

Przemysław Sypka

**PRZESŁANKI OD ANALIZY ZMIENNOŚCI JAKOŚCI
SIEDLISKA LEŚNEGO NA PODSTAWIE ESTYMACJI
WYSOKOŚCI DRZEWOSTANU**

***PREMISES FOR ANALYSIS OF FOREST SITE QUALITY
DYNAMICS BASED
ON TREE STAND HEIGHT ESTIMATION***

Streszczenie

Dynamika wzrostu drzewostanu bardzo silnie zależy od klasy bonitacyjnej siedliska leśnego. Dodatkowo w drzewostanach zagospodarowanych bezrzębowo (odnowienia naturalne) można zaobserwować bardzo duże zróżnicowanie wysokości drzew, zwłaszcza w pierwszych latach ich życia. Drzewa rosnące pod okapem wykazują dość długi okres powolnego wzrostu, co jest głównie spowodowane ocienianiem przez górne piętro drzewostanu. Zgromadzone empirycznie dane wskazują również, że nawet długi powolny wzrost w zagłuszeniu nie uniemożliwia takim drzewom szybkiego wzrostu w późniejszym okresie ich życia. W pracy opisano metodę, pozwalającą określić zarówno zmienność jakości siedliska w czasie, a także szacunkowy czas wzrost w zagłuszeniu. Opracowany algorytm wykorzystuje model wzrostu drzewostanu zaproponowany przez Sulińskiego [2007]. Występujące w tym modelu parametry mają jednoznaczną treść ekologiczną. Weryfikacja metody została przeprowadzona na podstawie danych wysokości drzewostanów świerkowych wznoszących na różnych siedliskach w Puszczy Białowieskiej i Witowie (Tatry Zachodnie).

Słowa kluczowe: bonitacja, miernik jakości siedliska, modelowanie wzrostu drzewostanu, zagłuszenie wzrostu

Summary

A site quality index is the main factor determining the tree stand growth dynamics. Furthermore, in natural afforested stands (a felling-less forest system) it is possible to observe high variability of tree heights, especially during the first-years of their life. It mainly results from overshadowing the regenerated trees with

the upper storey or dominant trees and the growth process is suppressed then. Collected empirical data show that even the long lasting period of growth in suppression does not prevent such a stand from reaching a rapid growth ratio in the later age. The paper presents a method of estimating a forest site quality and a roughly approximated period of the slow growth in suppression. The algorithm was based on the tree stand growth model proposed by Suliński [2007], which takes into consideration only parameters with direct ecological interpretation. The postulated procedure was verified on empirical spruce stand growth benchmarks from experimental sites in the Białowieża forest and Witów in the Western Tatras.

Key words: site quality, locality class index, tree-stand growth modeling, growth suppression

WPROWADZENIE

Jakość siedliska odgrywa decydującą rolę we wzroście drzewostanów. Z jakością siedliska bezpośrednio są również związane wartości cech biometrycznych drzewostanu warunkujące przenoszenie energii promieniowania słonecznego, osłabienie prędkości wiatru wewnątrz drzewostanu i szereg innych komponentów jego bilansu wodnego [Suliński 1993]. Najlepiej ugruntowanym w nauce i praktyce sposobem wyrażania jakości siedliska leśnego jest bonitacja wzrostowa, wyrażana za pomocą liczby oznaczającej klasę bonitacyjną, lub jako wysokość przeciętną drzewostanu osiągniętą przez dany gatunek w umownym wieku 100 lat [Bruchwald 1995]. Taka interpretacja zakłada, że jakość siedliska nie podlegała żadnym zmianom podczas całego życia drzewostanu. Przeprowadzane analizy pniowe jednak sugerują, iż wzrost drzewostanu może przebiegać z różną intensywnością, zależną nie tylko od fazy rozwojowej, ale również od zmieniającej się w czasie jakości siedliska. Zróznicowanie jakości siedliska w czasie może wynikać ze zmian np. warunków hydroklimatycznych czy też ocieniania przez górne piętro lasu. Przedmiotem pracy jest zmienność jakości siedliska w czasie. Celem pracy jest opracowanie metody umożliwiającej określenie zmienności warunków siedliskowych w oparciu o estymację wysokości drzewostanu.

MODELE WZROSTU DRZEWOSTANU

Od dawna podejmowane są próby stworzenia uniwersalnego wzoru matematycznego, który byłby w stanie opisać proces wzrostu drzewostanu. Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt, że modele matematyczne najczęściej przedstawiają tylko kształt krzywej wzrostu, reprezentującej pewną idealizację tego przebiegu. Dlatego też analizując poszczególne modele [Peng 2000, Richards 1959, Thurig i in. 2005, Tsoularis i Wallace 2002, Zeide 1993] nie można jedynie polegać na zgodności przebiegu z danymi empirycznymi, lecz także należy brać pod uwagę ocenę przyrodniczej interpretowalności występujących w równaniu parametrów. Model powinien przede wszystkim dążyć do wyjaśnienia

istoty zjawiska [Sztencel i Żelawski 1984, Czarnowski 1989, Suliński 1993, Suliński 2007]. Jednym z nielicznych modeli, bazujących na przesłankach przyrodniczych jest wzór zaproponowany przez Czarnowskiego [1989]. Przyrost wysokości drzewa lub rówieśnego zbiorowiska drzew może zostać wyrażony następującym wzorem:

$$\Delta H = \Delta H_m \left(1 - \left|\frac{A-A_m}{A+A_m}\right|\right), \quad (1)$$

gdzie:

ΔH – przyrost roczny drzewostanu na wysokość [m] w kolejnych latach wzrostu A ,

ΔH_m – maksymalny przyrost roczny drzewostanu na wysokość [m] następujący w wieku,

A_m [lata].

Wzór (10) ma stosunkowo łatwy do zinterpretowania sens przyrodniczy, bowiem wartości obydwóch występujących w nim współczynników obliczanych w procesie identyfikacji odnoszą się bezpośrednio do cech drzewostanu, które dla drzewostanów iglastych stożkowych są łatwe do zmierzenia „z gruntu” – maksymalnego przyrostu rocznego na wysokość ΔH_m oraz wieku A_m , w którym przyrost ten wystąpił. Według koncepcji Czarnowskiego wysokość drzewostanu otrzymuje się po scałkowaniu funkcji danej wzorem (1). Dla wieku A_m ma ona punkt osobliwy, toteż całkowanie należy wykonać oddzielnie dla dwóch przedziałów rozgraniczonych wartością A_m :

$$\begin{cases} 2\Delta H_m A_m \left(\frac{A}{A_m} - \ln\left(1 + \frac{A}{A_m}\right)\right) & \text{dla } A \leq A_m \\ 2\Delta H_m A_m \left(\ln\left(1 + \frac{A}{A_m}\right) + 1 - 2\ln(2)\right) & \text{dla } A \geq A_m \end{cases} \quad (2)$$

Maksymalny roczny przyrost wysokości drzewostanu i wiek kulminacji przyrostu mają wyraźną treść przyrodniczą: ΔH_m jest przejawem sił wzrostowych danego gatunku, natomiast A_m można nazwać reakcją gatunku na napotkane warunki siedliskowe. Na dobrym siedlisku wzrost na wysokość jest duży w młodym wieku, gdy siedlisko jest słabsze dynamika wzrostowa drzew maleje i kulminacja występuje w wieku późniejszym. Obydwa te parametry nie występują w sposób jawny w tabelach zasobności [Schwappach 1943], czy w danych z doświadczalnych powierzchni trzebieżowych [Wiedemann 1957] i muszą być obliczone w procesie identyfikacji wzoru (2). W warunkach naturalnych bardzo często stare drzewa kończą swoje życie po różnych katastrofach żywiołowych jak np. huragan, uderzenie pioruna czy pożar. Jednakże niektóre stare drzewa wykazują nieprzerwany przyrost, osiągając imponujące rozmiary. Roczny przyrost tych drzew jest bardzo nieznaczny. Dodatkowym czynnikiem redukującym

wysokość drzew mogą być silne wiatry, zmuszające drzewa do ciągłej regeneracji. Taka zdolność ciągłej regeneracji wskazuje, że drzewa przyrastają wszędzie i wznoszą się aż do śmierci [Czarnowski 1989].

Występujące we wzorach (1) i (2) kulminacja przyrostu na wysokość drzewostanu (ΔH_m) oraz wiekiem jej wystąpienia (A_m) są od siebie zależne [Assman 1968, Borowski 1974, Jaworski i Szarawa 1981, Suliński 1997]:

- wartości ΔH_m bezpośrednio są powiązane z gatunkiem drzew: gatunkom światłożądnym osiągają większe wartości ΔH_m we wcześniejszym wieku A_m w porównaniu do gatunków cienioznośnych,
- przyrosty ΔH_m są większe dla danego gatunku na siedliskach o lepszej bonitacji,
- z bonitacją związany jest również wiek A_m – kulminacja przyrostu wysokości następuje wcześniej na lepszych siedliskach,
- wiek A_m może być przesunięty w czasie, jeżeli drzewostan wzrastał w początkowej fazie pod osłoną górnego piętra lasu,
- na wartości ΔH_m i A_m mogą wpływać czynności gospodarcze (rodzaj i stopień trzebieży), a także gwałtownie działające czynniki biotyczne i abiotyczne.

Pierwszą próbę opisanie zależności pomiędzy powyższymi parametrami podjął Czarnowski [1989] wprowadzając wskaźnik zdolności produkcyjnej siedliska \mathcal{N} :

$$\Delta H_m A_m = \lambda \cdot \mathcal{N} \quad (3)$$

gdzie λ jest wartością stałą, charakterystyczną dla danego gatunku, przykładowo dla sosny pospolitej $\lambda = 0.25$. W oparciu o dane zaczerpnięte z tablic zasobności i powierzchni trzebieżowych Suliński [1997, 2007] postawił hipotezę, że iloczyn maksymalnego przyrostu na wysokość drzewostanu i wieku jego wystąpienia jest stały: $\Delta H_m A_m = \eta = const$.

Na tej podstawie zaproponowany został następujący model wzrostu drzewostanu [Suliński 2007]:

$$\begin{cases} 2\eta \left(\frac{A}{A_m} - \ln \left(1 + \frac{A}{A_m} \right) \right) & \text{dla } A \leq A_m \\ 2\eta \left(\ln \left(1 + \frac{A}{A_m} \right) + 1 - 2 \ln(2) \right) & \text{dla } A \geq A_m \end{cases} \quad (4)$$

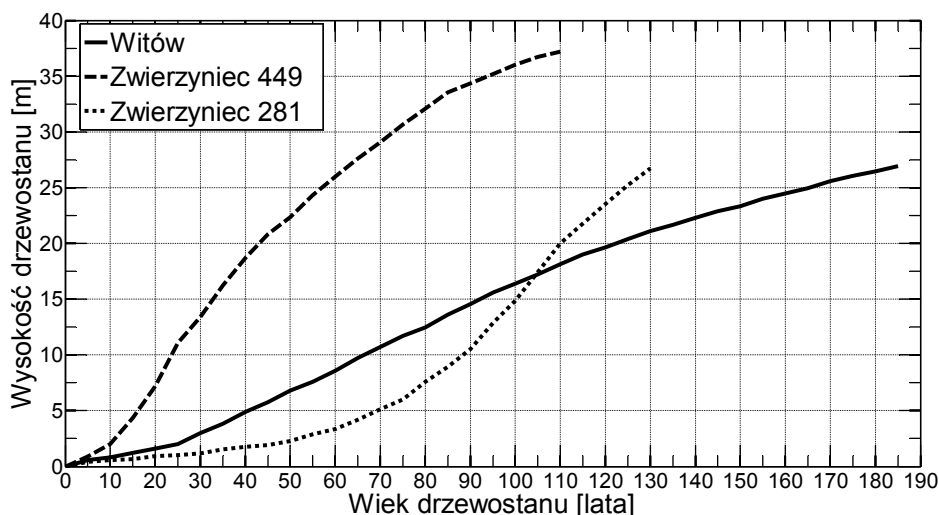
gdzie η jest wielkością stałą charakterystyczną dla danego gatunku, niezależną od klasy bonitacyjnej siedliska. Jedynym parametrem występującym we wzorze (4) jest wiek wystąpienia kulminacji wzrostu na wysokość (A_m), który może być utożsamiany z miernikiem jakości siedliska (bonitacji wzrostowej), oznaczonym literą Q – im Q mniejsze, tym siedlisko jest lepsze i maksymalny roczny przyrost na wysokość występuje w młodszym wieku [Suliński 2007].

ESTYMACJA ZMIENNOŚCI JAKOŚCI SIEDLISKA

Dynamika wzrostu drzew bardzo silnie zależy od typu odnowienia. W odnowieniach naturalnych obserwowane jest duże zróżnicowanie wysokości drzew, zwłaszcza w pierwszych latach życia. Drzewa rosnące pod okapem wykazują dość długi okres powolnego wzrostu. Dlatego w drzewostanach naturalnych jak i drzewostanach zagospodarowanych bezrębowo warunki siedliskowe zmieniają się zarówno przestrzennie jak i w czasie. Przy odnowieniach sztucznych na otwartym terenie wszystkie drzewa mają takie same warunki wzrostu. Do analizy zostały wybrane 3 drzewostany świerkowe: dwa z Puszczy Białowieskiej (Nadleśnictwo Zwierzyniec, oddziały 449 i 281) oraz jeden z Witowa (Tatry Zachodnie) [Borowski 1974]. Są to niepodważalnie dane z pomiarów wysokości na powierzchniach próbnych, spełniające wszystkie podstawowe wymogi danych empirycznych. Krzywe wzrostu tych drzewostanów zostały zaprezentowane na rys. 1. Drzewostan świerkowy w Puszczy Białowieskiej w Nadleśnictwie Zwierzyniec (oddział 449) był drzewostanem jednowiekowym i charakteryzował się bardzo krótkim, prawie 10 letnim, okresem powolnego wzrostu. Kulminacja przyrostu na wysokość wystąpiła w wieku około 25 lat. Wysokości świerków w danym wieku w tym oddziale były znacznie większe niż świerków z innych analizowanych powierzchni. Natomiast drzewostan naturalny, różnowiekowy (Nadleśnictwo Zwierzyniec, oddział 281) charakteryzował się bardzo długim, bo trwającym do około 80 roku życia, powolnym okresem wzrostu. Główną przyczyną, oprócz niewiele gorszej jakości siedliska w porównaniu do oddziału 449, były niekorzystne warunki wzrostu – wzrost odbywał się w ocienieniu przez górne piętro drzewostanu. Ważnym spostrzeżeniem jest to, że tak długi powolny wzrost nie uniemożliwił tym drzewom szybkiego wzrostu w późniejszym okresie ich życia. Kulminacja przyrostu tych drzew na wysokość wystąpiła w wieku około 110 lat. Drzewostan z zachodniej części Tatr (Witów) wzrastał przy górnej granicy zasięgu lasu (1400 – 1450 m n.p.m.). Z uwagi na panujące tam niekorzystne warunki siedliskowe (niskie temperatury, krótki okres wegetacji), wzrost nie odbywał się tak intensywnie jak na powierzchni Zwierzyniec 449.

Zaprezentowane powyżej wzory (2) oraz (4) bardzo dobrze odwzorowują przebiegi krzywych wzrostu dla powierzchni Zwierzyniec 449 oraz Witów (tab. 1). Z uwagi na istotną zmianę warunków siedliskowych na powierzchni Zwierzyniec 281 powyższe wzory nie mogą poprawnie aproksymować wysokości drzewostanu w zależności od wieku. W tym przypadku założenie, że jakość siedliska była stała podczas całego życia drzewostanu ($Q = \text{const}$) nie jest spełnione i wprowadza znaczny błąd do przeprowadzanych estymacji. Wartości estymowanych parametrów ΔH_m oraz A_m w tym przypadku przyjmują absurdalne wartości. Suliński [1997] zaobserwował, że przyjmując poprawkę na czas trwania przygluszenia (około 80 lat), iloczyn $\Delta H_m A_m = 0.54 \cdot (108 - 78) = 16.2$ i jest

bardzo zbliżony do analogicznego iloczynu dla świerków z powierzchni Zwierzyniec 449 $\Delta H_m A_m = 17.2$. Obie te wartości mieszczą się w 95% przedziale ufności obliczonym w oparciu o dane z tabel zasobności i przyrostów drzewostanów [Suliński 1997].



Rysunek 1. Krzywe wzrostu wysokości panujących świerków w zależności od warunków wzrostu [Borowski 1974]

Figure 1. Growth curves of dominant spruce trees at different investigated sites [Borowski 1974]

Tabela 1. Wyniki testów zgodności estymacji wysokości wzorami (2) oraz (4)

Table 1. Regression statistics for equations (2) and (4)

Wzór		A_m	ΔH_m	$\eta = \Delta H_m A_m$	R	$100R^2$	σ [m]	μ [%]	Q75	Q25
(2)	Zwierzyniec 449	20.0	0.65	12.5	0.999	99.86	0.46	2.0	1.3	-1.7
	Witów	54.4	0.23	13.0	1.000	99.93	0.24	1.7	1.8	-1.1
	Zwierzyniec 281	59561.6	90.8	5.4e+06	0.990	97.96	1.38	16.1	6.8	-42.8
(4)	Zwierzyniec 449	19.6	0.65	12.7	0.999	99.86	0.46	2.0	1.1	-1.5
	Witów	55.8	0.23		1.000	99.94	0.25	1.7	2.3	-0.9

R – współczynnik korelacji, σ – odchylenie standardowe, μ – średni błąd oszacowania, Q75 – kwartył górny, Q25 – kwartył dolny. Kursywą zostały zaznaczone wartości obliczone na podstawie estymowanych parametrów.

Powyższa obserwacja sugeruje, że krzywa wzrostu takiego drzewostanu mogła by być opisana zależnością (4) z odpowiednią poprawką na czas trwania przygłuszenia wzrostu, co odpowiadałoby przesunięciu krzywej wzrostu w czasie:

$$\begin{cases} 2\eta \left(\frac{A-d}{Q} - \ln \left(1 + \frac{A-d}{Q} \right) \right) & \text{dla } A \leq Q + d \\ 2\eta \left(\ln \left(1 + \frac{A-d}{Q} \right) + 1 - 2 \ln(2) \right) & \text{dla } A \geq Q + d \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: η jest wielkością stałą charakterystyczną dla danego gatunku, niezależną od klasy bonitacyjnej siedliska, d odpowiada za czas trwania przygluszenia a Q jest miernikiem jakości siedliska. Parametr Q jest powiązany z obserwowalnym wiekiem wystąpienia kulminacji przyrostu na wysokość $A_m = Q + d$. Wartość parametru η należy wyliczyć globalnie, wspólnie dla wszystkich krzywych w obrębie danego gatunku. Dodatkowo, w celu uzyskania zmienności parametrów Q oraz d występujących we wzorze (5), analizowane krzywe wzrostu można podzielić na fragmenty odpowiadające krótszym odcinkom czasu, np. wieloleciom. W takiej sytuacji parametry Q oraz d powinny zostać wyznaczone osobno dla każdego fragmentu krzywej wzrostu odpowiadającemu właściwemu wieloleciu.

Zaprezentowane na rys. 1 krzywe wzrostu dla drzewostanów świerkowych [Borowski 1974] zostały najpierw zdigitalizowane z rozdzielczością co 5 lat, a następnie podzielone na fragmenty odpowiadające kolejnym 20-letniom (5 kolejnych pomiarów). Taki zabieg umożliwił uśrednienie estymowanych na podstawie wzoru (5) parametrów Q oraz d za czas trwania danego 20-lecia. W celu zwiększenia liczby analizowanych przypadków każde wielolecie zaczynało się co 5 lat (nakładkowanie 15 lat), tj. pierwsze analizowane 20-lecie dla wieku drzewostanu 5 – 25 lat, drugie rozpatrywane 20-lecie dla wieku drzewostanu 10 – 30, trzecie 20-lecie dla wieku drzewostanu 15 – 35 lat itd. Zasadę podziału danych na wielolecia na przykładzie drzewostanu z Nadleśnictwa Zwierzyniec, Oddział 289 przedstawia rys. 2 – wielolecie A odpowiada wzrastaniu drzewostanu w wieku od 50 do 70 lat a wielolecie B reprezentuje wzrost drzewostanu w wieku od 105 do 125 lat. Dla każdego wielolecia zostały estymowane pary parametrów (Q_A, d_A) i (Q_B, d_B) determinujące przebieg krzywej wzrostu w danym wieloleciu, natomiast parametr η jest wspólny dla wszystkich wieloleci. Globalne wyniki aproksymacji 3 krzywych wzrostu (powierzchnie Witów, Zwierzyniec 449 oraz Zwierzyniec 289) podzielonych na 20-lecia według powyższego schematu zostały zamieszczone w tab. 2.

Tabela 2. Wyniki testów zgodności estymacji wzorem (5) wysokości w obrębie wyszczególnionych 20-leci dla wszystkich analizowanych powierzchni

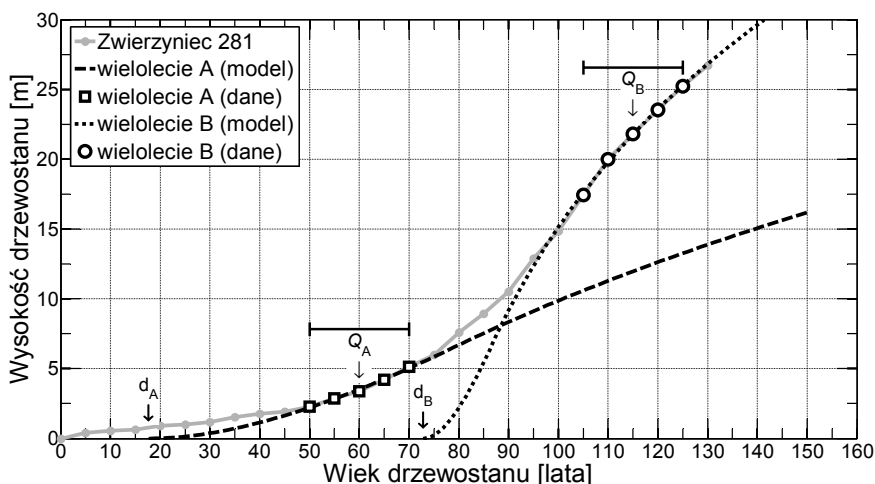
Table 2. Global regression statistics for equation (5) at all research sites

	η	R	$100R^2$	σ [m]	μ [%]	Q75	Q25
CAŁOŚĆ	10.6	1.000	99.97	0.173	1.2	0.8	-0.4
Witów		1.000	99.98	0.102	0.7	0.4	-0.2
Zwierzyniec 449		1.000	99.96	0.206	0.9	0.5	-0.4
Zwierzyniec 281		1.000	99.91	0.223	2.9	4.1	-1.8

R – współczynnik korelacji, σ – odchylenie standardowe, μ – średni błąd oszacowania, Q75 – kwartył górny, Q25 – kwartył dolny. Kursywą zostały zaznaczone wartości obliczone na podstawie estymowanych parametrów.

ANALIZA WYNIKÓW

Analiza zmienności jakości siedlisk dla trzech drzewostanów została przeprowadzona łącznie dla 73 dwudziestolecia (Witów: 33 przypadki, Zwierzyniec 449: 18 przypadków oraz Zwierzyniec 289: 22 przypadki). W tab. 2 zaprezentowane zostały tylko globalne testy zgodności – równanie (5) odzworowuje przebieg krzywych wzrostu z bardzo dużą dokładnością. Świadczą o tym zarówno wysokie wartości współczynnika korelacji (R , $100R^2$) jak i bardzo niskie wartości średniego błędu oszacowania (μ) oraz kwartyli górnego i dolnego (odpowiednio Q_{75} oraz Q_{25}). Szczegółowa analiza testów zgodności wykazuje, że największe błędy estymacji pojawiają się podczas aproksymacji wysokości we wczesnych latach wzrostu drzewostanów: Witów 5 – 35 lat (trzy pierwsze 20-lecia), Zwierzyniec 449 5 – 30 lat (dwa pierwsze 20-lecia), Zwierzyniec 289 5 – 55 lat (7 pierwszych 20-leci). Powyższe błędy mogą głównie wynikać ze źle odczytanych z wykresów wysokości drzewostanów (rys. 1). W przypadku drzewostanu Zwierzyniec 289 najlepsze wyniki testów zgodności uzyskiwane są w wieku powyżej 100 lat.

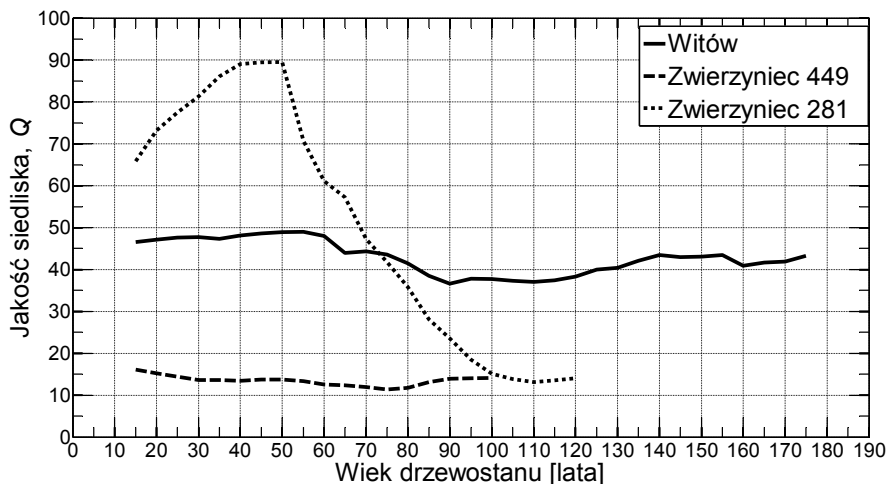


Rysunek 2. Przykładowy podział krzywej wzrostu na wieloletnia A oraz B wraz z estymacją wysokości w danym wieloletniu

Figure 2. Example division of growth curve data into multiannual periods A and B with approximation of height within a given period

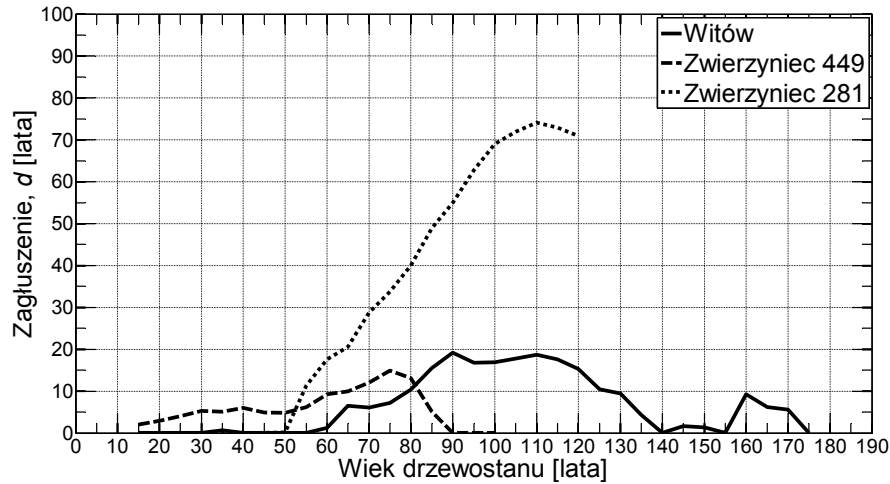
Na podstawie wysokości zawartych w tabelach zasobności drzewostanów [Schwappach 1943, Wiedemann 1957] można zauważyć, że drzewostan Zwierzyniec 449 rósł na siedlisku I bonitacji ($H_{100} = 36\text{m}$, rys. 1) a drzewostan

z Witowa na siedlisku V bonitacji ($H_{100} = 16.4\text{m}$, rys. 1). Analiza jakości siedliska dla drzewostanu Zwierzyniec 289 nie jest tak jednoznaczna jak w dwóch powyższych przypadkach. Odczytując bezpośrednio z krzywej wzrostu wysokość w wieku 100 lat ($H_{100} = 14.8\text{m}$) należałoby przyjąć, że to również było siedlisko V bonitacji. Jednakże można zaobserwować (rys. 2), że rozwój drzewostanu w wieku 50 – 70 lat wskazywał na znacznie gorszą jakość siedliska (przewidywana wysokość $H_{100} = 9.9\text{m}$, brak danych o tak słabych siedliskach w tabelach zasobności). Zmienność w czasie wyznaczonych podczas identyfikacji wzoru (5) parametrów opisujących jakość siedliska (Q) i czas zagłuszonego wzrostu (d) zostały przedstawione na odpowiednio rys. 3 oraz rys. 4. Parametr Q , reprezentujący jakość siedliska, dla drzewostanu Zwierzyniec 449 prawie nie zmienia swojej wartości oscylującej w granicach 13...16. Można przypuszczać, że jest to wartość charakterystyczna dla siedlisk I bonitacji. Małą zmienność w czasie wykazywała również jakość siedliska dla drzewostanu w Witowie ($Q = 37 \dots 49$). Takie wartości powinny być typowe dla słabych siedlisk V bonitacji. Przedstawiona niestałość warunków siedliskowych bezpośrednio mogła wynikać ze zmienności warunków klimatycznych w Tatrach Zachodnich w kolejnych 20-leciach. Zaprezentowany przebieg zmienności jakości siedliska dla drzewostanu Zwierzyniec 289 (rys. 3) wykazuje największe fluktuacje i potwierdza publikowane wcześniej obserwacje [Borowski 1974, Suliński 1997]. Początkowa faza wzrostu (do 40 lat) przebiegała w bardzo złych warunkach. W wieku 40–50 lat nastąpiła pewna stabilizacja jakości siedliska, lecz na bardzo kiepskim jakościowo poziomie – parametr $Q = 90$, czyli około 2 razy więcej niż dla powierzchni Witów. Należy pamiętać, że trzykrotne zwiększenie wartości parametru Q z około 15 (Zwierzyniec 449) na około 45 (Witów) odpowiadało zmianie bonitacji z poziomu I na V. W wieku 50 lat drzewostan ten osiągnął wysokość zaledwie około 2.5m (rys. 1), a wzrost w wieku 30 – 50 lat ekstrapolował $H_{100} = 7.7\text{m}$. Od tego momentu nastąpiła sukcesywna poprawa jakości siedliska. W końcowym okresie (dla wieku większego niż 100 lat) warunki siedliskowe na tej powierzchni były takie same jak dla drzewostanu Zwierzyniec 449 (I bonitacja). Wzrost drzewostanu w tej fazie odbywał się bardzo dynamicznie (rys. 1), maksymalny roczny przyrost na wysokość wyniósł wtedy $\Delta H_m = 0.54\text{m}$. Niemniej jednak przyjęcie wielkości H_{100} jako klasy bonitacyjnej spowodowałoby określenie bonitacji tego siedliska w tym czasie znowu na poziomie V ($H_{100} = 15.1\text{m}$, rys. 2).



Rysunek 3. Zmienność jakości siedliska w drzewostanach na rozpatrywanych powierzchniach badawczych na podstawie estymacji parametru Q w modelu (5)
Figure 3. Changeability of site quality at investigated sites based on estimation of parameter Q in model equation (5).

Trudno jednoznacznie określić jak szybko przebiegał proces przerzedzenia górnego piętra lasu i odsłonięcia drzewostanu podokapowego na powierzchni Zwierzyniec 289. Na podstawie zmienności parametru Q można oszacować ten czas na 50 lat. W pierwszych 50-ciu latach życia drzewostan wzrastał w stałych lecz bardzo złych warunkach i dlatego parametr d przyjmował wartość zero (rys. 4). Wraz z poprawą jakości siedliska i coraz szybszym wzrostem drzewostanu, zaczęła się zwiększać wartość tego parametru określając czas początkowego wzrostu w zagłuszeniu. W końcowym etapie, powyżej 100 lat, gdy warunki siedliskowe były bardzo dobre (I bonitacja) parametr d osiąga ustabilizowane wartości na poziomie 70–75 lat. Potwierdza to empiryczne obserwacje Sulińskiego [1997], który oszacował czas trwania zagłuszenia na 78 lat. Pewne zmiany wartości parametru d dla drzewostanów Zwierzyniec 449 oraz w Witowie mogą być utożsamiane ze zmianą jakości tych siedlisk. Dla świerczyny w Zwierzyncu 449 najlepsze siedlisko wystąpiło w wieku 75 lat (najmniejsza wartość parametru Q dla tego siedliska). W tym samym czasie można odnotować największą wartość parametru d dla tego drzewostanu. W późniejszym okresie (90–100 lat) jakość siedliska wróciła do poprzedniego poziomu i parametr d znowu był równy 0. Analogicznie obserwacje można poczynić dla drzewostanu w Witowie.



Rysunek 4. Zmienność zagłuszenia wzrostu w drzewostanach na rozpatrywanych powierzchniach badawczych na podstawie estymowanego parametru d w modelu (5)
Figure 4. Changeability of growth suppression at investigated sites based on estimation of parameter d in model equation (5)

WNIOSKI

Zaprezentowany w pracy model (5) pozwala na estymację zmienności jakości siedliska na podstawie krzywych wzrostu drzewostanów. Uzyskane wyniki aproksymacji wysokości jednoznacznie wskazują na bardzo dużą dokładność przedstawionej metody. Należy przypuszczać, że dogłębne poznanie relacji pomiędzy zmieniającymi się warunkami siedliskowymi a dynamiką wzrostu drzewostanów wydatnie przyczyni się do opracowania analitycznych wzorów pozwalających określać roczną produkcję biomasy, na podstawie tylko wieku i wysokości drzewostanu. Powyższy algorytm może zostać również zastosowany do danych zawartych w tablicach zasobności lub z powierzchni trzebieżowych, pozwalając na dokładniejsze wyznaczenie wartości stałej gatunkowej η . Dodatkowo przedstawiona metoda może posłużyć do oszacowania szybkości reakcji drzewostanu na zmiany warunków bytowania, które mogą być nagłe jak np. wycięcie drzewostanu dominującego czy jego powalenie przez huragan, jak i długoczasowe np. powolne usychanie i wymieranie górnego piętra drzewostanu. Istnieje także możliwość podziału danych na dowolne wieloletnia z dowolnym nakładkowaniem, możliwa jest również analiza wielolecia rozłącznych. Pewną wadą zaprezentowanego rozwiązania jest duża liczba parametrów, które muszą być jednocześnie identyfikowane. W przedstawionym przykładzie dla 3 drzewostanów świerkowych z podziałem na 20-letnia całkowita liczba parametrów wyniosła 147. Niemniej jednak całkowity czas obliczeń na komputerze

klasy PC, bez wykorzystywania specjalnych procedur optymalizujących czas obliczeń, wyniósł tylko 35 sekund.

BIBLIOGRAFIA

- Assman E. *Nauka o produktywności lasu*. PWRiL, Warszawa 1968.
- Borowski M. *Przyrost drzew i drzewostanów*. PWRiL, Warszawa 1974.
- Bruchwald A. *Dendrometria*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1995.
- Czarnowski M. S. *Zarys ekologii roślin lądowych*. PWN, Warszawa 1989.
- Jaworski A., Szarawa J. *Kształtowanie się wzrostu i przyrostu wysokości naturalnych odnowień jodły (*Abies alba* Mill.) na przykładzie wybranych powierzchni w lasach krynickich*. Acta Agr. Silv. ser. Silv. 20: 17-40, 1981.
- Peng Ch. *Growth and yields models for uneven-aged stands: past, recent and future*. Forest Ecology and Management, Vol. 132, pp. 259-279, 2000.
- Richards F. J. *A flexible growth function for empirical use*. Journal of Experimental Botany 10: 290-300, 1959.
- Schwappach A. *Ertragstabellen der wichtigeren Holzarten in tabellarischer und graphischer Form*. Merkur, Praga 1943.
- Suliński J. *Iloczyn maksymalnego rocznego przyrostu wysokości drzewostanu i wieku jego wystąpienia w świetle danych tabelarycznych*. Acta Agraria Et Silvestria Series Silvestris Vol. XXXV, 1997, s. 61-77.
- Suliński J. *Metoda obliczania rocznej produkcji biomasy w zbiorowisku leśnym w zależności od wysokości i wieku drzewostanu*. Acta Agraria Et Silvestria Series Silvestris Vol. XLV, 2007, s. 89-117.
- Suliński J. *Modelowanie bilansu wodnego w wymianie między atmosferą, drzewostanem i gruntem przy użyciu kryteriów ekologicznych*. Zeszyty Naukowe AR Kraków, rozpr. 179, 1993.
- Sztencel I., Żelawski W. *Modele matematyczne najczęściej stosowane w analizie wzrostu żywych organizmów*. Wiadomości Botaniczne, Vol. 28, No. 3, pp. 221-226, 1984.
- Thurig E., Kaufmann E., Frisullo R., Bugmann H. *Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model*. Forest Ecology and Management, Vol. 204, pp. 51-66, 2005.
- Tsoularis A., Wallace J. *Analysis of logistic growth models*. Mathematical Bioscience, Vol. 179, pp. 21-55, 2002.
- Wiedemann E. *Ertragstabellen wichtiger Holzarten bei verschiedener Durchforstung*. Verlag M. u. H. Schaper, Hannover, 1957.
- Zeide B. *Analysis of Growth Equations*. Forest Science, Vol. 39, No. 3, pp. 594-616, 1993.

Dr inż. Przemysław Sypka
Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Elektroniki
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: sypka@agh.edu.pl

*Artykuł powstał w ramach działalności statutowej
Katedry Elektroniki AGH w Krakowie*