

PROGNOZOWANIE ZMIAN LASU MIESZANEGO W KAMPINOSKIM PARKU NARODOWYM Z ZASTOSOWANIEM MODELU FORKOME*

Ihor Kozak¹, Marek Ferchmin², Grzegorz Potaczała¹,
Oksana Kozak¹, Zorjan Seńko¹, Anna Baraniuk-Otręba²

¹Katolicki Uniwersytet Lubelski

²Kampinoski Park Narodowy

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki prognozy zmian lasu mieszanego w oddziale 135g Obrębu Kampinos w Kampinoskim Parku Narodowym z zastosowaniem modelu FORKOME. Pokazano możliwe zmiany biomasy i ilości drzew w ciągu 600 lat. W wariancie kontrolnym prognozowano zmniejszenie biomasy sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) i zwiększenie biomasy dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) oraz zajęcie przez dąb szypułkowy dominującej pozycji w biomacie w trakcie symulacji. W scenariuszu 1 (ciepło i wilgotno) model prognozuje zmniejszenie biomasy dębu szypułkowego i lipy (*Tilia cordata* Miller.) oraz zwiększenie biomasy dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* Liebl); w scenariuszu 2 (ciepło i sucho) obserwuje się mniejszy udział dębu bezszypułkowego niż w scenariuszu 1, zaś nieznacznie większy w środkowej fazie symulacji w porównaniu z kontrolą. W scenariuszu 3 (zimno i wilgotno) model FORKOME prognozuje większą dominację sosny, dość widoczną w pierwszej połowie symulacji, a w scenariuszu 4 (zimno i sucho) większy udział biomasy lipy, zwłaszcza w drugiej połowie symulacji oraz zwiększenie biomasy *Acer platanoides*. Symulacje wykonane na modelu FORKOME pozwalają stwierdzić, że sukcesja lasu może być użyta do oceny wpływu zmian klimatu na ekosystemy leśne, a przedstawione wyniki wskazują, że model jest dobrym narzędziem do badania różnych zagadnień, zwłaszcza związanych ze zmianami klimatu.

Słowa kluczowe: las mieszany, model komputerowy FORKOME, zmiany klimatyczne, Kampinoski Park Narodowy

* Praca finansowana przez Komitet Badań Naukowych. Grant N6 P06L 04221.

WSTĘP

Kampinoski Park Narodowy niemal w całości znajduje się na terenie mezoregionu 318.73 nazwanego Kotliną Warszawską [Kondracki 2002]. Jedynie południowy i wschodni fragment wraz z otuliną sięga aż po Równinę Łowicko-Błońską i Równinę Warszawską [Sikorska-Maykowska 2003]. Rzeźba terenu Puszczy Kampinoskiej została ukształtowana przez różne procesy. Na początku były to procesy lodowcowe, następnie fluwialne i eoliczne, wreszcie jeziorno-bagniskowe, które zostały zmienione przekształceniami spowodowanymi rozwojem pokrywy roślinnej i osuszaniem [Zgorzelski i Pawłowska 2003]. Gleby Puszczy są ubogie w składniki pokarmowe, jednak wystarczająco zasobne dla pokrywających je lasów. Ostatnio w glebach i ściółkach leśnych Puszczy zauważono nagromadzenie metali ciężkich i siarki [Konecka-Betley 2003].

Według regionalizacji przyrodniczo-leśnej [Trampler i in. 1990] analizowany teren wypełnia znaczną część Dzielnicy Puszczy Kampinoskiej. Ta dzielnica charakteryzuje się przewagą drzewostanów z dominacją sosny (70%) oraz brakiem litych drzewostanów świerkowych, jodłowych i bukowych. Wśród borów sosnowych i mieszanych na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego znaczny udział mają drzewostany średniowiekowe – średnia wieku około 70 lat; około 15% powierzchni Parku zajmują drzewostany ponad 100-letnie. W tej pracy postanowiliśmy sprawdzić, z pomocą modelu FORKOME, jakie zmiany mogą w nich zająć wraz z upływem czasu.

Analiza zmian średnich miesięcznych temperatur powietrza na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego wykazała stosunkowo duże wahania średniej rocznej temperatury powietrza. Na przykład, w 1996 roku średnia roczna temperatura powietrza spadła do 3,5°C; w latach 1986-1993 średnia roczna temperatura wynosiła 7,9°C [Wierzbicki 1999]. Jednocześnie ilość opadów atmosferycznych w 1996 roku wzrosła do 662,2 mm, podczas gdy średnia suma w latach 1986-1993 wynosiła 501,7 mm. Wszystko wskazuje na to, że jest konieczna symulacja sukcesji lasu dębowego na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego z uwzględnieniem 4 scenariuszy zmian klimatycznych: ciepło i wilgotno, ciepło i sucho, chłodno i wilgotno oraz chłodno i sucho.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie prognozy zmian składu gatunkowego średniowiekowego drzewostanu sosnowo-dębowego, liczby drzew oraz ich biomasy w scenariuszu kontrolnym, czyli nie zakładającym zmiany klimatu i w czterech wariantach sukcesji uwzględniających możliwe zmiany klimatyczne: 1 – klimat ciepły i wilgotny, 2 – ciepły i suchy, 3 – zimny i wilgotny, 4 – zimny i suchy.

MATERIAŁY I METODA

W niniejszej pracy przedstawimy zmiany średniowiekowego mieszanego drzewostanu sosnowo-dębowego, który powstał na skutek posadzenia sosny i spontanicznego obsiewu dębów. W 2002 r. w oddziale 135g w Obrębie Kampinos Kampinoskiego Parku Narodowego została założona płatowa powierzchnia pomiarowa na południowym stoku wydmy o rozmiarach 25 × 25 m, na wysokości 73-80 m n.p.m., o glebie rdzawej właściwej, na piasku luźnym; panujący zespół: *Tilio cordatae-Carpinetum typicum*; skład drzewostanu: 70% *Quercus robur* i *Q. petraea* (dąb), 30% *Pinus sylvestris* (sosna zwyczajna); w czasie prowadzenia pomiarów wiek sosny wynosił 70 lat, dębu szypułkowego – średnio 55, dębu bezszypułkowego – średnio 50.

Model FORKOME został już opisany w naszych poprzednich publikacjach [Menshutkin i Kozak 1997, Kozak i Menshutkin 1999, 2000, 2001]. Zastosowano go już także do prognozowania sukcesji starego drzewostanu sosnowego w Kampinoskim Parku Narodowym [Kozak i in. 2003]. W niniejszej pracy podajemy jedynie ogólną jego charakterystykę.

Specyfiką podejścia modelu FORKOME jest traktowanie lasu jako zgrupowania drzew, z których każde ma własny specyficzny zestaw cech (gatunek, wiek, pierśnica, wysokość itd.) oraz podlega indywidualnemu rozwojowi, zależnemu od różnych czynników ekologicznych takich, jak światło, temperatura, wilgotność, konkurencja i in.

Model zajmuje pozycję pośrednią pomiędzy modelami pojedynczego drzewa i modelami całego drzewostanu. Komponentami modelu są: określone warunki miejsca – uwzględniające klimat, określone cechy drzewostanu, skład gatunkowy i osiągnięte maksymalne rozmiary drzew, podmodel wzrostu – zawierający roczny przyrost pierśnicy i wysokości każdego drzewa na małej (zazwyczaj 0,16 ha) powierzchni symulacji, podmodel pojawu nowych osobników – obliczający prawdopodobieństwo wejścia nowych drzew do piętra drzewostanu w procesie symulacji, podmodel śmiertelności – eliminujący drzewa, które osiągnęły maksymalny wiek przypisany gatunkowi lub które charakteryzują się bardzo niewielkim przyrostem (niewystarczającym do przetrwania), podmodel zasobów – uwzględniający potencjalne ograniczenia wzrostu przez różne zasoby środowiska, wyrażone jako mnożniki wzrostu osiągające odpowiednie wartości.

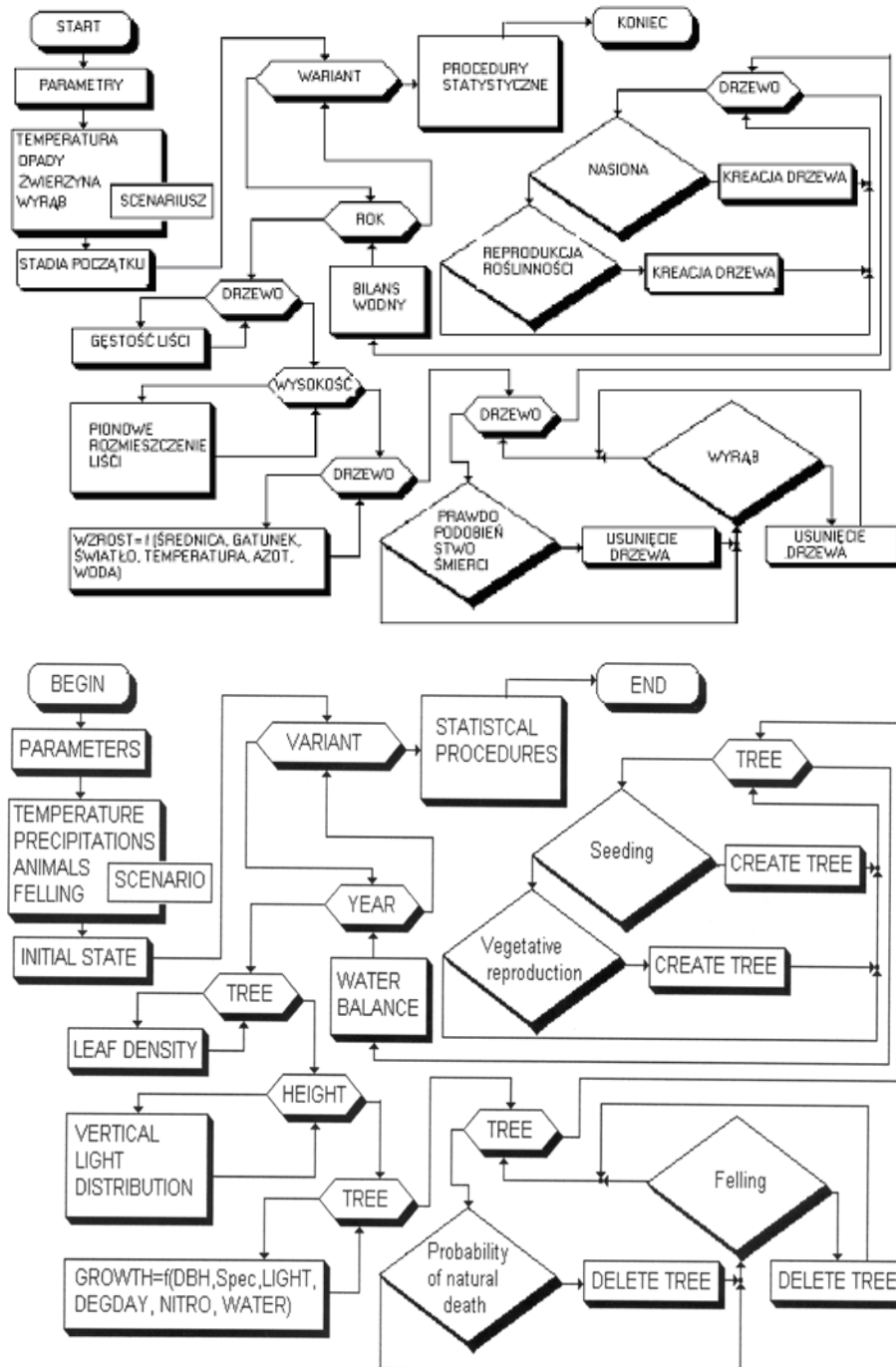
W modelu wydzielane są określone bloki. Jest to dobrze widoczne na jednym z algorytmów (rys. 1). Bloki zawierają ocenę parametrów każdego drzewa i zbiorowiska leśnego. Do parametrów tych należą m.in.: maksymalna średnica drzewa na standardowej wysokości 130 cm od ziemi, maksymalna wysokość, maksymalny wiek oraz minimalna i maksymalna suma temperatur efektywnych powietrza. W modelu znajdują się ponadto inne parametry, związane z różnymi realizowanymi podczas konkretnej symulacji scenariuszami rozwojowymi.

Ponieważ model ma charakter stochastyczny, badania jego dynamiki wymagają uwzględnienia wielu wariantów. Krokiem czasowym w modelu jest rok. Schemat blokowy przedstawiony na rysunku został rozszerzony o dodatkowe bloki oraz możliwości wycinania drzew, zmian temperatury powietrza, zwiększania i zmniejszania ilości opadów atmosferycznych w realizowanych scenariuszach zmian. W modelu została zastosowana statystyczna metoda Monte-Carlo, pozwalająca na analizy obejmujące do 50 symulacji w każdym scenariuszu. Po przeprowadzeniu analizy Monte-Carlo, program przedstawia graficznie (z możliwością wydruku) średnią, uzyskaną w wyniku symulacji liczbę drzew oraz średnią biomasę drzew wraz z ich odchyleniami standardowymi – dla każdego roku symulacji.

Pozycja każdego drzewa jest projektowana na przekątnej badanej płatowej powierzchni. W symulacji komputerowej rok założenia powierzchni badawczej (2002 r.) jest uważany za pierwszy rok symulacji.

W ciągu każdego modelowanego roku model uwzględnia śmiertelność drzew, która jest procesem losowym i zależy od warunków wzrostu w poprzednim roku oraz od wieku drzewa.

Symulacja reprodukcji drzew jest przedstawiona w modelu jako stochastyczny proces uzależniony od gatunków siewek i warunków panujących na powierzchni ziemi. Tempo wzrostu każdego drzewa zależy od rozmiarów i gatunku drzewa oraz od warunków wodnych, świetlnych, temperatury, a także od zaopatrzenia gleby w pierwiastki biogenne.



Rys. 1. Algorytm modelu FORKOME
Fig. 1. FORKOME model algorithm

Model przewiduje wzrost drzew, biorąc pod uwagę ograniczenia w dostępie światła. Gatunki drzew podzielone są na różne klasy ze względu na stopień tolerancji wobec temperatury oraz przymrozków wiosennych (późne) i jesiennych (wczesne), warunków świetlnych, wilgotności, zgrzyzania przez zwierzyne, zanieczyszczeń i innych czynników.

Do symulacji wzrostu w modelu jako danych wyjściowych używa się standardowych leśnych danych inwentarzowych, wśród których znajdują się dane o rozmiarach pierśnic, wysokościach drzew i inne. Podstawowym równaniem zastosowanym w modelu jest równanie przyrostu pierśnicy. Jako wielomianowa funkcja wzrostu grubości pnia modelowany jest również wzrost na wysokość poszczególnych gatunków.

Zastosowanie równania wzrostu drzew pozwala na określenie parametrów liczbowych na podstawie stosunkowo łatwo dostępnych danych. Takimi parametrami są: pierśnica, wysokość i wiek, maksymalna pierśnica, maksymalna wysokość i maksymalny wiek, osiągnięty przez drzewa danego gatunku.

Symulacje zmian klimatycznych przeprowadzono w następujących scenariuszach:

Kontrola – w warunkach rzeczywistych: średnia roczna temperatura powietrza 7,6°C i opady atmosferyczne 550 mm; Scenariusz 1 – wzrost temperatury o 2°C i wzrost ilości opadów o 200 mm (ciepło i wilgotno); Scenariusz 2 – wzrost temperatury o 2°C i spadek ilości opadów o 200 mm (ciepło i sucho); Scenariusz 3 – spadek temperatury o 2°C i wzrost ilości opadów o 200 mm (zimno i wilgotno); Scenariusz 4 – spadek temperatury o 2°C i spadek ilości opadów o 200 mm (zimno i sucho).

WYNIKI I DYSKUSJA

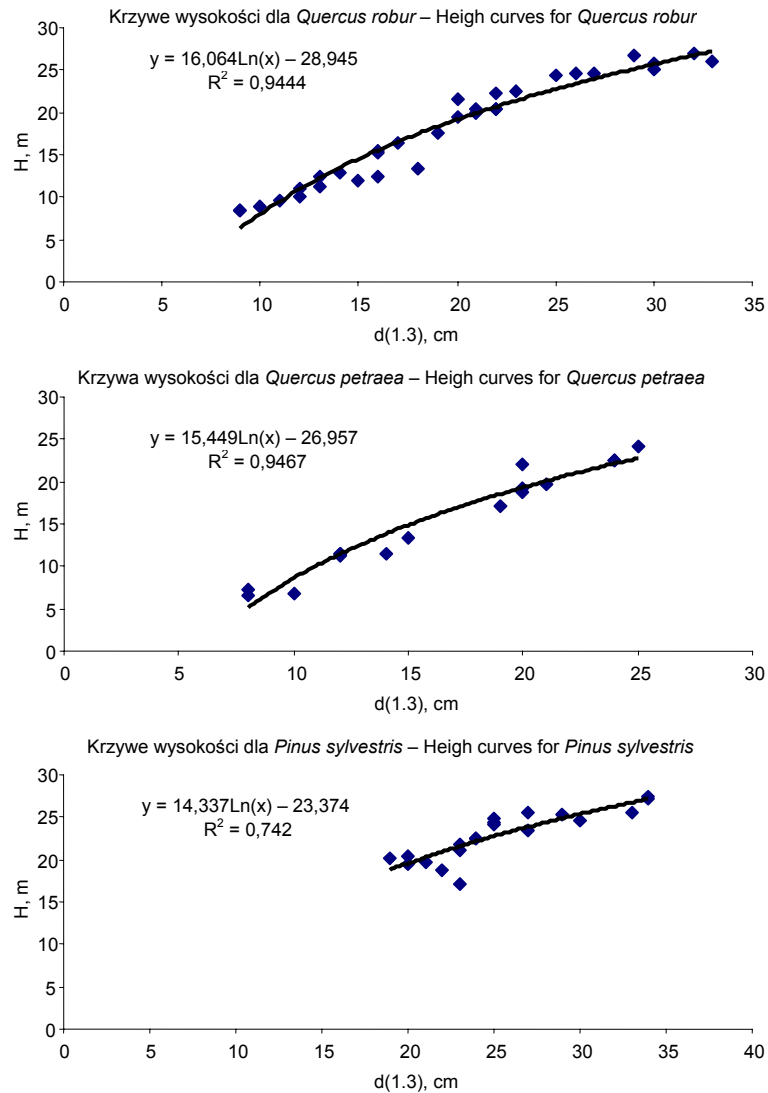
Analiza danych krzywej wysokości dla poszczególnych gatunków w analizowanym płacie (rys. 2) wykazuje niewielkie zróżnicowanie wysokości sosny, co potwierdza sztuczne jej pochodzenie.

Analizując z pomocą modelu FORKOME proces zmian sukcesyjnych na danej powierzchni widzimy, że w pierwszym roku symulacji dominował wg biomasy dąb szypułkowy – 42%. Sosna zwyczajna zajmowała w biomasy 40%. Resztę zajmował dąb bezszypułkowy *Quercus petraea* Liebl. – 20%. Liczba drzew w pierwszym roku symulacji była dość podobna procentowo do biomasy: 40% drzew stanowił dąb szypułkowy, 38% sosna, 20% dąb bezszypułkowy, 2% lipa.

Nie analizujemy którejkolwiek z jednej realizacji, ponieważ każda z nich może być inna i od razu przechodzimy do analizy Monte-Carlo. Nasz program pozwala wykonać dość dużo, do 50, realizacji. Dla danej powierzchni wykonaliśmy 30 i przedstawiamy uśrednione wartości w postaci analizy Monte-Carlo. Wyniki wskazują tendencje zmian sukcesyjnych na danej powierzchni badawczej i są niezbędne z punktu widzenia analizy prognozy jej zmian sukcesyjnych.

Po przeprowadzonej przez nas analizie zmian biomasy drzew na badanej powierzchni na podstawie Monte-Carlo, przedstawimy wyniki prognozowanych zmian w postaci rysunków i tabel tak dla kontroli, jak i dla różnych scenariuszy zmian klimatycznych.

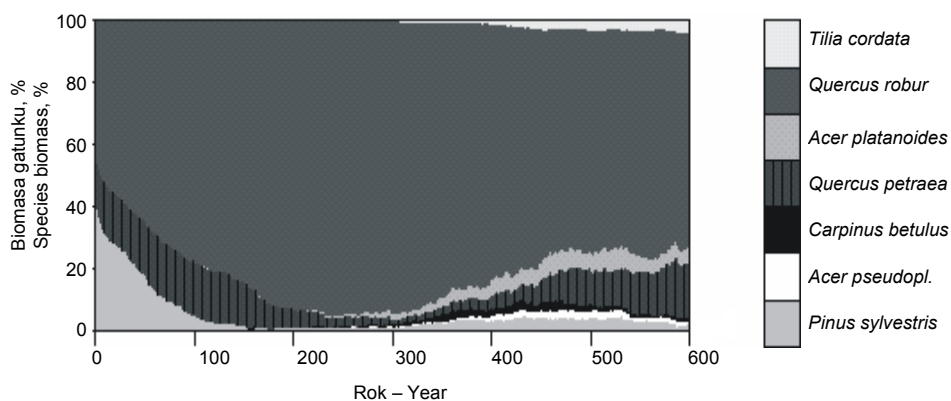
Graficzne przedstawienie symulacji Monte-Carlo zmian biomasy drzew na badanej powierzchni drzewostanu sosnowego w oddziale 135g Obrębu Kampinos w Kampinoskim Parku Narodowym (rys. 3) potwierdza zmianę drzewostanu sosnowego w kierunku



Rys. 2. Krzywe wysokości dla poszczególnych gatunków drzew w analizowanym płacie

Fig. 2. Height curves for certain tree species on the patch

dębowego. Zaniknięcie sosny zwyczajnej model prognozuje w ciągu 100-120 lat od początku symulacji Monte-Carlo. Po zmniejszeniu biomasy sosny dąb szypułkowy cały czas utrzymuje dominację w biomacie. Do 150. roku jego biomasa zwiększa się kosztem zmniejszenia biomasy i zanikania sosny, ale w drugiej połowie symulacji jego biomasa ma tendencję do nieznacznego zmniejszenia kosztem zwiększenia biomasy lipy (do 3% – w górnej części rysunku; kolory na rysunku i kolory w legendzie ułożone w tej samej kolejności) i nieznacznego zwiększenia biomasy dębu bezszypułkowego.



Rys. 3. Symulacja Monte-Carlo biomasy drzew w analizowanym płacie, kontrola, %
 Fig. 3. Tree biomass Monte-Carlo simulation, on the patch, control scenario, % values

Jak pokazuje ta 30-krotna uśredniona symulacja, procentowy udział dębu bezszypułkowego zwiększa się od 12% na początku symulacji do 20% w 600. roku symulacji. Jednak, jak widać na rysunku, w środkowej fazie symulacji jego biomasa była dość mała (1-2%). W drugiej połowie symulacji zwiększa się udział biomasy *Acer platanoides* do 5%, *A. pseudoplatanus* – do 2%, *Carpinus betulus* – do 2%.

Model pozwala na wyliczenie symulowanej biomasy w każdym roku symulacji. Jako przykład przedstawiamy wyniki symulacji dla każdego stulecia, w których wyliczono średnią biomasa każdego gatunku (w 100., 200., 300., 400., 500., 600. roku) (tab 1). Podano także odchylenie standardowe (standard deviation) po znakach (\pm).

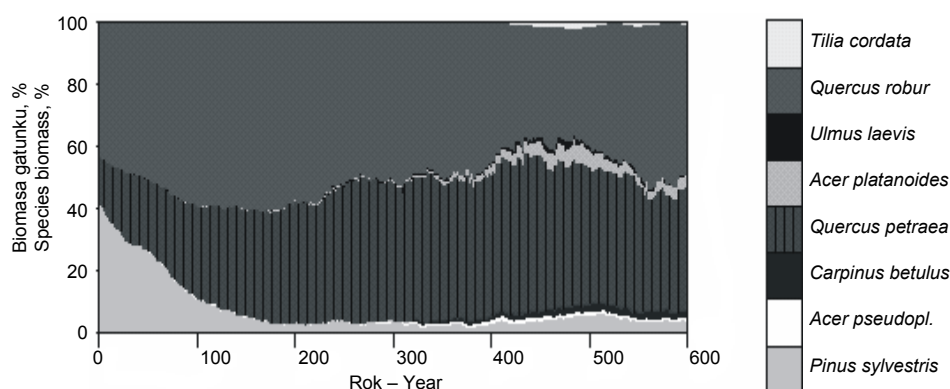
Jak wynika z tabeli (tab. 1), model symuluje dominację dębu szypułkowego od 400,4 \pm 5,4 t/ha w 100. roku do 305,7 \pm 4,3 t/ha w 600. roku. Jak widać, biomasa dębu szypułkowego zwiększa się do 200. roku i dalej maleje do 600. roku. Biomasa sosny zwyczajnej, która stanowiła 38% w pierwszym roku symulacji, już w 100. roku wynosiła

Tabela 1. Symulacja Monte-Carlo biomasy w analizowanym płacie, wariant kontrolny
 Table 1. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, control scenario

Gatunek drzewa Tree species	Lata – Years					
	100	200	300	400	500	600
<i>Tilia cordata</i>	–	–	1,3 \pm 0,3	4,7 \pm 0,9	14,0 \pm 2,6	16,9 \pm 2,7
<i>Quercus robur</i>	400,4 \pm 5,4	448,6 \pm 10,9	431,5 \pm 13,3	348,7 \pm 18,3	337,3 \pm 16,4	305,7 \pm 4,3
<i>Acer platanoides</i>	0,3 \pm 0,1	0,6 \pm 0,2	8,0 \pm 2,4	19,0 \pm 3,4	25,2 \pm 2,9	19,7 \pm 2,3
<i>Quercus petraea</i>	88,1 \pm 3,9	28,3 \pm 5,2	6,0 \pm 1,7	17,9 \pm 3,4	50,6 \pm 6,2	76,6 \pm 7,3
<i>Carpinus betulus</i>	–	0,2 \pm 0,1	3,8 \pm 1,1	10,4 \pm 1,8	9,8 \pm 1,9	6,0 \pm 1,1
<i>Acer pseudoplatanus</i>	–	–	1,3 \pm 0,4	5,5 \pm 1,3	10,8 \pm 2,6	4,7 \pm 1,2
<i>Pinus sylvestris</i>	25,6 \pm 3	5,2 \pm 2,4	4,4 \pm 1,1	8,6 \pm 1,9	13,9 \pm 2,0	5,8 \pm 1,1
Łącznie – Total	514,4	482,9	456,3	418,8	461,6	435,4

tylko $25,6 \pm 3,0$ t/ha. W następnych stuleciach jej biomasa zmieniała się od $5,2 \pm 2,4$ t/ha w 200. roku do $5,8$ t/ha w 600. roku. Biomasa dębu bezszypułkowego w czasie symulacji zmieniała się od $88,1 \pm 3,9$ w 100 r. do $6,0$ w 300. roku i do $76,6$ t/ha w 600. roku. W drugiej połowie symulacji wzrasta biomasa lipy (od $1,3$ t/ha w 300. roku do $16,9$ t/ha w 600. roku), *Acer pseudoplatanus* (od $1,3$ t/ha w 300. roku do $10,8$ t/ha w 500. roku) i *Acer platanoides* (od 8 t/ha w 300. roku do $25,2$ t/ha w 500. r.) (tab. 1).

W scenariuszu 1, w ocieplonym i uwilgotnionym klimacie model przewiduje szybsze i gwałtowniejsze zwiększenie biomasy dębu bezszypułkowego (rys. 4), prawie do 50% w końcu symulacji, kiedy dominuje, a biomasa dębu szypułkowego spada na drugie miejsce. Tak więc w scenariuszu 1, w porównaniu z wariantem kontrolnym, model prognozuje zmniejszenie biomasy dębu szypułkowego i lipy oraz zwiększenie biomasy dębu bezszypułkowego. Już w 500. roku (tab. 2) biomasa dębu bezszypułkowego jest większa ($184,8 \pm 15,2$ t/ha) niż dębu szypułkowego ($165,5 \pm 12,3$ t/ha).

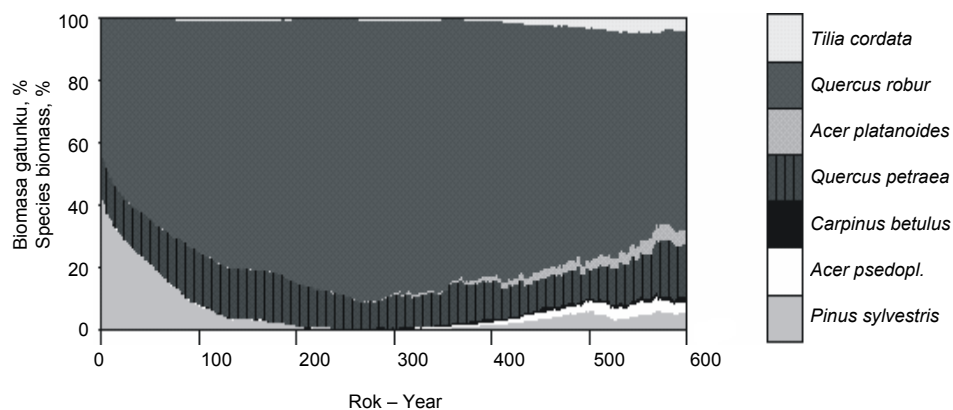


Rys. 4. Symulacja Monte-Carlo biomasy drzew w analizowanym płacie, scenariusz 1, %
Fig. 4. Tree biomass Monte-Carlo simulation pine-oak tree stand, scenario 1, % values

Tabala 2. Symulacja Monte-Carlo biomasy w analizowanym płacie, scenariusz 1
Table 2. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 1

Gatunek drzewa Tree species	Lata – Years					
	100	200	300	400	500	600
<i>Tilia cordata</i>	–	–	$0,7 \pm 0,2$	$0,6 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,7$	$1,4 \pm 0,2$
<i>Quercus robur</i>	$299,7 \pm 5,8$	$263,9 \pm 10,8$	$231,8 \pm 12,8$	$179,3 \pm 17,5$	$165,5 \pm 12,3$	$209,8 \pm 18,3$
<i>Ulmus laevis</i>	–	$0,2 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,4$	$2 \pm 0,4$	$4,2 \pm 0,8$	$1,0 \pm 0,1$
<i>Acer platanoides</i>	$0,4 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,3$	$10 \pm 1,3$	$22,6 \pm 3,2$	$16,8 \pm 2,4$
<i>Quercus petraea</i>	$151,5 \pm 4,6$	$183,1 \pm 8,8$	$206,6 \pm 15,3$	$177,8 \pm 16,6$	$184,8 \pm 15,2$	$174,1 \pm 2,8$
<i>Carpinus betulus</i>	$0,7 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$1,4 \pm 0,3$	$4,4 \pm 0,7$	$9,5 \pm 1,7$	$7,5 \pm 1,4$
<i>Acer pseudoplatanus</i>	$0,5 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,3$	$4 \pm 0,5$	$4,1 \pm 1,0$	$4,2 \pm 1,1$
<i>Pinus sylvestris</i>	$55,1 \pm 4,8$	$14,6 \pm 3,3$	$10,8 \pm 2,5$	$8,3 \pm 1,8$	$20,5 \pm 2,8$	$17,0 \pm 2,3$
Łącznie – Total	507,9	464	455,8	386,4	413,1	431,8

W scenariuszu 2 (ciepło i sucho) symulacja przewiduje bardzo podobną w porównaniu z wariantem kontrolnym sytuację, choć udział dębu bezszypułkowego jest trochę większy, zwłaszcza w środkowej fazie symulacji (rys. 5). Na przykład w 300. roku wynosi $32,7 \pm 4,6$ t/ha, podczas gdy w wariacie kontrolnym tylko $6,0 \pm 1,7$ t/ha (tab. 3).



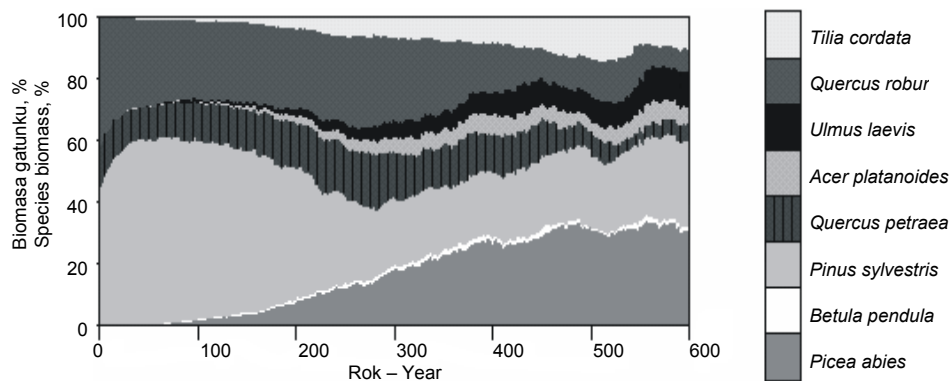
Rys. 5. Symulacja Monte-Carlo biomasy drzew w analizowanym płacie, scenariusz 2, %
 Fig. 5. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 2, % values

Tabela 3. Symulacja Monte-Carlo biomasy w analizowanym płacie, scenariusz 2
 Table 3. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 2

Gatunek drzewa Tree species	Lata – Years					
	100	200	300	400	500	600
<i>Tilia cordata</i>	1,5±0,2	0,9±0,2	1,6±0,6	2,1±0,3	8,1±1,2	11,3±1,4
<i>Quercus robur</i>	278,4±4,3	308,1±8,2	276,9±11,8	228,5±13,7	184,4±14,3	175,6±13,2
<i>Acer platanoides</i>	0,3±0,1	0,1	1,6±0,4	3,7±0,6	5,8±1,4	12,5±1,9
<i>Quercus petraea</i>	62,3±2,3	51,3±3,2	32,7±4,6	33±6,4	24,0±3,7	46,2±6,9
<i>Carpinus betulus</i>	0,4±0,1	0,3±0,1	0,9±0,3	3,0±0,5	2,2±0,4	4,4±0,6
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,2±0,1	0,1	0,5±0,1	2,6±0,5	7,9±1,2	9,6±1,4
<i>Pinus sylvestris</i>	29,9±1,8	5,1±1,4	1,1±0,2	4,5±0,8	12,6±1,9	13,7±1,9
Łącznie – Total	373	365,9	315,3	277,4	245	273,3

W scenariuszu 3 (zimno i wilgotno) zastosowany model FORKOME przewiduje większą dominację sosny. Na początku symulacji biomasa sosny stanowiła 42% ogólnej biomasy, ale już w 50. roku wzrosła do 60%. Sosna dominuje prawie do 150. roku, kiedy jej biomasa wynosi 50-60% biomasy ogólnej. Dalej jest widoczna tendencja do zmniejszania się udziału biomasy sosny, do 30% w 600. roku. Jak wynika z rysunku (rys. 6), do końca symulacji w tym scenariuszu będą dominować sosna i świerk. Udział dębu szypułkowego do końca symulacji zmniejszy się do 6%, a dębu bezszypułkowego do 3%. W końcowej fazie symulacji wzrasta udział lipy, której biomasa zwiększa swój udział prawie do 10% (rys. 6), a resztę biomasy stanowi biomasa świerku (jego biomasa może

się zmienił od 10% w 200. roku do 25% w 600. roku), *Ulmus laevis* (do 10% w 600. roku) i *Acer platanoides* do 5% ($18,6 \pm 1,7$ t/ha) (tab. 4).

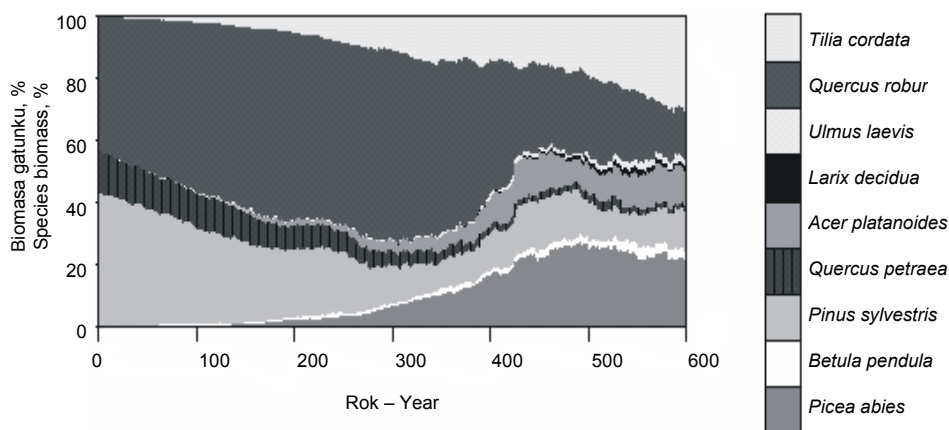


Rys. 6. Symulacja Monte-Carlo biomasy drzew w analizowanym płacie, scenariusz 3, %
Fig. 6. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 3, % values

Tabela 4. Symulacja Monte-Carlo biomasy w analizowanym płacie, scenariusz 3
Table 4. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 3

Gatunek drzewa Tree species	Lata – Years					
	100	200	300	400	500	600
<i>Tilia cordata</i>	4,0±0,4	13,9±1,6	23,8±2,4	32,4±3,1	48,5±4,6	35,9±4,2
<i>Quercus robur</i>	98,8±3,9	99,7±6,3	100,3±6,7	65,0±7,2	43±7,1	26,5±2,1
<i>Ulmus laevis</i>	2,0±0,3	8,8±1,0	18,9±2,1	29,4±2,9	29,6±2,3	40,4±3,8
<i>Acer platanoides</i>	1,4±0,2	8,4±0,8	16,6±1,6	24,4±2,9	14,8±1,6	18,6±1,7
<i>Quercus robur</i>	47,2±2,2	55,8±3,5	54,3±4,2	47,0±5,8	21,8±4,6	19,8±4,2
<i>Pinus sylvestris</i>	223,6±7,2	159,4±8,3	79,2±7,0	86,1±7	89,0±8,2	99,1±8,3
<i>Betula pendula</i>	1,7±0,4	2,5±0,3	4,3±0,6	6,6±1,6	1,8±0,2	5,5±1,2
<i>Picea abies</i>	6,9±0,7	30,5±2,7	68,4±4,2	107,5±5,8	113,8±6,9	110,5±6,3
Łącznie – Total	385,6	379	365,8	398,4	362,3	356,3

W scenariuszu 4 (chłodno i sucho) model przewiduje większy udział biomasy lipy, zwłaszcza w drugiej połowie symulacji. Udział dębu szypułkowego zwiększa się z 42% do 60% w 300. roku. Potem jego biomasa zmniejsza się, do 16% w końcowej fazie symulacji. Udział dębu bezszypułkowego w tym scenariuszu jest znikomy, zmniejsza się z 17% na początku symulacji do 1% na końcu. Udział sosny spada z prawie 40% na początku symulacji do 12% na końcu (rys. 7). W tym scenariuszu model przewiduje zwiększenie biomasy *Acer platanoides* od 9,2 t/ha w 200. roku do 28,9 t/ha w 600. roku (tab. 5).



Rys. 7. Symulacja Monte-Carlo biomasy drzew w analizowanym płacie, scenariusz 4, %
 Fig. 7. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 4, % values

Tabela 5. Symulacja Monte-Carlo biomasy w analizowanym płacie, scenariusz 4
 Table 5. Tree biomass Monte-Carlo simulation on the patch, scenario 4

Gatunek drzewa Tree species	Lata – Years					
	100	200	300	400	500	600
<i>Tilia cordata</i>	5,4±0,5	15,4±2	30,2±3,7	32,9±3,8	44,6±4,6	76,4±6,8
<i>Quercus robur</i>	173,9±3,7	185,2±5,7	169,7±7,4	105,3±10,9	61,5±6,7	40,0±44,2
<i>Ulmus laevis</i>	0,3±0,1	0,3±0,1	0,6±0,1	1,2±0,3	3,1±0,4	5,6±0,3
<i>Larix decidua</i>	–	–	–	0,5±0,1	3,2±0,5	3,6±0,2
<i>Acer platanoides</i>	1,4±0,2	6,0±0,6	9,2±1,1	21,8±2,7	22,4±2,8	28,9±3,1
<i>Quercus robur</i>	34,8±1,2	22,9±1,9	12,8±2,2	4,4±1,3	5,3±1,8	2,5±0,3
<i>Pinus sylvestris</i>	97,6±3,9	65,8±4,2	37,1±3,9	28,1±3,1	29,2±2,8	33,4±2,9
<i>Betula pendula</i>	2,3±0,5	2,3±0,2	2,0±0,4	3,0±0,7	5,0±0,7	5,6±0,8
<i>Picea abies</i>	1,9±0,3	7,9±1,2	19,3±1,7	40,7±3,2	63,3±4,5	56,3±4,2
Łącznie – Total	317,6	305,8	280,9	237,9	237,6	252,3

Warto zauważyć, że otrzymane przez nas w wyniku symulacji dane są zgodne z tezą wysuniętą przez Sprugela [1991], który twierdzi, że stosunkowo niewielkie zmiany temperatury i opadów mogą spowodować znaczące i długotrwałe zmiany roślinności.

Właśnie ta teza Sprugela skłoniła nas do próby modelowania zmian lasów nie tylko na skutek zmian temperatury, ale i wilgotności. Podobne symulacje prowadził też Brzeziecki [1999]. Znane są także inne przykłady podawane w literaturze [Krauchi 1995], w których połączono kombinacje procesów długoterminowych (sukcesja) i krótkoterminowych (hydrologia), co daje możliwość bardziej adekwatnego do

rzeczywistości symulowania procesów zmian ekosystemu. Uzyskane wyniki sugerują w tym wypadku, że wystarczą stosunkowo niewielkie zmiany warunków klimatycznych, aby uzyskać duże wahania zmian następstwa gatunków w sukcesji. Jest to zgodne z innymi danymi w literaturze. Na przykład w Niemczech, na powierzchni badawczej Solling symulacja z zastosowaniem modelu FORSUM została również wykonana z użyciem scenariusza klimatycznego IPCC – “business-as-usual” [Krauchi 1995]. W tych prognozach świerk całkowicie znika z obszaru Solling i zostaje zastąpiony przez las typu *Luzulo-Fagetum* z gatunkami *Acer platanoides*, *Quercus petraea* i *Fagus sylvatica* [Krauchi 1995].

WNIOSKI

Zastosowanie modelu FORKOME pozwoliło prognozować dla średniowiekowego mieszanego lasu w Kampinoskim Parku Narodowym wyparcie sosny przez dąb. W wariacie kontrolnym pokazano zmniejszenie biomasy sosny zwyczajnej i zwiększenie biomasy dębu szypułkowego oraz zajęcie przez dąb dominującej pozycji w biomacie w trakcie symulacji.

Jak widać z analizy Monte-Carlo w wariacie kontrolnym model potwierdza zanikanie sosny do 100. roku. Od początku symulacji do 250. roku biomasa dębu szypułkowego ma tendencję do zwiększania się, a dalej do nieznacznego zmniejszania na korzyść zwiększenia się biomasy lipy.

W scenariuszu 1 model prognozuje zmniejszenie biomasy dębu szypułkowego i lipy oraz zwiększenie biomasy dębu bezszypułkowego. W scenariuszu 2 model zakłada, że dąb bezszypułkowy zmniejszy swój udział w stosunku do udziału w scenariuszu 1, ale nieco zwiększy, zwłaszcza w środkowej fazie symulacji, w porównaniu z wariantem kontrolnym. W scenariuszu 3 model FORKOME symuluje większą dominację sosny, dość widoczną w pierwszej połowie symulacji, a w scenariuszu 4 większy udział biomasy lipy, zwłaszcza w drugiej połowie symulacji oraz zwiększenie biomasy *Acer platanoides*. Udział dębu szypułkowego zwiększa się do 200. roku, po czym zmniejsza się do 16% w końcowej fazie symulacji. Udział dębu bezszypułkowego, osiki i brzozy jest znikomy. Udział sosny spada do 200. roku i dalej utrzymuje się na niskim poziomie.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy składają serdeczne podziękowanie Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie prowadzonych badań (Grant N 6 P06L 042 21) oraz dyrektorowi mgr. inż. Jerzemu Misiakowi za umożliwienie wykonywania pracy na terenie Kampinoskiego Parku Narodowego.

PIŚMIENNICTWO

- Botkin D.B., 1993. Forest Dynamics: An Ecological Model. Oxford Univ. Press Oxford.
Botkin D.B., Janak J.F., Wallis J.R., 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. J. Ecol. 60, 849-872.

- Brzeziecki B., 1999. Ekologiczny model drzewostanu. Zasady konstrukcji, parametryzacja, przykłady zastosowań. Warszawa.
- Kondracki J., 2002. Geografia regionalna Polski. PWN Warszawa.
- Konecka-Betley K., 2003. Gleby. W: Kampinoski Park Narodowy T.1. Przyroda Kampinoskiego Parku Narodowego, 97-133.
- Kozak I., Menshutkin V., 1999. Computer simulation of forest Ecosystem Dynamics. Biol. Bull. 26 (6), 586-592.
- Kozak I., Menshutkin V., 2000. Possibilities of application of computer modelling for prediction of tree stand succession dynamics on the example of fir-beech tree stand in the Bieszczady Mountains. Forestry 3, 113-122.
- Kozak I., Menshutkin V., 2001. Prediction of beech forest succession in Bieszczady Mountains using a computer model. J. For. Sci. 47 (8), 333-339.
- Kozak I., Menshutkin V., Ferchmin M., Potaczała G., Józwińska M., Kozak O., Seńko Z., 2003. Prognozowanie zmian lasu sosnowego w obszarze ochrony ścisłej Nart w Kampinoskim Parku Narodowym z wykorzystaniem modelu FORKOME. Parki Nar. Rezerw. Przynr. 22 (4), 483-497.
- Krauchi N., 1995. Application of the model FORSUM to the Solling spruce site. Ecol. Model. 83, 219-228.
- Menshutkin V., Kozak I., 1997. An Investigation of a mixed beech forest dynamics in Ukrainian Carpathians using a computer model. W: Selected ecological problems of Polish-Ukrainian Carpathians. Red. K. Perzanowski, M. Augustyn. Bieszczady, 23-29.
- Sikorska-Maykowska M., 2003. Budowa geologiczna. W: Kampinoski Park Narodowy T.1. Przyroda Kampinoskiego Parku Narodowego, 69-86.
- Sprugel D.G., 1991. Disturbance, equilibrium, and environmental variability: what is "natural" vegetation in a changing environment? Biol. Conserv. 58, 1-18.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A., 1990. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. PWRiL Warszawa.
- Wierzbiński A., 1999. Monitoring meteorologiczny. System pomiarów na terenie Stacji Bazowej Pożary w Kampinoskim Parku Narodowym. W: Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Warszawa, 89-97.
- Zgorzelski M., Pawłowska T., 2003. Geomorfologia. W: Kampinoski Park Narodowy T.1. Przyroda Kampinoskiego Parku Narodowego, 87-95.

THE PROGNOSIS OF MIXED FOREST DYNAMICS IN THE KAMPINOSKI NATIONAL PARK USING A FORKOME MODEL

Abstract. Results of mixed forest prognosis with use of the FORKOME model on the area of the 135g division of the Kampinoski Forest Department are presented in this research work. 600 hundred years of future possible tree amount and biomass changes are described. The research includes control scenario simulating *Pinus sylvestris* biomass decreasing and *Quercus robur* biomass increasing up to reaching the domination level. Scenario 1 (warm and humid) simulates *Quercus robur* and *Tilia cordata* biomass decreasing and increasing of *Quercus petraea* biomass. Scenario 2 (warm and dry) *Quercus petraea* biomass reaches lower level than in scenario 1 however, slightly higher in the middle of the simulation than in the control scenario. In scenario 3 (cold and humid) FORKOME simulates considerable domination of *Pinus sylvestris* especially during the first half of the prognosis. Scenario 4 (cold and dry) simulates *Tilia cordata* and *Acer platanoides* biomass increasing in the second half of the prognosis. Preceding FORKOME simulations allows ascertaining that forest succession computer research is helpful in estimating climatic changes influence on

forest ecosystems. The results clearly state that FORKOME model is very useful for that kind of research.

Key words: mixed forest, FORKOME computer model, climate changes, Kampinoski National Park

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 25.07.2005 r.

Do cytowania – For citation: Kozak I., Ferchmin M., Potaczała G., Kozak O., Seńko Z., Baraniuk-Otręba A., 2005. Prognozowanie zmian lasu mieszanego w Kampinoskim Parku Narodowym z zastosowaniem modelu FORKOME. Acta Sci. Pol., Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar. 4(2), 49-62.