

Ihor KOZAK, DARIA CHŁÓDEK, Adam ZAWADZKI, Hanna KOZAK, Grzegorz POTACZAŁA *

SYMULACJA PRZEBUDOWY DRZEWOSTANÓW ŚWIERKOWYCH W BIESZCZADACH ZA POMOCĄ MODELU FORKOME

CONVERSION SIMULATION OF SPRUCE STANDS IN THE BIESZCZADY
MOUNTAINS WITH THE AID OF FORKOME MODEL

Abstract. *A computer model FORKOME was applied for simulation of *Picea abies* L. Karst. stands conversion in the Bieszczady Mountains. The model was used to forecast 9 conversion scenarios of the time span of 100 years. The simulation results indicated that in the artificial spruce stands on post-agriculture land the spontaneous natural succession occurs causing the change of spruce dominated forests into beech-fir ones, adequate to the local conditions. Cutting of spruces accelerated the succession speed, enabling more intensive growth of biomass and the number of target trees and earlier shift of domination in the stand. In the scenario of cutting all trees over 2 cm d.b.h. in the first year of simulation the model predicts intensive increase of beech biomass up to 500 t/ha after 90th year of forecast. Leaving two greatest spruces provide required shelter for growing seedlings. Introduction of seedlings of target tree species caused the increase of their biomass. In the scenario of climate warming decline of spruce biomass and increase of beech one was noticed in the last decades of forecast, compare to the control climate conditions. In the scenario of climate cooling the spruce biomass increased during investigated time span of 100 years. The application of FORKOME model was found useful to analyze the potential scenarios of spruce stands conversion in the Bieszczady Mountains. Obtained results indicated that restructuring is most beneficial to beech, so is the climate warming.*

Key words: *Norway spruce, beech, computer model FORKOME, Bieszczady Mts., prognosis, regeneration.*

* Katolicki Uniwersytet Lubelski, Katedra Ekologii Krajobrazu, ul. Konstantynów 1H;
20-708 Lublin; e-mail: modeliho@kul.lublin.pl

1. WSTĘP

Problem przebudowy drzewostanów niedostosowanych składem gatunkowym do siedliska jest ważny dla gospodarki leśnej zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia. Jest to wyjątkowo istotne zagadnienie dla lasów górskich, pełniących nie tylko ważne funkcje produkcyjne, ale także środowiskowe, krajobrazowe i rekreacyjne.

Przebudowa sztucznych drzewostanów świerkowych, występujących na siedliskach odpowiadających drzewostanom bukowo-jodłowym w Bieszczadach jest problemem aktualnym, do rozwiązania którego zastosowanie komputerowych modeli ekologicznych wydaje się być perspektywiczne.

W pracy wykorzystano ekologiczny model komputerowy FORKOME jako narzędzie wspierające hodowlano-ekologiczną analizę odmiennych scenariuszy przebudowy drzewostanów. Model komputerowy FORKOME (Kozak, Menshutkin 2001; Kozak i in. 2002; Kozak i in. 2003) rozwijany od 1997 r. należy do samego typu, co model JABOWA (Botkin i in. 1972) i model FORET (Shugart 1984). W latach 90. istniało około 40 różnych wersji modeli ekologicznych, stosowanych do wielu typów lasów z różnych stref roślinno-klimatycznych (Brzeziecki 1999, Bugmann 2001).

Model FORKOME uwzględnia parametry siedliskowe i należy do grupy płatowych modeli ekologicznych bazujących na płatowej teorii dynamiki ekosystemów leśnych. Umożliwia symulację sukcesji zespołów leśnych z uwzględnieniem ich charakterystycznych cech (składu gatunkowego, wieku itd.) i specyfiki rozwoju osobniczego w zależności od zewnętrznych czynników ekologicznych, takich jak; natężenie światła, temperatura, wilgotność i in., oraz wewnętrznych, takich jak konkurencja (Kozak i in. 2003). Model ten został zweryfikowany w górskich (Bieszczady) i równinnych (Puszcza Kampinoska) regionach leśnych i skutecznie zastosowany do prognozowania rzeczywistych zjawisk przyrodniczych zachodzących w różnych warunkach siedliskowych i gospodarczych.

Celem niniejszej pracy jest porównanie tempa przemiany sztucznych drzewostanów świerkowych, rosnących na terenie Bieszczadów, w kierunku naturalnej na tym obszarze buczyny karpackiej, w zależności od przyjętych scenariuszy gospodarczych i klimatycznych. Za pomocą modelu FORKOME sprawdzono wpływ działań hodowlanych (cięcia i podsadzenia) oraz zmian klimatycznych (zmiany sum temperatur efektywnych) na tempo ustępowania świerka i odnawianie się na jego miejscu lasu wielogatunkowego.

2. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Badania prowadzono w lipcu 2005 r. w lasach Nadleśnictwa Stuposiany (RDLP w Krośnie), gdzie przeważają siedliska lasu górskiego z dominującym

bukiem pospolitym *Fagus sylvatica* L., jodłą *Abies alba* Mill. i świerkiem *Picea abies* L. Karst. W sztucznych drzewostanach świerkowych powstałych w okresie powojennym na gruntach porolnych założono 3 powierzchnie badawcze: powierzchnia nr 1 i nr 2 w zlewni potoku Głęboki w oddziale 71, powierzchnia nr 3 – w zlewni potoku Muczny, w oddziale 43. Obecnie przeznaczone są one do przebudowy metodą odnowień sztucznych. Dane zebrane na powierzchniach badawczych posłużyły do utworzenia powierzchni „Świerk 1”, „Świerk 2”, i „Świerk 3”, wykorzystanych do symulacji zmian biomasy i liczebności drzew za pomocą programu FORKOME (tab. 1, 2 i 3). Prognozy dotyczące przyrostu biomasy i ilości drzew zostały przeprowadzone na wszystkich powierzchniach świerkowych, jednak ze względu na znaczne podobieństwo wyników z tych powierzchni w pracy zamieszczono wykresy przedstawiające wyniki z powierzchni „Świerk 1”.

Każda powierzchnia badawcza miała kształt kwadratu o boku 25 m (625 m²). Taki rozmiar powierzchni stosuje się z powodzeniem w modelach tej grupy (Bugmann 1994). Granicę powierzchni w terenie wyznaczały taśmy, tworzące układ współrzędnych (X – po linii wschód-zachód; Y – północ-południe). Poszczególne drzewa zostały ponumerowane i zmierzone (pierśnica, wysokość, promień korony, wiek). Miejsca występowania drzew naniesiono na mapę przy użyciu metody domiarów prostokątnych. Dane zebrane na powierzchniach badawczych posłużyły do utworzenia plików w arkuszu kalkulacyjnym w formacie Exel.csv, które następnie wprowadzono do programu FORKOME.

Brak większego zróżnicowania badanych powierzchni pod względem gatunku, wieku oraz wymiarów drzew jest skutkiem sztucznego pochodzenia analizowanych drzewostanów. Na wszystkich powierzchniach występował nalot buka (średnio 0,3 sztuki na 1 m²) i jodły (średnio 0,2 sztuki na 1 m²) pochodzący z samosiewu, świadczący o naturalnym odnawianiu się buka i jodły. Nalot ten nie został uwzględniony w komputerowej symulacji, jednakże jego skład gatunkowy i przybliżona ocena ilościowa wykorzystana została do uwiarygodnienia wyników symulacji z modelu FORKOME, które wskazują na odnawianie się buka i jodły w analizowanych drzewostanach świerkowych.

Struktura modelu FORKOME (Kozak i in. 2003) jest strukturą blokową, dlatego umożliwia dokonywanie przekształceń i unowocześnień bez konieczności zmian całego programu, a rozbudowa programu następuje przez dodanie kolejnych bloków. Zastosowanie metody Monte Carlo w symulacjach wielokrotnych (30 symulacji) pozwoliło na potwierdzenie zauważonych tendencji zmian wartości średnich, odchyłeń standardowych i innych statystycznych parametrów dla biomasy całych drzew, ich części nadziemnej (pnie z korą, gałęzie, liście/igły) i podziemnej (korzenie) w stanie suchym oraz dla liczby drzew.

W programie symulowane są procesy reprodukcji, wzrostu oraz śmiertelności drzew w ciągu każdego roku przy wykorzystaniu odpowiednich równań (Brzeziecki 1991, 1999; Kozak i in. 2003). Parametry dla poszczególnych gatunków uwzględniają ich najważniejsze właściwości ekologiczne i hodowlane, stąd ich wartości są zróżnicowane, gdyż odzwierciedlają różnorodne cechy tych gatunków i warunki siedliskowe, w których one występują.

Tabela 1. Charakterystyka drzew rosnących na powierzchni „Świerk 1”

Table 1. Characteristic of trees growing on plot “Spruce 1”

Lp No	Gatunek Species	D (cm)	H (m)	Wiek Age (lata) (years)	X	Y
1	<i>Picea abies</i>	30	26,0	43	0,3	0,5
2	<i>Picea abies</i>	20	22,5	43	0,2	5,5
3	<i>Picea abies</i>	28	26,0	43	2,0	18,0
4	<i>Picea abies</i>	37	27,5	43	2,5	19,0
5	<i>Picea abies</i>	25	24,5	43	2,0	23,0
6	<i>Picea abies</i>	22	23,0	43	3,0	22,5
7	<i>Picea abies</i>	21	25,5	43	4,0	0,3
8	<i>Picea abies</i>	33	26,5	43	7,5	24,5
9	<i>Picea abies</i>	21	24,0	43	6,0	18,0
10	<i>Picea abies</i>	38	28,0	43	4,0	16,0
11	<i>Picea abies</i>	25	27,0	43	4,0	10,0
12	<i>Picea abies</i>	30	26,5	43	3,5	8,0
13	<i>Picea abies</i>	29	26,0	43	5,0	7,0
14	<i>Picea abies</i>	28	26,0	43	5,0	3,0
15	<i>Picea abies</i>	35	26,0	43	5,0	2,0
16	<i>Picea abies</i>	30	27,0	43	7,0	2,0
17	<i>Picea abies</i>	28	26,0	43	11,0	13,0
18	<i>Picea abies</i>	30	26,5	43	17,0	19,0
19	<i>Picea abies</i>	27	25,5	43	16,5	24,0
20	<i>Picea abies</i>	25	24,5	43	17,0	24,5
21	<i>Picea abies</i>	31	27,5	43	19,0	24,5
22	<i>Picea abies</i>	22	24,5	43	20,0	19,0
23	<i>Picea abies</i>	26	25,5	43	21,0	20,0
24	<i>Picea abies</i>	22	24,0	43	23,0	20,0
25	<i>Picea abies</i>	30	26,0	43	22,0	11,0
26	<i>Picea abies</i>	31	27,5	43	24,0	9,0
27	<i>Picea abies</i>	21	24,0	43	24,0	8,0
28	<i>Picea abies</i>	31	27,5	43	20,0	8,0
29	<i>Picea abies</i>	29	27,0	43	19,0	6,5
30	<i>Picea abies</i>	26	25,0	43	17,5	6,0
31	<i>Picea abies</i>	23	24,0	43	19,0	5,0
32	<i>Picea abies</i>	20	22,0	43	24,5	0,5
33	<i>Picea abies</i>	22	24,0	43	23,5	3,0
34	<i>Picea abies</i>	23	24,5	43	22,0	1,5

Objaśnienia: D – pierśnica, H – wysokość, X, Y – współrzędne pni drzew w metrach względem granic powierzchni badawczej

Designations: D – d.b.h.; H – height; X, Y – coordinates of tree location according to the plot border

Przeprowadzenie symulacji w programie FORKOME wymaga wprowadzenia danych dotyczących drzew z powierzchni próbnej do programu (w formie plików Exel.csv) oraz określenia wartości poszczególnych parametrów dla gatunków. Następnie określa się wartość temperatury efektywnej, w „stopniodniach” (degree days – akr. DD) i opadów (mm), planuje ewentualną wycinkę drzew oraz określa ogólne ustawienia przez wybranie typu symulacji (pojedyncza lub Monte Carlo),

Tabela 2. Charakterystyka drzew rosnących na powierzchni „Świerk 2”
 Table 2. Characteristic of trees growing on plot “Spruce 2”

Lp No	Gatunek Species	D (cm)	H (m)	Wiek Age (lata)	X	Y
1	<i>Picea abies</i>	32	25,5	43	0,5	0,5
2	<i>Picea abies</i>	26	24,0	43	0,5	2,5
3	<i>Picea abies</i>	18	20,5	43	5,0	5,0
4	<i>Picea abies</i>	34	26,0	43	11,0	10,0
5	<i>Picea abies</i>	32	25,0	43	14,0	13,0
6	<i>Picea abies</i>	32	25,0	43	14,0	6,5
7	<i>Betula pendula</i>	34	26,5	43	0,5	15
8	<i>Picea abies</i>	42	28,0	43	20,0	2,5
9	<i>Picea abies</i>	25	24,0	43	20,0	6,0
10	<i>Picea abies</i>	19	21,0	43	21,0	11,0
11	<i>Picea abies</i>	29	25,5	43	22,0	14,0
12	<i>Picea abies</i>	38	27,5	43	24,0	18,0
13	<i>Picea abies</i>	34	26,5	43	22,0	20,0
14	<i>Picea abies</i>	37	27,5	43	18,0	19,0
15	<i>Picea abies</i>	43	28,5	43	24,0	23,0
16	<i>Picea abies</i>	34	26,5	43	17,0	23,0
17	<i>Picea abies</i>	35	27,0	43	15,0	21,0
18	<i>Picea abies</i>	27	24,0	43	14,0	23,0
19	<i>Picea abies</i>	22	21,0	43	12,0	24,0
20	<i>Picea abies</i>	34	26,5	43	11,0	20,0
21	<i>Picea abies</i>	34	26,5	43	11,0	19,0
22	<i>Picea abies</i>	22	24,0	43	7,0	19,0
23	<i>Picea abies</i>	43	30,0	43	4,0	22,0
24	<i>Picea abies</i>	29	25,0	43	0,5	25,0

Objaśnienia jak w tabeli 1

Designations as in the table 1

określenie liczby lat symulacji i liczby jej powtórzeń (ryc. 1). Wyniki symulacji uzyskuje się w postaci przystępnych do interpretacji wykresów oraz tabel.

W pracy przedstawiono 9 scenariuszy przebudowy powierzchni świerkowych, badanych za pomocą modelu FORKOME z zastosowaniem metody Monte Carlo. W symulacji analizowano przebieg przebudowy w okresie 100 lat, stosując 30 powtórzeń w pojedynczym scenariuszu. Wartości temperatury efektywnej i opadów dla powierzchni badawczych wynosiły odpowiednio 1475 DD i 850 mm (Kozak i in. 2003). Wynikiem przeprowadzonego modelowania są prognozy dotyczące biomasy oraz liczby drzew poszczególnych gatunków na powierzchniach badawczych.

Scenariusze zostały opracowane w celu weryfikacji tezy o szybszym ustępowaniu świerka z badanych powierzchni w wyniku jego usuwania (cięcia) oraz stosowania odnowień sztucznych (wprowadzanie sadzonek innych gatunków). Zbadano również zmiany momentu pojawiania się buka na badanych powierzchniach oraz przejmowaniu przez niego dominacji w strukturze ilościowej i biomasy tych powierzchni w zależności od przyjętych scenariuszy.

W scenariuszu kontrolnym (zerowym) przeprowadzono symulacje bez wprowadzania zmian (ryc. 2). Scenariusz ten zakłada możliwość zaistnienia naturalnej sukcesji w sztucznych drzewostanach świerkowych. Rosnące świerki nie są usu-

Tabela 3. Charakterystyka drzew rosnących na powierzchni „Świerk 3”

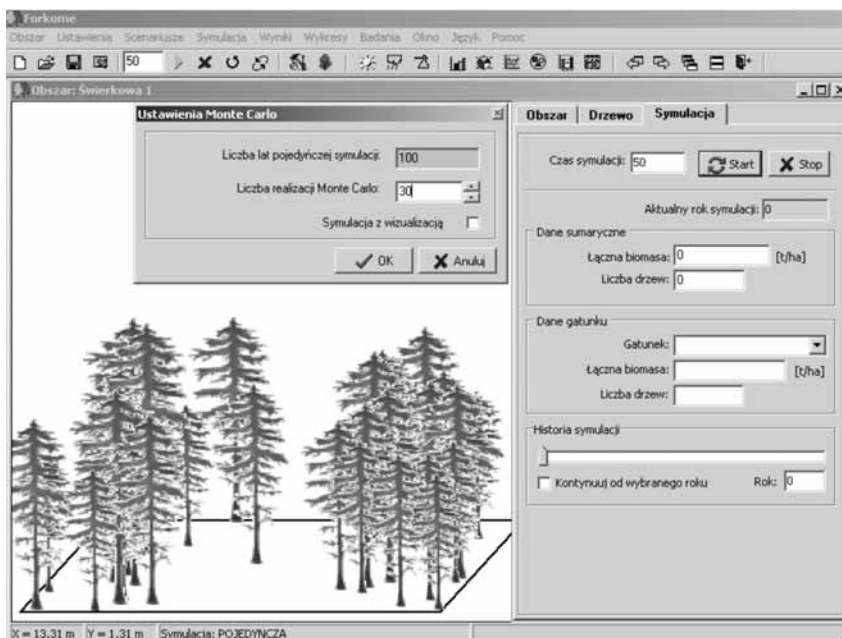
Table 3. Characteristic of trees growing on plot “Spruce 3”

Lp No	Gatunek Species	D (cm)	H (m)	Wiek Age (lata)	X	Y
1	<i>Picea abies</i>	17,0	18,5	21	0,1	25,0
2	<i>Picea abies</i>	25,0	24,0	29	1,6	23,0
3	<i>Picea abies</i>	7,0	11,0	11	0,4	23,0
4	<i>Picea abies</i>	21,0	18,0	23	0,6	21,0
5	<i>Picea abies</i>	10,0	15,0	15	2,4	21,0
6	<i>Picea abies</i>	16,0	17,0	19	4,4	20,0
7	<i>Picea abies</i>	22,0	20,0	25	8,2	23,0
8	<i>Picea abies</i>	11,0	16,0	16	13,0	23,0
9	<i>Picea abies</i>	13,0	16,5	17	14,0	22,0
10	<i>Picea abies</i>	8,0	9,5	10	12,0	20,0
11	<i>Picea abies</i>	14,0	10,5	14	9,6	17,0
12	<i>Picea abies</i>	17,0	21,0	22	7,0	17,0
13	<i>Picea abies</i>	12,0	17,0	17	4,6	17,0
14	<i>Picea abies</i>	11,0	13,0	17	0,6	19,0
15	<i>Picea abies</i>	15,0	14,0	17	1,6	18,0
16	<i>Picea abies</i>	11,0	13,0	14	0,6	15,0
17	<i>Picea abies</i>	17,0	20,0	22	2,6	15,0
18	<i>Picea abies</i>	23,0	21,5	26	5,2	14,0
19	<i>Picea abies</i>	23,0	22,0	26	7,6	14,0
20	<i>Picea abies</i>	21,0	21,0	25	12,0	17,0
21	<i>Picea abies</i>	16,0	16,5	20	15,0	20,0
22	<i>Picea abies</i>	16,0	22,0	22	17,0	21,0
23	<i>Picea abies</i>	8,0	14,5	13	18,0	17,0
24	<i>Picea abies</i>	11,0	18,0	17	15,0	17,0
25	<i>Picea abies</i>	12,0	16,0	16	15,0	15,0
26	<i>Picea abies</i>	8,0	13,0	12	12,0	15,0
27	<i>Picea abies</i>	14,0	15,0	17	9,4	14,0
28	<i>Picea abies</i>	18,0	22,5	24	8,2	12,0
29	<i>Picea abies</i>	21,5	22,0	26	1,8	12,0
30	<i>Picea abies</i>	23,0	22,5	27	1,2	10,0
31	<i>Picea abies</i>	19,0	22,0	24	1,6	8,8
32	<i>Picea abies</i>	18,0	22,0	23	3,0	6,4
33	<i>Picea abies</i>	20,0	24,5	26	3,2	4,2
34	<i>Picea abies</i>	25,0	24,5	29	3,4	2,6
35	<i>Picea abies</i>	15,0	19,0	20	3,4	1,4
36	<i>Picea abies</i>	21,0	25,0	27	7,4	1,6
37	<i>Picea abies</i>	16,0	17,0	19	6,6	4,2
38	<i>Picea abies</i>	16,0	20,5	21	7,8	6,8
39	<i>Picea abies</i>	15,5	23,5	23	5,6	9,0
40	<i>Picea abies</i>	23,0	25,0	28	9,0	7,6
41	<i>Picea abies</i>	10,0	13,0	13	9,8	6,4
42	<i>Picea abies</i>	24,0	23,0	28	11,0	9,8
43	<i>Picea abies</i>	12,0	13,0	15	8,4	10,0
44	<i>Picea abies</i>	22,0	24,0	27	14,0	11,0
45	<i>Picea abies</i>	15,0	21,0	21	15,0	13,0
46	<i>Picea abies</i>	11,0	18,5	17	16,0	12,0
47	<i>Picea abies</i>	18,0	23,0	24	14,0	14,0
48	<i>Picea abies</i>	13,0	23,0	21	18,0	15,0
49	<i>Picea abies</i>	8,0	17,5	15	19,0	17,0
50	<i>Picea abies</i>	23,0	28,5	30	18,0	21,0
51	<i>Picea abies</i>	17,0	21,5	23	18,0	22,0
52	<i>Picea abies</i>	19,0	21,5	24	17,0	24,0
53	<i>Picea abies</i>	15,0	20,0	21	15,0	24,0
54	<i>Picea abies</i>	14,0	20,0	20	14,0	24,0
55	<i>Picea abies</i>	13,5	23,0	21	20,0	23,0

Lp No	Gatunek Species	D (cm)	H (m)	Wiek Age (lata)	X	Y
56	<i>Picea abies</i>	16,5	23,0	23	20,0	24,0
57	<i>Picea abies</i>	9,5	14,0	14	19	20,0
58	<i>Picea abies</i>	10,0	13,0	13	20	20,0
59	<i>Picea abies</i>	15,0	20,5	21	21	24,0
60	<i>Picea abies</i>	18,5	22,0	24	22	24,0
61	<i>Picea abies</i>	26,0	18,0	26	22	23,0
62	<i>Betula pendula</i>	37,0	28,5	58	23	24,0
63	<i>Picea abies</i>	22,0	22,5	26	22	20,0
64	<i>Picea abies</i>	17,0	22,5	23	22	20,0
65	<i>Picea abies</i>	17,0	24,5	24	22	19,0
66	<i>Picea abies</i>	13,0	21,5	20	23	17,0
67	<i>Picea abies</i>	19,5	26,0	27	21	17,0
68	<i>Picea abies</i>	17,0	26,0	25	20	15,0
69	<i>Picea abies</i>	14,0	22,5	21	19	13,0
70	<i>Picea abies</i>	29,0	28,5	34	22	2,6
71	<i>Picea abies</i>	37,0	30,0	39	23	5,0
72	<i>Picea abies</i>	12,0	20,5	19	17	4,0
73	<i>Picea abies</i>	27,0	29,0	33	21	7,5
74	<i>Picea abies</i>	20,0	23,0	25	18	9,0
75	<i>Picea abies</i>	13,0	22,0	21	23	11,0
76	<i>Picea abies</i>	13,0	21,5	20	24	10,0
77	<i>Picea abies</i>	12,0	10,0	17	25	11,0
78	<i>Picea abies</i>	8,0	11,5	11	25	14,0

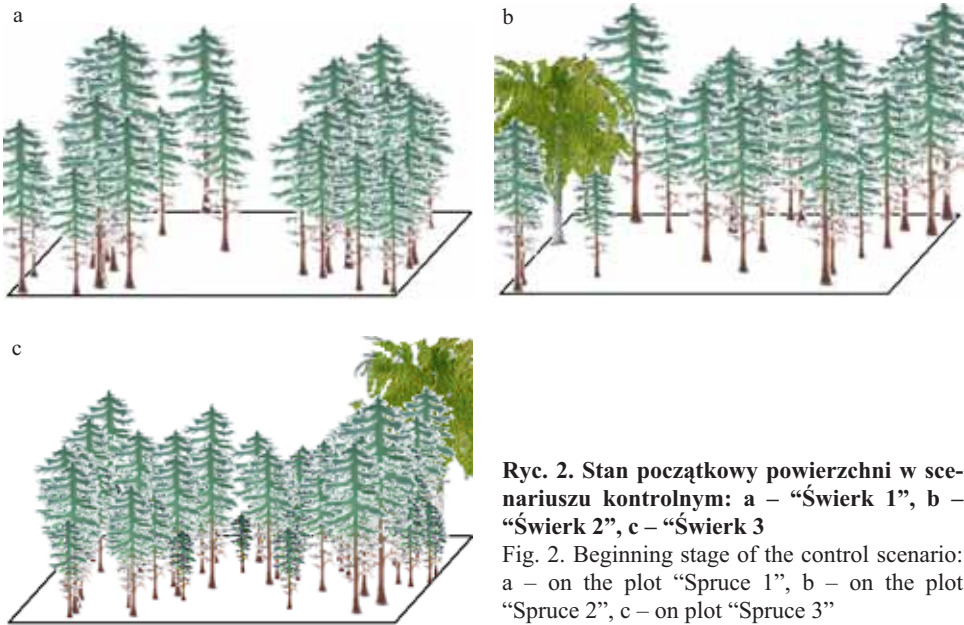
Objaśnienia jak w tabeli 1

Designations as in the Table 1



Ryc. 1. Interfejs modelu FORKOME przygotowanego do przeprowadzenia symulacji w scenariuszu kontrolnym

Fig. 1. FORKOME model interface of the control scenario simulation



Ryc. 2. Stan początkowy powierzchni w scenariuszu kontrolnym: a – “Świerk 1”, b – “Świerk 2”, c – “Świerk 3

Fig. 2. Beginning stage of the control scenario: a – on the plot “Spruce 1”, b – on the plot “Spruce 2”, c – on plot “Spruce 3”

wane, lecz pozostawiane naturalnemu procesowi obumierania. Wyniki z tych symulacji służą do porównań z wynikami symulacji z pozostałych scenariuszy.

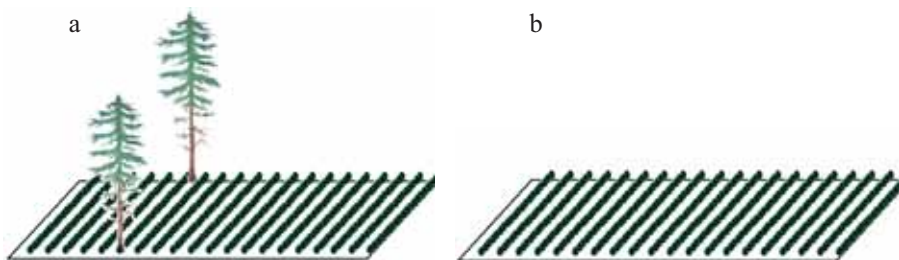
W scenariuszu 1 założono znaczne zmiany w strukturze drzewostanu na skutek jednorazowego usunięcia (za pomocą narzędzia modelu „scenariusz wycinania lasu”) wszystkich świerków o średnicy powyżej 2 cm. Wycinka drzew następuje w pierwszym roku symulacji.

W scenariuszu 2 zbadano wpływ pozostawienia pojedynczych dojrzałych świerków na naturalne odnawianie się powierzchni leśnej. W tym celu pliki zawierające dane z powierzchni próbnych zostały tak zmodyfikowane, aby na powierzchni pozostały jedynie 2 dojrzałe świerki o średniej wartości pierśnicy i wysokości. Jako kryterium wyboru tych świerków zastosowano ich stosunkowo regularne rozmieszczenie, zgodne z praktyką leśną.

W scenariuszu 3 sprawdzono, jaki jest wpływ sztucznego odnowienia lasu (poprzez rzędowe podsadzenia odpowiedniego gatunku) na proces przebudowy drzewostanu. W tym celu dokonano symulacji podsadzenia sadzonek buka *Fagus sylvatica* w rzędach (ryc. 3a), w ilości 400 szt./625m², która jest analogiczna do stosowanej w praktyce leśnej (6–8 tys./ha). Model FORKOME został wzbogacony o dodatkową możliwość uwzględnienia sadzonek drzew o średnicy od 0,6 cm. W scenariuszu tym pozostawiono 2 dojrzałe świerki w celach osłaniających.

W scenariuszu 4 zastosowano dwugatunkowe sztuczne odnowienie lasu poprzez rzędowe podsadzenia gatunków w odpowiednich proporcjach. Wprowadzono tu sadzonki buka i jodły w stosunku 1:1, w sposób opisany w poprzednim scenariuszu.

Z kolejnych dwóch scenariuszy zostały wyeliminowane świerki osłaniające. W scenariuszu 5 zbadano odnowienia sztuczne bez świerków, poprzez wpro-



Ryc. 3. Stan początkowy powierzchni „Świerk 1”: a – w scenariuszu 3, b – w scenariuszu 6
Fig. 3. Beginning stage on plot “Spruce 1”: a – in the scenario 3; b – in the scenario 6

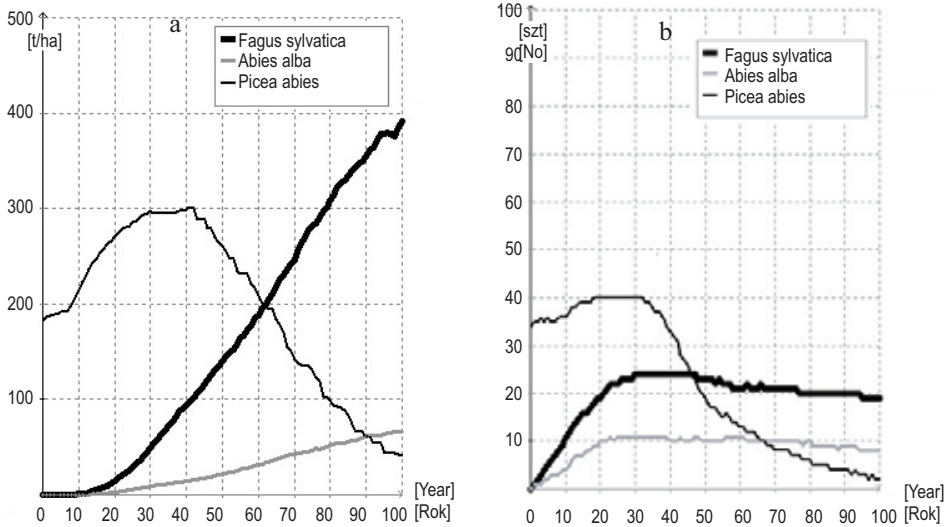
wadzenie sadzonek buka i jodły, natomiast w scenariuszu 6 – jedynie sadzonek bukowych (ryc. 3b).

W kolejnych scenariuszach 7 i 8 badano wpływ zmian termicznych na procesy sukcesji naturalnej (brak bezpośredniej ingerencji człowieka), zachodzącej w drzewostanach świerkowych. W scenariuszu 7 badano zmiany tempa ustępowania świerka na skutek ocieplenia, natomiast w scenariuszu 8 – na skutek oziębienia klimatu. Za pomocą narzędzia modelu „scenariusz zmian temperaturowych” wprowadzono zmiany temperatury o 100 „stopniodni” powyżej wartości kontrolnej (1475 „stopniodni”) w scenariuszu 7, natomiast w scenariuszu 8 – o 100 „stopniodni” poniżej wartości kontrolnej. W scenariuszach zmian klimatycznych nie uwzględnia się wpływu zmian opadów atmosferycznych, ze względu na brak zmian lub zmiany nieistotne tego parametru przy wzroście temperatur efektywnych w zakresie 100 „stopniodni” (Migąła 2005).

3. WYNIKI

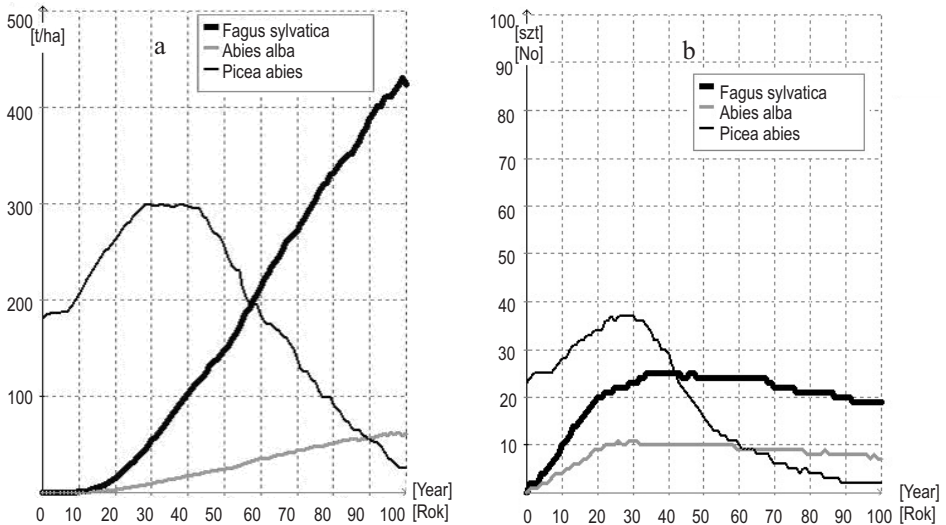
W niniejszej publikacji zamieszczono wykresy przedstawiające wyniki analiz z powierzchni „Świerk 1”, „Świerk 2” oraz „Świerk 3” w scenariuszu kontrolnym (zerowym). Przeprowadzona symulacja wykazała, że biomasa buka na powierzchni „Świerk 1” wzrasta szybciej niż biomasa jodły i osiąga znacznie wyższą wartość końcową (ryc. 4). Biomasa świerka po początkowym wzroście maleje po 40 roku prognozy do wartości wyraźnie niższej od wartości początkowej.

Porównanie zmian biomasy powierzchni i liczby drzew poszczególnych gatunków wykazuje, że mimo szybkiego pojawiania się siewek buka i intensywnego wzrostu ich liczby w pierwszej fazie symulacji, ich biomasa przewyższy biomasę świerka dopiero w drugiej części prognozy – drzewa potrzebują czasu, aby urosnąć i zwiększyć swoją biomasę. Świerk przewyższa biomasą pozostałe gatunki w pierwszej połowie prognozy, jednak pod względem liczby drzew ulega bukowi w 5 dekadzie, a jodle w 7 dekadzie.



Ryc. 4. Wykresy rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Świerk 1”

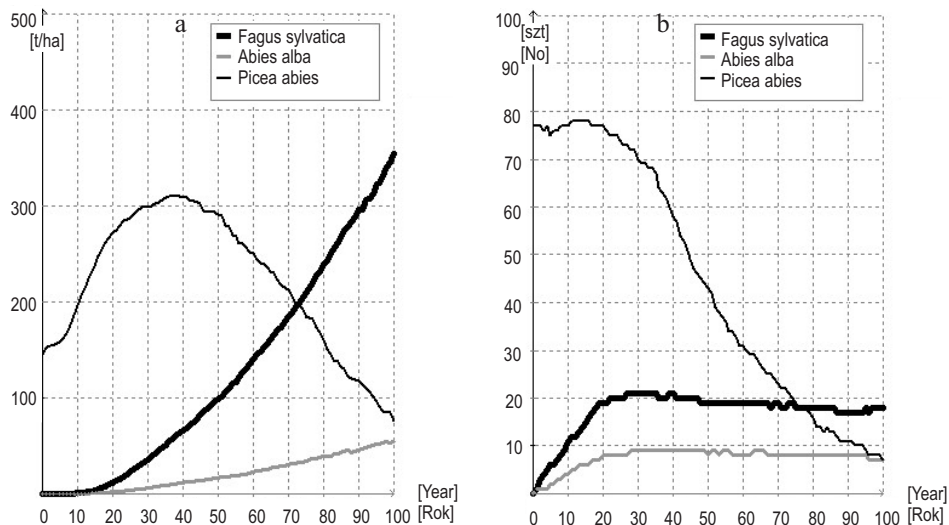
Fig. 4. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot “Spruce 1”



Ryc. 5. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczba drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Świerk 2”

Fig. 5. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot “Spruce 2”

Na powierzchni „Świerk 2” i „Świerk 3” w scenariuszu kontrolnym biomasa i liczba drzew będą zmieniać się podobnie do zmian zachodzących na powierzchni „Świerk 1” (ryc. 5 i 6). Tylko na powierzchni „Świerk 3”, gdzie jest więcej drzew świerka (78), gatunek ten nieco dłużej utrzyma swoją dominację pod względem



Ryc. 6. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Świerk 3”

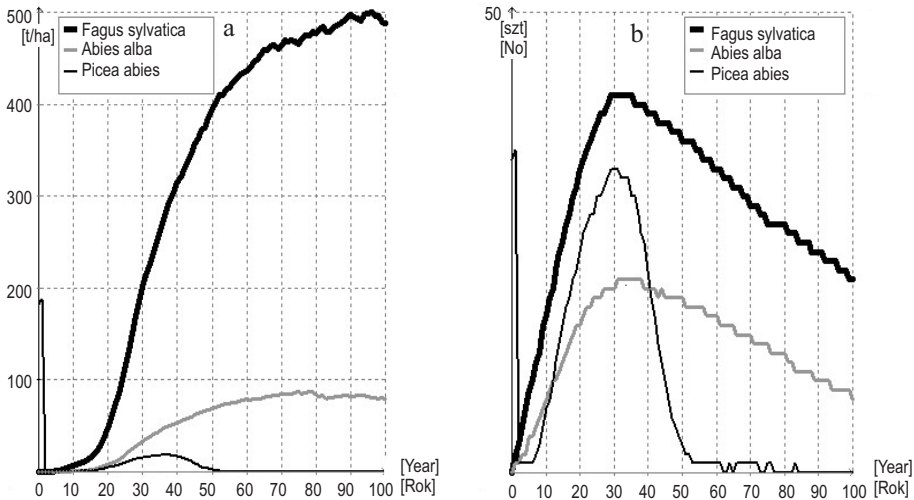
Fig. 6. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot “Spruce 3”

biomasy (do 70 lat) i liczby drzew (do 75 lat nad bukiem i do 95 lat nad jodłą). Wyniki prognozy z zastosowaniem modelu FORKOME wykazują, że na badanych powierzchniach sukcesja naturalna bez ingerencji człowieka zachodzi – z punktu widzenia hodowli lasu – stosunkowo wolno.

W modelu FORKOME przeprowadzone zostało procentowe porównanie zbieżności wyników prognoz biomasy i ilości drzew pomiędzy powierzchniami „Świerk 1” i „Świerk 2” i „Świerk 3”. W modelu porównywano wyniki prognoz z całej 100-letniej symulacji każdej powierzchni z każdą w scenariuszu kontrolnym. Otrzymane wyniki świadczą o bardzo dużej zbieżności scenariuszy (0 – brak zbieżności, 1 – zbieżność 100%) pod względem osiągniętej biomasy (w granicach 0,97–0,99) i liczby drzew (0,90–0,96). W związku z tym w artykule zostały przedstawione wyniki symulacji tylko dla powierzchni „Świerk 1”.

W scenariuszu 1 wycięcie wszystkich świerków o średnicy powyżej 2 cm spowodowało całkowitą redukcję biomasy analizowanych powierzchni w pierwszej dekadzie. Na powierzchni „Świerk 1” po wycięciu wszystkich drzew biomasa buka zaczęła wzrastać intensywnie od 3 dekady (ryc. 7a), natomiast biomasa jodły zaczęła się zwiększać nieco później i osiągnęła znacznie niższą wartość końcową. Biomasa świerka wykazała chwilowy wzrost, a następnie znacznie obniżyła się do niewielkiej wartości końcowej. Pojawił się natomiast nowy gatunek – brzoza, której biomasa i liczba drzew początkowo znacznie wzrosły, przewyższając pozostałe gatunki, jednak po kilkunastu latach wartości te zmalały.

Po wycięciu wszystkich świerków liczba drzew buka intensywnie zwiększyła się w pierwszych trzech dekadach. Analogiczne, ale nieco słabsze zwiększenie



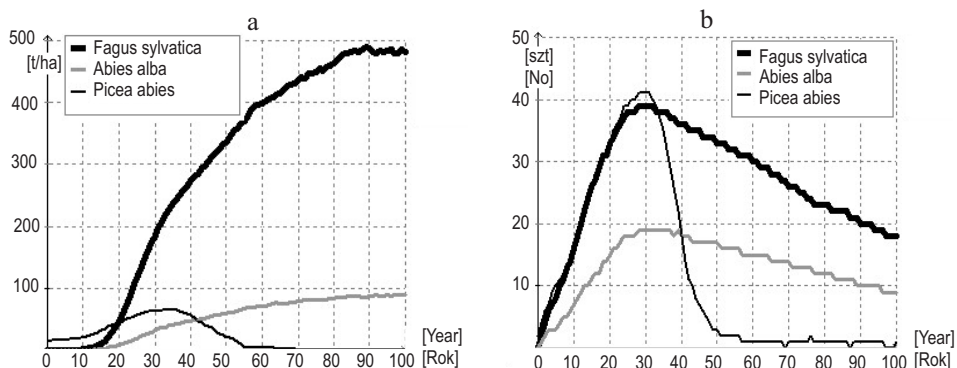
Ryc. 7. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 1
 Fig. 7. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 1

zauważalne jest dla jodły i świerka (ryc. 7b), z tym, że w pierwszej dekadzie ilość osobników jodły może być nieco wyższa niż świerka. W kolejnych trzech dekadach ta tendencja może być odwrotna. Ale już od piątej dekady prognozowana jest znowu większa ilość osobników jodły niż świerka. Zmiany ilościowe jodły są podobne do zmian buka, jednak przyjmują wartości dwukrotnie mniejsze.

Biomasa świerka już po 50 roku symulacji stanowi niewielki procent całkowitej biomasy, a liczba drzew tego gatunku znacznie się redukuje. Świerk przestaje dominować na powierzchni, osiągając wartości biomasy nawet mniejsze od jodły, a znacznie niższe od buka. Pojawienie się brzozy, będącej gatunkiem światłolubnym i lekkonasiennym, jest związane ze znacznym wzrostem oświetlenia i dostępności powierzchni na skutek jej odkrycia przez usunięcie dużych drzew.

Pozostawienie w scenariuszu 2 dwóch sztuk wysokich świerków zapewnia zacienienie zapobiegające pojawianiu się gatunków światłolubnych (ryc. 8). Nie ma to jednak istotnego wpływu na dynamikę biomasy jodły i buka, której rozkład jest podobny jak w scenariuszu 1. Różnica zaznacza się w wartości biomasy świerka, znacznie wyższej niż w scenariuszu poprzednim i początkowo przewyższającej biomasę buka. Wyraźny spadek biomasy świerka w drugiej połowie prognozy powoduje, że wartość końcowa jego biomasy jest niska – podobna jak w scenariuszu poprzednim. Liczba drzew świerka jest w pierwszej połowie prognozy wyższa w porównaniu z poprzednim scenariuszem, a w drugiej połowie wykazuje tendencję spadkową do kilku drzew na końcu prognozy.

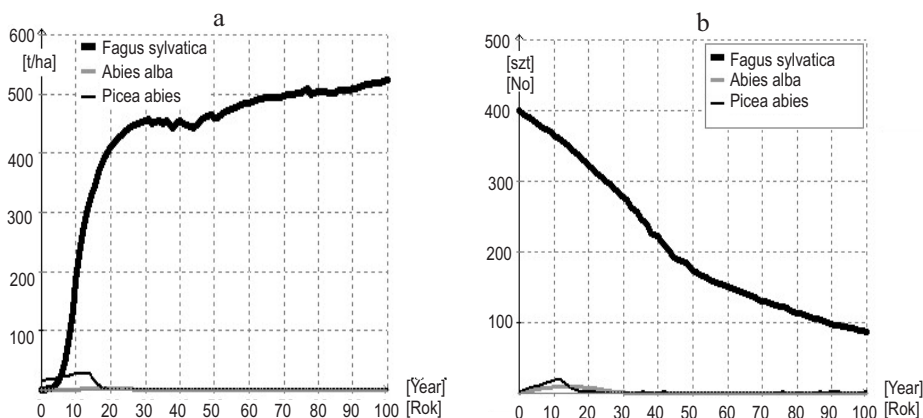
Pozostawienie pojedynczych świerków nie ma większego wpływu na pozostałe gatunki. Istotną rolą tych drzew jest niedopuszczanie, poprzez utrzymanie odpowiedniego poziomu zacienienia, do rozwoju gatunków pionierskich na tym terenie. Ze względu na swoje rozmiary, świerki te tworzą wyższą, odrębną warstwę



Ryc. 8. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 2
 Fig. 8. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 2

w stosunku do młodych drzew buka i jodły, przez co bezpośrednia konkurencja pomiędzy tymi dwoma poziomami jest znacznie mniejsza. Wpływ dorosłych świerków może się jednak zaznaczać pośrednio poprzez tworzenie bazy nasiennej, a następnie łatwiejsze wprowadzanie swego gatunku do drzewostanu na drodze naturalnej.

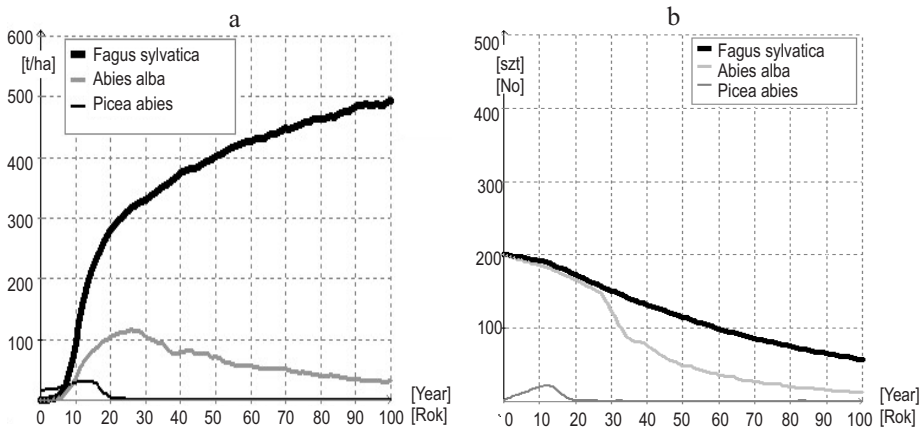
W scenariuszu 3, zakładającym podsadzenie buka i pozostawienie 2 dojrzałych świerków w celach osłaniających, zmiany biomasy pokazują szybkie przejście dominacji od świerka do buka (ryc. 9a). Można zauważyć, że optymalnym rozwiązaniem jest pozostawienie na badanej powierzchni 625m² dwóch starych, dużych świerków, by uzyskać optymalne parametry zacienienia sadzonek buka. Pozostawienie na tej powierzchni 3, 4, 5, a nawet 6 dużych świerków, a przez to zwiększenie zacienienia, powodowało drastyczne zmniejszenie liczby sadzonek w pierwszej dekadzie prognozy. W tym scenariuszu liczebność buka na końcu prognozy jest dość wysoka (ryc. 9b).



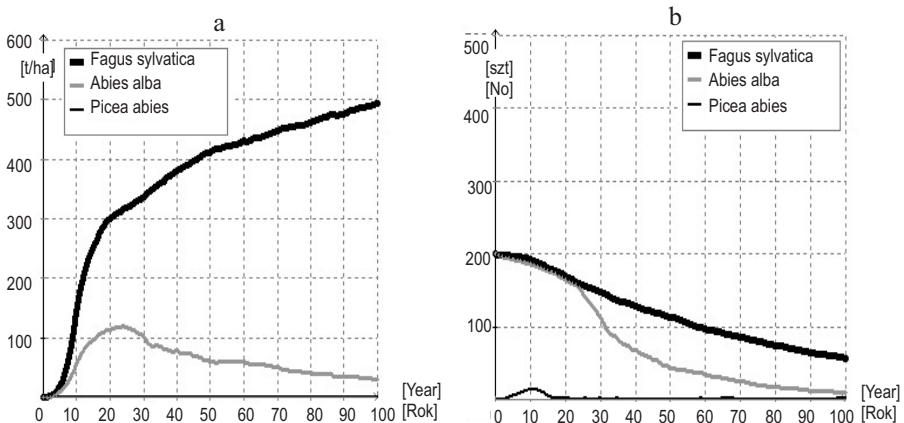
Ryc. 9. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 3
 Fig. 9. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 3

Porównanie fluktuacji wykresu biomasy poszczególnych gatunków uzyskanej w scenariuszu 4 ze scenariuszem 3 nie wykazuje większych rozbieżności. W scenariuszu 4 wprowadzono także sadzonki jodły, której biomasa w czasie prognozy była cały czas mniejsza od biomasy buka (ryc. 10a). Również w strukturze ilościowej drzew badanej powierzchni zaznaczył się większy spadek liczby drzew jodły w porównaniu z bukiem (ryc. 10b).

W scenariuszu 5 brak dojrzałych świerków na początku symulacji spowodował, że gatunek ten w dalszym rozwoju nie osiągnął znaczącej biomasy (jego biomasa w toku prognozy waha się na poziomie kilku t/ha, co jest niewidoczne na wykresie) (ryc. 11a). Struktura ilościowa świerka jest tu podobna do scenariusza 4. i zaznacza się wyraźna dominacja buka nad jodłą i świerkiem. Ale na końcu prognozy można zauważyć słabą tendencję do zmniejszenia się liczby drzew buka i jodły.



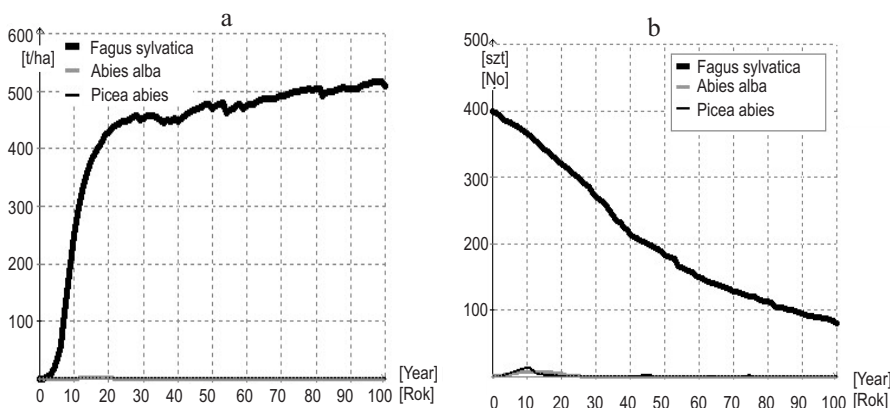
Ryc. 10. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczydrzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 4
Fig. 10. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 4



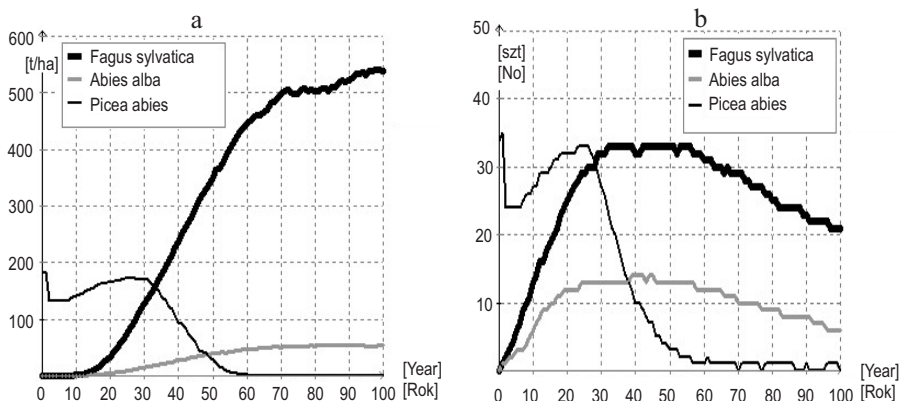
Ryc. 11. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczy drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 5
Fig. 11. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 5

Biomasa buka w scenariuszu 6 jest podobna do biomasy tego gatunku w scenariuszu 3 (ryc. 12). W scenariuszu 6, w którym nie było osłaniających świerków, gatunek ten pojawił się także, ale z niską wartością biomasy i liczbą drzew. Osłaniające świerki w scenariuszu 3 mogły powodować minimalny spadek biomasy buka w środkowej części prognozy (4 i 5 dekada). Brak osłony i konkurencji ze strony starych świerków w scenariuszu 6 powodował nieco większy wzrost biomasy buka w 4 i 5 dekadach. Czyli świerki, spełniając swoją rolę zacieniającą, zwiększają nieznacznie konkurencję o zasoby pokarmowe i światło na danej powierzchni. Różnica wartości biomasy buka jest jednak znikoma, co oznacza, że konkurencja ze strony świerków osłaniających jest niewielka.

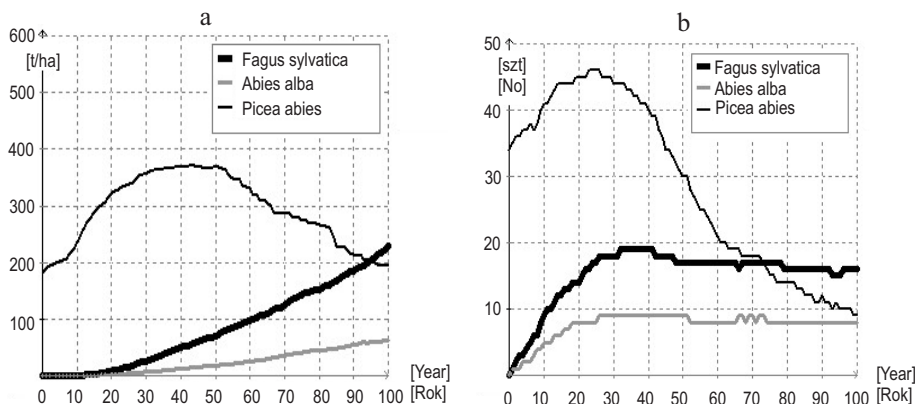
W scenariuszu 7 (ocieplenie klimatu) w porównaniu ze scenariuszem kontrolnym widoczny jest silniejszy spadek wartości biomasy świerka w pierwszej dekadzie i następnie od czwartej dekady do końca prognozy. Wartość biomasy świerka w tej prognozie nigdy nie przekroczyła wartości początkowej (ryc. 13a).



Ryc. 12. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 6
Fig. 12. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in



Ryc. 13. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 7
Fig. 13. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 7



Ryc. 14. Wykres rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu 8
 Fig. 14. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in scenario 8

Wzrost biomasy buka zaczyna się już w drugiej dekadzie, a na początku czwartej dekady buk dominuje już nad świerkiem. Porównanie struktury ilościowej w obu scenariuszach wykazuje znacznie większy spadek liczby drzew świerka, choć w pierwszej połowie zaznaczył się ich niewielki spadek i wzrost. Wzrost temperatury nie wpływa znacząco na pozostałe gatunki.

W scenariuszu 8 (ochłodzenie klimatu), w porównaniu ze scenariuszem kontrolnym, biomasa świerka w badanym okresie znacznie wzrasta i nawet przy nieznacznym spadku w ostatnich dekadach prognozy osiąga, w porównaniu do wartości początkowej, wartość końcową wyższą (ryc. 14). W strukturze ilościowej zaznacza się wyraźna dominacja świerka nad pozostałymi gatunkami, choć liczba drzew świerka nieznacznie stopniowo maleje. Dopiero w ostatnich dekadach liczba drzew buka i świerka wyrównuje się, podczas gdy w scenariuszu kontrolnym dla tej powierzchni buk szybciej zdobywa przewagę.

4. DYSKUSJA

Za pomocą modelu FORKOME przeprowadzono symulacje na 3 powierzchniach badawczych, każda o wymiarach 25×25m (1/16 ha). Badania dowiodły, że stosowanie takiej powierzchni badawczej w modelach płatowych jest zasadne (Bugmann 1994). Na przykład, w modelu JABOWA (Botkin i in. 1972) stosowano powierzchnie 10×10m przy liczbie symulacji 100. Każda z utworzonych trzech powierzchni, mając po 625 m², przy 30 stosowanych sekwencji symulacyjnych, będzie odpowiadać powierzchni (equilibrium landscape) 1,8 ha, przy najmniejszej (0,5 ha) stosowanej w modelu FORSKA (Lemans, Prentice 1987).

Wyniki otrzymane z prognoz przeprowadzonych za pomocą modelu FORKOME świadczą o tym, że w scenariuszach kontrolnych w sztucznych świer-

czynach zachodzi wtórna sukcesja naturalna. Prowadzi ona do regeneracji lasu bukowo-jodłowego, mimo zaniechania wycinki świerków, czy nie wprowadzania innych gatunków drzew przedplonowych lub docelowych. Potwierdzeniem uzyskanych wyników mogą być badania przeprowadzone w latach 1993–1999 w litych i wielogatunkowych świerczynach sztucznego pochodzenia, założonych na gruntach zarówno historycznie leśnych, jak i porolnych, na terenie Bieszczadzkiego Parku Narodowego (Przybylska, Zięba 2000).

Badania modelowe dają wyniki zbieżne z przedstawionymi w literaturze (Przybylska, Zięba 2000). W okresie 100 lat model prognozuje intensywny proces renaturalizacji sztucznych świerczyn na drodze naturalnej sukcesji, prowadzący do zmian w strukturze gatunkowej tych drzewostanów poprzez wzrost liczby gatunków.

Kwestią często poruszaną w literaturze jest problem hodowli lasów górskich wobec prognozowanych zmian klimatu. Proces globalnego ocieplenia jest powszechnie przyjętym faktem. Tempo wzrostu średniej temperatury przyjmuje wartości 0,47–0,6°C na 100 lat, z jednoczesną tendencją wzrostową dobowych minimów temperatury i spadkową dobowych amplitud (Migała 2005). Zmiany temperatury powietrza w Karpatach są zgodne ze zmianami temperatury na półkuli północnej na przestrzeni ostatnich 150 lat i mieszczą się w granicach 0,9–1,13°C (Fabijanowski, Jaworski 1996).

Uwzględniając w modelu FORKOME prognozy wzrostu temperatur (o 1°C) w najbliższych dekadach w scenariuszu ocieplenia sprawdzano, czy zachodzą zmiany w strukturze drzewostanów świerkowych. Literaturowe dane potwierdzają zróżnicowanie indywidualnej reakcji gatunków na zmiany klimatu i możliwość zaistnienia rozpadu współczesnych ekosystemów (Migała 2005).

Wpływ zmian wielkości opadów na strukturę drzewostanów istniejących na terenie obszarów górskich jest mniej wyraźny (Poznański, Jaworski 2000). Ze względu na niesprecyzowane prognozy zmian wielkości opadów atmosferycznych, w modelu FORKOME ze scenariuszy klimatycznych wybrano tylko ocieplenie i ochłodzenie klimatu i zrezygnowano ze zmian spowodowanych opadami atmosferycznymi.

W scenariuszu ocieplenia otrzymanym za pomocą Modelu FORKOME widoczny jest wzrost intensywności przyrostu biomasy buka oraz przyspieszenie momentu przejścia dominacji przez ten gatunek nad świerkiem. Spadek biomasy i liczby drzew świerka obrazuje ustępowanie tego gatunku na skutek podniesienia się ciepłoty powietrza. Nie są to jednak zmiany bardzo intensywne. Należy też wziąć pod uwagę, że w tym scenariuszu badany był wpływ ocieplenia na przyspieszenie sukcesji naturalnej na tych terenach, nie zaś konsekwencji ocieplenia na zmiany w drzewostanach typowych dla tych terenów i zgodnych z siedliskiem. Jednak wzrost przyspieszenia ustępowania świerka z litych powierzchni świerkowych niezgodnych z siedliskiem w warunkach ocieplenia sugeruje możliwość zaistnienia podobnych zmian w przypadku drzewostanów naturalnych.

Istnieją też koncepcje dotyczące ochłodzenia klimatu, wydają się one jednak mało realne (Fabijanowski, Jaworski 1996). Przeprowadzenie symulacji w sce-

nariuszu ochłodzenia klimatu wykazuje wzrost biomasy świerka i zmniejszenie dynamiki przyrostu biomasy buka. Obserwowany wzrost dominacji buka w ostatnich latach na terenie Bieszczadów wyklucza raczej możliwość ochłodzenia klimatu.

Dla analizowanych powierzchni świerkowych w Bieszczadach w modelu FORKOME przyjęto założenia zgodne z warunkami panującymi na badanym terenie. Okazały się one korzystniejsze dla buka i jodły niż dla świerka. Sztuczne drzewostany świerkowe występują tu na siedliskach odpowiadających drzewostanom bukowo-jodłowym i znajdują się w rzeczywistości w otoczeniu lasów bukowych i jodłowych. To przekłada się w modelu na zwiększone parametry maksymalnej wysokości, maksymalnej pierśnicy i maksymalnego wieku dla tych gatunków

Badania prognostyczne rozwoju drzewostanów pod wpływem działania różnych czynników są istotnym rodzajem badań naukowych. Zastosowanie modelu FORKOME umożliwiło uzyskanie wyników, których interpretacja potwierdza prawdziwość tez założonych w niniejszej pracy. Rezultaty uzyskane po przeprowadzeniu powyższych badań prognostycznych są adekwatne do wyników badań terenowych i zjawisk opisywanych w literaturze.

Model FORKOME jest narzędziem przystosowanym do badań zależności i zmian w strukturze gatunkowej drzewostanów. Możliwość sprawdzania wielu parametrów określających stan drzewostanu zapewnia uzyskanie precyzyjnych wyników. Model ten pozwala na analizowanie dynamiki rozwoju zbiorowiska leśnego w połączeniu z wpływem czynników klimatycznych i antropogenicznych w czasie dowolnie określonym przez użytkownika.

5. WNIOSKI

1. W sztucznych, litych świerczynach na gruntach porolnych zachodzi samostna sukcesja naturalna, powodująca zmiany w składzie gatunkowym i liczebności drzew poszczególnych gatunków, które prowadzą do przekształcenia się tych zbiorowisk w naturalne dla tego terenu drzewostany bukowo-jodłowe.

2. Wycinka świerków przyspiesza tempo sukcesji umożliwiając intensywniejszy wzrost drzew docelowych i wcześniejsze przejście przez nie dominacji nad świerkiem w strukturach: ilościowej i biomasy.

3. Pozostawianie kilku sztuk świerków zacieniających (nie więcej niż 2), chroni przed pojawianiem się gatunków lekkonasiennych, jednak może obniżyć nieznacznie wartość biomasy gatunków docelowych na skutek konkurencji. Pozostawienie więcej niż 2 starych świerków znacznie zwiększa zacienienie sadzonek i powoduje drastyczne ich obumieranie w pierwszej dekadzie symulacji.

4. Wprowadzanie sadzonek drzew docelowych, przyczynia się do zwiększenia biomasy tych gatunków. Wzrost ten, w porównaniu z odnowieniem natu-

ralnym, jest jednak niewielki, a przy wysokich kosztach odnowienia sztucznego, istotne jest stosowanie innych sposobów wspomaganie odnawiania tych drzewostanów.

5. Podjęcie profilaktycznych działań, minimalizujących negatywny wpływ ocieplenia klimatu, wymaga badań nad rozwojem górskich ekosystemów leśnych w zmienionych warunkach. Model FORKOME, dzięki odpowiednim narzędziom (scenariusze zmian klimatycznych), jest przystosowany do przeprowadzania prognostycznych badań leśnych i umożliwia weryfikację stawianych hipotez.

6. Wyniki uzyskiwane z badań prognostycznych wykonywanych za pomocą modelu FORKOME potwierdziły jego przydatność do symulacji przebudowy drzewostanów świerkowych w Bieszczadach.

*Składamy serdeczne podziękowanie Kierownictwu i pracownikom
Nadleśnictwa Stuposiany za pomoc i udostępnienie materiałów taksacyjnych.*

Praca została złożona 16.10.2006 r. i przyjęta przez Komitet Redakcyjny 1.03.2007 r.

SIMULATION OF SPRUCE STANDS CONVERSION IN BIESZCZADY MTS. WITH FORKOME MODEL

Summary

This paper presents the results on prognostic possibilities of natural forests regeneration in Norway spruce monocultures *Picea abies* L. Karst that covers the Bieszczady Mountains with use of the FORKOME model. Nine different variants of regeneration methods are presented. Variants of spruce trees felling followed by planting present a selective method of cutting that is determined as the most effective one. Felling variant is characterized by complete cutout of spruce trees with stem diameter over 2 cm. That action was performed in the 1st year of the prognosis with the FORKOME model. The results are: beech biomass increases intensively to the level of 500 t/ha after 90 years of prognosis and spruce biomass almost completely diminishes. Spruce selective cutting with simultaneous planting of target species as beech *Fagus sylvatica* L. and fir *Abies alba* Mill. shows quick biomass increase as simulated for those variants. Beech and fir biomass increases rapidly – then stabilizes. After next 20–30 years initial form of beech forest is recognizable and keeps developing the natural (potential) forest similarity degree. The Bieszczady Mts. potential stand consists of beech and fir *Dentario glandulosae-Fagetum*. Presented results indicate great usefulness of the FORKOME model while investigating different variants of natural forest regeneration in Norway spruce monocultures in Bieszczady Mts. especially concerning climate changes.

LITERATURA

- Botkin D. B., Janak F. J., Wallis J. R. 1972: Some ecological consequences of computer model of forest growth. *J. Ecol.*, nr 60.
- Brzeziecki B. 1999: Ekologiczny model drzewostanu: zasady konstrukcji, parametryzacji i przykłady zastosowań. Fundacja Rozwoju SGGW, Warszawa.
- Brzeziecki B. 1991: Ekologiczny model wzrostu lasu: niektóre problemy metodyczne i kalibracyjne. *Sylvan*, 9: 5-16.
- Bugmann H. 1994: On the ecology of mountainous forests in a changing climate: a simulation study. Ph. D. thesis no. 10638, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland.
- Bugmann H. 2001: A review of forest gap models. *Climatic Change* 51, Kluwer Academic Publishers.
- Fabijanowski J., Jaworski A. 1996: Kierunki postępowania hodowlanego w lasach karpackich wobec zmieniających się warunków środowiska. *Sylvan*, 8: 75-97.
- Kozak I., Menshutkin V. 2001: Prediction of beech forest succession in the Bieszczady Mountains using a computer model. *J. For. Sci.*, 47, 8: 333-339.
- Kozak I., Menshutkin V., Klekowski R. 2003: Modelowanie elementów krajobrazu. Towarzystwo Naukowe KUL, Lublin.
- Kozak I., Menshutkin V., Józwińska M., Potaczała G. 2002: Computer simulation of fir forest dynamics in the Bieszczady Mountains in response to climate change. *J. For. Sci.* 48, 8: 425-431.
- Leemans R., Prentice I. C. 1987: Description and simulation of tree layer composition and size distribution in a primeval *Picea-Pinus* forest. *Vegetatio*, 69: 147-156.
- Migala K. 2005: Piętra klimatyczne w górach Europy a problem zmian globalnych. Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław. strony
- Poznański R., Jaworski A. 2000: Nowoczesne metody gospodarowania w lasach górskich. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa.
- Przybylska K., Zięba S. 2000: Procesy renaturalizacyjne w drzewostanach Bieszczadzkiego Parku Narodowego. *Roczniki Bieszczadzkie*, 9: 117-139.
- Shugart H. H. 1984: *Theory of forest dynamics*. Springer, New York.