwania informacji o poszczególnych proveniencjach i ekotypach.

Na podstawie tych danych, wykorzystując wzór (13), obliczono minimalną (kolumna 6) oraz maksymalną (kolumna 7) sumę temperatur efektywnych, potrzebną do rozwoju drzew określonego gatunku. Spośród gatunków drzew występujących w BPN najmniejszą minimalną sumą temperatur efektywnych zadowolają się osika, brzoza omszona, sosna i brzoza brodawkowata, co jest związane z tym, że zasięg występowania tych gatunków sięga daleko na północ i północny wschód. Największe wymagania w stosunku do minimalnej sumy temperatur mają natomiast takie gatunki jak grab, dąb, klon, lipa i jesion.

Maksymalna suma temperatur informuje z kolei, jak daleko dany gatunek sięga na południe. Pod tym względem na pierwszym miejscu znalazła się osika, która jako jedyna wśród rozpatrywanych gatunków, występuje w północnej Afryce. Dość daleko na południe sięga także areał występowania olszy oraz jesionu. Wiąz górski, obie brzozy, klon zwyczajny oraz szczególnie sosna i świerk, to gatunki, dla których maksymalna suma temperatur efektywnych jest coraz mniejsza.

Na podstawie minimalnych i maksymalnych sum temperatur efektywnych obliczono dla warunków Białowieży (przeciętna suma temperatur równa  $1665^{\circ}$ ) termiczne współczynniki redukcji wzrostu dla każdego gatunku, korzystając z równania (14). Z obliczonych współczynników (kolumna 8 w tab. 2) wynika, że takie gatunki, jak wiąz i obie brzozy, w mniejszym stopniu osika i świerk, znajdują się w Puszczy Białowieskiej blisko swojego optimum termicznego. Dla tych gatunków współczynniki redukcji wzrostu prawie wcale lub niewiele różnią się od jedności. Najbardziej oddalonymi od optimum termicznego są w warunkach Białowieży takie gatunki jak grab, dąb, lipa oraz jesion.

Interesujących spostrzeżeń dostarcza zbadanie, w jaki sposób zmieniają się termiczne współczynniki redukcji wzrostu dla poszczególnych gatunków, przy założeniu, że suma temperatur efektywnych dla danej miejscowości zmienia się o pewną wartość na plus i na minus. W tab. 3 przedstawiono wyniki takiej symulacji przy założeniu 5, 10, 15 i 20% odchyień od przeciętnej sumy ciepła dla Białowieży.

Można stwierdzić, że w warunkach Białowieży jedynymi gatunkami, które wyraźnie reagują zwiększonym wzrostem na zmniejszenie sumy ciepła, są sosna i świerk (gatunki strefy borealnej). I odwrotnie, zwiększenie sumy ciepła powoduje w przypadku tych gatunków redukcję współczynników wzrostu. Takie zachowanie się tych gatunków jest wynikiem tego, że optimum warunków termicznych mają one w miejscowościach charakteryzujących się mniejszą niż Białowieża przeciętną sumą temperatur efektywnych.

Wiąz górski i obie brzozy praktycznie nie reagują ani na wzrost, ani na obniżenie sumy ciepła, dzięki temu, że Białowieża znajduje się w pobliżu optimum termicznego dla tych gatunków. W przypadku klonu, który także ma w Białowieży bliskie optymalnym stosunki cieplne, obniżenie temperatury wywiera zauważalny wpływ na wzrost, co jest jednak związane z małą tolerancją tego gatunku względem sumy ciepła. Wszystkie

TABELA 3

Wpływ zmian sumy temperatur efektywnych dla Białowieży na wielkość termicznego współczynnika redukcji wzrostu

Gatunek	Suma temperatur* [°]								
	1332	1415	1498	1582	1665	1748	1832	1915	1998
Sosna	986	960	920	866	799	718	622	514	392
Świerk	998	997	976	936	877	800	702	587	452
Dąb	378	469	553	630	699	761	816	864	905
Grab	082	203	315	421	516	603	682	751	812
Olsza	555	617	674	727	776	819	858	892	922
Jesion	515	581	642	699	750	797	840	876	908
Wiąz gór.	912	950	977	994	999	995	979	953	916
Lipa dr.	441	525	602	673	737	793	843	886	922
Brzoza br.	955	979	994	999	996	983	960	928	887
Brzoza om.	984	996	999	996	983	963	934	897	853
Osika	777	817	843	872	898	921	941	958	972
Klon	617	727	819	892	946	982	999	996	976

\*Założono odchylenia o 5%, 10%, 15% i 20% na plus i na minus od przeciętnej sumy ciepła dla Białowieży (1665°)

pozostałe gatunki zachowują się w ten sposób, że obniżają swój wzrost, gdy temperatura się obniża, oraz zwiększają wzrost, gdy temperatura się podnosi ponad warunki przeciętne. Najbardziej czułymi na zmiany temperatury gatunkami w tej grupie są grab oraz lipa.

Powyższe przykłady nie wyczerpują naturalnie wszystkich problemów związanych z kalibracją równań, uwzględniających wpływ czynników ekologicznych (światło, woda, składniki pokarmowe, emisje przemysłowe) na wzrost drzew. Ilustrują one jedynie zasady podejścia i pewnej filozofii modelowania tkwiącej u podstaw gapowych modeli rozwoju lasu. Jakkolwiek przedstawione wyżej rezultaty są na ogół zgodne z hodowlą i ekologiczną oceną właściwości poszczególnych gatunków, to jednak dopiero po planowanej weryfikacji modelu gapowego przy użyciu danych ze stałych próbnych w BPN można będzie pełniej ocenić przydatność zaprezentowanego tutaj ujęcia.

## Wnioski

- Konstrukcja równań przedstawionych w pracy pozwala na symulacje wzrostu poszczególnych drzew wchodzących w skład drzewostanów o dowolnym składzie gatunkowym i rosnących w różnych warunkach środowiska.
- Przebieg wzrostu drzew, zgodny z zaprezentowanymi równaniami, zależy z jednej strony od właściwości biologicznych gatunku (takich jak maksymalna

wysokość i pierśnica, maksymalny wiek, tempo wzrostu, stopień światłożądności, itp.), a z drugiej – od aktualnego układu najważniejszych czynników ekologicznych (światło, temperatura, składniki pokarmowe).

- Ekologiczny oraz otwarty na modyfikacje charakter równań umożliwia uwzględnienie wpływu dalszych czynników (np. wielkość opadów w sezonie wegetacyjnym, stopień zanieczyszczeń powietrza) na wzrost drzew. Niezbędne jest jedynie opracowanie sposobu kalibracji reakcji różnych gatunków na zróżnicowaną wielkość natężenia określonego czynnika.
- Przejrzysta struktura równań, względna prostota estymacji parametrów oraz wstępne rezultaty praktycznego zastosowania równań dla gatunków występujących w Białowieckim PN wskazują, jak się wydaje, na możliwość wykorzystania tych równań przy konstrukcji modeli rozwoju lasu w różnych układach drzewostanowo-siedliskowych.

*Z Katedry Hodowli Lasu SGGW-AR w Warszawie*

*Panu prof. E. Bernadzkemu składam serdeczne podziękowanie za cenne uwagi i wnioski udzielone w trakcie przygotowywania niniejszej pracy.*

## Literatura

1. Botkin D.B., Janak J.F., Wallis J.R.: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *J. Ecol.* 1972 Vol. 60.
2. Bruchwald A.: Model wzrostowy MDI-1 dla sosny. *Las Pol.* 1985 nr 9.
3. Bruchwald A.: Przyrodnicze podstawy budowy modeli wzrostu. (W:) Wpływ przemysłowych zanieczyszczeń powietrza i in. polutantów na las. Rogów, 25–26 XI 1987.
4. Czarnowski M.S.: *Zarys ekologii roślin lądowych.* Warszawa: PWN 1978.
5. Dudek A., Ek A.R.: A bibliography of worldwide literature on individual tree based forest stand growth models. *Staff Paper Series* 1980 No. 12.
6. Faliński J.B., Hereźniak J.M.: *Zielone grądy i czarne bory Białowieży.* Warszawa: Nasza Księgarnia 1977.
7. Karpiński J.J.: *Materiały do bioekologii Puszczy Białowieckiej.* Inst. Bad. Leś. Rozpr. i Spraw. Seria A 1949.
8. Ker J.W., Smith J.H.G.: Advantages of the parabolic expression of height-diameter relationships. *For. Chron.* 1955 No. 31.
9. Lepš J., Vacek S.: *Matematicke modely vyvoje lesnich porostu a jejich vyuziti.* *Lesnictvi* 1986 R. 32 nr 8.
10. Mozgawa J.: *Metodologiczne podstawy wykorzystania fotointerpretacji do modelowania systemowego w drzewostanach.* Warszawa: SGGW-AR *Rozprawy naukowe i monografie* 1985.

11. Paczoski J.: Lasy Białowieży. Monografie Naukowe nr 1. Poznań 1930.
12. Polański Z.: Metodyka badań doświadczalnych. Kraków: Politechnika Krakowska 1981.
13. Shugart H.H.: A theory of forest dynamics. New York: Springer 1984.
14. Shugart H.H., West D.C.: Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. J. Environ. Manag. 1977 No. 5.
15. Wróblewski L.: Empiryczny model kształtowania się zapasu w wybranych szeregach rozwojowych drzewostanów sosnowych. Rozprawa doktorska SGGW-AR 1979.
16. Zajączkowski S.: Empiryczny model kształtowania się pierśnicy i przyrostu pierśnicy w wybranych szeregach rozwojowych drzewostanów sosnowych. Sylwan 1981 R. 125 nr 4.
17. Zaręba R.: Maksymalne wymiary drzew Białowieskiego Parku Narodowego. Sylwan 1958 R. 102 nr 1.
18. Ząbek J., Zaręba R.: Najstarsze świerki w Puszczy Białowieskiej Sylwan 1957 R. 101 nr 5,

*Praca wpłynęła do Komitetu Redakcyjnego 11 kwietnia 1989 r.*

## Summary

In the paper, the author presented the principles of construction of ecological growth model of tree, rendering possible to simulate changes of breast height diameter and height of trees being elements of stands with differentiated species and age structure.

The growth equation, constructed for optimum biocenotic and site conditions (5), makes the increment of breast height diameter dependent on the present breast height diameter of tree, on the maximum dimensions of tree and on the constant being a growth parameter specific for tree species.

One took into account also the influence of some processes of demographical character (competition for light — equations (9) and (10), competition for nutrients — equation (12), climatic competition (temperature — equation (14)) on the run of the increment of breast height diameter and height of tree.

An estimation of numerical parameters of the equations, conducted on the basis of data literature and original studies concerning the Białowieża National Park, proved that results obtained with the use of presented equations were in general correlating with the silvicultural and ecological evaluation of individual species of forest trees.