

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 areał 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).

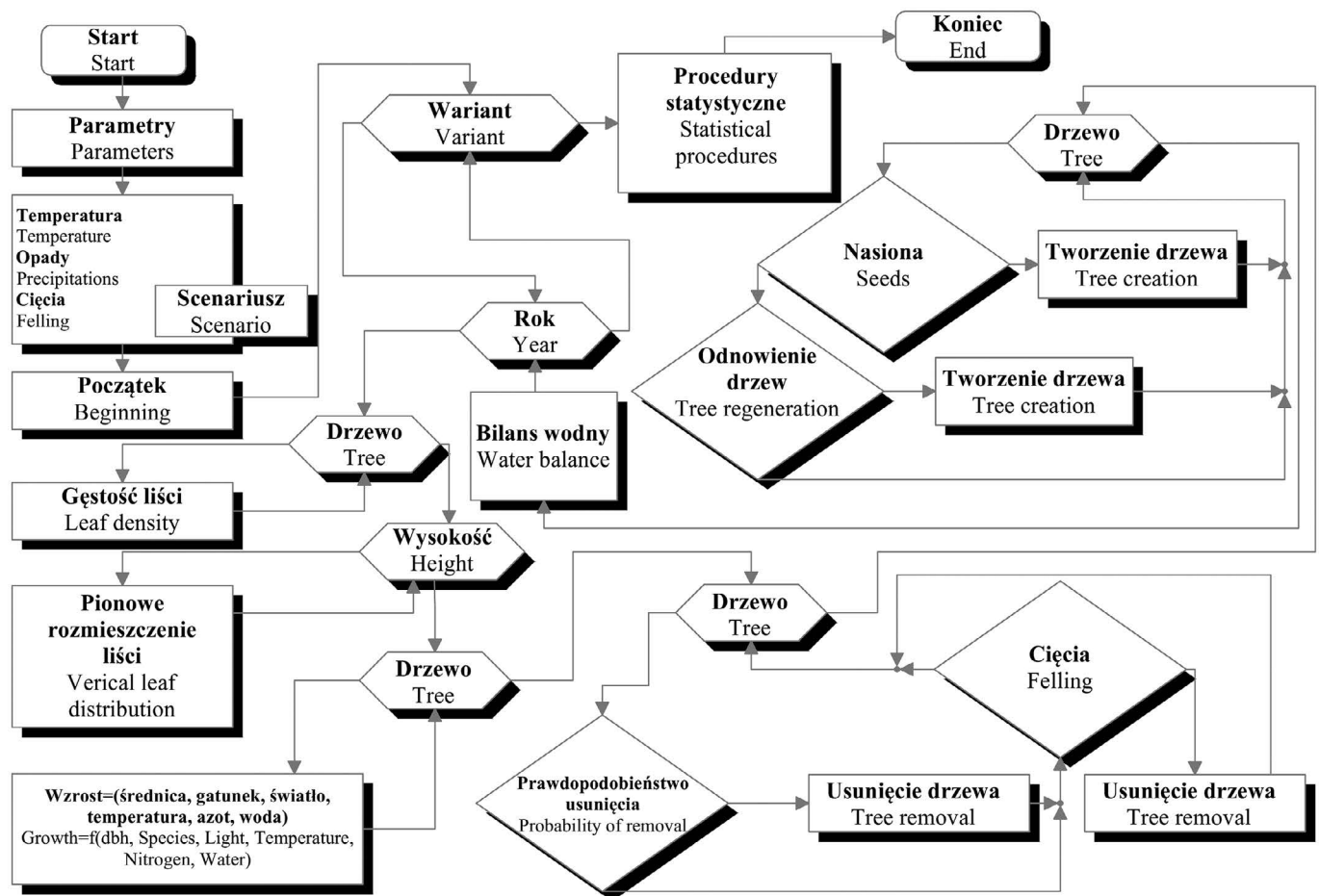
Model FORKOME należy do grupy modeli płatowych, które symulują wieloletnią dynamikę (sukcesję) zespołów leśnych z uwzględnieniem, w sposób bezpośredni, wpływu najważniejszych czynników środowiska, takich jak: temperatura, opady, światło, zasobność gleby w składniki pokarmowe, na główne procesy zachodzące 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 zacieniające 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 światłoządności podzielono gatunki drzew na trzy zasadnicze typy: światłoządne, pośrednie, cienozadne.

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],

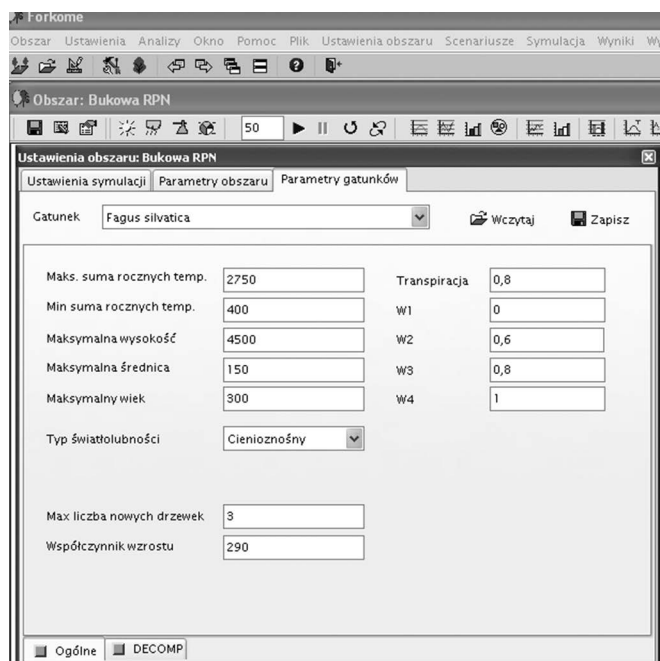
AGE_{max} – maksymalny wiek życia drzew danego gatunku.

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.

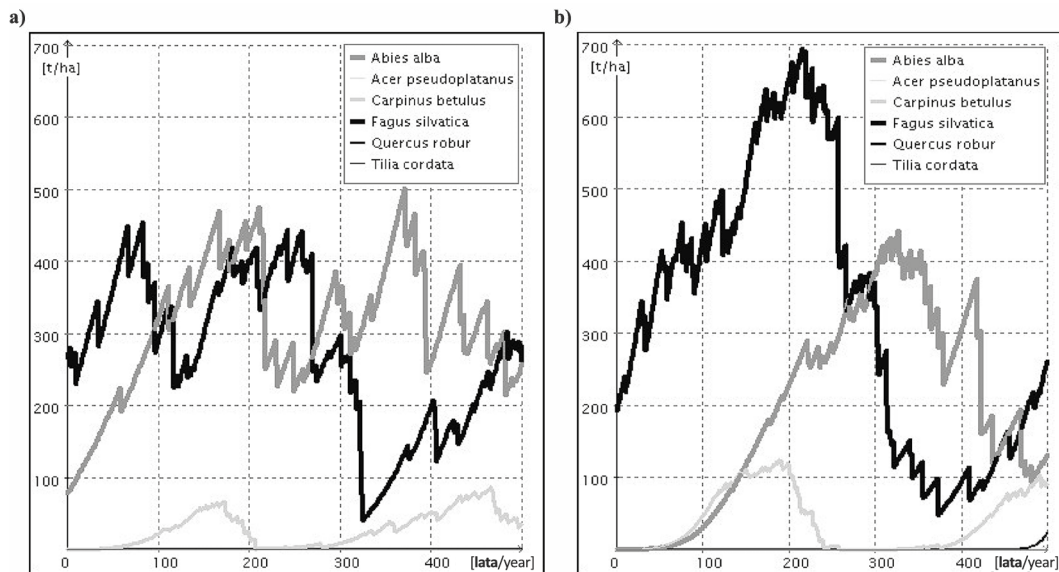
We wszystkich analizowanych scenariuszach w pierwszym roku symulacji na powierzchni Buczyna 1 dominował buk zwyczajny (260 t/ha, 76,5% biomasy całkowitej). Pozostałą część drzewostanu zajmowała jodła pospolita (23,5%). Na powierzchni Buczyna 2 także dominował buk zwyczajny (201 t/ha, 98,4% biomasy), 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).

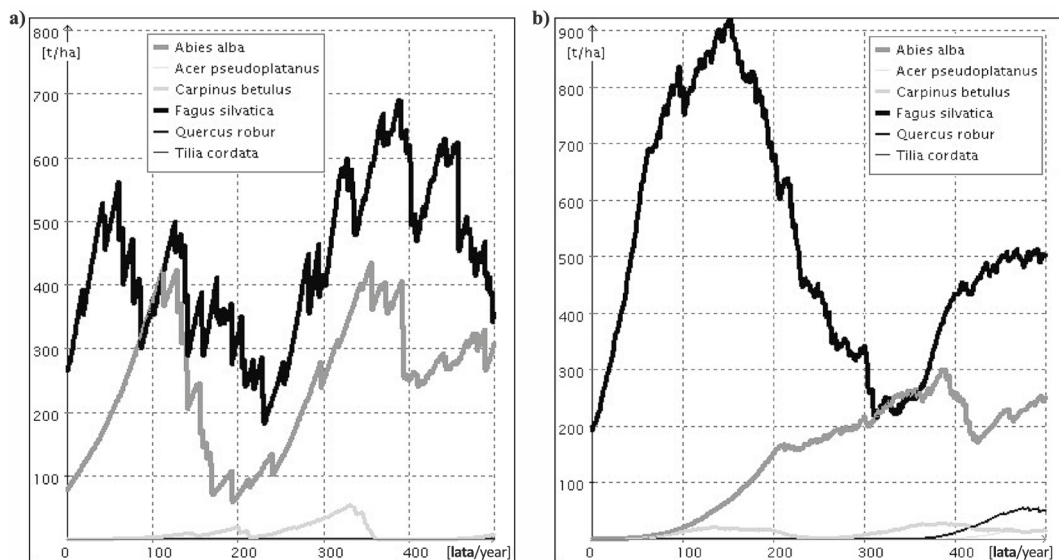
W scenariuszu 1. – ciepło-wilgotno (CW) model FORKOME prognozuje możliwe osłabienie cyklicznych zmian pomiędzy bukiem a jodłą. Na powierzchni 1. (ryc. 4a) buk w czasie całej symulacji dominuje nad jodłą. Podobna, a nawet większa, dominacja buka wystąpiła na powierzchni 2. w części ukraińskiej (ryc. 4b).

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.

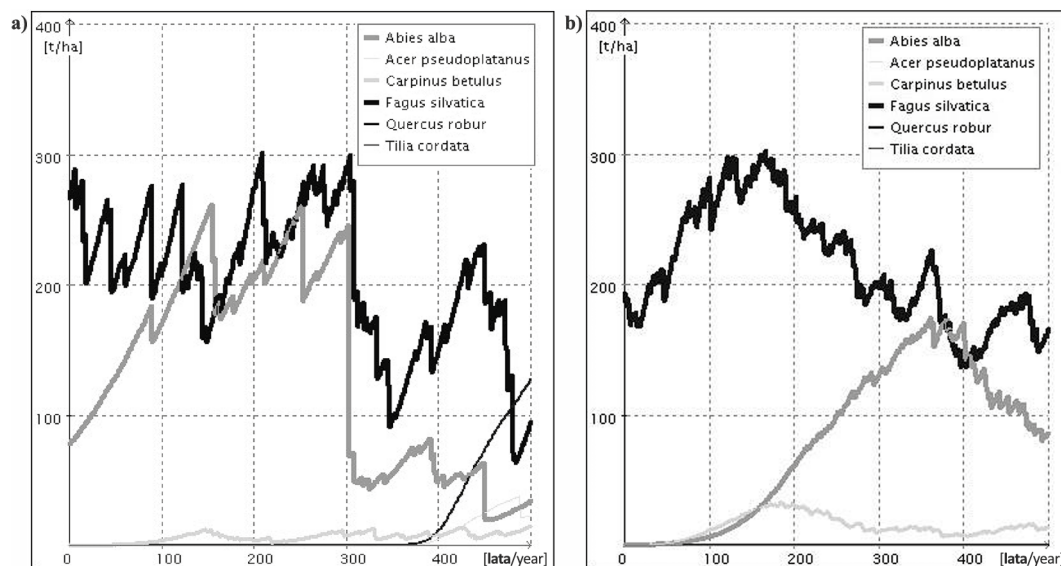
W czwartym scenariuszu, tj. w klimacie zimniejszym i suchszym (ZS) w stosunku do obecnego (ryc. 7), biomasa buka w drugiej połowie okresu symulacji oscyluje wokół najniższej wartości (100 t/ha na pierwszej i 30 t/ha na drugiej powierzchni). W tej prognozie, tak jak i w poprzedniej, pozycja buka jest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

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

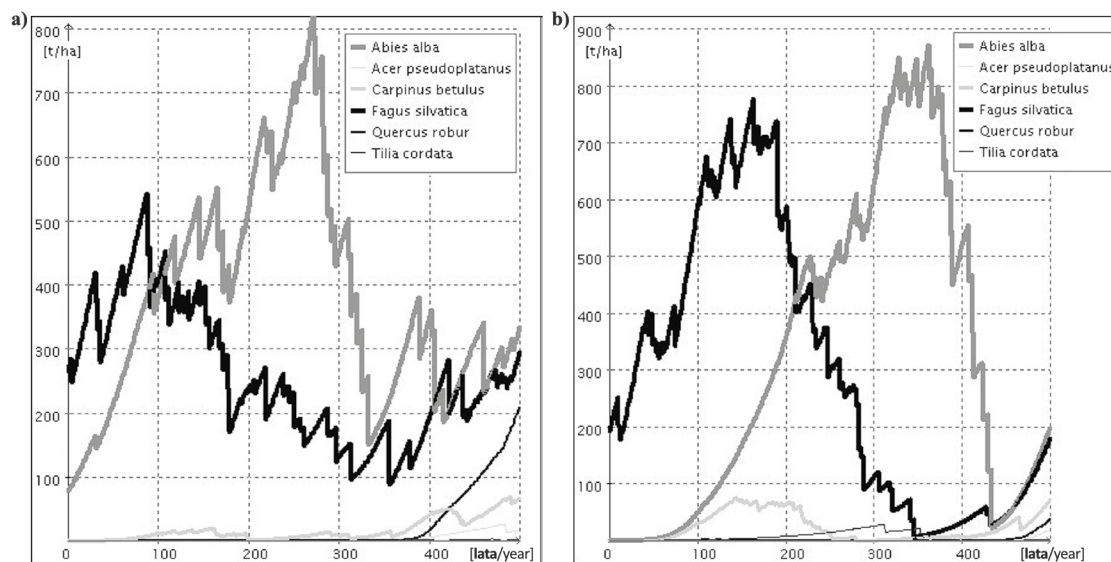
na ogół słabą korelację krzyżową pomiędzy jodłą a bukiem. Wysokie bezwzględne wartości współczynnika korelacji krzyżowej (do $-0,98$) uzyskano jedynie w scenariuszu zakładającym klimat cieplejszy i suchszy w stosunku do obecnego (ryc. 8a). W tym scenariuszu stwierdzono także silny dodatni wpływ temperatury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

4. Dyskusja

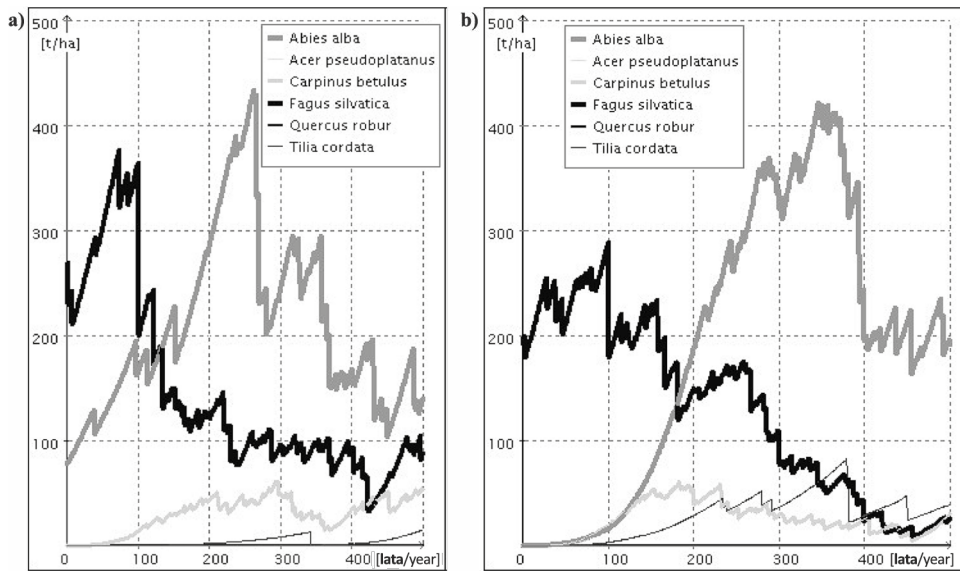
Prognozowana dynamika drzewostanów bukowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza potwierdza podatność buka na zmiany klimatyczne, co zostało zauważone już wcześniej (Dale et al. 2010). Wyniki symulacji przeprowadzonych przy pomocy modelu FORKOME sugerują, że na wschodniej



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

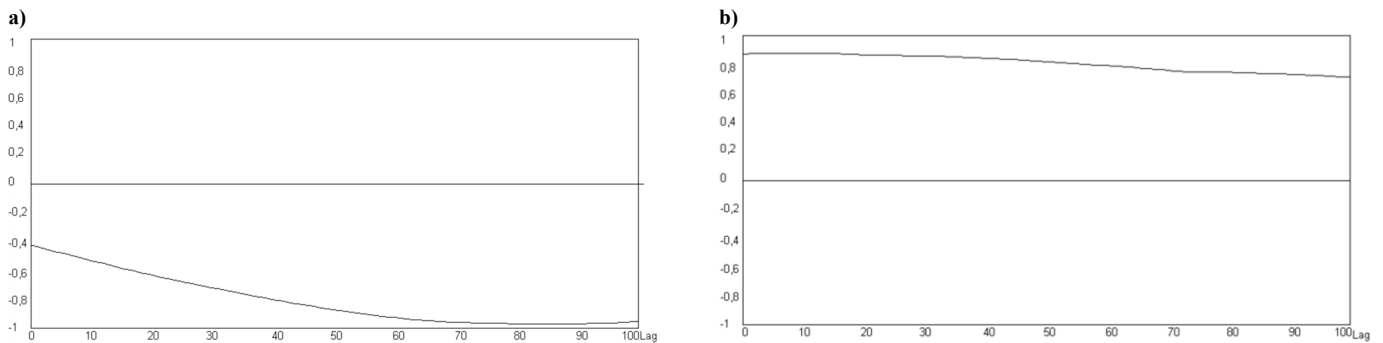


Rycina 6. Prognozowane zmiany biomasy drzew poszczególnych gatunków w scenariuszu ZW na powierzchniach: a) 1, b) 2
Figure 6. Prognosed changes of tree biomass of particular species in the cold-humid scenario on plots: a) 1, b) 2



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 przejmuje od buka jodła. Stwierdzono silną ujemną (do -0,98) korelację krzyżową pomiędzy jodłą a bukiem.

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., Szwaagrzyk 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., 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.
- Szwaagrzyk 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.