

## Symulacja dynamiki drzewostanów sosnowych polskiej i ukraińskiej części Roztocza w warunkach zmian klimatu

Simulation of Scots pine stand dynamics under climate change conditions  
in the Polish and Ukrainian parts of Roztocze

Ihor Kozak<sup>✉</sup>, Patrycja Czekajska, Hanna Kozak, Adam Stępień, Piotr Kociuba

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

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

**Abstract.** The study was conducted in the Polish (Roztoczanski National Park) and Ukrainian (Rava-Rus'ka Landscape Reserve and Yavorivskiy National Park) parts of the Roztocze region. In each of these locations three research areas were established in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands under similar ecological conditions. The purpose of this study was to carry out a survey of possible scenarios for pine stand dynamics in the Polish and Ukrainian parts of Roztocze using the FORKOME model. A control scenario was compared with four other climate change scenarios (warm dry and warm humid; cold dry and cold humid) for a period of covering the next 100 years. Using the control scenario, the FORKOME model predicted that for the next 100 years pine stands will dominate in terms of biomass and number of trees. The warm-dry and warm-humid climate scenarios resulted in slightly reduced biomass of pine stands. However pine would still maintain its dominance, although with a noticeable increase in beech and fir biomass. Nevertheless, in term of the number of trees during the second half of the simulation, it is beech and fir that dominate stand 1 in Roztoczanski National Park. Under the climate cooling scenario (cold dry and cold humid), the biomass of pine and spruce would increase during the next 100 years. Pine trees that would dominate in terms of their numbers, although the number of spruce individuals also tends to increase. The results presented in the paper indicate that the FORKOME model is very useful when investigating different climate changes scenarios in the Roztocze region.

**Key words:** Scots pine, beech, fir, spruce, FORKOME computer model, Roztocze, prognosis

### 1. Wstęp

Dynamika zmian drzewostanów sosnowych oraz określanie ich kierunków w odniesieniu do możliwych zmian klimatycznych na Roztoczu jest ważnym zagadnieniem dla gospodarki leśnej zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

W literaturze brak jest danych dotyczących komputerowej symulacji dynamiki drzewostanów sosnowych na Roztoczu. W opracowaniach poświęconych ogólnej analizie drzewostanów sosnowych można znaleźć wzmianki o zmniejszaniu się obszaru występowania płatów *Leucobryo-Pinetum* na skutek silnego rozwoju podrostów buka i jodły (Izdebski et al. 1992). Ponadto w

wyniku wcześniej prowadzonej gospodarki leśnej, nastawionej głównie na produkcję sosny, wytworzyły się także liczne zbiorowiska zastępcze (Izdebski et al. 1992). Dodatkowo postępująca eutrofizacja siedlisk leśnych przyczynia się do wycofywania się płatów *Leucobryo-Pinetum* oraz powiększania zasięgu borów mieszanych (Izdebski et al. 1992).

W innej publikacji (Maciejewski 2009) można odnaleźć potwierdzenie dla zwiększania się udziału gatunków liściastych kosztem gatunków iglastych w lasach Roztoczańskiego Parku Narodowego (RPN). Za przyczyny tychże zmian uważa się niektóre katastrofalne zjawiska atmosferyczne, takie jak mrozy i susze, wiatrołomy, śniegołomy oraz czynniki antropogeniczne.

Zaznacza się również istotny wpływ fluktuacji klimatycznych i zanieczyszczeń przemysłowych, które oddziałują bezpośrednio lub pośrednio – poprzez eutrofizację siedlisk i umożliwiają ekspansję drzew ciepłolubnych silnie ocieniających glebę (buk, grab).

W odniesieniu do zmian klimatu istotne jest sprawdzenie przyszłej dynamiki drzewostanów sosnowych, zwłaszcza ich prognoza dotycząca roli sosny i innych gatunków w drzewostanach z zastosowaniem modelowania komputerowego.

W celu prognozowania zmian drzewostanów sosnowych zastosowany został ekologiczny model komputerowy FORKOME (Kozak et al. 2012), należący do tego samego typu co model JABOWA (Botkin et al. 1972), model FORET (Shugart 1984) i model FORLAS (Brzezicki, Zajączkowski 2006).

Celem pracy było przeprowadzenie prognozy dotyczącej tendencji zmian, jakim mogą ulegać drzewostany sosnowe w polskiej oraz ukraińskiej części Roztocza w przeciągu 100 lat, w odmiennych scenariuszach zmian klimatycznych (kontrola, ciepło sucho, ciepło wilgotno, zimno sucho, zimno wilgotno). Symulację dynamiki drzewostanów sosnowych przeprowadzono z zastosowaniem modelu FORKOME na bazie trzech powierzchni badawczych położonych w drzewostanach sosnowych, na których dominują gleby bielcowe właściwe. Sprawdzone również wpływ zmian klimatycznych (zmiany sum temperatur efektywnych, oraz rocznych sum opadów atmosferycznych) na tempo ustępowania sosny oraz odnawiania się w jej miejsce innych gatunków (takich jak buk zwyczajny, jodła pospolita, świerk pospolity, grab pospolity). Scenariusze klimatyczne zostały opracowane w celu weryfikacji tezy o utrzymaniu się sosny na badanych powierzchniach na Roztoczu w wariantach zmian klimatu. W ramach analizy zastosowano także podejście agregacji czynników klimatycznych (Kahn 1994).

## 2. Materiały i metody badań

Badania zostały przeprowadzone w latach 2009–2011 na terenie lasów Roztoczańskiego Parku Narodowego (RPN) w Polsce oraz Regionalnego Parku Krajobrazowego „Roztocze Rawskie” i Jaworiwskiego Parku Narodowego na Ukrainie. W każdym z tych obiektów założono po trzy powierzchnie badawcze w lasach o podobnych warunkach ekologicznych.

Do prezentacji wybrano jedną powierzchnię z każdego obiektu. Na wszystkich trzech badanych powierzchniach dominują gleby bielcowe właściwe, ubogie w składniki mineralne. Wykształca się na nich zbiorowisko *Leucobryo–Pinetum*, najpowszechniejszy zespół leśny całego Roztocza. Podczas przeprowadzania

badania na powierzchniach dominowały drzewostany sosnowe o podobnym składzie gatunkowym (10So + Bk, Jd, Św) oraz wieku (na pierwszej powierzchni odnotowano jedną brzozę, która w pierwszych latach prognozy wypadła z drzewostanu). Są to powierzchnie położone się w różnych częściach Roztocza. Pierwsza powierzchnia – „Sosna 1” znajduje się w wydzieleniu 189f w RPN w Polsce (50°36' N, 22°57' E), druga „Sosna 2” w wydzieleniu 3 kwartału 66 Regionalnego Parku Krajobrazowego „Roztocze Rawskie” koło Rawy Ruskiej na Ukrainie (50°13' N, 23°37' E), z kolei powierzchnia trzecia „Sosna 3” – w wydzieleniu 12, kwartale 28 Młynkiwskiego leśnictwa Jaworiwskiego Parku Narodowego na Ukrainie (50°03' N, 23°49' E).

W drzewostanach wszystkich analizowanych powierzchni dominuje sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) z domieszką buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.), jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) i świerka pospolitego (*Picea abies* L. Karst.). Zwarcie w warstwie A nie przekracza 70–80%, ale nie jest równomierne z uwagi na luki powstałe wskutek obumarcia jednego lub kilku większych drzew sosnowych. Runo na powierzchniach badanych tworzy borówka czarna z domieszką traw, lokalnie można zaobserwować płyty mchów.

Dominująca w warstwie drzew sosna rośnie w siedliskach suchych; drzewostany są widne i świetliste. W warstwie krzewów obecne są świerk, buk i jodła. Średnia pierśnica sosny (tab. 1) na powierzchni „Sosna 1” wyniosła 24,4 cm (max 65, min 5), na powierzchni „Sosna 2” – 25,9 cm (max 60, min 7), a na powierzchni „Sosna 3” – 28,3 cm (max 56, min 6 cm). Wszystkie powierzchnie zostały założone na ekspozycji wschodniej, gdzie nachylenie terenu wynosiło 15–17°. Wszystkie gatunki pochodzą praktycznie z samosiewu, z wyjątkiem częściowo podsadzonego buka na powierzchni „Sosna 1” w RPN.

Analiza statystyczna danych pokazała, że według przeprowadzonego w programie STATISTICA testu Shapiro-Wilka dane dotyczące pierśnicy drzew (D) na tych trzech powierzchniach są z rozkładu normalnego i posiadają asymetrię prawostronną.

Każda powierzchnia badawcza miała kształt kwadratu o boku 25 m (625 m<sup>2</sup>). Taki rozmiar powierzchni z powodzeniem stosuje się w modelach gapowych (Bugmann 1994). Co więcej, przeprowadzenie 200 symulacji dla każdej powierzchni będzie odpowiadało analizie terenu o powierzchni równej 200×0,0625, tj. 12,5 ha.

Granice powierzchni badawczych wyznaczono za pomocą taśmy, tworząc prostokątny układ współrzędnych (X – na linii wschód–zachód; Y – północ–południe). Poszczególne drzewa zostały ponumerowane i zmierzone (pierśnica, wysokość, promień korony, wiek). Miejsca występowania drzew (współrzędne przestrzenne drzew) zmierzono z dokładnością do 5 cm,

**Tabela 1. Charakterystyka drzew na powierzchniach badawczych**

Table 1. Characteristic of trees on research plots

Powierzchnia Plot	Gatunek Species	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>	10,0	5,0	18,0	7,6	4,0	13,0	14,8	11,0	16,0	8
1	<i>Fagus sylvatica</i>	8,3	6,0	14,0	5,4	4,0	9,0	15,4	12,0	20,0	7
1	<i>Betula pendula</i>	20	20	20	16	16	16	26	26	26	1
1	<i>Picea abies</i>	9,4	4,0	21,0	8,6	4,0	18,0	16,2	11,0	35,0	10
1	<i>Pinus sylvestris</i>	24,4	5,0	65,0	18,0	5,0	39,0	67,5	10,0	148,0	35
2	<i>Abies alba</i>	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	77,0	19,0	19,0	19,0	1
2	<i>Fagus sylvatica</i>	7,0	5,0	8,0	5,2	4,0	6,0	14,0	4,0	6,0	5
2	<i>Picea abies</i>	12,4	9,0	16,0	10,0	8,0	12,0	33,2	24,0	43,0	5
2	<i>Pinus sylvestris</i>	25,9	7,0	60,0	14,9	5,0	29,0	68,9	19,0	160,0	37
3	<i>Abies alba</i>	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	19,0	19,0	19,0	1
3	<i>Fagus sylvatica</i>	7,0	5,0	8,0	5,2	4,0	6,0	14,0	10,0	16,0	5
3	<i>Picea abies</i>	7,6	5,0	13,0	6,8	5,0	10,0	20,2	13,0	35,0	5
3	<i>Pinus sylvestris</i>	28,3	6,0	56,0	16,1	7,0	28,0	75,4	19,0	149,0	39

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

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

następnie naniesiono na mapę przy użyciu metody domiarów prostokątnych. Wiek drzew na powierzchniach został określony za pomocą świdra Presslera. Pomiary pierśnicy dokonano z użyciem średnicomierza (na wysokości 1,3 metra nad poziomem gruntu). Do pomiarów wysokości zastosowano wysokościomierz Leiss BL8.

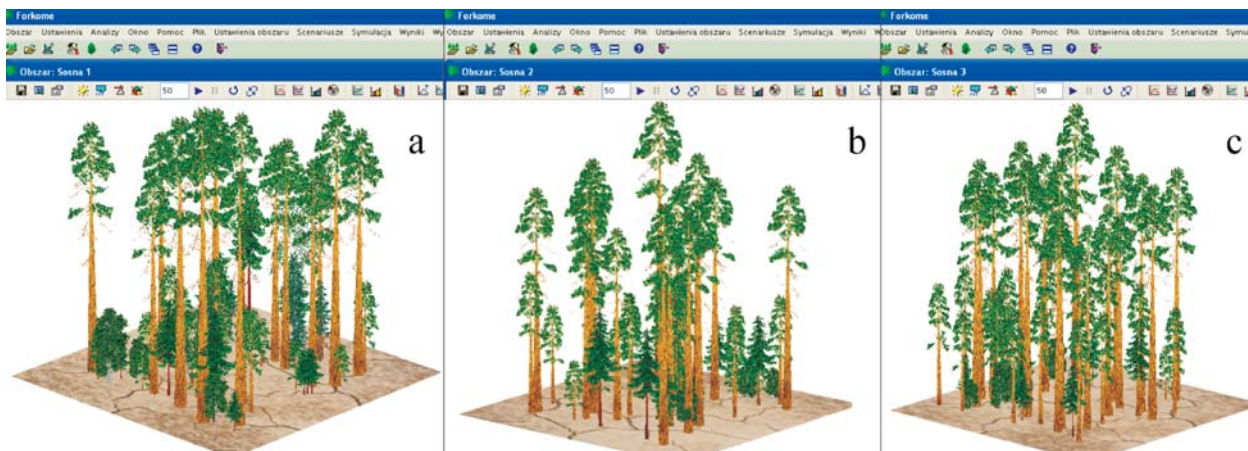
Na powierzchniach wykonano zdjęcia hemisferyczne (3 zdjęcia na każdą powierzchnię), niezbędne do weryfikacji obliczeń LAI (ang. Leaf Area Index) w modelu FORKOME. Do wykonywania zdjęć hemisferycznych wykorzystano aparat cyfrowy typu SLR (lustrzanka) – Canon EOS 5D (matryca 12 MP) z obiektywem Sigma 8 mm f/3.5 DG EX FISH EYE typu „rybie oko” o kącie widzenia 180°. Dla analizy zdjęć hemisferycznych wykorzystano oprogramowanie Gap Light Analyzer (Frazer et al. 2000), które pozwoliło poza współczynnikiem powierzchni liściowej (LAI) określić również bezwzględną ilość światła bezpośredniego i rozproszonego, strukturę zwarcia koron (ażurowość), zmienność przestrzenną ulistnienia okapu drzewostanu, biomasę aparatu asymilacyjnego. Otrzymane dane zostały wykorzystane do weryfikacji parametrów wyjściowych (biomasa aparatu asymilacyjnego) w modelu FORKOME. Wybrane dane z powierzchni badawczych, zapisane w formacie Excel.csv, wprowadzono do modelu FORKOME.

Model FORKOME bazuje na teorii płatowej dynamiki ekosystemów leśnych. Umożliwia on symulację sukcesji zespołów leśnych z uwzględnieniem ich cha-

rakterystyki (składu gatunkowego, wieku itd.) oraz specyfiki rozwoju osobniczego w zależności od zewnętrznych czynników ekologicznych, takich jak: natężenie światła, temperatura, wilgotność i in., oraz wewnętrznych, takich jak konkurencja. W modelu symulowane są procesy reprodukcji, wzrostu oraz śmiertelności drzew w ciągu każdego roku przy wykorzystaniu odpowiednich równań (Brzeziecki 1999; Kozak et al. 2012). Dla każdego gatunku w modelu został przyjęty wiek zamierania (dla sosny jest to 400 lat). Parametry dla poszczególnych gatunków uwzględniają ich najważniejsze właściwości ekologiczne i hodowlane, stąd ich wartości są zróżnicowane, gdyż odzwierciedlają różnorodne cechy tych gatunków oraz warunki siedliskowe.

Model FORKOME uwzględnia zdarzenia klęsk żywiołowych w postaci pożarów (Kozak et al. 2012). W związku z tym, że sosna do odnowienia potrzebuje światła (pod okapem odnawia się słabo, zaś naturalnie najlepiej odnawia się na powierzchniach otwartych po pożarach) w modelu istnieje możliwość odnawiania się sosny zarówno podokapowo, jak i na otwartej powierzchni.

Model umożliwia wyświetlenie rozmieszczenia drzew na badanych powierzchniach (ryc. 1a, 1b, 1c), ustalenie parametrów symulacji (jako czas jej trwania przyjęto okres 100 lat), wybierając symulację Monte Carlo (200 symulacji). Prognozy dotyczące zmian biomasy i liczby drzew zostały przeprowadzone na wszystkich powierzchniach sosnowych.



Rycina 1. Stan początkowy (wizualizacja 3D w modelu FORKOME) powierzchni w scenariuszu kontrolnym: a – „Sosna 1”, b – „Sosna 2”, c – „Sosna 3”

Figure 1. Beginning stage (3D visualization in FORKOME model) of plots in control scenario: a – „Pine 1”, b – „Pine 2”, c – „Pine 3”

Do analizy zmian klimatycznych w modelu FORKOME zastosowana została metoda opracowana przez Kahna (1994), która m.in. została wykorzystana także w hybrydowym modelu dynamiki lasu SILVA (Pretzsch et al. 2002). Z podejścia opracowanego przez Kahna (1994) uwzględniono podstawowe czynniki środowiskowe związane z klimatem. Kolejno są nimi: amplituda roczna temperatury, średnia temperatura okresu wegetacyjnego, suma opadów w sezonie wegetacyjnym. Określone przez Kahna (1994) zmienne tych parametrów zastosowane zostały w warunkach drzewostanów na terenie Roztocza.

W niniejszej pracy sprawdzono także wpływ zmian klimatycznych (zmiany sum temperatur efektywnych oraz rocznych sum opadów atmosferycznych) na tempo ustępowania sosny i odnawiania się w jej miejsce innych gatunków (buk, jodła, świerk, grab). Za pomocą narzędzia „scenariusz zmian temperaturowych” do modelu zostały wprowadzone wartości symulujące zmiany klimatu. Wartości kontrolne wynosiły 1425 „stopniodni” (suma temperatur efektywnych w ciągu sezonu wegetacyjnego) dla „Sosna 1”, 1435 dla „Sosna 2” i 1440 dla „Sosna 3”. Natomiast wartości ze scenariusza kontrolnego zostały zwiększone o 200 „stopniodni” dla scenariusza ciepłego suchego oraz ciepłego wilgotnego, a także zmniejszone o 200 „stopniodni” w scenariuszu zimnym suchym oraz zimnym wilgotnym.

Analogicznie za pomocą narzędzia „scenariusz zmian opadów atmosferycznych” wartości kontrolne opadów dla powierzchni „Sosna 1” (718 mm; dane ze stacji meteorologicznej w Zwierzyńcu, Polska), dla „Sosna 2” (713 mm; dane ze stacji meteorologicznej w Rawie Ruskiej, Ukraina) i dla „Sosna 3” (645 mm; dane ze stacji meteorologicznej we Lwowie, Ukraina) zmniejszono lub zwiększono o 100 mm. Jako próbę kontrolną

przyjęto brak zmian klimatu (kn), następnie ustalono scenariusze klimatyczne na ciepły suchy (cs – temperaturę zwiększono o 200 „stopniodni”, a opady zmniejszono o 100 mm), ciepły wilgotny (cw – temperaturę zwiększono o 200 „stopniodni”, a opady zwiększono o 100 mm), zimny suchy (zs – temperaturę zmniejszono o 200 „stopniodni”, a opady zmniejszono o 100 mm) oraz zimny wilgotny (zw – temperaturę zmniejszono o 200 „stopniodni”, a opady zwiększono o 100 mm).

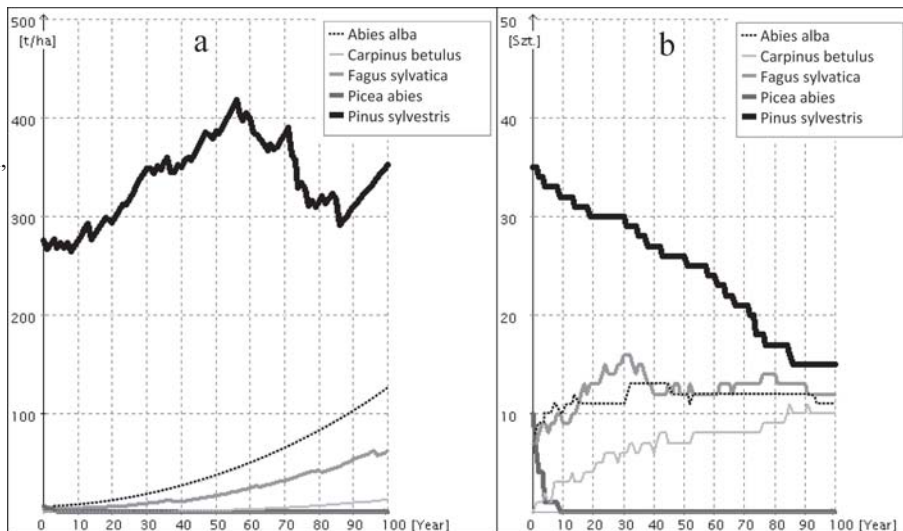
### 3. Wyniki

W publikacji zamieszczono wykresy przedstawiające wyniki prognoz z powierzchni „Sosna 1”, „Sosna 2” oraz „Sosna 3” w scenariuszu kontrolnym, a także w czterech scenariuszach zmian klimatu. Poprzez analizę tych wykresów można zauważyć, że w scenariuszu kontrolnym (kn) biomasa sosny będzie wzrastać w ciągu prognozowanych 56 (ryc. 2a) czy 60 lat (ryc. 3a, ryc. 4a), przy czym na powierzchni najbardziej wysuniętej na zachód – „Sosna 1” biomasa sosny osiągnie 420 t/ha, zaś na pozostałych powierzchniach – „Sosna 2” i „Sosna 3” biomasa sosny zwiększy się do 550 oraz 670 t/ha. Po upływie 60. roku prognozy zauważalna jest tendencja spadkowa dla biomasy sosny niemal na wszystkich powierzchniach w scenariuszu kontrolnym, chociaż na powierzchni „Sosna 1” stwierdzono nieznaczny wzrost biomasy sosny pod koniec prognozy (od 86. do 100. roku).

Gatunki domieszkowe osiągają największą biomasa na powierzchni „Sosna 1”. W końcowym stadium prognozy biomasa jodły na tej powierzchni może osiągnąć ponad 100 t/ha, a biomasa buka 60 t/ha (ryc. 2a). Zwiększenie biomasy buka i jodły na powierzchni

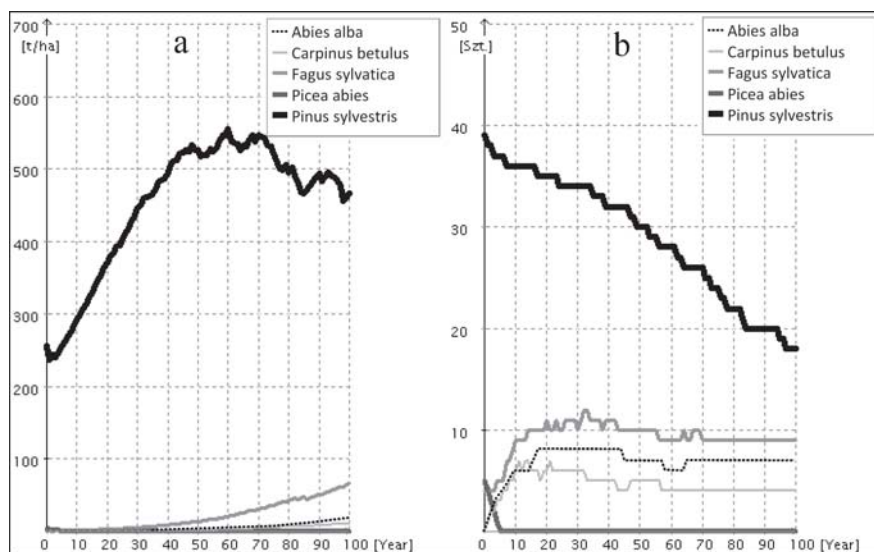
**Rycina 2. Wykresy rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Sosna 1”**

Figure 2. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot „Pine 1”



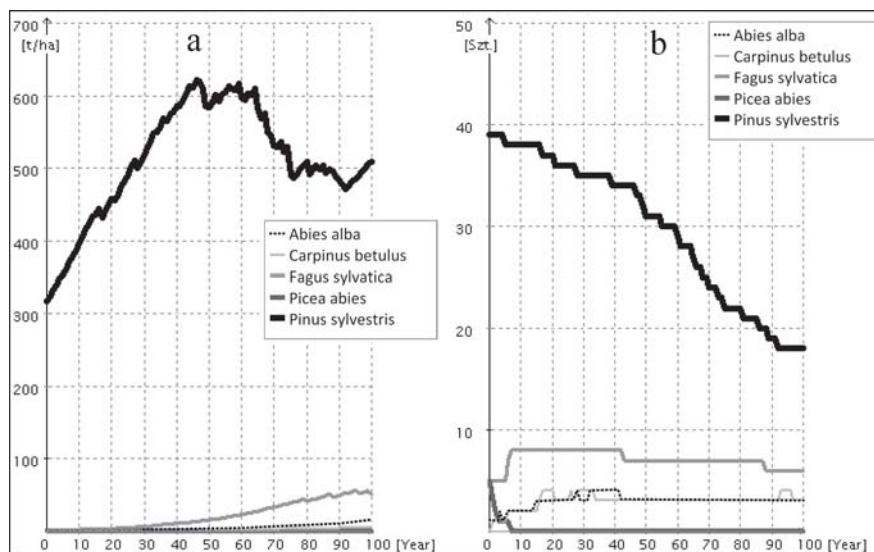
**Rycina 3. Wykresy rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Sosna 2”**

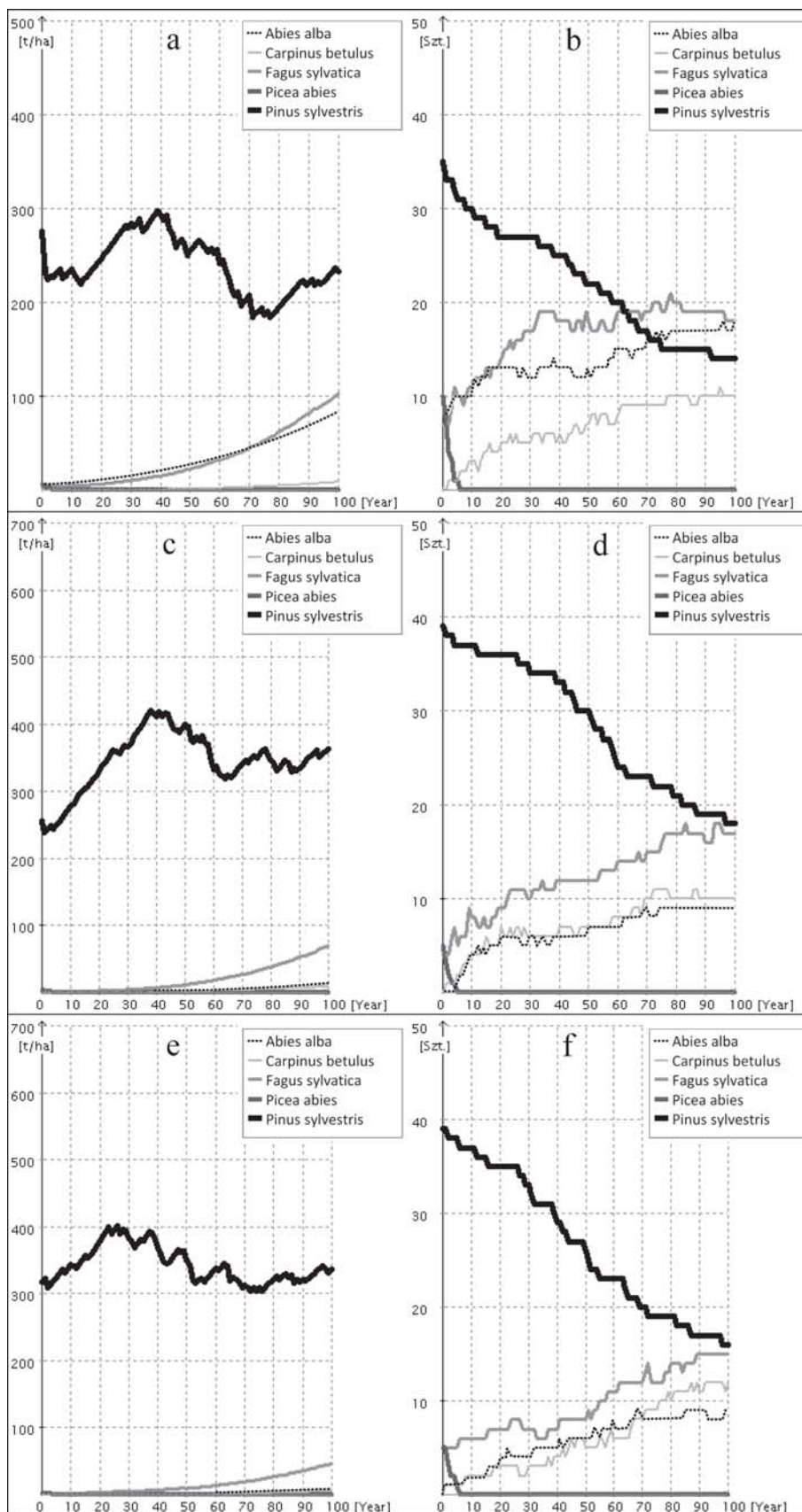
Figure 3. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot „Pine 2”



**Rycina 4. Wykresy rozkładu biomasy (a) i liczby drzew (b) poszczególnych gatunków w scenariuszu kontrolnym na powierzchni „Sosna 3”**

Figure 4. Biomass total production, accumulation (a) and number of trees (b) of analyzed species in the control scenario on the plot „Pine 3”



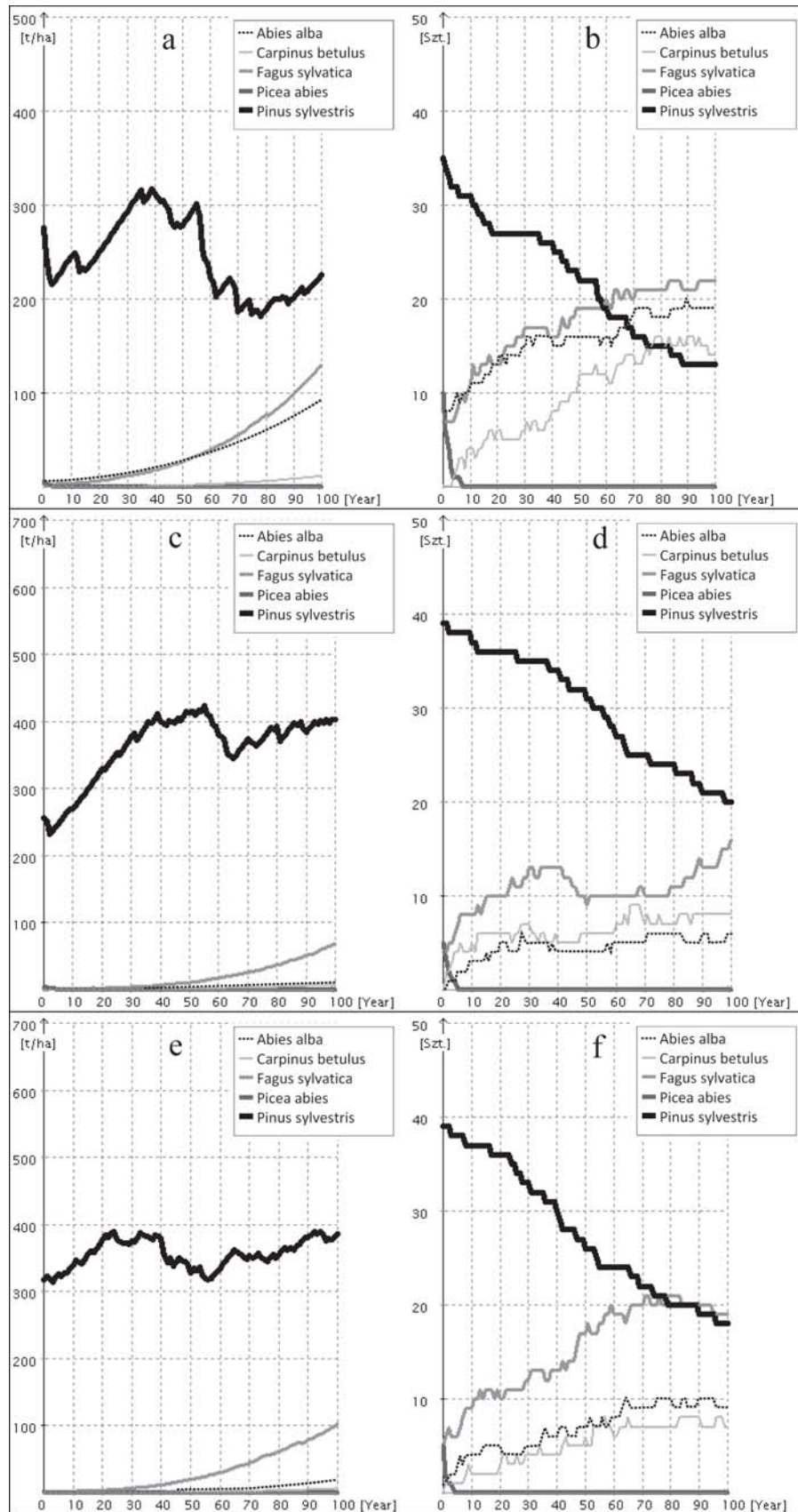


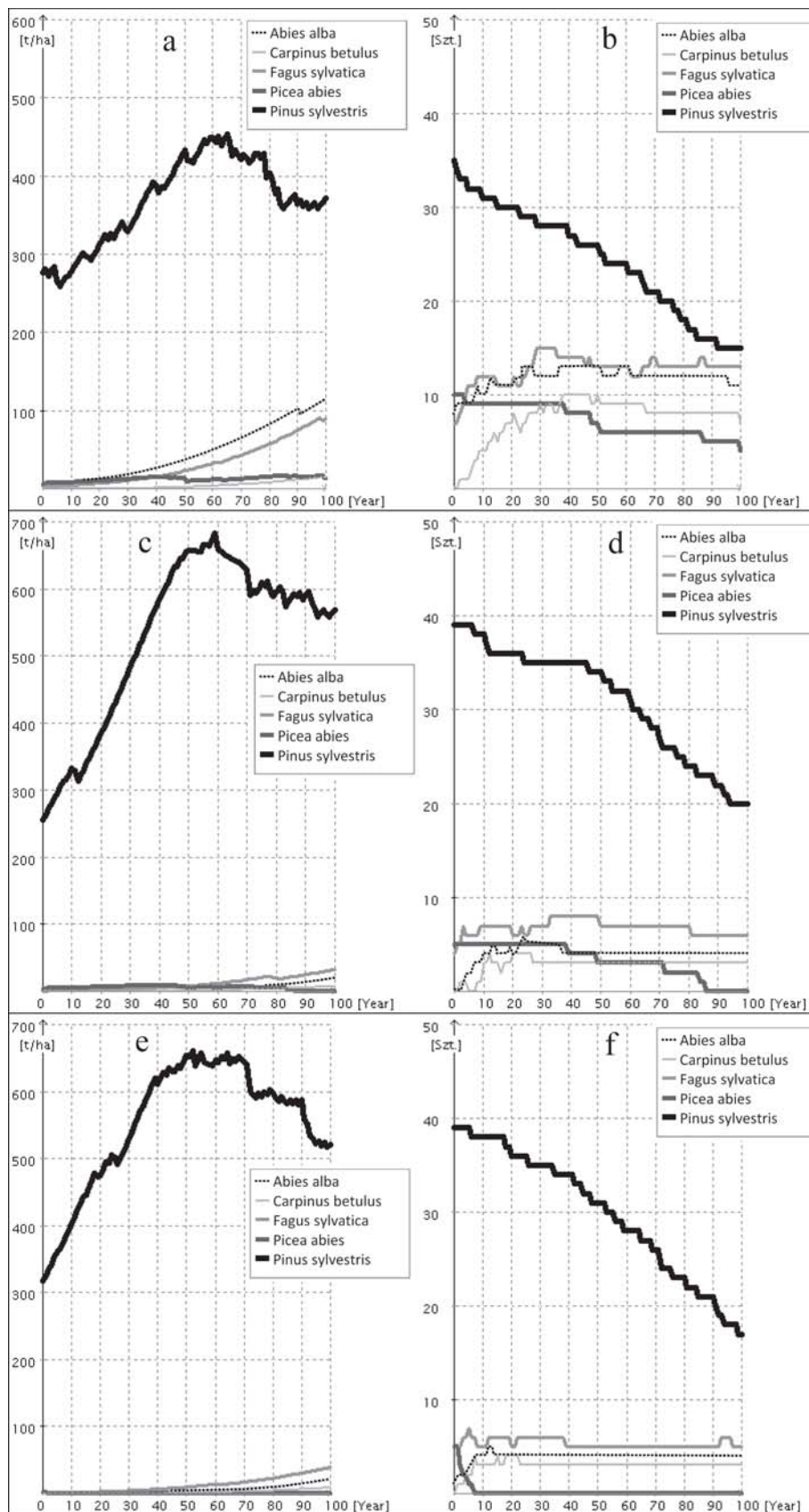
**Rycina 5. Wykresy rozkładu biomasy (z lewej) i liczby drzew (z prawej) poszczególnych gatunków w scenariuszu klimatu ciepłego suchego (cs) na powierzchniach (a, b) „Sosna 1”, (c, d) „Sosna 2”, (e, f) „Sosna 3”**

Figure 5. Biomass total production, accumulation (left) and number of trees (right) of analyzed species in the warm dry climate scenario (wd) on the plots (a, b) „Pine 1”, (c, d) „Pine 2”, (e, f) „Pine 3”

**Rycina 6. Wykresy rozkładu biomasy (z lewej) i liczby drzew (z prawej) poszczególnych gatunków w scenariuszu klimatu ciepłego wilgotnego (cw) na powierzchniach (a, b) „Sosna 1”, (c, d) „Sosna 2”, (e, f) „Sosna 3”**

Figure 6. Biomass total production, accumulation (left) and number of trees (right) of analyzed species in the warm humid climate scenario (wh) on the plots (a, b) „Pine 1”, (c, d) „Pine 2”, (e, f) „Pine 3”



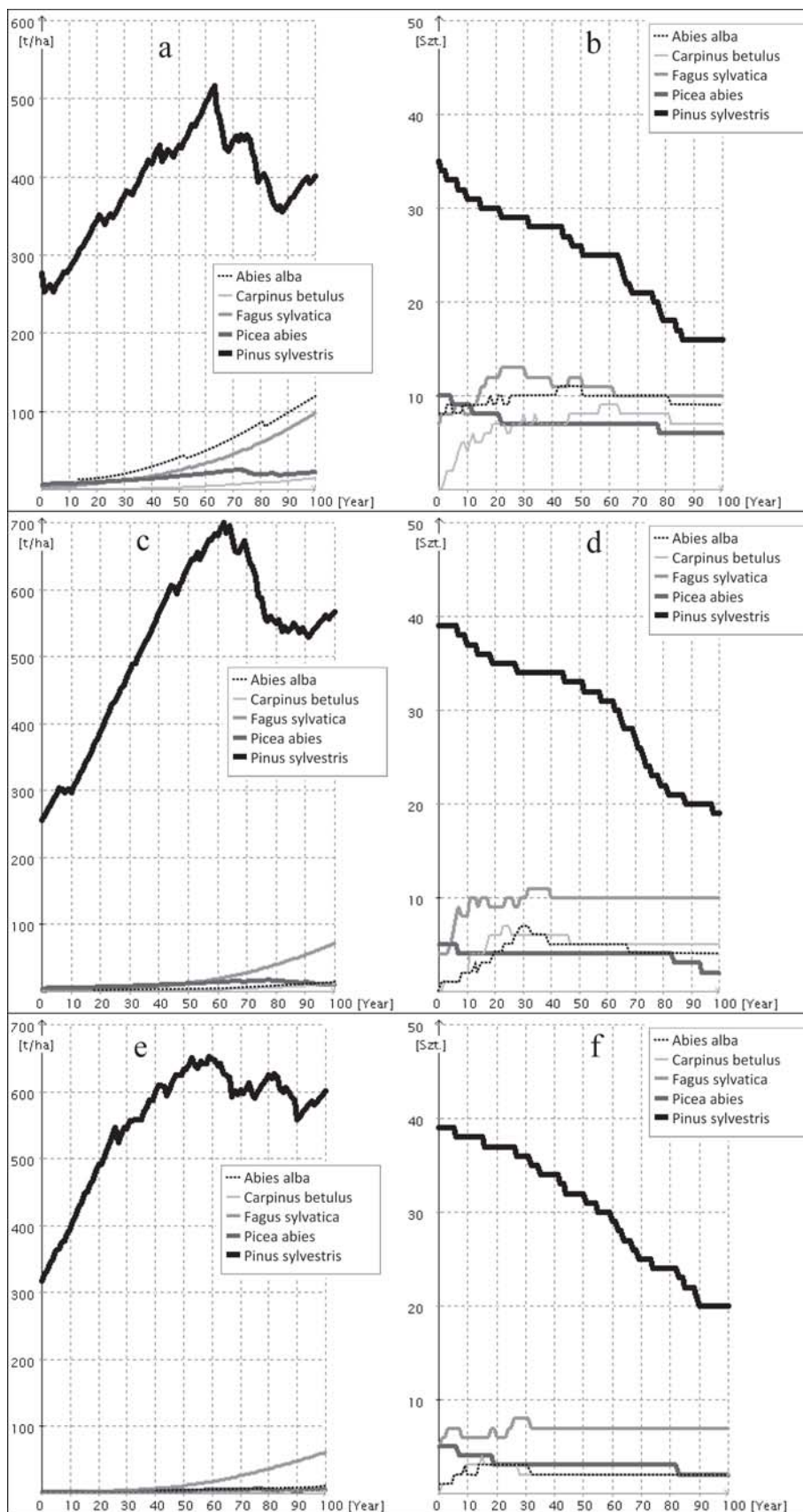


**Rycina 7. Wykresy rozkładu biomasy (z lewej) i liczby drzew (z prawej) poszczególnych gatunków w scenariuszu klimatu zimnego suchego (zs) na powierzchniach (a, b) „Sosna 1”, (c, d) „Sosna 2”, (e, f) „Sosna 3”**  
 Figure 7. Biomass total production, accumulation (left) and number of trees (right) of analyzed species in the cold dry climate scenario (cd) on the plots (a, b) „Pine 1”, (c, d) „Pine 2”, (e, f) „Pine 3”



Rycina 8. Wykresy rozkładu biomasy (z lewej) i liczby drzew (z prawej) poszczególnych gatunków w scenariuszu klimatu zimnego wilgotnego (zw) na powierzchniach (a, b) „Sosna 1”, (c, d) „Sosna 2”, (e, f) „Sosna 3”

Figure 8. Biomass total production, accumulation (left) and number of trees (right) of analyzed species in the cold humid climate scenario (ch) on the plots (a, b) „Pine 1”, (c, d) „Pine 2”, (e, f) „Pine 3”



„Sosna 1” może być spowodowane dosadzaniem buka w przeszłości i udziałem jodły w sąsiednich lasach jodłowych.

Liczba drzew sosny na trzech powierzchniach badanych ma tendencję spadkową. Na powierzchni „Sosna 1” liczba sosen zmniejsza się z 36 do 15 drzew (ryc. 2b), na powierzchni „Sosna 2” – z 37 do 18 (ryc. 3b), na powierzchni „Sosna 3” – z 39 do 18 (ryc. 4b). Warto zauważyć, że stosownie do liczby drzew w scenariuszu kontrolnym sosna utrzyma dominację na wszystkich powierzchniach. Biomasa i liczba drzew świerka w scenariuszu kontrolnym spada niemal do zera na trzech powierzchniach badawczych, co wskazuje na osłabienie roli tego gatunku w drzewostanach sosnowych.

Wyniki prognozy z zastosowaniem modelu FORKOME wskazują, że z punktu widzenia hodowli lasu, sukcesja na badanych powierzchniach zachodzi stosunkowo wolno. Sosna utrzyma dominację pod względem biomasy i liczby drzew. W porównaniu z parametrami dla sosny opracowanymi przez Kahna (1994), sosna z symulacji przeprowadzonej w modelu FORKOME w warunkach Roztocza okazała się także mało wrażliwa na zmiany średniej temperatury sezonu wegetacyjnego, średniej wartości amplitudy temperatury czy też wielkości opadów w sezonie wegetacyjnym. Jedynie w sytuacji zmniejszenia amplitudy temperatury mnożniki wzrostu dla sosny mogą nieznacznie spadać (mnożnik wzrostu 0,81).

W scenariuszu ciepłym i suchym zauważono tendencję do zmniejszania się biomasy sosny do 180 t/ha na powierzchni „Sosna 1”. Na tej powierzchni biomasa sosny nie przekroczy 300 t/ha (ryc. 5a), zaś na powierzchni „Sosna 2” tylko od 35. do 45. roku prognozy biomasa tego gatunku osiągnie 410 t/ha (ryc. 5c), a na powierzchni „Sosna 3” ukształtuje się poniżej 400 t/ha (ryc. 5e). Będzie to znacznie mniej w porównaniu do scenariusza kontrolnego. Należy podkreślić, że nawet przy zmniejszeniu biomasy sosna przez cały okres trwania prognozy utrzyma swoją dominującą pozycję. Stosunkowo równomiernie przyrasta biomasa buka i jodły, na obszarze pojawia się grab, w domieszce może pojawić się również lipa. Pod względem liczby drzew w scenariuszu ciepłym suchym (cs) sosna na powierzchni „Sosna 1” może nie utrzymać dominacji: ulegnie bukowi w 6. dekadzie, natomiast jodle w 7. dekadzie prognozy (ryc. 5b). Na powierzchni „Sosna 2” i „Sosna 3” gatunek sosny utrzyma dominację.

W scenariuszu ciepłym wilgotnym (cw) biomasa sosny również będzie mniejsza w porównaniu do próby kontrolnej – na powierzchni „Sosna 1” spadnie do 200 t/ha (ryc. 6a) na początku prognozy, następnie wzrośnie do 310 t/ha w środku prognozy, aby w drugiej połowie znowu spaść do 180 t/ha z nieznacznym wzrostem do 230 t/ha zauważalnym pod koniec prognozy.

Biomasa sosny na powierzchni „Sosna 2” (ryc. 6c), po nieznacznym spadku na początku prognozy, wzrośnie do 410 t/ha w środku prognozy, następnie nieco spadnie i oscylując pod koniec prognozy, utrzyma się na wcześniejszym poziomie. Na powierzchni „Sosna 3” biomasa będzie wahać się pomiędzy 300–400 t/ha (ryc. 6e).

Biomasa buka na powierzchni „Sosna 1” w ciepłym wilgotnym (cw) scenariuszu będzie trzykrotnie większa w porównaniu do próby kontrolnej (50 t/ha w próbie kontrolnej i 150 t/ha w scenariuszu ciepłym wilgotnym, przy czym zauważalna jest dominacja buka nad jodłą). Buk i jodła charakteryzują się tutaj stale wzrastającym wskaźnikiem biomasy. W domieszce pojawia się grab i nieznacznie lipa (jednakże ze względu na małe wartości, a co za tym idzie niewystarczającą czytelność rycin lipa nie została na nich uwidoczniła). Pod względem liczby drzew na powierzchni „Sosna 1” buk stanie się gatunkiem dominującym już w piątej dekadzie – znacznie szybciej niż w ciepłym suchym (cs) scenariuszu. W szóstej dekadzie dominację przejmie jodła, a w siódmej – grab. Na powierzchni „Sosna 2” i „Sosna 3” sosna utrzyma się jako gatunek dominujący.

W scenariuszach związanych z ochłodzeniem klimatu sosna wzmacnia swoją pozycję. Jak widać w scenariuszu zakładającym zmianę klimatu na zimny suchy (zs) na powierzchni „Sosna 1” w środku prognozy biomasa sosny osiągnie wartość 450 t/ha, z kolei na powierzchniach „Sosna 2” i „Sosna 3” osiągnie odpowiednio wartość 690 i 670 t/ha. Biomasa buka i jodły spadnie, natomiast zwiększy się biomasa świerka. Pod względem ilości liczby w porównaniu do próby kontrolnej zwiększy się udział świerka, zwłaszcza na powierzchni „Sosna 1” (ryc. 7b) oraz powierzchni „Sosna 2” (ryc. 7d). Liczba drzew buka będzie się utrzymywać na minimalnym poziomie.

W scenariuszu zimny wilgotny (zw) biomasa sosny zwiększy się w porównaniu do scenariusza kontrolnego, a wręcz będzie większa w porównaniu do poprzedniego scenariusza. Osiąga ona na powierzchni „Sosna 1” (ryc. 8a) 520 t/ha, na powierzchni „Sosna 2” (ryc. 8c) 700 t/ha oraz na powierzchni „Sosna 3” (ryc. 8e) 670 t/ha biomasy. Biorąc pod uwagę liczbę drzew, zauważalny jest wzrost udziału świerka. Udział buka i jodły pozostanie na niskim poziomie.

#### 4. Dyskusja

Symulacje z zastosowaniem modelu FORKOME zostały przeprowadzone na trzech powierzchniach badawczych, przy czym każda miała wymiary 25×25 m (1/16 ha). W konsekwencji, przy 625 m<sup>2</sup> powierzchni,

200 zastosowanych sekwencji symulacyjnych odpowiadają powierzchni (equilibrium landscape) 12,5 ha.

W innych tego typu modelach, jak na przykład w modelu JABOWA (Botkin et al. 1972), stosowano powierzchnie 10×10 m, przy czym liczba symulacji wynosiła 100; najmniejsza powierzchnia wyniosła 0,5 ha i została zastosowana w modelu FORSKA (Leemans, Prentice 1987). Przeprowadzone na Roztoczu badania dowiodły, iż zasadnym jest stosowanie w modelach płatowych powierzchni badawczych o wielkości 625 m<sup>2</sup>.

Z badań przeprowadzonych za pomocą modelu FORKOME wynika, że sosna nie zostanie wyparta przez inne gatunki na przestrzeni 100 lat. Powyższa teza może zostać potwierdzona także badaniami przedstawionymi w literaturze, gdzie u sosny zwyczajnej w pobliżu południowej granicy występowania tego gatunku w północno-wschodniej Hiszpanii (Martinez-Vilalta et al. 2008) zauważono zwiększenie powierzchni przekroju o 84% na przestrzeni XX wieku. Nie wyklucza się, że taki trend był związany ze wzrostem ilości CO<sub>2</sub> w atmosferze.

Symulacja dynamiki drzewostanów sosnowych na Roztoczu przeprowadzona została na podstawie powierzchni badawczych położonych w drzewostanach sosnowych, gdzie dominują gleby bielcowe. Ten rodzaj gleb w większości porośnięty jest borami sosnowymi, również na Roztoczu, zaś samoistne pożary zapewniają sośnie możliwość odnowienia (Kozak et al. 2012).

Jak wynika z przeprowadzonych symulacji komputerowych, liczba drzew sosny stale spada – obumierają stare drzewa, a zwarcie koron nie pozwala młodszym osobnikom otrzymać dostatecznej ilości światła wystarczającej dla wzrostu. Na wykresach widoczne jest słabe odnawianie się drzew (bez udziału pożaru).

Prowadzenie symulacji z zastosowaniem modelu FORKOME w różnych scenariuszach zmian klimatycznych (ciepło sucho, ciepło wilgotno, zimno sucho i zimno wilgotno) często jest stosowane przez innych autorów (Brzeziecki 1999). Ma to nie tylko teoretyczne zastosowanie, ale także praktyczne – przejawiające się w możliwości określenia kierunków zmian zachodzących w środowisku, która to możliwość pozwoli na przyjęcie odpowiednich strategii postępowania, ochrony oraz zarządzania.

Zmiany klimatyczne w tak odległym czasie nie zawsze są łatwe do przewidzenia – niemożliwe jest założenie, iż klimat pozostanie bez zmian. Dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie czterech kolejnych wariantów symulacji, których wyniki są zbieżne z ekologicznymi wymaganiami sosny (Ellenberg 1986; Kahn 1994).

Sosna charakteryzuje się najszerszym spektrum ekologicznym spośród wszystkich analizowanych gatunków, co ma szczególne znaczenie w przypadku wystąpienia ekstremalnych warunków temperaturowych i wil-

gotnościowych na tak słabych glebach jak gleby bielcowe. W takich warunkach buk, jodła oraz świerk giną w pierwszej kolejności.

Wyniki prognoz przeprowadzonych za pomocą modelu FORKOME są stosunkowo reprezentacyjne. Jako potwierdzenie uzyskanych wyników mogą służyć badania prowadzone w Roztoczańskim Parku Narodowym (Maciejewski 2009; Maciejewski 2011; Maciejewski, Szwagrzyk 2011), Regionalnym Parku Krajobrazowym „Roztocze Rawskie” (Cherniawskij, Sawka 2004) oraz Jaworiskim Parku Narodowym (Horoszko, Homiuk 2011).

Badania z zastosowaniem modelu FORKOME dają wyniki zbieżne z przedstawionymi w literaturze (Maciejewski 2009; Maciejewski 2011; Maciejewski, Szwagrzyk 2011; Horoszko, Homiuk 2011). W ciągu 100 lat model FORKOME prognozuje utrzymanie się drzewostanów sosnowych, nawet w scenariuszu klimatu ciepłego i suchego (cs), co jest potwierdzone sklasyfikowaniem sosny zwyczajnej jako gatunku względnie przystosowanego do suszy (Ellenberg 1986). Prognozowane są również zmiany w strukturze gatunkowej tych drzewostanów poprzez wzrost liczby buka, jodły i grabu w scenariuszach zakładających ocieplenie klimatu. Warto zauważyć, że proces ocieplenia klimatu jest jedną z przyjętych hipotez (Fabijanowski, Jaworski 1996). Dla analizowanych powierzchni sosnowych na Roztoczu w modelu FORKOME przyjęto założenia zgodne z warunkami panującymi na badanym terenie, które to założenia okazały się korzystne dla sosny.

Badania prognostyczne rozwoju drzewostanów, biorąc pod uwagę wpływ zmian klimatycznych, są istotnym rodzajem badań naukowych. Zastosowanie modelu FORKOME umożliwiło uzyskanie wyników, których interpretacja potwierdza prawdziwość tez założonych w niniejszej pracy. Rezultaty uzyskane po przeprowadzeniu powyższych badań prognostycznych są adekwatne do wyników badań terenowych oraz zjawisk opisywanych w literaturze. Model FORKOME okazał się skutecznym narzędziem przystosowanym do badań zależności i zmian w strukturze gatunkowej drzewostanów, biomasy gatunków oraz liczby drzew. Opracowanie w modelu możliwości analizowania jednocześnie wielu parametrów określających stan drzewostanu zapewnia uzyskanie precyzyjnych wyników. Model FORKOME pozwala na analizowanie dynamiki rozwoju zbiorowisk leśnych w połączeniu z wpływem czynników klimatycznych, w czasie dowolnie określonym przez użytkownika.

## 5. Wnioski

Jak wynika z symulacji opisanych w publikacji, sosna zwyczajna niezależnie od fluktuacji klimatycznych będzie podstawowym, a w słabszych warunkach glebowych i wodnych głównym gatunkiem drzewostanów na glebach bielcowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza. Sosna nie staje się mniej konkurencyjna na Roztoczu w porównaniu do buka czy jodły, zwłaszcza na ubogich siedliskach gleb bielcowych. Buk, jodła i świerk na tych siedliskach zawsze będą gatunkami podrzędnymi i domieszkowymi.

W sosnowych drzewostanach Roztocza w prognozowanym okresie 100 lat sosna w wariantcie kontrolnym oraz w scenariuszu klimatu ciepłego suchego (cs), ciepłego wilgotnego (cw), zimnego suchego (zs) oraz zimnego wilgotnego (zw) pozostanie w dominacji pod względem biomasy. Sosna znajduje optymalne warunki wzrostu na Roztoczu w części polskiej i ukraińskiej.

Model FORKOME, dzięki odpowiednim narzędziom (scenariusze zmian klimatycznych), jest przystosowany do przeprowadzania prognostycznych badań leśnych i umożliwia weryfikację stawianych hipotez. Wyniki uzyskiwane z badań prognostycznych wykonanych za pomocą modelu FORKOME potwierdziły jego przydatność dla symulacji dynamiki drzewostanów sosnowych w polskiej i ukraińskiej części Roztocza.

## Podziękowania

Składamy podziękowania pracownikom Roztoczańskiego Parku Narodowego w Polsce, Regionalnego Parku Krajobrazowego „Roztocze Rawskie” i Jaworiewskiego Parku Narodowego na Ukrainie za pomoc oraz Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za finansowanie badań (Projekt No. NN 309 014638).

## Literatura

Botkin D. B., Janak J. G., Wallis J. R. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 60: 849–872.

Brzeziecki B. 1999. Ekologiczny model drzewostanu: zasady konstrukcji, parametryzacji i przykłady zastosowań. Warszawa, Fundacja Rozwoju SGGW, 115 s. ISBN 83-87660-65-5.

Brzeziecki B., Zajączkowski J. 2006. FORLAS 2.0. Program komputerowy i podręcznik użytkownika. Warszawa, SGGW, Katedra Hodowli Lasu, 38 s.

Bugmann H. 1994. On the ecology of mountainous forests in a changing climate: a simulation study. Ph. D. thesis no.

10638, Switzerland, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

Cherniawskij M. W., Sawka H. S. 2004. Funkcjonalne zonuвання Regionalnoho Landszaftnoho Parku „Raws'ke Roztochia”. *Naukowyj Wisnik Ukr DLTU*, 14, 8: 241–252.

Ellenberg H. 1986. Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen aus ökologischer Sicht. Stuttgart, Ulmer, 989 p.

Horoszko M. P., Homiuk P. H. 2011. Znaczennja typologicznogo profilu A. Piasec'koho dla ocinky zmin typiw lisu w umowach Ukrainskoho Roztoczja. *Naukowyj Wisnik Ukr DLTU*, 21, 11: 16–20.

Izdebski K., Czarnecka B., Grądziel T., Lorens B., Popiołek Z. 1992. Zbiorowiska roślinne Roztoczańskiego Parku Narodowego na tle warunków siedliskowych. Lublin, Wydawnictwo Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej.

Fabijanowski J., Jaworski A. 1996. Kierunki postępowania hodowlanego w lasach karpaccich wobec zmieniających się warunków środowiska. *Sylwan*, 8: 75–97.

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.

Kahn M. 1994. Modellierung der Hohenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forstliche Forschungsberichte Munchen*, 141: 1–204.

Kozak I., Mikusiński G., Stępień A., Kozak H., Frań R. 2012. Modelling forest dynamics in a nature reserve: a case study from south-central Sweden. *Journal of Forest Science*, 58, 10: 436–445.

Leemans R., Prentice I. C. 1987. Description and simulation of tree layer composition and size distribution in a primeval Picea–Pinus forest. *Vegetatio*, 69: 147–156.

Maciejewski Z. 2009. Stabilność a dynamika naturalnych ekosystemów leśnych w świetle 35-letnich badań obszarów chronionych Roztoczańskiego Parku Narodowego, w: Roztoczańskie Spotkania. Wykłady otwarte z lat 2006–2009. Zwierzyniec, Ośrodek Edukacyjno-Muzealny Roztoczańskiego Parku Narodowego, 6: 92–105.

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.

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.

Martinez-Vilalta J., Lopez B.C., Adell N., Badiella L., Ninyerola M. 2008. Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions. *Global Change Biology*, 14: 2868–2881.

Pretzsch H., Biber P., Ďurský J. 2002. The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162: 3–21.

Shugart H. H. 1984. Theory of forest dynamics. New York, Springer. ISBN 0-387-96000-7.