

Prognozowanie wpływu zmian klimatycznych na dynamikę drzewostanów bukowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza

A prognosis for the impact of climate change on beech stand dynamics in the Polish and Ukrainian Roztoche region

Ihor Kozak^{1*}, Barbara Typiak¹, Taras Parpan², Hanna Kozak¹

¹Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Katedra Ekologii Krajobrazu, ul. Konstantynów 1H, 20–708 Lublin, Polska;

²Ukraiński Instytut Leśnictwa Górskiego, ul. Hruszewskiego 31, 76018 Iwano-Frankiwnsk, Ukraina

*Tel. +48 81 4454531, e-mail: modeliho@kul.lublin.pl

Abstract. This study has been carried out in the Polish Roztoczański National Park and the Ukrainian Ravs'ke Roztochia Regional Landscape Park, both of which are part of the Roztoche region. In each of these two locations, representative study plots were established in beech (*Fagus sylvatica* L.) stands occupying sites with similar environmental conditions. A long-term prognosis for the dynamics of the chosen beech stands were generated using the computer model FORKOME. The model was used to forecast stand developments for four climatic scenarios (warm-humid, warm-dry, cold-humid, cold-dry) covering a time span of 500 years. Our simulation results indicate that in the control scenario, beech stands were dominating and cyclical changes between beech and Silver fir (*Abies alba* Mill.) may occur. In the scenarios with assumed climate warming, a decline of fir biomass and an increase of beech biomass, as compared to the control conditions, was noticed. In the scenario with assumed climate cooling, fir biomass increased for the duration of the investigated time span. To conclude, the application of the FORKOME model was found to be a useful tool for analyzing potential scenarios of long-term dynamics of beech stands in the Roztoche region in Poland and Ukraine.

Keywords: climate change, FORKOME model, tree competition, simulation, Roztoche

1. Wstęp

Klimat się zmienia. W ciągu ostatnich 100 lat średnia temperatura globalna wzrosła o około 0,7°C (IPCC 2007). W ciągu tego samego okresu średnia temperatura w Europie wzrosła jeszcze bardziej, bo o 0,95°C. Według prognoz sformułowanych w ramach prac Międzyrządowego Panelu Zmian Klimatycznych (IPCC) przewiduje się do końca XXI wieku dalszy, znaczący wzrost średniej temperatury rocznej dla Europy. Szacuje się, że w ciągu następnych 100 lat w Europie będzie miał miejsce wzrost temperatury o od 2,0°C do 6,3°C (IPCC 2007). Przewidywany jest także wzrost sumy opadów oraz częstości występowania zjawisk ekstremalnych (Lindner et al. 2010).

Zróznicowane reakcje poszczególnych gatunków drzew na przemiany zachodzące w środowisku są głównym czynnikiem warunkującym przekształcenia strukturalne drzewostanów i całych układów przyrodniczych (Milada et al. 2011),

dlatego nie ulega wątpliwości, że zmiany klimatu powinny być uwzględniane w aktualnych i przyszłych strategiach gospodarki leśnej.

Powyższy postulat dotyczy zwłaszcza obszarów położonych blisko naturalnych granic zasięgów gatunków drzew. Do takich obszarów należy Roztoche. Na jego terenie przebiega naturalna granica występowania buka (*Fagus sylvatica* L.), jednego z głównych gatunków lasotwórczych w polskich lasach (Maciejewski 2011). Prognozowanie dynamiki drzewostanów bukowych na północno-wschodniej granicy ich występowania, w warunkach możliwych zmian klimatycznych, ma duże znaczenie zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Wieloletnie badania drzewostanów bukowych na Roztoczu, zarówno w polskiej (Maciejewski 2011; Maciejewski, Szwagrzyk 2011), jak i ukraińskiej (Stojko 2000; Cherniavskiy, Savka 2004) części, wskazują na ich dużą dynamikę. Przemiany w budowie lasów bukowych mogą być m.in. spowodowa-

Wpłynęło: 5.12.2016 r., zrecenzowano: 14.01.2017 r., zaakceptowano: 30.01.2017 r.

ne współczesnymi zmianami klimatu, bowiem zbiorowiska leśne z udziałem buka występujące w Europie są podatne na przekształcenia wynikające z tych zmian (Dale et al. 2010).

Prognozowanie wieloletniej dynamiki drzewostanów wymaga użycia specjalnych narzędzi, tj. odpowiednio skonstruowanych modeli komputerowych. Jednym z nich jest model wzrostu lasu JABOWA (Botkin et al. 1972), z którego wywodzi się duża grupa tzw. płatowych modeli dynamiki drzewostanów, m.in. model FORET (Shugart, West 1977), skonstruowany w celu prognozowania dynamiki lasów na południu USA. Na bazie modelu JABOWA powstało też szereg modeli wykorzystywanych do symulacji i prognozowania dynamiki lasów w Europie: model FORSKA (Leemans, Prentice 1989), model FORCLIM (Bugmann 1997, 2001), model FORECE (Kienast 1987) oraz model FORSUM (Krauchi 1995). W Polsce także zostały opracowane tego typu modele: model FORKOME (Kozak et al. 2003, 2005, 2012, 2014), model FORBIG (Kozak, Brzeziecki 2007) oraz model FORLAS (Zajączkowski et al. 2013).

Założenia dotyczące zastosowania modeli płatowych w lasach polskich zostały po raz pierwszy przedstawione w pracach Brzezieckiego (1991, 1999). Pewien wkład w tę dziedzinę wniosły ponadto opracowania Szwagrzyka (1994) oraz model PICEAT, symulujący wzrost monokultur świerkowych w Sudetach (Pawłowski 1996). Modele płatowe mają dużą szansę sprostania potrzebom i wyzwaniom, związanym z rosnącą popularnością półnaturalnej hodowli lasów, jak również z tendencją do zastępowania leśnictwa monokulturowego leśnictwem ekosystemowym (Brzeziecki 1999).

Model FORKOME był już wykorzystywany do symulacji dynamiki drzewostanów w Kampinoskim Parku Narodowym (Kozak et al. 2005) i w Bieszczadzkim Parku Narodowym (Kozak, Menshutkin 2001; Kozak et al. 2003, 2014), a także w Rezerwacie Helgedomen w Szwecji (Kozak et al. 2012) oraz na Ukrainie (Kozak, Menshutkin 2002).

Głównym celem pracy było przeprowadzenie, z wykorzystaniem modelu FORKOME, prognozy dotyczącej zmian drzewostanów bukowych w polskiej oraz w ukraińskiej części Roztocza, przy założeniu różnych scenariuszy zmian

klimatycznych (kontrola – klimat bez zmian, ciepło-sucho, ciepło-wilgotno, zimno-sucho, zimno-wilgotno). Zakres pracy obejmował także sprawdzenie relacji konkurencyjnych pomiędzy bukiem a jodłą (za pomocą analizy korelacji krzyżowej) oraz zbadanie wpływu zmian sumy temperatur efektywnych i opadów atmosferycznych na charakter tych relacji.

2. Materiały i metody

Badania terenowe przeprowadzono w latach 2013–2015 na terenie Roztoczańskiego Parku Narodowego (N: 50°35'29", E: 22°57'35") w Polsce oraz „Rehionalnoho Landszaftnoho Parku Rav's'ke Roztochia” na Ukrainie (N: 50°13'23", E: 23°31'27"). W każdym z tych parków założono po trzy powierzchnie badawcze o zbliżonych warunkach siedliskowych, a z każdego parku wybrano po jednej powierzchni reprezentatywnej. Na wszystkich powierzchniach dominował buk zwyczajny, z większym udziałem jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) w polskiej części. Badane drzewostany występowały na glebach brunatnych (Tittenbrun 2013), na bazie których wykształciły się wilgotne siedliska leśne bogate w składniki pokarmowe. Średnia pierśnica buka wyniosła 41,2 cm na pierwszej powierzchni, a na drugiej – 34,3 cm (tab. 1). Wybrane powierzchnie są reprezentatywne dla Roztocza.

Wszystkie powierzchnie badawcze posiadały ekspozycję zachodnią, a nachylenie terenu wynosiło 10–11°. Każda z nich miała kształt kwadratu o boku 25 m (625 m²). Taka wielkość powierzchni jest często stosowana w modelach płatowych (Bugmann 2001). Po przeprowadzeniu 200 próbnych symulacji dla każdej powierzchni jej areal odpowiadał terenowi o wymiarach 200×0,0625=12,5 ha. Analiza statystyczna danych (test Shapiro-Wilka przeprowadzony przy zastosowaniu programu STATISTICA) wykazała, że pierśnice drzew na badanych powierzchniach cechowały się rozkładem normalnym z zaznaczającą się asymetrią prawostronną.

Poszczególne drzewa na powierzchniach ponumerowano i zmierzono ich pierśnicę, wysokość, promień korony, wiek, współrzędne X i Y. Miejsca występowania drzew naniesiono na mapę przy użyciu metody domiarów prostokątnych. Na

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki drzew występujących na powierzchniach badawczych

Table 1. Basic characteristics of the trees that are present on research plots

Po- wierzchnia	Gatunek	D (cm)			H (m)			Wiek (lata) Age (years)			N
		średnia mean	min	max	średnia mean	min	max	średnia mean	min	max	
1	<i>Abies alba</i>	15,8	5,0	24,0	14,6	5,0	21,0	35	10	70	11,0
1	<i>Fagus sylvatica</i>	41,2	11,0	98,0	21,4	8,0	39,0	78	22	185	29,0
2	<i>Abies alba</i>	5,1	4,0	8,0	3,2	2,0	5,0	11	8	17	5,0
2	<i>Fagus sylvatica</i>	34,3	8,0	79,0	18,4	6,0	37,0	65	21	156	24,0

D – pierśnica, H – wysokość, N – liczba drzew

D – d.b.h., H – height, N – number of trees

wyznaczonych obszarach wykonano zdjęcia hemisferyczne (po 9 zdjęć) niezbędne do weryfikacji obliczeń współczynnika powierzchni liściowej (ang. LAI) w modelu FORKOME. Do ich wykonywania wykorzystano aparat cyfrowy typu SLR – Canon EOS 5D z obiektywem Sigma 8 mm f/3.5 DG EX FISH EYE o kącie widzenia 180°. Do analizy zdjęć hemisferycznych użyto oprogramowania Gap Light Analyzer (Frazer et al. 2000). Wszystkie dane zebrane na powierzchniach badawczych wprowadzono do modelu FORKOME (Kozak et al. 2012) i przeprowadzono symulacje rozwoju drzewostanów w okresie 500 lat (tak długi okres symulacji pozwolił na ustabilizowanie relacji pomiędzy bukiem a jodłą w drzewostanach polskiej i ukraińskiej części Roztocza).

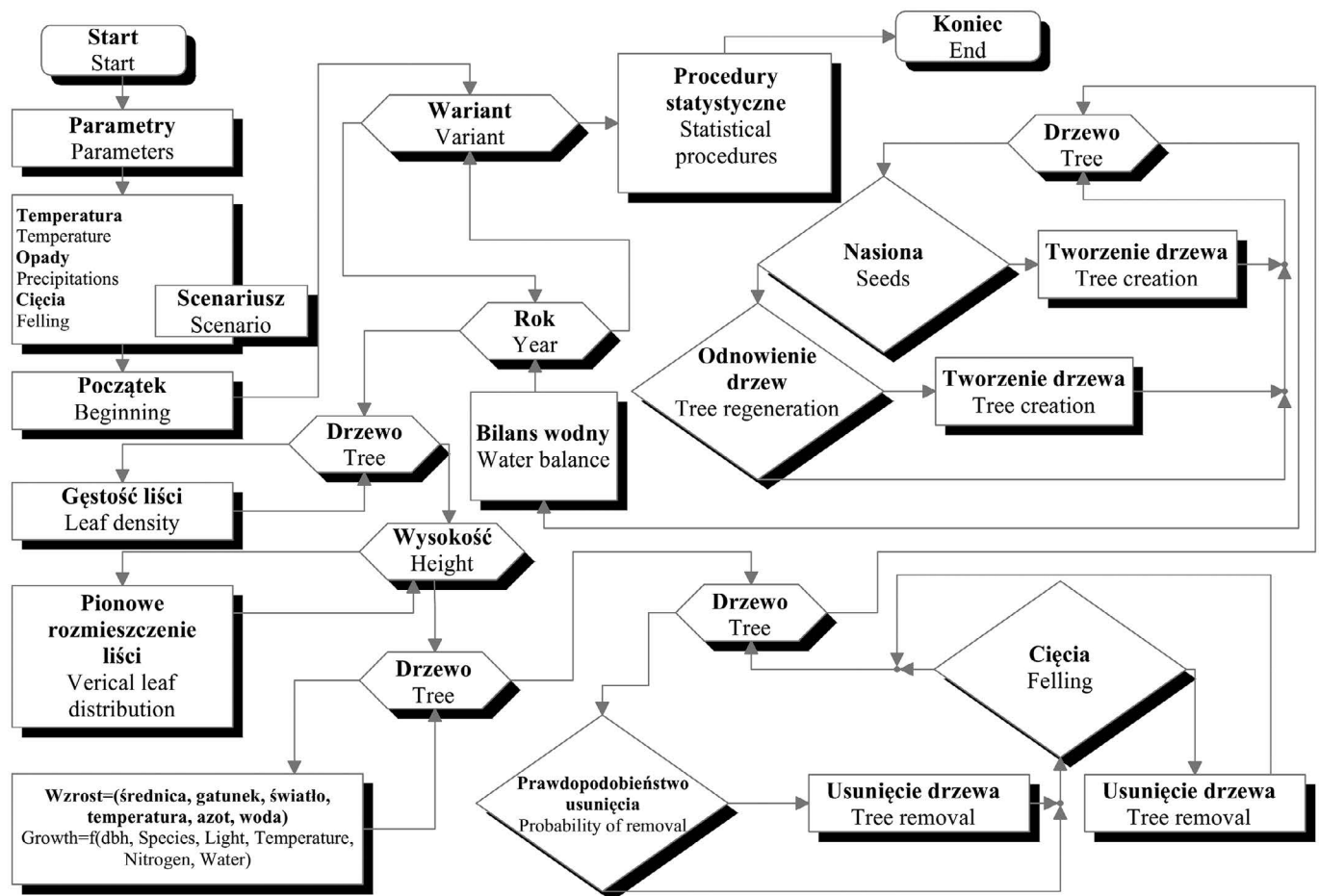
Model FORKOME należy do grupy modeli płatowych, które symulują wieloletnią dynamikę (sukcesję) zespołów leśnych z uwzględnieniem, w sposób bezpośredni, wpływu najważniejszych czynników środowiska, takich jak: temperatura, opady, światło, zasobność gleby w składniki pokarmowe, na główne procesy zachodzące w drzewostanach: odnowienie, wzrost i zamieranie poszczególnych drzew.

Konstrukcja modelu FORKOME została szczegółowo opisana we wcześniejszych publikacjach (Kozak, Menshutkin 2001; Kozak et al. 2003, 2012, 2014). Jest on najbardziej

podobny do modelu FORET (Shugart, West 1977) oraz – w przypadku niektórych rozwiązań służących do obliczenia ilości światła – do modelu JABOWA 3 (Botkin 1993). Model FORKOME zawiera też szereg oryginalnych rozwiązań i elementów, dotyczących m.in. sposobu symulacji wahań warunków termicznych, elementów bilansu wodnego siedliska oraz wielkości transpiracji drzew.

Z punktu widzenia programowania, w budowie modelu główną rolę odgrywa pojęcie tzw. obiektu. Podstawowymi obiektami w modelu FORKOME są: „Obszar” (Area) – reprezentuje badany płat drzewostanu oraz „Drzewo” (Tree) – reprezentuje pojedyncze drzewo. Symulacja wzrostu i rozwoju poszczególnych drzew odbywa się na podstawie warunków środowiskowych (klimatu, gleby, warunków świetlnych) panujących w danym płacie drzewostanu (zdefiniowanych w obiekcie „Obszar”). Każdy gatunek drzewa ma specyficzne, określone w sposób ilościowy, wymagania siedliskowe. Jeżeli warunki obszaru spełniają minimum wymagań gatunku, to taki gatunek jest dopuszczany do rozwoju. Stan końcowy symulacji w jednym roku jest stanem wejściowym symulacji w roku następnym.

Model FORKOME podzielony jest na moduły (bloki) (ryc. 1). Blok „Parametry” zawiera wartości parametrów



Rycina 1. Schemat blokowy modelu FORKOME

Figure 1. The block diagram of FORKOME model

opisujących każdy gatunek drzewa i całe zbiorowisko leśne. Do parametrów tych należą m.in.: maksymalna średnica drzewa na standardowej wysokości 130 cm od ziemi (D_{max}), maksymalna wysokość (H_{max}), maksymalny wiek (AGE_{max}) oraz minimalna i maksymalna suma temperatur powietrza (DGD_{min} , DGD_{max}). Do modelu dodano też inne parametry związane z różnymi scenariuszami rozwojowymi. Z uwagi na to, że model jest stochastyczny, badania jego dynamiki wymagają uwzględnienia wielu wariantów (blok „Wariant”). Procesy te są kontrolowane przez blok „Rok”. Krokiem czasowym w modelu jest jeden rok. Schemat blokowy przedstawiony na rycinie 1. został rozszerzony o dodatkowe bloki i opcje, w tym opcje: wycinania drzew, zmian temperatury powietrza oraz zwiększania i zmniejszania ilości opadów atmosferycznych (blok „Scenariusz”). W modelu zastosowano statystyczną metodę Monte-Carlo pozwalającą na symulację 200 wariantów rozwoju lasu w każdym scenariuszu. Po przeprowadzeniu analizy Monte-Carlo program umożliwia przedstawienie i wydrukowanie średniej liczby drzew i średniej biomasy drzew wraz z ich odchyleniami standardowymi dla każdego roku symulacji. W bloku „Procedury Statystyczne” została dodana możliwość wyliczenia funkcji autokorelacji i korelacji krzyżowej.

Jednym z najważniejszych modułów modelu jest blok „Wzrost” (Growth). W bloku tym oblicza się roczny przyrost każdego drzewa występującego na symulowanym obszarze (płacie drzewostanu o zdefiniowanych warunkach środowiskowych). Podstawowym obliczanym elementem jest przyrost pierśnicy drzewa. Roczny przyrost drzewa może wynosić od 0 do wartości możliwego przyrostu w idealnych (optymalnych z punktu widzenia wymagań danego gatunku) warunkach środowiskowych i obliczony jest wg wzoru:

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

gdzie:

r – stała dla gatunku, określająca wydajność fotosyntetyczną aparatu asymilacyjnego ($\text{cm}^3/(\text{cm}^2\text{rok})$),

La – powierzchnia listowia danego drzewa (m^2),

D – pierśnica drzewa (cm),

H – wysokość drzewa (cm),

D_{max} – maksymalna pierśnica dla danego gatunku (cm),

H_{max} – maksymalna wysokość dla danego gatunku (cm),

$\delta(D^2H)$ – przyrost objętości drzewa (cm^3).

Na podstawie pierśnicy, wykorzystując zależności o charakterze allometrycznym, oblicza się szereg innych parametrów symulowanego drzewa, na przykład jego wysokość. W rocznym przyroście drzewa uwzględniany jest także wpływ warunków zewnętrznych. W modelu FORKOME aktualny przyrost drzewa $\delta(D^2H)_{real}$ obliczany jest jako iloczyn przyrostu optymalnego $\delta(D^2H)_{opt}$ i czynników ograniczających przyrost drzewa (f_1, f_2, f_3, \dots), z których każdy przyjmuje wartość z przedziału [0,1]:

$$\delta(D^2H)_{real} = \delta(D^2H)_{opt} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_j$$

gdzie:

$\delta(D^2H)_{real}$ – aktualny przyrost objętości drzewa, po uwzględnieniu wpływu czynników zewnętrznych (ekologicznych),

$\delta(D^2H)_{opt}$ – przyrost drzewa w warunkach optymalnych,

f_1, f_2, f_3, \dots – współczynniki określające wpływ aktualnego układu czynników zewnętrznych (ekologicznych) wyrażone w skali od 0 do 1.

Głównym czynnikiem zewnętrznym limitującym wzrost drzewa jest najczęściej dostępność światła. W modelu FORKOME przy obliczaniu ilości światła, jaka dociera do danego drzewa, uwzględniany jest ubytek radiacji słonecznej spowodowany przez sumaryczne zacinające oddziaływanie powierzchni liści drzew wyższych od danego drzewa, znajdujących się w obrębie symulowanego płatu drzewostanu. W obrębie jednego płatu wyznaczane jest średnie natężenie światła na różnych wysokościach od powierzchni gleby, odpowiadających wysokości poszczególnych drzew. Pod względem stopnia światłozadności podzielono gatunki drzew na trzy zasadnicze typy: światłozadne, pośrednie, cienioznośne.

Warunki termiczne w modelu określane są przez roczną sumę temperatur efektywnych (sumę temperatur dobowych obliczanych dla okresu, w którym temperatura średnia przekracza 5°C). Współczynnik wyrażający wpływ temperatury na wzrost drzewa obliczany jest ze wzoru (Botkin 1993):

$$T = \frac{4(DGD - DGD_{min})(DGD_{max} - DGD)}{(DGD_{max} - DGD_{min})^2}$$

gdzie :

T – wskaźnik ograniczający wzrost,

DGD – suma temperatur efektywnych charakterystycznych dla danego miejsca,

DGD_{min} – minimalna suma temperatur efektywnych niezbędna dla istnienia gatunku,

DGD_{max} – maksymalna suma temperatur efektywnych konieczna do występowania gatunku.

W modelu FORKOME zostało również uwzględnione zjawisko transpiracji w zależności nie tylko od ogólnych parametrów meteorologicznych, jak jest to w innych modelach płatowych, ale także od specyfiki danego gatunku drzewa. Uwzględniono także wpływ (zmieniającego się) poziomu wód gruntowych na występowanie drzew różnych gatunków oraz zależność pomiędzy tempem wzrostu drzew i ilością wody w glebie, którą po raz pierwszy uwzględniono w modelu FORKOME (Kozak et al. 2003). Kolejny czynnik limitujący wzrost drzewa to tzw. indeks wykorzystania siedliska (*site index*). Określa się go na podstawie stosunku aktualnej sumy pól powierzchni przekroju pierśnicowego drzew występujących na symulowanym płacie do maksymalnej powierzchni możliwej do osiągnięcia w danych warunkach siedliskowych (Botkin 1993).

W bloku „Zamieranie Drzew” (Death) symuluje się zjawisko zamierania drzew. Do śmierci drzewa może dojść w dwóch przypadkach: 1) gdy nie uzyskuje ono określonego minimalnego przyrostu oraz 2) losowo, tj. niezależnie od przyrostu drzewa. W pierwszym przypadku model bazuje na założeniu, że jeżeli drzewo nie osiąga minimalnego przyrostu

przez dziesięć kolejnych lat, to istnieje tylko 1% szansy, że przeżyje ono te dziesięć lat. Drugi przypadek śmierci drzewa wynika z założenia, że jedynie niewielka część zdrowych drzew osiąga maksymalny wiek możliwy do osiągnięcia przez drzewa danego gatunku. W modelu przyjęto założenie, że tylko 2% zdrowych drzew osiąga maksymalny wiek, stąd nierówność (Botkin 1993):

$$RND < \frac{4,0}{AGE_{max}}$$

gdzie:

RND – losowa liczba z zakresu $[0,1]$,

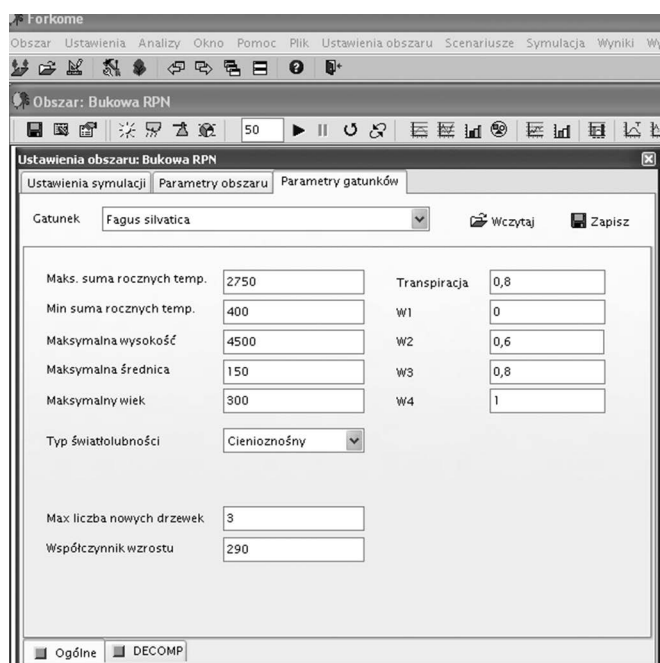
AGE_{max} – maksymalny wiek życia drzew danego gatunku.

W bloku „Odnowienie Drzew” (Birth) symuluje się, jako proces stochastyczny, zjawisko pojawiania się młodych drzew (Botkin 1993). Dla każdego gatunku przyjęta jest, wyznaczona empirycznie, maksymalna liczba nowych drzew, jakie mogą pojawić się w ciągu jednego roku w płacie drzewostanu o określonej wielkości. Maksymalna liczba nowych drzew danego gatunku jest zredukowana w stopniu określonym przez czynniki o charakterze losowym oraz przez ilość światła dochodzącego do dna lasu. Dla każdego z trzech typów wskaźnika tolerancji na światło generowane są inne wartości siewek.

Dalsze opcje zawarte w modelu pozwalają użytkownikowi na dokonanie ustawień podstawowych parametrów symulacji, parametrów analizowanego obszaru oraz parametrów gatunków drzew (ryc. 2), a także dokonanie wyboru scenariusza możliwych zmian klimatycznych poprzez określenie zakresu i charakteru zmian sumy temperatur efektywnych DGD oraz opadów atmosferycznych.

Do analizy procesów klimatycznych w modelu FORKOME zastosowano także podejście agregacji czynników klimatycznych (Kahn 1994). Uwzględniono podstawowe czynniki środowiskowe związane z klimatem (amplitudę roczną temperatury, średnią temperaturę okresu wegetacyjnego, sumę opadów w sezonie wegetacyjnym). Scenariusze klimatyczne zostały opracowane w celu weryfikacji tezy o utrzymaniu się buka na badanych powierzchniach na Roztoczu w wariantach zmian klimatu.

Dodatkowo w modelu FORKOME za pomocą narzędzia „Scenariusz zmian temperatury” do wartości kontrolnej (1425 „stopniodni” dla 1. badanej powierzchni oraz 1435 „stopniodni” dla 2. powierzchni) wprowadzono zmiany temperatury o 200 „stopniodni” powyżej wartości kontrolnej dla scenariusza ciepło-sucho i ciepło-wilgotno, oraz o 200 „stopniodni” poniżej wartości kontrolnej w scenariuszu zimno-sucho i zimno-wilgotno. Za pomocą narzędzia „Scenariusz zmian opadów atmosferycznych” symulowano wzrost lub spadek średniej rocznej sumy opadów o 100 mm. Wartości kontrolne opadów dla pierwszej powierzchni badawczej wynosiły odpowiednio 718 mm (dane ze stacji meteorologicznej w Zwierzyńcu, w Polsce), dla drugiej powierzchni – 713 mm (dane ze stacji meteorologicznej w Rawie Ruskiej na Ukrainie). Zaprezentowane scenariusze zakładają pozostawienie lasu samego sobie, czyli nie uwzględniają gospodarki leśnej i cięć przedrębnych oraz rębnych.



Rycina 2. Widok okna ogólnych parametrów drzew w modelu FORKOME

Figure 2. View of the interface on general parameters of trees in the FORKOME model

Obszar / Area, **Ustawienia** / Settings, **Analizy** / Analysis, **Okno** / Window, **Pomoc** / Help, **Plik** / File, **Ustawienia obszaru** / Area settings, **Scenariusze** / Scenarios, **Symulacja** / Simulation, **Wyniki** / Results, **Bukowa RPN (Roztoczański Park Narodowy)** / Beech RPN (Roztochanski National Park), **Ustawienia symulacji** / Simulation settings, **Parametry obszaru** / Area parameters, **Parametry gatunków** / Species parameters, **Gatunek** / Species, **Wczytaj** / Load, **Zapisz** / Save, **Maks. suma rocznych temp.** / DGD_{max} , **Min. suma rocznych temp.** / DGD_{min} , **Maksymalna wysokość** / Maximum height, **Maksymalna średnica** / Maximum DBH, **Maksymalny wiek** / Maximum Age, **Typ światłolubności** / Shade tolerance type, **Maks. liczba nowych drzewek** / Maximum saplings amount, **Współczynnik wzrostu** / Growth coefficient, **Transpiracja** / Transpiration, **Ogólne** / General, **Decomp.** / Decomposition

3. Wyniki

Wyniki przeprowadzonych prognoz wieloletniego rozwoju drzewostanów występujących na obu analizowanych powierzchniach próbnych (Buczyna 1 i Buczyna 2), wykonanych w modelu FORKOME, przedstawiono na rycinach 3–7.

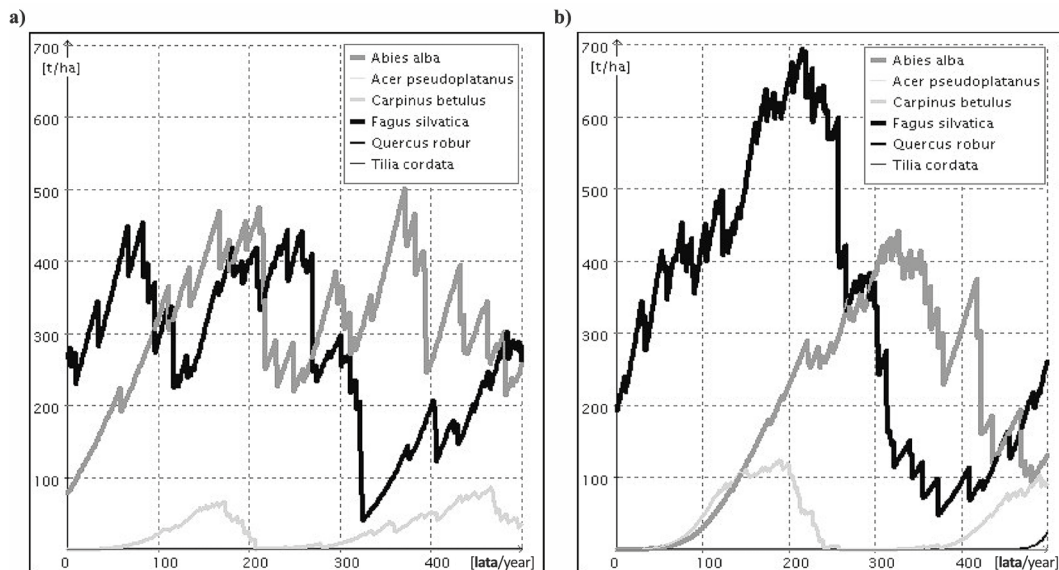
We wszystkich analizowanych scenariuszach w pierwszym roku symulacji na powierzchni Buczyna 1 dominował buk zwyczajny (260 t/ha, 76,5% biomasy całkowitej). Pozostałą część drzewostanu zajmowała jodła pospolita (23,5%). Na powierzchni Buczyna 2 także dominował buk zwyczajny (201 t/ha, 98,4% biomasy), a udział jodły był znikomy (1,6%). Graficzne zestawienie wyników symulacji przeprowadzonych metodą Monte Carlo dla scenariusza kontrolnego (brak zmian klimatycznych) sugeruje cykliczne zastępowanie buka przez jodłę i odwrotnie (ryc. 3). Największy wzrost roli buka kosztem jodły widoczny jest na

powierzchni 2. w ciągu pierwszych 220 lat, licząc od momentu rozpoczęcia symulacji. Po tym okresie biomasa buka spada, a jodły rośnie. Jednak nie trwa to długo, gdyż po 140 kolejnych latach prognozy buk znowu zaczyna zwiększać swój udział. W ostatnim okresie symulacji w drzewostanach pojawiają się także domieszki grabu pospolitego, dębu szypułkowego i klonu jaworu (większe na powierzchni 2.). Wyniki prognozy z zastosowaniem modelu FORKOME wskazują, że z punktu widzenia hodowli lasu, sukcesja lasu na badanych powierzchniach zachodzi stosunkowo wolno. Buk i jodła utrzymują dominację na przemian pod względem biomasy i liczby drzew. Porównanie parametrów tych gatunków, opracowanych przez Kahna (1994), z danymi z symulacji przeprowadzonej w modelu FORKOME w warunkach Roztocza wykazało, że gatunki te są mało wrażliwe na zmiany średniej temperatury sezonu wegetacyjnego oraz na zmiany średniej wartości amplitudy temperatur, na-

tomiast bardziej wrażliwe na wielkość opadów w sezonie wegetacyjnym. Jedynie w sytuacji zmniejszenia opadów mnożniki wzrostu dla buka mogą nieznacznie spadać (średnia wartość mnożnika wzrostu = 0,82).

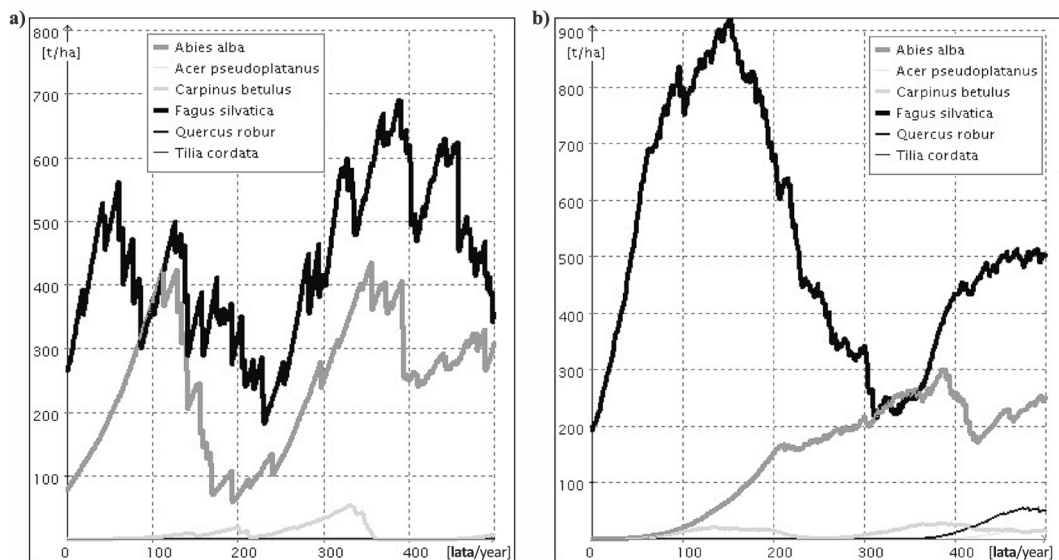
W scenariuszu 1. – ciepło-wilgotno (CW) model FORKOME prognozuje możliwe osłabienie cyklicznych zmian pomiędzy bukiem a jodłą. Na powierzchni 1. (ryc. 4a) buk w czasie całej symulacji dominuje nad jodłą. Podobna, a nawet większa, dominacja buka wystąpiła na powierzchni 2. w części ukraińskiej (ryc. 4b).

W scenariuszu 2. (CS, ryc. 5), zakładającym zmianę klimatu na cieplejszy i bardziej suchy w stosunku do obecnego, model również prognozuje osłabienie cyklicznych zmian udziału obu gatunków (buka i jodły). Biomasa buka znacznie zmniejszyła się na obu powierzchniach (od 300 t/ha w pierwszej połowie prognozy do 150 t/ha w drugiej). Dodatkowymi gatunkami, które się pojawiły, były grab pospolity



Rycina 3. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchniach: a) 1, b) 2

Figure 3. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the control scenario on plots: a) 1, b) 2



Rycina 4. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu CW na powierzchniach: a) 1, b) 2

Figure 4. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the warm-humid scenario on plots: a) 1, b) 2

(przez większość okresu symulacji), klon jawor i dąb szypułkowy. Ten ostatni zwiększył swój udział do 120 t/ha na końcu przyjętego okresu prognozy (ryc. 5a).

W scenariuszu 3. (zimno-wilgotno, ZW, ryc. 6) jodła osiągnęła największy udział biomasy w 270. roku symulacji na powierzchni 1. i w 360. roku symulacji na powierzchni 2. Świadczy to o najkorzystniejszych dla tego gatunku warunkach w tym scenariuszu, przy jednoczesnym znaczącym osłabieniu zdolności konkurencyjnej buka.

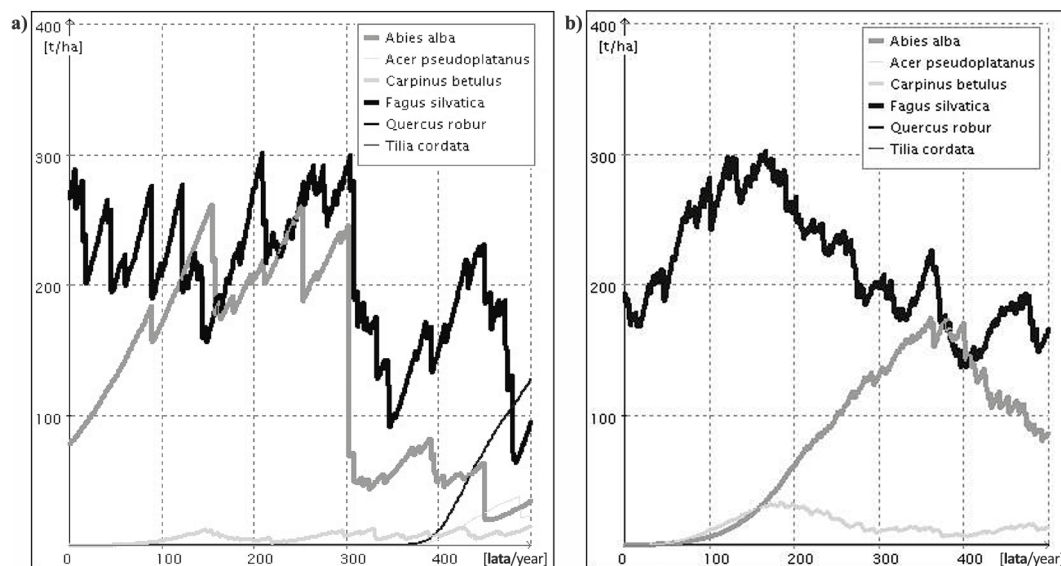
W czwartym scenariuszu, tj. w klimacie zimniejszym i suchszym (ZS) w stosunku do obecnego (ryc. 7), biomasa buka w drugiej połowie okresu symulacji oscyluje wokół najniższej wartości (100 t/ha na pierwszej i 30 t/ha na drugiej powierzchni). W tej prognozie, tak jak i w poprzedniej, pozycja buka jest słabsza w porównaniu z pozycją jodły.

Symulacja dynamiki bukowych drzewostanów na Roztoczu w różnych scenariuszach zmian klimatycznych wykazała

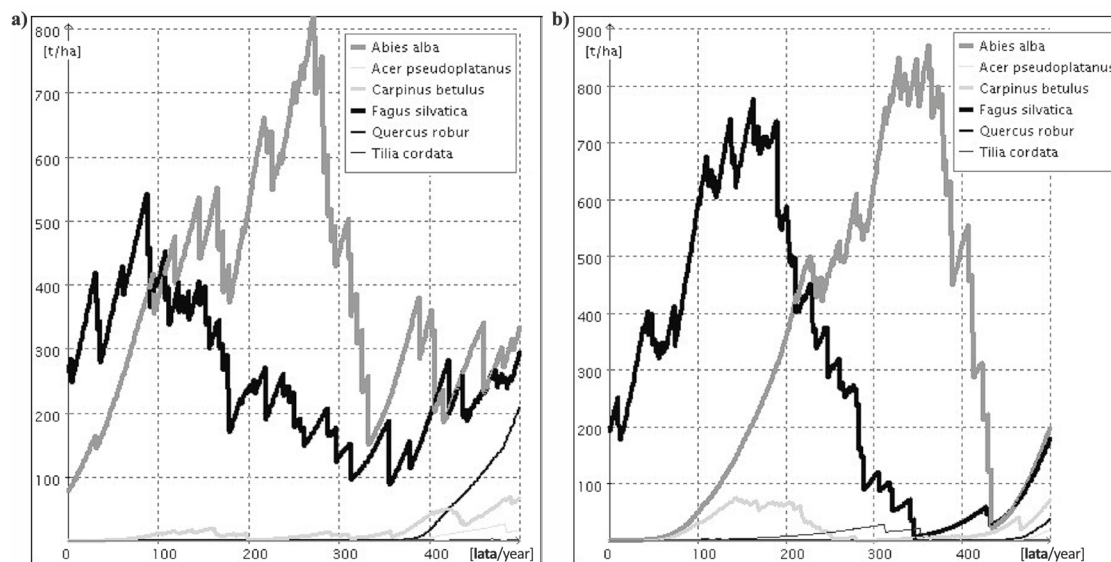
na ogół słabą korelację krzyżową pomiędzy jodłą a bukiem. Wysokie bezwzględne wartości współczynnika korelacji krzyżowej (do $-0,98$) uzyskano jedynie w scenariuszu zakładającym klimat cieplejszy i suchszy w stosunku do obecnego (ryc. 8a). W tym scenariuszu stwierdzono także silny dodatni wpływ temperatury (ryc. 8b) na biomasę buka (korelacja krzyżowa pomiędzy temperaturą powietrza a biomasą buka powyżej $0,80$).

4. Dyskusja

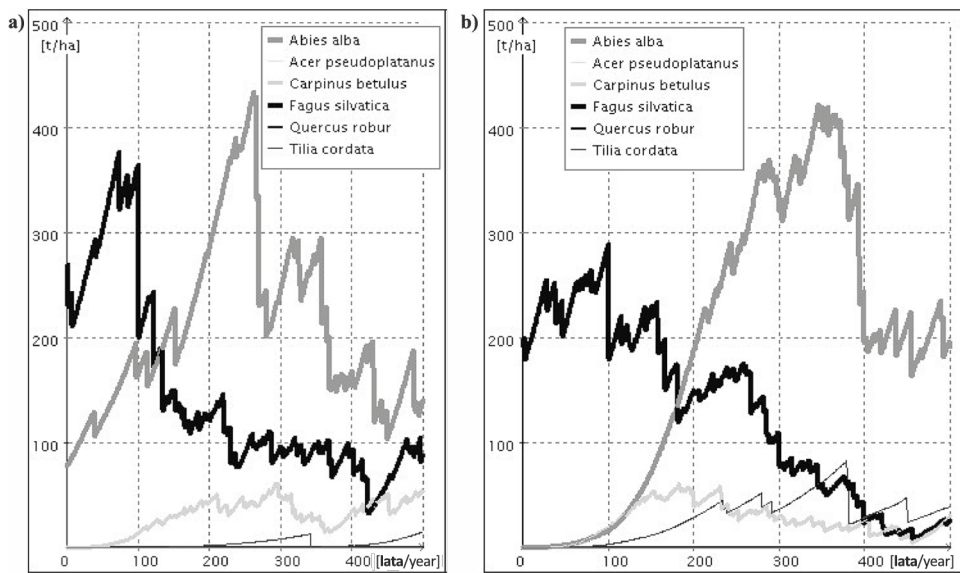
Prognozowana dynamika drzewostanów bukowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza potwierdza podatność buka na zmiany klimatyczne, co zostało zauważone już wcześniej (Dale et al. 2010). Wyniki symulacji przeprowadzonych przy pomocy modelu FORKOME sugerują, że na wschodniej



Rycina 5. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu CS na powierzchniach: a) 1, b) 2
Figure 5. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the warm-dry scenario on plots: a) 1, b) 2

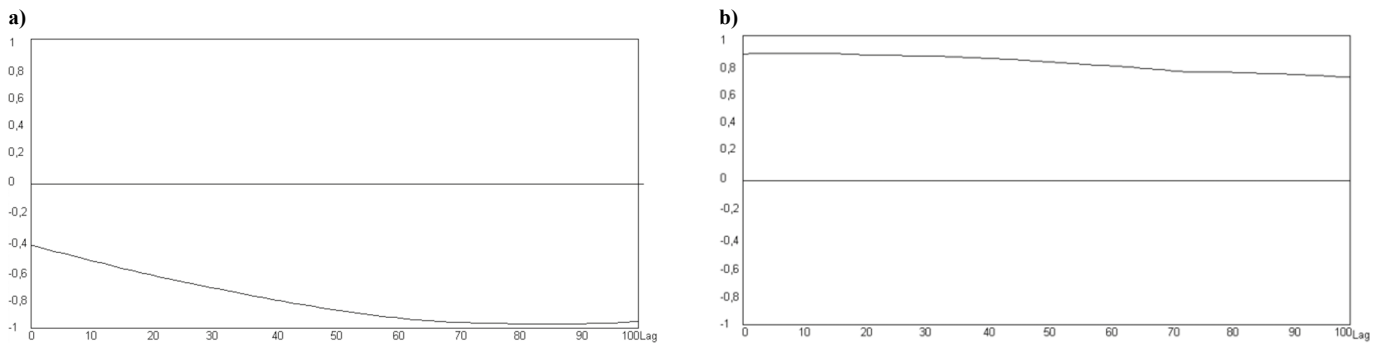


Rycina 6. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu ZW na powierzchniach: a) 1, b) 2
Figure 6. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the cold-humid scenario on plots: a) 1, b) 2



Rycina 7. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu ZS na powierzchniach: a) 1, b) 2

Figure 7. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the cold-dry scenario on plots: a) 1, b) 2



Rycina 8. Wartości współczynnika korelacji krzyżowej na powierzchni 2. w scenariuszu CS: a) pomiędzy biomasa jodły i biomasa buka, b) pomiędzy temperaturą a biomasa buka

Figure 8. Value of cross correlation parameter on the plot 2 in the warm-dry scenario: a) between beech and fir biomass, b) between temperature and beech biomass

granicy swego naturalnego zasięgu buk jest w największym stopniu wrażliwy na zmniejszenie sumy opadów. Duża wrażliwość buka na wahania wielkości opadów została stwierdzona także przez innych badaczy (Mátyás et al. 2010).

Buczyny występujące na Roztoczu charakteryzują się dużą plastycznością, a przeprowadzone badania wskazują na opóźnione (ze względu na długowieczność drzew) przekształcenia składu gatunkowego drzewostanów w stosunku do momentu wystąpienia powodujących je zmian klimatu. Okres największych przemian strukturalnych może trwać tym krócej, im większa jest wyjściowa złożoność strukturalna drzewostanu, wyrażająca się jego zróżnicowaniem wiekowym, na co zwracali uwagę także inni autorzy (Dale et al. 2010).

Wyniki przeprowadzonych symulacji potwierdzają tezę, że zmiany w dostępności ciepła i wody mogą spowodować zróżnicowane reakcje gatunków drzew na Roztoczu. Oprócz osłabienia cyklicznych zmian pomiędzy bukiem a jodłą, widocznych w scenariuszu kontrolnym, w niektórych scenariuszach eksperymentalnych ma miejsce obniżenie ogólnego zapasu drzewostanów, co w konsekwencji mogłoby dodatko-

wo stymulować ich przekształcenia strukturalne. Podobne prognozowane zmniejszenie biomasy drzewostanów bukowych zaobserwowano w Niemczech (Rötzer et al. 2013). Model FORKOME prognozuje większy udział jodły w polskiej części Roztocza w porównaniu z częścią ukraińską, gdzie jodła ma aktualnie mniejszy udział w biomacie na skutek działalności gospodarczej prowadzonej w przeszłości (Stojko 2000). Model sugeruje także mniejszy udział tego gatunku na powierzchni 2. w pierwszej połowie okresu symulacji.

Należy podkreślić, że również w przyszłości buk pozostanie ważnym gatunkiem lasotwórczym na północno-wschodniej granicy swego występowania. Prognozowane skutki zmian klimatu na Roztoczu ocenia się jako pozytywne dla buka. Podobne wyniki uzyskano dla Europy Północnej i Zachodniej (Lindner et al. 2010).

Płatowy model FORKOME pozwala na uwzględnienie stanu obecnego, wykonanie prognozy dynamiki drzewostanów bukowych na Roztoczu w części polskiej i ukraińskiej, jak również przeprowadzenie analizy interakcji różnych czynników środowiskowych oraz procesów demograficz-

nych w drzewostanach. Konstrukcja modelu sprawia, że jego wyniki można łatwo porównać z wynikami innych modeli prognostycznych, jak na przykład modelu FORLAS (Zajączkowski et al. 2013). Zgodne to jest z sugestiami pojawiającymi się w literaturze, aby wnioski odnośnie przyszłego składu gatunkowego konstruować na podstawie porównań kilku modeli, a w perspektywie skupić się na ocenie odporności obecnych drzewostanów na zmiany zachodzące w środowisku (Bugmann 1997). Stosowane w modelu FORKOME oraz w modelu FORLAS mnożniki wzrostu (Kozak et al. 2012; Zajączkowski et al. 2013) okazały się dobrym i prostym narzędziem do przeprowadzenia bezpośredniej oceny wpływu zmian wybranych czynników środowiska na przyrost i stosunki konkurencyjne gatunków, zwłaszcza buka i jodły, jako dominujących w badanych drzewostanach Roztocza.

W modelu FORKOME, aby w pełni ukazać wieloletnią dynamikę drzewostanu bukowego, długość okresu prognozy została zwiększona do 500 lat. Tak długi czas symulacji został dobrany po uprzednim przeanalizowaniu przeżywalności głównych analizowanych gatunków drzew (buka i jodły). Podobny okres prognozy był także zastosowany w badaniach przeprowadzonych w drzewostanach bukowych oraz jodłowo-bukowych w Bieszczadach (Kozak et al. 2003) oraz w pracy Brzezieckiego (1999), której wyniki dla 500-letniego okresu prognozy sugerują cykliczne zastępstwo buka i jodły, mające względnie trwałe charakter. Wyniki te znajdują potwierdzenie w wielu badaniach terenowych, dobrze udokumentowanych w literaturze dotyczącej sąsiednich regionów, takich jak Świętokrzyski Park Narodowy (Jaworski, Podlaski 2006) oraz Bieszczady (Kozak et al. 2003). Tendencja wypierania jodły przez buka oraz duża jego ekspansja jest widoczna w całej Europie. Zjawisko to ma miejsce między innymi w Karpatach Wschodnich (w niższych partiach).

Wykorzystując model FORKOME, udało się zobrazować wieloletni cykl przemian drzewostanów bukowych dla różnych wariantów zmian klimatycznych. Prowadzenie badań i obserwacji lasu oraz tworzenie prognoz przebiegu jego przebudowy ma duże znaczenie dla gospodarki leśnej, ze szczególnym uwzględnieniem prac urzędniowych. Dzięki takim badaniom możliwa jest kontrola sukcesji poprzez odwołanie się do podobnych zmian oraz przewidywanie ich kierunków. Długoletnia prognoza pozwala obrać właściwe strategie reagowania, zarządzania i ochrony lasu.

5. Podsumowanie

Zgodnie z rezultatem symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu FORKOME buk w scenariuszu kontrolnym pozostaje podstawowym gatunkiem drzewostanów w polskiej i ukraińskiej części Roztocza na północno-wschodniej granicy swojego zasięgu. W scenariuszu zakładającym brak zmian klimatycznych charakterystyczną cechą rozwoju drzewostanów jest zjawisko polegające na cyklicznym zastępstwie buka przez jodłę i odwrotnie. Z innych prognoz wynika, że we wszystkich analizowanych scenariuszach możliwych zmian klimatycznych ma miejsce osłabienie cyklicznych zmian pomiędzy

bukiem i jodłą. W scenariuszu zakładającym klimat cieplejszy i wilgotniejszy (CW) w stosunku do obecnego, w prognozowanym okresie buk cały czas utrzymuje dominującą pozycję pod względem udziału w biomase drzewostanu. W scenariuszu zakładającym klimat cieplejszy i suchszy (CS) wielkość biomasy całkowitej buka jest prawie o połowę mniejsza w porównaniu z poprzednim scenariuszem. W scenariuszach zakładających ochłodzenie klimatu w drugiej połowie okresu prognozy rolę gatunku dominującego przejmują od buka jodła. Stwierdzono silną ujemną (do -0,98) korelację krzyżową pomiędzy jodłą a bukciem.

Model FORKOME, dzięki odpowiednim rozwiązaniom (scenariusze zmian klimatycznych, blok analizy korelacji), jest przydatnym narzędziem do przeprowadzania prognostycznych badań leśnych (do 200 symulacji na okres 500 lat), umożliwiającym weryfikację wielu hipotez dalszego rozwoju różnych typów lasu. Wyniki uzyskane z badań prognostycznych wykonanych za pomocą modelu FORKOME potwierdziły w szczególności jego przydatność w symulacji dynamiki drzewostanów bukowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Autorzy składają podziękowania pracownikom Roztoczańskiego Parku Narodowego w Polsce oraz pracownikom z „Rehionalnyj Landszaftnyj Park Ravs'ke Roztochia” na Ukrainie za okazaną pomoc w udostępnieniu materiałów opisowych. Badania wykonano w ramach grantu NCN N N309 014638.

Literatura

- Botkin D.B. 1993. *Forest Dynamics: An Ecological Model*. Oxford University Press, Oxford, 309 p. ISBN 0-19-506555-7.
- Botkin D.B., Janak J.F., Wallis J.R. 1972. Some Ecological Consequences of a computer Model of Forest Growth. *Journal of Ecology* 60(3): 849–872. DOI 10.3161/15052249PJE2015.63.2.004.
- Brzeziecki B. 1991. Ecological growth Model of the Forest: some methodical and calibration problems. *Sylvan* 9: 5–15.
- Brzeziecki B. 1999. Ekologiczny model drzewostanu. Konstrukcja. Parametryzacja. Przykłady zastosowań. Wyd. SGGW, Warszawa. ISBN 83-87660-65-5.
- Bugmann H. 1997. Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic changes. *Climate Research* 8: 35–44.
- Bugmann H. 2001. A review of forest gap models. *Climatic Change* 51: 259–305.
- Frazer G.W., Canham C.D., Lertzman K.P. 2000. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Image processing software to analyze true-colour, hemispherical canopy photographs. *Bulletin Ecological Society of America* 81: 191–197.
- Cherniavskiy M.W., Savka H.S. 2004. Funkcionalne zonuвання Rehionalnoho Landszaftnoho Parku "Ravs'ke Roztochia". *Naukovyj Visnyk Ukr DLTU* 14(8): 241–252.

- Dale V.H., Tharp M.L., Lamm K.O., Hodges D. 2010. Modeling transient response of forests to climate change. *Science of the Total Environment* 408: 1888–1901. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.10.008.
- IPCC 2007. WGI fourth assessment report to climate change: the physical science basis; summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva. ISBN 978-0-521-88009-1 hardback; ISBN 978-0-521-70596-7 paperback.
- Jaworski A., Podlaski R. 2006. Budowa, struktura i dynamika drzewostanów naturalnych w rezerwacie Święty Krzyż (Świętokrzyski Park Narodowy). *Acta Agraria et Silvicultura ser. Silvestris* 44: 9–38.
- Kahn M. 1994. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forstliche Forschungsberichte München* 141: 1–204.
- Kozak I., Brzeziecki B. 2007. Analiza wybranych modeli obliczenia i prognozowania zasobów węgla w lasach (2): model FORBIG. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa, 145–158. ISBN 978-83-89744-66-1
- Kozak I., Ferchmin M., Menshutkin V., Potaczała G., Kozak O., Seńko Z., Baraniuk-Otręba A. 2005. Prognozowanie zmian lasu grądowego w Kampinoskim Parku Narodowym z wykorzystaniem modelu Forkome. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 371, *Leśnictwo* 43: 35–48.
- Kozak I., Menshutkin V. 2002. Prediction of Spruce Forests Dynamics in the Polish Bieszczady and Ukrainian Bieskidy using the Computer Modelling. *Baltic Forestry* 8(1): 28–34.
- Kozak I., Menshutkin V. 2001. Prediction of beech forest succession in Bieszczady Mountains using a computer model. *Journal of Forest Science* 47(8): 333–339.
- Kozak I., Menshutkin V., Józwińska M., Potaczała G. 2003. Modelling of beech forest dynamics in the Bieszczady Mountains in response to climate change. *Ekologia-Bratislava* 22(2): 152–161. DOI 10.2478/eko-2013-0009.
- Kozak I., Mikusiński G., Stępień A., Kozak H., Frąk R. 2012. Modelling forest dynamics in a nature reserve: a case study from south-central Sweden. *Journal of Forest Science* 58(10): 436–445.
- Kozak I., Perzanowski K., Kucharzyk S., Przybylska K., Zięba S., Frąk R., Bujoczek L. 2014. Perspectives for the application of computer models to forest dynamic forecasting in Bieszczadzki National Park (Poland). *Ekologia-Bratislava* 33(1): 16–25. DOI 10.2478/eko-2013-0009.
- Kienast F. 1987. FORECE - A forest succession model for southern central Europe. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (USA), 69 p.
- Krauchi N. 1995. Application of the model FORSUM to the Solling spruce site. *Ecological Modelling* 83: 219–228.
- Leemans R., Prentice I.C. 1989. FORSKA, a general forests succession model. Uppsala: Institute of Ecological Botany, 70 p. ISBN 0348-1417.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., García-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M. J., Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259(4): 698–709. DOI 10.1016/j.foreco.2015.06.006.
- Maciejewski Z. 2011. Spontaneous regeneration of a Carpathian beech forest in planted pine stands on the Roztocze Highlands (Roztocze National Park, south-east Poland). *Polish Journal of Ecology* 59(2): 285–297. DOI 10.3161/15052249PLE2015.63.3.013.
- Maciejewski Z., Szwagrzyk J. 2011. Long-term changes in stand composition of natural forest stands on the Roztocze Highlands. *Polish Journal of Ecology* 59(3): 535–549. DOI 10.3161/15052249PLE2015.63.3.013.
- Mátyás Cs., Berki I., Czúc B., Gálos B., Mórnicz N., Rasztovits E. 2010. Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 6: 91–100.
- Milada M., Schaich H., Burgi M., Konold W. 2011. Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecology and Management* 261: 829–843. DOI 10.1016/j.foreco.2015.06.006.
- Pawłowski W.J. 1996. Computer simulation of growth of a spruce stands using the PICEAT model. *Ekologia Polska* 44(3-4): 333–349.
- Rötzer T., Liao Y., Goergen K., Schüler G., Pretzsch H. 2013. Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Climate Research* 58: 81–95.
- Shugart H.H., West D.C. 1977. Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journal of Environmental Management* 5: 161–179.
- Stojko S. 2000. Ekologiczne podstawy utworzenia polsko-ukraińskich rezerwatów biosfery na Roztoczu i Polesiu, w: *Ekologia i transformacje cywilizacyjne na przełomie wieków*. KUL, Lublin, 309–317. ISBN 83-903246-7-9.
- Szwagrzyk J. 1994. Simulation models of forest dynamics based upon the concept of tree stand regeneration in gaps. *Wiadomości ekologiczne* 40(2): 57–95.
- Tittenbrun A. 2013. Skład gatunkowy i struktura lasów Roztoczańskiego Parku Narodowego. Wyd. RPN, Zwierzyniec. ISBN 978-83-935430-0-7.
- Zajączkowski J., Brzeziecki B., Perzanowski K., Kozak I. 2013. Wpływ potencjalnych zmian klimatycznych na zdolność konkurencyjną głównych gatunków drzew w Polsce. *Sylvan* 157(4): 253–261.

Wkład autorów

I.K. – koncepcja artykułu, przegląd literatury, analiza danych, symulacje w modelu FORKOME; B.T. – praca terenowa, przygotowanie maszynopisu; T.P. – analiza danych i praca terenowa; H.K. – praca terenowa i korekta tekstu.

A prognosis for the impact of climate change on beech stand dynamics in the Polish and Ukrainian Roztoche region

Ihor Kozak^{1*}, Barbara Typiak¹, Taras Parpan², Hanna Kozak¹

¹The John Paul II Catholic University of Lublin, Department of Landscape Ecology, ul. Konstantynów 1H, 20-708 Lublin, Poland.;²Ukrainian Research Institute for Mountain Forestry, Hrushevskoho 31, 76000, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

*Tel. +48 81 4454531, e-mail: modeliho@kul.lublin.pl

Abstract. This study has been carried out in the Polish Roztoczański National Park and the Ukrainian Ravs'ke Roztochia Regional Landscape Park, both of which are part of the Roztoche region. In each of these two locations, representative study plots were established in beech (*Fagus sylvatica* L.) stands occupying sites with similar environmental conditions. A longterm prognosis for the dynamics of the chosen beech stands were generated using the computer model FORKOME. The model was used to forecast stand developments for four climatic scenarios (warm-humid, warm-dry, cold-humid, cold-dry) covering a time span of 500 years. Our simulation results indicate that in the control scenario, beech stands were dominating and cyclical changes between beech and Silver fir (*Abies alba* Mill.) may occur. In the scenarios with assumed climate warming, a decline of fir biomass and an increase of beech biomass, as compared to the control conditions, was noticed. In the scenario with assumed climate cooling, fir biomass increased for the duration of the investigated time span. To conclude, the application of the FORKOME model was found to be a useful tool for analyzing potential scenarios of long-term dynamics of beech stands in the Roztoche region in Poland and Ukraine.

Keywords: climate change, FORKOME model, tree competition, simulation, Roztoche

1. Introduction

Climate is changing. Over the past 100 years, the average global temperature has increased by approximately 0.7°C (IPCC 2007). During the same period, the average temperature in Europe increased even more – by 0.95°C. According to the forecasts formulated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), a further, significant increase in the average annual temperature in Europe is expected by the end of the 21st century. It is estimated that over the next 100 years, temperatures in Europe will increase from 2.0°C to 6.3°C (IPCC 2007). The sum of precipitation and the frequency of extreme weather events are also expected to increase (Lindner et al. 2010).

Diverse responses of different tree species to environmental changes are the main determinants of the structural transformations of stands and entire natural systems (Milada et al. 2011), and therefore, climate change should be taken into account in the current and future forest management strategies.

The above postulate especially concerns the areas situated close to the natural limits of tree species ranges. The Roztoche (Roztocze) region is one of such areas. There occurs the natural boundary of common beech (*Fagus sylvatica* L.), one of the main forest forming species in Poland (Maciejewski 2011). Predicting the dynamics of beech stands within the north-eastern limit of beech occurrence in consideration of climate changes, is of much importance – both from scientific and practical standpoints. High dynamics of beech stands has been indicated in many studies carried out in the Polish (Maciejewski 2011, Maciejewski, Szwagrzyk 2011) as well as the Ukrainian (Stojko 2000, Cherniavskiy, Savka 2004) parts of the Roztoche region. The observed transformations in the construction of beech forests can be, among others, due to the current climate change, as beech forest communities in Europe are susceptible to climate variations (Dale et al. 2010).

The forecasting of multi-annual dynamics of forest stands requires the use of special tools, that is, properly designed

Submitted: 5.12.2016, reviewed: 14.01.2017, accepted after revision: 30.01.2017

computer models. One of them is the model of forest growth JABOWA (Botkin et al. 1972), from which originates a large group of the so-called gap models of forest stand dynamics, and among others – FORET (Shugart, West 1977) designed to forecast the forest dynamics in the southern United States. Based on JABOWA, a number of models have been used to simulate and forecast forest dynamics in Europe: FORSKA (Leemans, Prentice 1989), FORCLIM (Bugmann 1997, 2001), FORECE (Kienast 1987) and FORSUM (Kraeuchi 1995). The models of this type were also constructed in Poland: FORKOME (Kozak et al. 2003, 2005, 2012, 2014), FORBIG (Kozak, Brzeziecki 2007) and FORLAS (Zajączkowski et al. 2013)

The assumptions concerning the use of gap models in the Polish forests were initially presented by Brzeziecki (1991, 1999). A contribution to this field was also made by Szwarzgryk (1994), as well as the model PICEAT that simulates the growth of spruce monocultures in the Sudety Mts. (Pawłowski 1996). The gap models give a great opportunity to meet the needs and challenges associated with the rising popularity of cultivating semi-natural forests and a tendency to replace monoculture forestry with ecosystem forestry (Brzeziecki 1999). The model FORKOME has already been used to simulate tree dynamics in the Kampinoski National Park (Kozak et al. 2005), the Bieszczady National Park (Kozak, Menshutkin 2001, Kozak et al., 2003, 2014), the Helgedomen Reserve in Sweden (Kozak et al. 2012) as well as in Ukraine (Kozak, Menshutkin 2002).

The main aim of the present study was to perform the forecasts of changes in beech stands in the Polish and Ukrainian parts of the Roztoche (Roztocze) region, with the use of the model FORKOME, assuming different scenarios of climate change (unchanged – control conditions, warm-dry, warm-humid, cold-dry and cold-humid). The scope of the research also included checking competition relations between beech and fir (cross-correlation analysis) and investigating the effects of changes in the sum of effective temperatures and precipitation on these relations.

2. Materials and Methods

Field trials were conducted in the years 2013–2015, in the Roztochanski National Park (Roztoczański Park Narodowy) (N: 50°35'29, E: 22°57'35) in Poland and the Ravens'ke Roztochia Regional Landscape Park (Rehionalnyj Landshafnyj Park Ravens'ke Roztochia) in Ukraine (N: 50°13'23, E: 23°31'27). In each park, 3 study areas with similar habitat conditions were established. From these, in each park, 1 representative study plot was chosen. Common beech dominated in the stands of all the study areas, and a greater share of Silver fir (*Abies alba* Mill.) was observed in Poland's part. The studied stands grew on brown soils (Tittenbrun 2013), on which there have developed humid and nutrients rich forest sites. In the study plot no. 1 – Beech 1, average DBH of beech was 41.2 cm and in the plot no. 2 – Beech 2 – 34.3 cm (Table 1). The study areas established were representative for the Roztoche region (Roztocze).

All the study areas had western exposure and 10°–11° slope. Each of them had a square shape with a side of 25 m (625 m²). Such size is often used in gap models (Bugmann 2001). After conducting 200 test simulations for each study plot, it was found that the area observed corresponded to the district with the area of $200 \times 0.0625 = 12.5$ ha. Statistical analysis of the data obtained (the Shapiro-Wilk test performed with the use of STATISTICA) showed that DBH of the examined trees had normal distribution with marked right-sided asymmetry.

The trees observed on the study plots were numbered and their DBH, height, crown radius, age, as well as X and Y co-ordinates were recorded. Hemispherical photographs (9/plot) were taken as required for verifying the leaf area index (LAI) calculations performed by FORKOME. A digital SLR camera – Canon EOS 5D with Sigma 8mm f/3.5 DG EX FISH EYE with 180° viewing angle— was used. Gap Light Analyzer software (Frazer et al. 2000) was used for hemispherical analyses. All data collected on the study plots were entered into the model FORKOME (Kozak et al. 2012) and

Table 1. Basic characteristics of the trees that are present on research plots

Plot	Species	D (cm)			H (m)			Age (years)			N
		mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	
1	<i>Abies alba</i>	15.8	5.0	24.0	14.6	5.0	21.0	35	10	70	11.0
1	<i>Fagus sylvatica</i>	41.2	11.0	98.0	21.4	8.0	39.0	78	22	185	29.0
2	<i>Abies alba</i>	5.1	4.0	8.0	3.2	2.0	5.0	11	8	17	5.0
2	<i>Fagus sylvatica</i>	34.3	8.0	79.0	18.4	6.0	37.0	65	21	156	24.0

D – d.b.h., H – height, N – number of trees

simulations of stand development over a period of 500 years were carried out (such a long simulation period was needed for stabilizing beech and fir relationships in the stands in the Polish and the Ukrainian parts of the Roztoche region).

The model FORKOME belongs to the group of gap models that simulate the long-term dynamics (succession) of forest complexes, taking directly into account the influence of the most important environmental factors, such as: temperature, precipitation, light, soil nutrient content, on the main processes taking place in the stands: regeneration, growth and decline of individual trees.

The design and structure of FORKOME were described in detail in earlier publications (Kozak, Menshutkin 2001; Kozak et al. 2003, 2012, 2014). This model is largely similar to the model FORET (Shugart, West 1977) and – in the case of some solutions including calculations of light quantities – to the model JABOWA 3 (Botkin 1993). FORKOME also contains a number of original solutions and elements, such as, among others: the method of simulation of fluctuations in thermal conditions, elements of the water balance within a given site and an extent of tree transpiration.

From the programming point of view, the concept of the so-called object is of major importance in model construction. The crucial objects in FORKOME are: ‘Area’— representing the surveyed stand and ‘Tree’— representing an individual tree. Simulation of growth and development of individual trees is based on environmental conditions (climate, soil, light) that prevail in a given stand (defined in the object ‘Area’). Each tree species has specific, quantified habitat requirements. If the site conditions meet the minimum species requirements, then the species is allowed to develop. The final status of the simulation in one year constitutes the input status for the simulation in the following year.

The model FORKOME is divided into modules (blocks) (Fig. 1). The block ‘Parameters’ contains parameters describing each tree species and the entire forest community. These parameters include: the maximum tree diameter at the standard height of 130 cm from the ground (D_{max}), the maximum height (H_{max}), the maximum age (AGE_{max}) and the minimum and maximum sums of air temperature (DGD_{min} , DGD_{max}). Other parameters related to different development scenarios were added to the model. Because

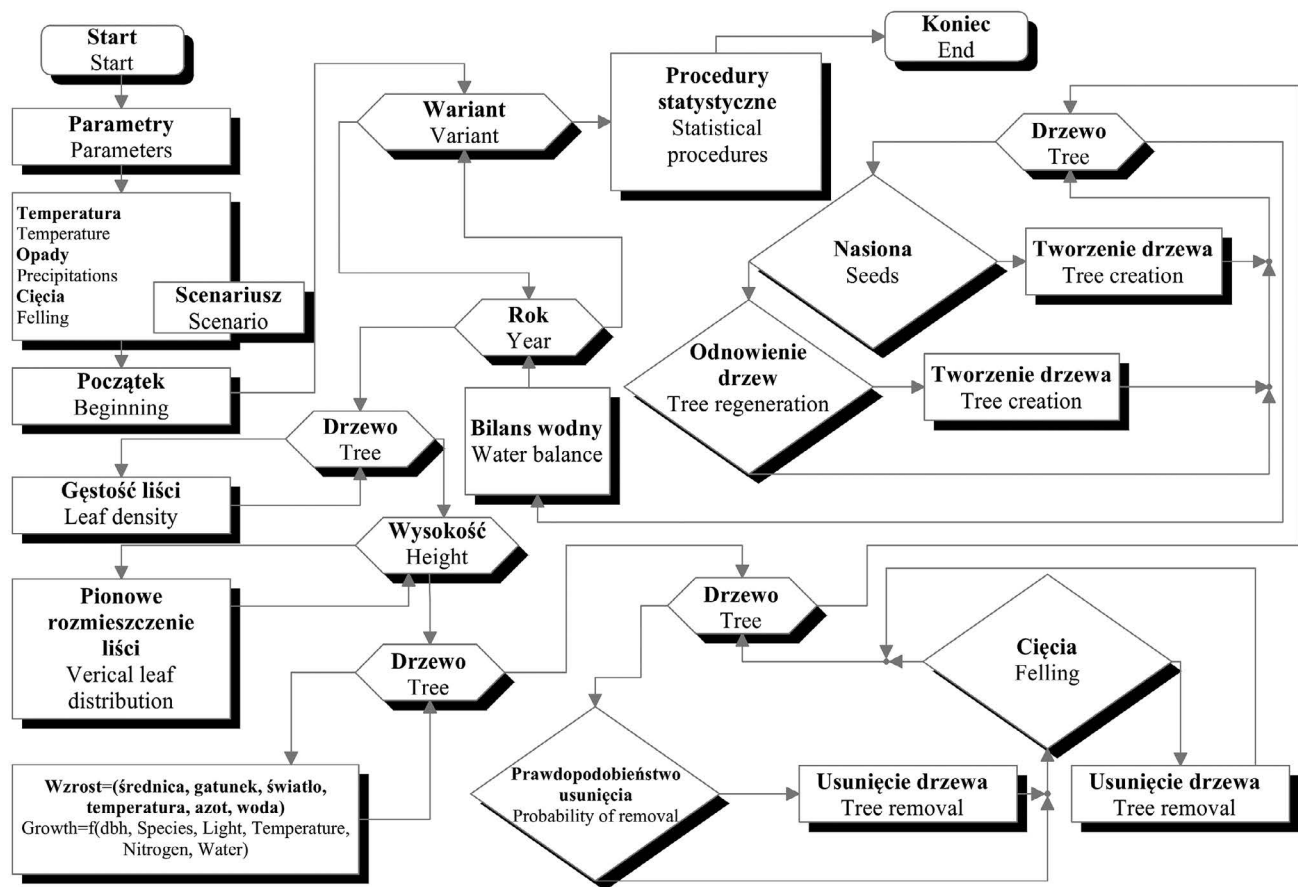


Figure 1. The block diagram of FORKOME model

se the model is stochastic, its dynamics need to include several variants (the ‘Variant’ block). These are controlled by the ‘Year’ block. The model time step is one year. The block diagram shown in figure 1 was expanded with additional blocks and options, including cutting trees, changing air temperatures, and increasing and decreasing precipitation (‘Scenario’ block). The model uses the Monte-Carlo statistical method to simulate 200 variants of forest development in each scenario. After carrying out the Monte Carlo analysis, the program allows to present and print the results on the average tree number and biomass along with standard deviations for each simulation year. In the ‘Statistical Procedures’ block, the option to calculate autocorrelation and cross-correlation functions was added.

One of the most important modules of the model is the ‘Growth’ block. This block calculates the annual increment of each tree occurring in the simulated area (stand patch with defined environmental conditions). The basic calculated factor is DBH increment. The annual tree increment can be from 0 to the value of possible increment in the ideal environmental conditions (optimal in terms of a given tree species requirements) and is calculated according to the formula:

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

where:

r – constant for species, delineating the photosynthetic productivity of the assimilation apparatus ($\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \text{ year})$),

La – leaf area of a given tree (m^2),

D – tree DBH (cm),

H – tree height (cm),

D_{\max} – maximum DBH of a given tree species (cm),

H_{\max} – maximum height of a given tree species (cm),

$\delta(D^2H)$ – increase in tree volume (cm^3).

Based on DBH, using a variety of allometric relationships, a number of other parameters of the simulated tree are calculated, for example – tree height. The influence of external conditions is also taken into account in the annual growth of trees. In the model FORKOME, the actual increment of a real tree $_{real}$ is calculated as the product of the optimal tree increment $_{opt}$ and tree growth limiting factors (f_1, f_2, f_3, \dots), each of which has a value in the range [0,1]:

$$\delta(D^2H)_{real} = \delta(D^2H)_{opt} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_j$$

where:

$\delta(D^2H)_{real}$ – current tree volume increase, after taking into account the effects of external factors (ecological),

$\delta(D^2H)_{opt}$ – tree growth under optimal conditions,

f_1, f_2, f_3, \dots – coefficients determining the influence of the current system of external factors (ecological) expressed on a scale from 0 to 1.

On a regular basis, light availability is the main external factor limiting tree growth. In the model FORKOME, when calculating the amount of light that reaches a particular tree, the loss of solar radiation due to overall shading is taken into account, which is caused by the leaf area of higher trees within the simulated stand area. The mean light intensities are determined at different distances from the ground, comparable to individual tree heights. In terms of light requirements, the tree species observed were divided into three main types: photophilous, intermediate and shade tolerant.

The thermal conditions in the model are determined by the annual sum of effective temperatures (the sum of daily temperatures calculated for the period in which the average temperature exceeds 5 °C). The coefficient expressing the temperature effect on tree growth is calculated from the formula (Botkin 1993):

$$T = \frac{4(DGD - DGD_{\min})(DGD_{\max} - DGD)}{(DGD_{\max} - DGD_{\min})^2}$$

where:

T – growth limiting indicator,

DGD – the sum of effective temperatures characteristic for a given site,

DGD_{\min} – minimum sum of effective temperatures necessary for species existence,

DGD_{\max} – maximum sum of effective temperatures necessary for species occurrence.

The model FORKOME included transpiration dependent not only on general meteorological parameters, as in other gap models, but also on tree species specificity. Furthermore, the effect of groundwater levels (changing) on the occurrence of trees of different species was taken into account, as along with the relationship between tree growth and soil water content, as it was originally built in this very model (Kozak et al. 2003). Another built-in factor limiting tree growth is the so-called site index. The index is determined on the basis of the ratio of current total DBH cross sectional area of the trees in the simulated stand to the maximum area achievable under the conditions of a given site (Botkin 1993).

Tree declining was simulated in the block ‘Death’. The death of a tree occurs in two cases: 1) when a certain minimum increment has not been achieved, and 2) inadvertently, that is, irrespective of tree growth. In the first case, the model is based on the assumption that if a tree does not reach the minimum increment for 10 consecutive years, the probability of its survival in this period of time is 1%. In the second case, the assumption is made that only a small proportion of healthy trees of a given species reaches the maximum age achievable. The model assumes that only 2% of healthy trees reach the maximum age, as shown by the inequality below (Botkin 1993):

$$RND < \frac{4,0}{AGE_{max}}$$

where:

RND – random number in the range $[0,1]$,

AGE_{max} – maximum age of trees of a given species.

In the block ‘Tree Regeneration’, the appearance of young trees is simulated as a stochastic process (Botkin 1993). For each species, the empirically determined maximum number of new trees are considered that can occur within 1 year in a stand of a given size. The maximum number of new trees of a given species is reduced to the extent reliant upon fortuitous events and the amount of light entering the forest floor. For each of the three types of light tolerance, different seedling values are generated.

Further options included in the model allow the user to set basic simulation parameters, as well as those of the analysed area and tree species (Fig. 2), and also – to select a scenario for possible climate change by defining the scope and nature of changes in the sum of effective temperatures DGD and precipitation.

In the analysis of climate processes in the model FORKOME, aggregation of climate factors approach was used (Kahn. 1994). The main environmental factors related to climate (annual temperature amplitude, mean temperature of the vegetation season, sum of precipitation in the vegetation season) were taken into account. Climate scenarios were developed to verify a hypothesis of beech survival on the surveyed areas in Roztoche, under the conditions of different climate change variants.

Additionally, the tool ‘Temperature change scenario’ was used to include in the model adding/subtracting temperature changes to the control temperature value (1425 ‘degree-days’ and 1435 ‘degree-days’ for the first and second study area, respectively): plus 200 ‘degree-days’ for the scenarios warm-dry and warm-humid, and minus 200 ‘degree-days’ for those cold-dry and cold-humid. The tool ‘Scenario of Precipitation Change’ was used to simulate 100 mm increase/decrease in the mean annual precipitation. Precipitation control value for the first study area Beech 1 was 718 mm (data from the meteorological station Zwierzyniec, Poland), and 713 mm for the second study area Beech 2 (data from the meteorological station Rawa Ruska, Ukraine). The presented scenarios assume that the forest is left alone, that is, forest management, including different types of cutting, is not taken into account.

3. Results

The results of the multi-year forecasts with regard to the development of tree stands occurring on the analysed study

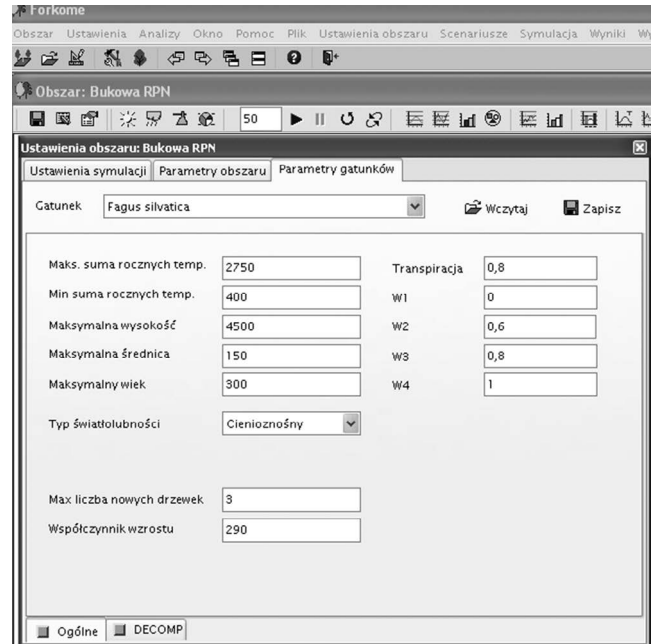


Figure 2. View of the interface on general parameters of trees in the FORKOME model

Area, Settings, Analysis, Window, Help, File, Area settings, Scenarios, Simulation, Results, Beech RPN (Roztochanski National Park), Simulation settings, Area parameters, Species parameters, Species, Load, Save, DGD-max, DGDmin, Maximum height, Maximum DBH, Maximum Age, Shade tolerance type, Maximum saplings amount, Growth coefficient, Transpiration, General, Decomposition

areas – Beech 1 and Beech 2, performed using the model FORKOME, are presented in figures 3–7.

In all the analysed scenarios, within the study area Beech 1, beech (260 t/ha, 76.5% of total stand biomass) was dominant in the first simulation year. Fir trees (23.5%) constituted the remaining part of the Beech 1 stand. The study area Beech 2 was also dominated by beech (201 t/ha, 98.4% of the total stand biomass), whereas the share of fir was negligible (1.6%). The graphical comparison of the Monte Carlo simulation results obtained for the control scenario (no climate change) suggests cyclic replacement of beech by fir and vice versa (Fig. 3). The greatest increase in the role of beech at the expense of fir is visible on Beech 2, during the 220 years – starting from the beginning of the simulation. After this period, beech biomass drops and that of fir grows. However, this does not take long because after the next 140 years, the beech share starts to increase again. In the last period of the simulation, there also appeared admixtures of common hornbeam, pedunculate oak and sycamore maple in the simulated stands (larger on Beech 2). The results of FORKOME forecasting show that in view of forest silviculture, forest succession is relatively slow in the

studied areas. Beech and fir by turn maintain their dominance in terms of biomass and the number of trees. The comparison of these species parameters, as developed by Kahn (1994), with data from the FORKOME simulation using conditions in the Roztoche region, show that beech and fir are not sensitive to changes in the average temperature of the growing season, as well as to the changes in the mean value of temperature amplitude; however, they are somewhat vulnerable to precipitation volume in the growing season. Beech growth rates may slightly decrease (average value of growth factor = 0.82) in the case of decreasing rainfall.

In the scenario 1 – warm-humid (WH), the model FORKOME predicts a possible weakening of cyclic changes between beech and fir. On Beech 1 (Fig. 4a), beech dominates

over fir during the whole simulation period. Similar, and even greater, beech dominance occurred on Beech 2 (Ukrainian part) (Fig. 4b).

In the scenario 2 (warm-dry, WD, Fig. 5), assuming a climate change towards warmer and drier conditions than those existing now, the model predicts a decline in cyclical changes beech and fir shares. Beech biomass significantly decreased on both study areas (from 300 t/ha in the first half of the forecast to 150 t/ha in the second). The admixture species that occurred were hornbeam (for most of the simulation period), maple sycamore and pedunculate oak. The latter increased its share to 120 t/ha at the end of the forecast period (Fig. 5a).

In the scenario 3 (cold-humid, CH, Fig. 6), fir reached the largest biomass share in 270 simulation years on Beech 1,

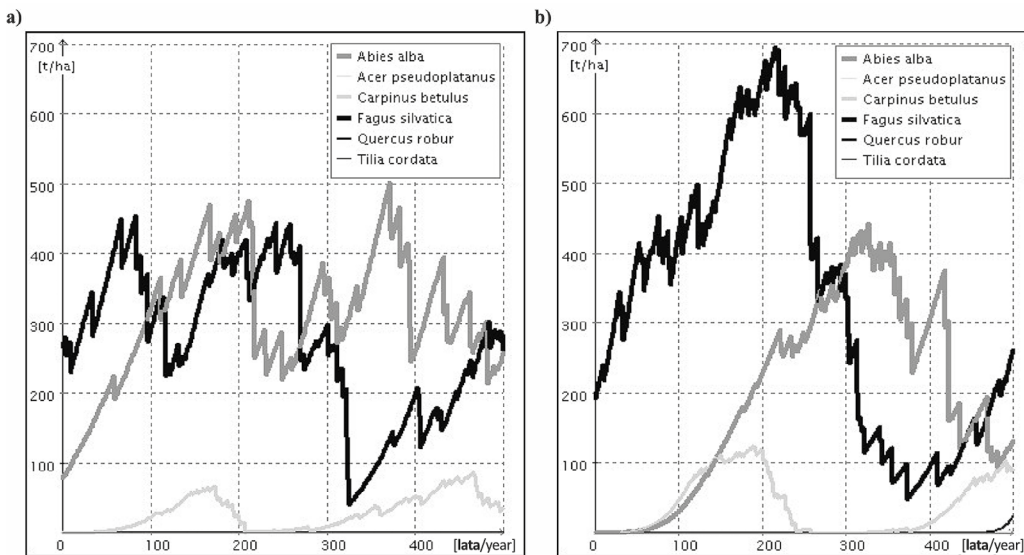


Figure 3. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the control scenario on plots: a) 1, b) 2

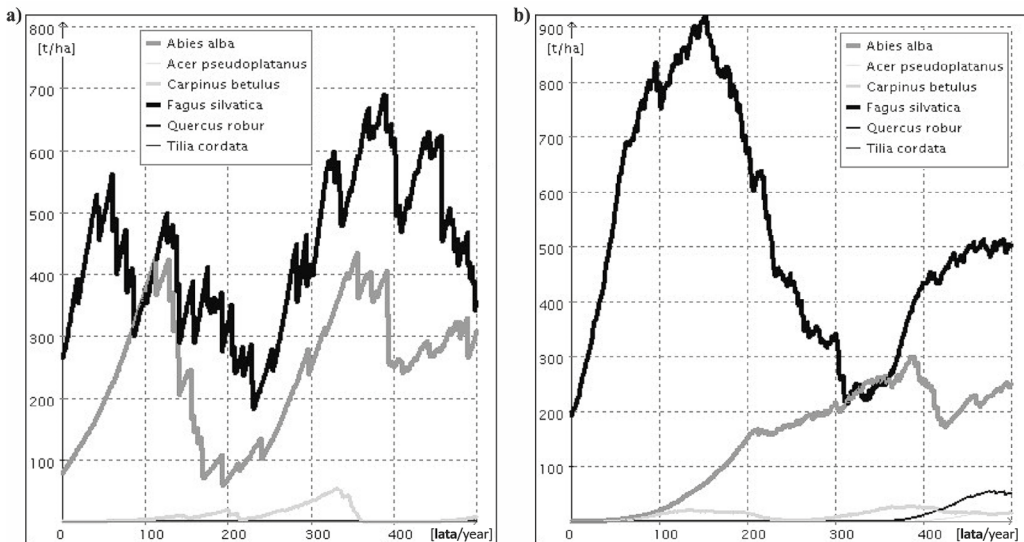


Figure 4. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the warm-humid scenario on plots: a) 1, b) 2

and on Beech 2 – in the 360th simulation year. This indicates the cold-humid scenario conditions as most favourable for fir, and at the same time – significantly weakening the competitive ability of beech.

In the scenario 4, that is, cold-dry climate (CD) as compared to the present climate (Fig. 7), in the second half of the simulation period, beech biomass oscillated around the lowest value (100 t/ha and 30 t/ha on Beech 1 and Beech 2, respectively). As in the previous forecast, the beech status of is weakened when compared to that of fir.

As a general rule, the simulation of beech dynamics in the Roztoche region in various climate change scenarios showed a weak cross-correlation between fir and beech. The high absolute values of the cross-correlation coefficient (up

to -0.98) were obtained only in the warm-dry climate scenario (Fig. 8a). This scenario also showed strong positive influence of temperature (Fig. 8b) on beech biomass (cross-correlation between air temperature and beech biomass – greater than 0.80).

4. Discussion

The results obtained on predicted dynamics of beech stands in the Polish and Ukrainian parts of the Roztoche region confirm vulnerability of beech to climate change, as reported earlier (Dale et al. 2010). The results of the simulations carried out using the model FORKOME suggest that the eastern limit of natural beech range is the most sensitive

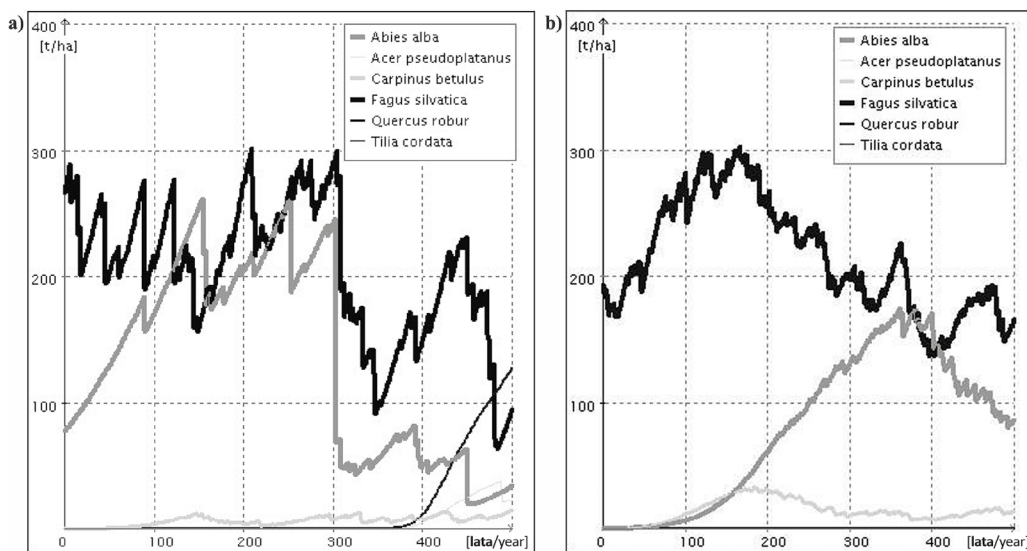


Figure 5. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the warm-dry scenario on plots: a) 1, b) 2

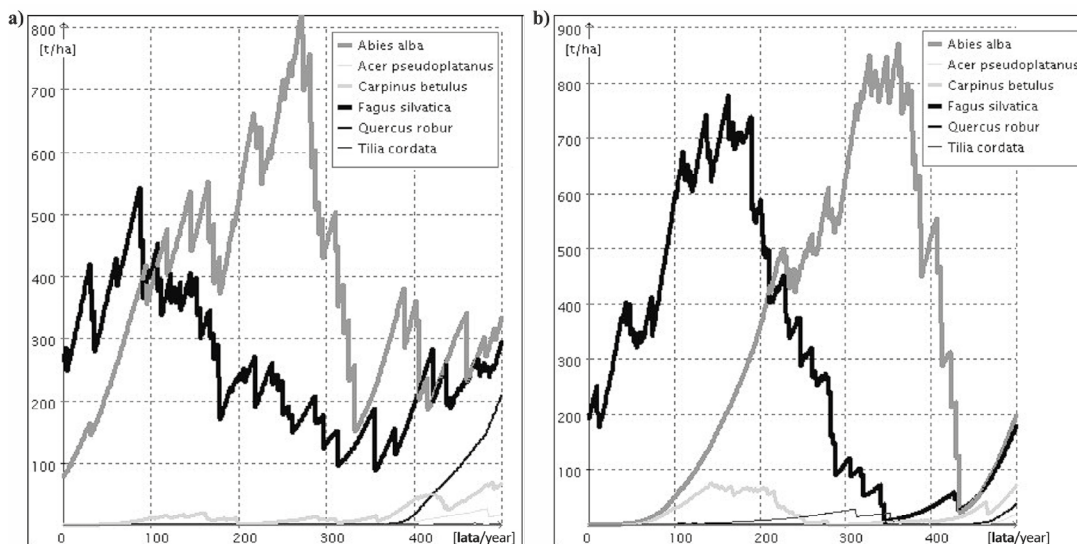


Figure 6. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the cold-humid scenario on plots: a) 1, b) 2

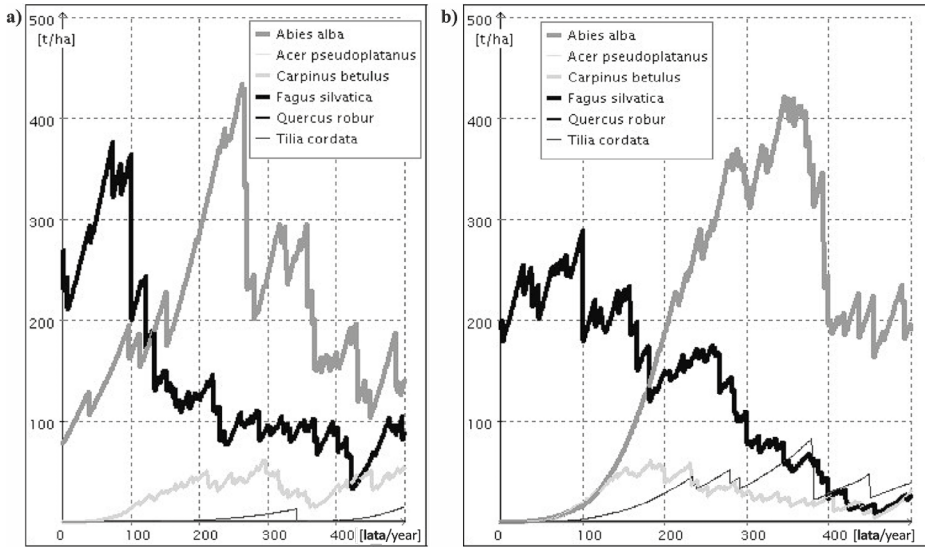


Figure 7. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the cold-dry scenario on plots: a) 1, b) 2

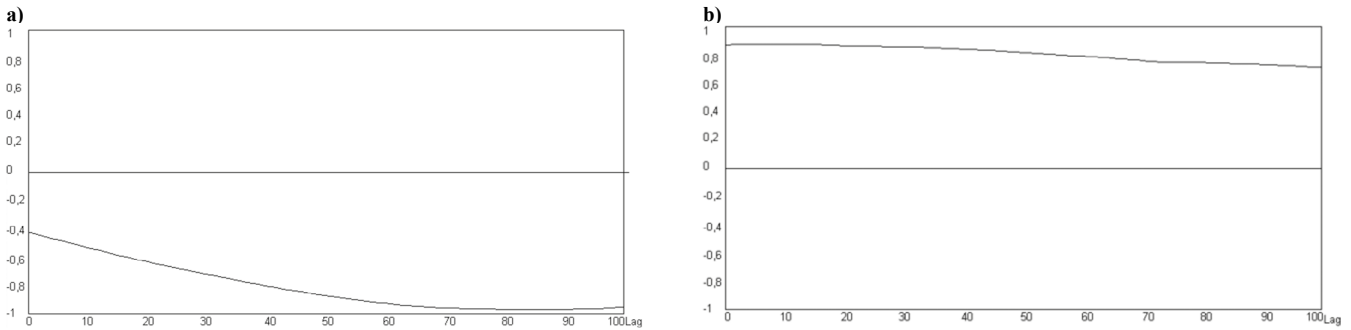


Figure 8. Value of cross correlation parameter on the plot 2 in the warm-dry scenario: a) between beech and fir biomass, b) between temperature and beech biomass

to the decrease in the sum of precipitation. The high sensitivity of beech to fluctuations in rainfall was also observed by other authors (Mátyás et al. 2010).

Beech forests occurring in the Roztoche region are characterized by high flexibility, and the study results show that the transformation of stand species composition is delayed (due to the longevity of trees) as compared to the time of occurrence of climate change resulting in stand alterations. The period of the greatest structural changes can last the shorter, the greater is the initial structural complexity of the stand – expressed by its age diversity, and this was pointed out also by other authors (Dale et al. 2010).

The results of the simulations confirmed that changes in the availability of warmth and water could cause varied reactions of tree species in the Roztoche region. In addition to the weakening of cyclical changes between beech and fir – as demonstrated in the control scenario – in some of the experimental scenarios, the overall tree stock is reduced,

which can further encourage stand structural transformations. The comparable predicted reduction of beech biomass was observed in Germany (Rötzer et al. 2013). FORKOME predicts a higher share of fir in the Polish part of Roztoche when compared to the Ukrainian part, where fir has a lower share of biomass due to past economic activities (Stojko 2000). The model also suggests a smaller proportion of fir on Beech 2 in the first half of the simulation period.

It should be emphasized that in the future also, beech will remain an important forest species on the north-eastern limit of its range. In the present study, the predicted effects of climate change in the Roztoche region were judged as positive for beech. Similar results were obtained for Northern and Western Europe (Lindner et al. 2010).

The model FORKOME allows for considering the current situation, performing forecasts of beech dynamics in Polish and Ukrainian Roztoche, as well as analysing interactions of various environmental factors and demographic processes in

forest stands. The design of the model makes its results easy to compare with the results of other prognostic models, such as FORLAS (Zajączkowski et al. 2013). This is consistent with literature suggestions to conclude on the future species composition based on the comparison of several models, as well as to focus on the assessment of resistance of current stands to changes in the environment (Bugmann 1997). The growth indices used in FORKOME and FORLAS models (Kozak et al. 2012; Zajączkowski et al. 2013) have proven to be a good and simple tool for the direct assessment of the effect of selected environmental factors on growth and competitive relations of tree species, especially beech and fir as the dominant species in the studied stands in the Roztoche region.

In the model FORKOME, in order to fully show the many years of beech stand dynamics, the length of the forecast period was increased to 500 years. Such a long time of simulation was chosen after analysing endurance of the major analysed tree species (beech and fir). A similar forecast period was also applied in beech and fir-beech stand trials in the Bieszczady Mountains (Kozak et al. 2003) and works by Brzeziecki (1999), whose results for the 500-year forecast period suggest a cyclic replacement between beech and fir, with a fixed character. These results are supported by many field studies – well documented in literature on neighbouring regions such as the Świętokrzyski National Park (Jaworski, Podlaski 2006) and the Bieszczady Mts. (Kozak et al. 2003). The trend of replacing fir by beech as well as large expansion of the latter species have been observed throughout Europe. Among others, it was reported from the Eastern Carpathians (in the lower parts).

The use of FORKOME made it possible to visualize the multi-year cycle of beech stand transformation under the conditions of different variants of climate change. Conducting studies on forests, and forecasting the course of their transformation is of great importance for forestry, with particular regard to forest management planning. With this type of research, it is possible to control succession by referring to analogous changes and predicting their direction. Long-term forecasts allow for proper strategies on the subject of reacting, managing and protecting the forest.

6. Conclusion

In the simulations carried out using the model FORKOME, in the control scenario, beech remains the main species of forest stands in the Polish and Ukrainian parts of the Roztoche region – on its north-eastern limit of its range. In the scenario assuming no climate change, the characteristic feature of stand development is the cyclic replacement of beech by fir and vice versa. Other forecasts show that, in all the analysed scenarios of possible climate change, there occurs the abating of cyclical changes between beech and fir. In the scenario with

warmer and more humid climate conditions when compared to present climate, in the forecasted period, beech still holds the dominant position in terms of biomass share. In the scenario of warmer and drier climate, the total biomass of beech is almost half the volume observed in warmer and humid scenario. In the scenarios assuming climate cooling in the second half of the forecast period, fir takes over the role of the dominant species. There was found a strong negative cross-correlation (up to -0.98) between fir and beech.

On account of appropriate solutions (climate change scenarios, correlation analysis block), the model FORKOME, is a useful tool for conducting forest prognostics (up to 200 simulations over a 500-year period), enabling the verification of many hypotheses for the future development of various types of forest. In particular, the results obtained from FORKOME prognostic tests confirmed the model usefulness in simulating the dynamics of beech stands in the Polish and Ukrainian parts of the Roztoche region.

Conflict of interest

Authors declare no potential conflicts.

Acknowledgements and source of funding

The authors thank the employees of the Roztocze National Park in Poland and the employees of ‘Rehionalnyj Landsofnyj Park Ravs’ke Roztochia’ in Ukraine for their help in providing descriptive materials.

The study was conducted under the NCN N N309 014638 grant.

References

- Botkin D.B. 1993. Forest Dynamics: An Ecological Model. Oxford University Press, Oxford, 309 p. ISBN 0-19-506555-7.
- Botkin D.B., Janak J.F., Wallis J.R. 1972. Some Ecological Consequences of a computer Model of Forest Growth. *Journal of Ecology* 60(3): 849–872. DOI 10.3161/15052249PJE2015.63.2.004.
- Brzeziecki B. 1991. Ecological growth Model of the Forest: some methodical and calibration problems. *Sylvan* 9: 5–15.
- Brzeziecki B. 1999. Ekologiczny model drzewostanu. Konstrukcja. Parametryzacja. Przykłady zastosowań. Wyd. SGGW, Warszawa. ISBN 83-87660-65-5.
- Bugmann H. 1997. Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic changes. *Climate Research* 8: 35–44.
- Bugmann H. 2001. A review of forest gap models. *Climatic Change* 51: 259–305.
- Frazier G.W., Canham C.D., Lertzman K.P. 2000. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Image processing software to analyze true-colour, hemispherical canopy photographs. *Bulletin Ecological Society of America* 81: 191–197.

- Cherniavskiy M.W., Savka H.S. 2004. Funkcjonalne zonuвання Ruchionalnoho Landszaftnoho Parku "Ravs'ke Roztochia". *Naukovyj Visnyk Ukr DLTU* 14(8): 241–252.
- Dale V.H., Tharp M.L., Lannom K.O., Hodges D. 2010. Modeling transient response of forests to climate change. *Science of the Total Environment* 408: 1888–1901. DOI 10.1016/j.scitotenv.2013.10.008.
- IPCC 2007. WGI fourth assessment report to climate change: the physical science basis; summary for policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva. ISBN 978-0-521-88009-1 hardback; ISBN 978-0-521-70596-7 paperback.
- Jaworski A., Podlaski R. 2006. Budowa, struktura i dynamika drzewostanów naturalnych w rezerwacie Święty Krzyż (Świętokrzyski Park Narodowy). *Acta Agraria et Silvicultura ser. Silvestris* 44: 9–38.
- Kahn M. 1994. Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forsliche Forschungsberichte München* 141: 1–204.
- Kozak I., Brzeziecki B. 2007. Analiza wybranych modeli obliczania i prognozowania zasobów węgla w lasach (2): model FORBIG. Instytut Badawczy Leśnictwa, Warszawa, 145–158. ISBN 978-83-89744-66-1
- Kozak I., Ferchmin M., Menshutkin V., Potaczała G., Kozak O., Seńko Z., Baraniuk-Otręba A. 2005. Prognozowanie zmian lasu grądowego w Kampinoskim Parku Narodowym z wykorzystaniem modelu Forkome. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 371, *Leśnictwo* 43: 35–48.
- Kozak I., Menshutkin V. 2002. Prediction of Spruce Forests Dynamics in the Polish Bieszczady and Ukrainian Bieskidy using the Computer Modelling. *Baltic Forestry* 8(1): 28–34.
- Kozak I., Menshutkin V. 2001. Prediction of beech forest succession in Bieszczady Mountains using a computer model. *Journal of Forest Science* 47(8): 333–339.
- Kozak I., Menshutkin V., Józwińska M., Potaczała G. 2003. Modeling of beech forest dynamics in the Bieszczady Mountains in response to climate change. *Ekologia-Bratislava* 22(2): 152–161. DOI 10.2478/eko-2013-0009.
- Kozak I., Mikusiński G., Stępień A., Kozak H., Frąk R. 2012. Modelling forest dynamics in a nature reserve: a case study from south-central Sweden. *Journal of Forest Science* 58(10): 436–445.
- Kozak I., Perzanowski K., Kucharzyk S., Przybylska K., Zięba S., Frąk R., Bujoczek L. 2014. Perspectives for the application of computer models to forest dynamic forecasting in Bieszczadzki National Park (Poland). *Ekologia-Bratislava* 33(1): 16–25. DOI 10.2478/eko-2013-0009.
- Kienast F. 1987. FORECE - A forest succession model for southern central Europe. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (USA), 69 p.
- Krauchi N. 1995. Application of the model FORSUM to the Solling spruce site. *Ecological Modelling* 83: 219–228.
- Leemans R., Prentice I.C. 1989. FORSKA, a general forests succession model. Uppsala: Institute of Ecological Botany, 70 p. ISBN 0348-1417.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M. J., Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259(4): 698–709. DOI 10.1016/j.foreco.2015.06.006.
- Maciejewski Z. 2011. Spontaneous regeneration of a Carpathian beech forest in planted pine stands on the Roztocze Highlands (Roztocze National Park, south-east Poland). *Polish Journal of Ecology* 59(2): 285–297. DOI 10.3161/15052249PLE2015.63.3.013.
- Maciejewski Z., Szwagrzyk J. 2011. Long-term changes in stand composition of natural forest stands on the Roztocze Highlands. *Polish Journal of Ecology* 59(3): 535–549. DOI 10.3161/15052249PLE2015.63.3.013.
- Mátyás Cs., Berki I., Czúc B., Gálos B., Mórnicz N., Rasztovits E. 2010. Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 6: 91–100.
- Milada M., Schaich H., Burgi M., Konold W. 2011. Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecology and Management* 261: 829–843. DOI 10.1016/j.foreco.2015.06.006.
- Pawłowski W.J. 1996. Computer simulation of growth of a spruce stand using the PICEAT model. *Ekologia Polska* 44(3-4): 333–349.
- Rötzer T., Liao Y., Goergen K., Schüller G., Pretzsch H. 2013. Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Climate Research* 58: 81–95.
- Shugart H.H., West D.C. 1977. Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journal of Environmental Management* 5: 161–179.
- Stojko S. 2000. Ekologiczne podstawy utworzenia polsko-ukraińskich rezerwatów biosfery na Roztoczu i Polesiu, w: *Ekologia i transformacje cywilizacyjne na przełomie wieków*. KUL, Lublin, 309–317. ISBN 83-903246-7-9.
- Szwagrzyk J. 1994. Simulation models of forest dynamics based upon the concept of tree stand regeneration in gaps. *Wiadomości ekologiczne* 40(2): 57–95.
- Tittenbrun A. 2013. Skład gatunkowy i struktura lasów Roztoczańskiego Parku Narodowego. Wyd. RPN, Zwierzyniec. ISBN 978-83-935430-0-7.
- Zajączkowski J., Brzeziecki B., Perzanowski K., Kozak I. 2013. Wpływ potencjalnych zmian klimatycznych na zdolność konkurencyjną głównych gatunków drzew w Polsce. *Sylwan* 157(4): 253–261.

Authors' contribution

I.K. – article concept, literature review, data analysis, FORKOME simulations; B.T. – field work, preparation of the manuscript; T.P. – data analysis and field work; H.K. – field work and text revision.