Kociuba P., Kozak I., 2014, Zastosowanie autorskiego modelu komputerowego do prognozowania zmian w krajobrazach leśnych. PEK, T. XXXVIII, 161-170.

Zastosowanie autorskiego modelu komputerowego do prognozowania zmian w krajobrazach leśnych

The use of the original computer model to predict changes in forest landscapes

Piotr Kociuba, Ihor Kozak

Katedra Ekologii Krajobrazu, Wydział Matematyki, Informatyki i Architektury Krajobrazu
Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II
Konstantynów 1H, 20-708 Lublin
e-mail: piotrkociuba@interia.pl, modeliho@kul.lublin.pl

Abstract: The article presents the possibilities and perspectives of using a computer model to predict changes in forest landscapes, taking into account each tree with simultaneous analysis of large areas of forest compartments and airborne laser scanning data. The model is based on the combination of cellular automata approach with patch process models. The innovative nature of the work associated with the combination of modern techniques of remote sensing gives the possibility of statistical analysis and computer programming. Using the developed model after its verification on the data from the Świdnik forest district the prognosis of forest dynamics was carried out within the entire forest compartments.

Słowa kluczowe: ALS, automaty komórkowe, las, model, prognoza
Key words: ALS, cellular automata, forest, model, prognosis

Wprowadzenie

Wraz z rozwojem techniki komputerowej nastąpiło prawdziwe przyspieszenie w badaniach nad modelowaniem wzrostu drzew i drzewostanów. Zastosowanie komputerów pozwoliło nie tylko na modelowanie coraz bardziej skomplikowanych systemów, ale również na zastosowanie coraz bardziej wyrafinowanych metod przy szacowaniu parametrów modeli i ich weryfikacji.

W ostatnich latach wzrosła liczba publikacji dotyczących modelowania systemów leśnych (Porté, Bartelink 2002), przy czym najczęściej stosowane są modele typu GAP (modele lukowe). Pierwszymi wśród tego typu modeli był model JABOWA (Botkin i in. 1972) czy model FORET (Shugart, West 1977), które ustaliły obecne standardy dla modelowania zbiorowisk leśnych.

Późniejsze modyfikacje modelu typu JABOWA–FORET opracowano nie tylko w Stanach Zjednoczonych, gdzie te modele powstały, ale także w innych państwach, jak na przykład w Austrii (modele FORCLIM – Bugmann 1994 i FORECE – Kräuchi 1994), czy w państwach Skandynawskich (FORSKA – Leemans, Prentice 1989). Również w Polsce powstały oryginalne opracowania, jak na przykład model FORKOME (Kozak, Menshutkin 1999; Kozak i in. 2003a, 2007, 2012, 2013), FORBIG (Kozak, Brzeziecki 2007), FORLAS (Brzeziecki, Zajączkowski 2008) i inne.
Jednakże, zwiększenie powierzchni pomiarowej dla modeli lukowych do jednego czy kilku wydzieleń leśnych powoduje zmniejszenie dokładności wyników prognostycznych. Modyfikacja modelu typu JABOWA-FORET do modelu SORTI (Pacala i in. 1993; Coates i in. 2003), który analizuje przestrzenne relacje pomiędzy drzewami na poziomie drzewostanu, a tym bardziej modyfikacja do modelu LANDIS (Mladenoff 2004) jako modelu, który analizuje kohorty, a nie konkretne drzewa, nie odzwierciedla specyfiki i skomplikowanej struktury samych drzewostanów. Poza tym wspominane krajobrazowe modele nie są dostosowane do warunków Polski, a także nie są w stanie automatycznie wykorzystać dokładnych danych pomiarowych, w tym danych z ALS (Airborne Laser Scanning), który oferuje coraz większe możliwości automatycznego określania cech drzew i drzewostanów (Zasada i in. 2011).
Celem naszej pracy było pokazanie możliwości i perspektyw zastosowania autorskiego modelu komputerowego do prognozowania zmian w krajobrazach leśnych z uwzględnieniem każdego drzewa przy jednoczesnej analizie dużych obszarów leśnych, dla których istnieją dane uzyskane z ALS. Autorski model wykorzystuje łącznie koncepcję automatów komórkowych (Cellular Automata) oraz płatowy model procesów (Gap/Patch models), reprezentowany przez opracowany wcześniej model FORKOME (Kozak i in. 2007, 2012, 2013). Nowatorski charakter pracy związany jest z połączeniem nowoczesnych technik teledetekcyjnych, możliwości analiz statystycznych i programowania komputerowego do opracowania realistycznego modelu komputerowego pozwalającego, po weryfikacji na założonych powierzchniach referencyjnych w terenie, przeprowadzić prognozowanie dynamiki ekosystemów w granicach całych wydzieleń leśnych.

Materiał i metody

Autorski model komputerowy zastosowano do prognozowania zmian w krajobrazach leśnych w nadleśnictwie Świdnik, leśnictwie Zemborzyce. Teren badań jest położony przy Zalewie Zemborzyckim pomiędzy 51°10’9’’ a 51°9’10’’ szerokości geograficznej północnej i 22°31’13’’ a 22°32’31’’ długości geograficznej wschodniej.
Badany teren leży w mezoregionie Wyniosłość Giełczewska (Kondracki, 2000). Okres wegetacyjny ze średnią dobową temperaturą wyższą lub równą 5° wynosi 200 dni, suma opadów przypadająca na ten okres wynosi 400 mm. Przeważającymi typami siedliskowymi w nadleśnictwie Świdnik jest Lśw 75,5%, LMśw 11,02%, BMśw 7,74%, łączny udział tych siedlisk

wynosi 94,26% powierzchni leśnej nadleśnictwa, a gatunkami dominującymi są dąb i sosna.
Dla wybranego obszaru badań (ryc. 1) pobrano z serwera WMS Banku Danych o Lasach plik *.shp* zawierający wydzielenia leśne wraz z tabelą atrybutów z danymi o: gatunku panującym, średnim wieku, udziale, siedlisku i bonitacji. Do weryfikacji modelu założono osiem powierzchni w następujących wydzieleniach: powierzchnia I – w wydzieleniu Nr 05-27-1-12-268-i -00; II – Nr 05-27-1-12-276-c -00; III – Nr 05-27-1-12-276-a -00; IV – Nr 05-27-1-12-281-a -00; V – Nr 05-27-1-12-275-b -00; VI – Nr 05-27-1-12-282-b -00; VII – Nr 05-27-1-12-268-h -00; VIII – Nr 05-27-1-12-269-a -00 (ryc. 1).
W obrębie wybranych powierzchni założono poletka kontrolne o wymiarach 625m^2 (ryc. 1), na których zebrano następujące informacje o każdym indywidualnym drzewie: gatunek, pierśnica (DBH, cm), wysokość (H, m), położenie na powierzchni oraz projekcja korony. Otrzymane dane, zapisane w postaci pliku *.csv,* zostały wczytane do modelu FORKOME. W artykule przedstawiono wyniki dla pięciu wybranych powierzchni (276-c, 276-a, 275-b, 282-b, 268-h).
Dodatkowo, dla analizy większych obszarów oraz uzupełnienia charakterystyki powierzchni testowych, zakupiono zestaw danych typu *.las* z CODGiK z gęstością chmury punktów 12 pkt m^{-2}. Chmurę punktów ALS poddano klasyfikacji, wyróżniając klasy: grunt, niska roślinność (0-0,5m), średnia roślinność (0,5-3 m) i wysoka roślinność (powyżej 3 m). Dane ALS przeanalizowano przy współpracy z Centrum Naukowym Badań Aerokosmicznych Ziemi Narodowej Akademii Nauk Ukrainy w Kijowie, wykorzystując metodę 2,5D (Semko 2014).
Opracowane dane ALS pozwoliły na utworzenie pliku *.csv* z zapisanymi danymi o współrzędnych każdego drzewa (X, Y, Z) oraz dane o wysokości drzew. Dla każdego drzewa uzyskanego z danych ALS wyliczono pierśnicę na podstawie następującego wzoru:

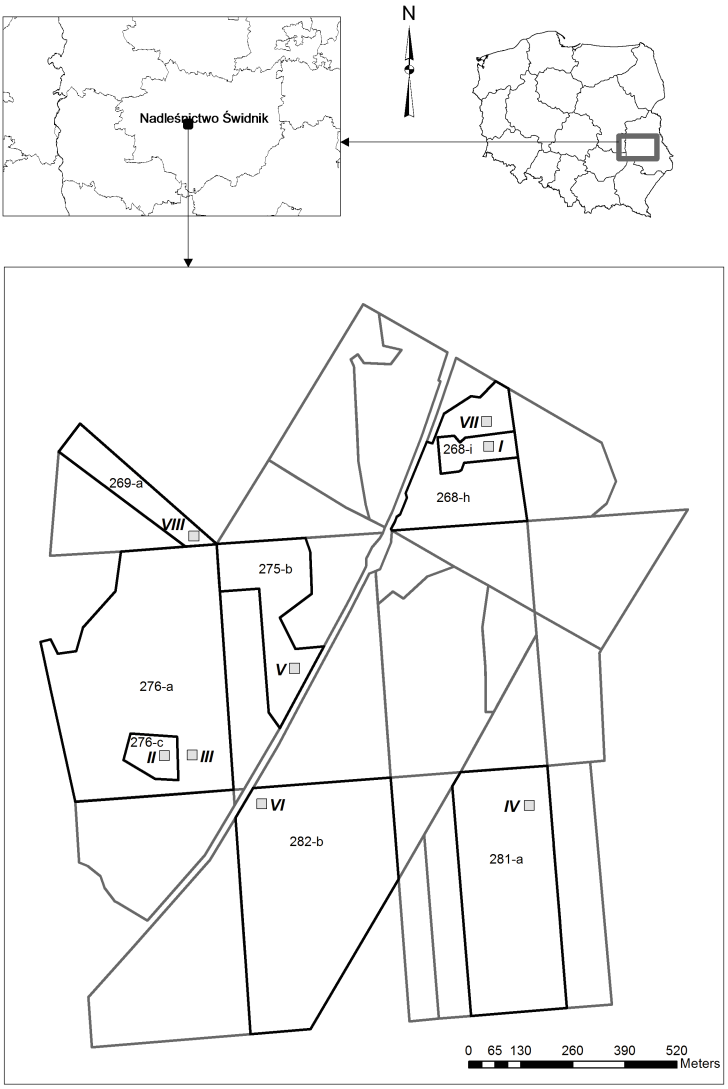
$$DBH = -B_2 + \frac{\sqrt{B_2^2 - 4 * (-h * 100 + 137) * B_3}}{2 * B_3},$$

$$B_2 = 2 * \frac{h_{max} - 137}{d_{max}}$$

$$B_3 = \frac{h_{max} - 137}{d_{max}^2}$$

gdzie: DBH – pierśnica drzewa; h – wysokość drzewa; B2 – parametr; B3 – parametr; h_{max} – maksymalna wysokość drzewa; d_{max} – maksymalna pierśnica drzewa.

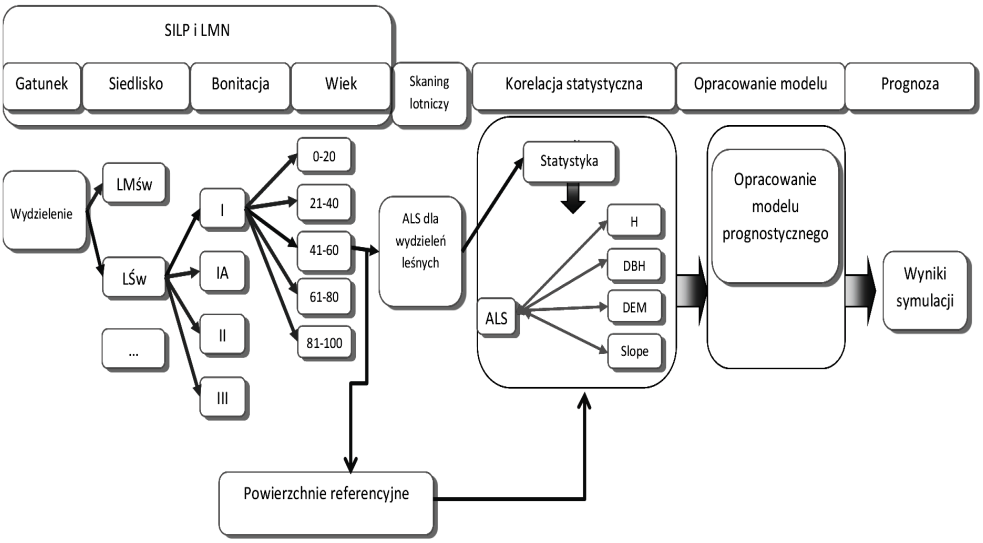
Poszczególne etapy modelowania, od przygotowania materiału badawczego do prognozy, przedstawia schemat koncepcyjny (ryc. 2). Przykładowy ciąg działań rozpoczyna się od zebrania danych niezbędnych do analizy (SILP – System Informatyczny Lasów Państwowych, LMN – Leśna Mapa Numeryczna), poprzez założenie powierzchni referencyjnych i skanowanie



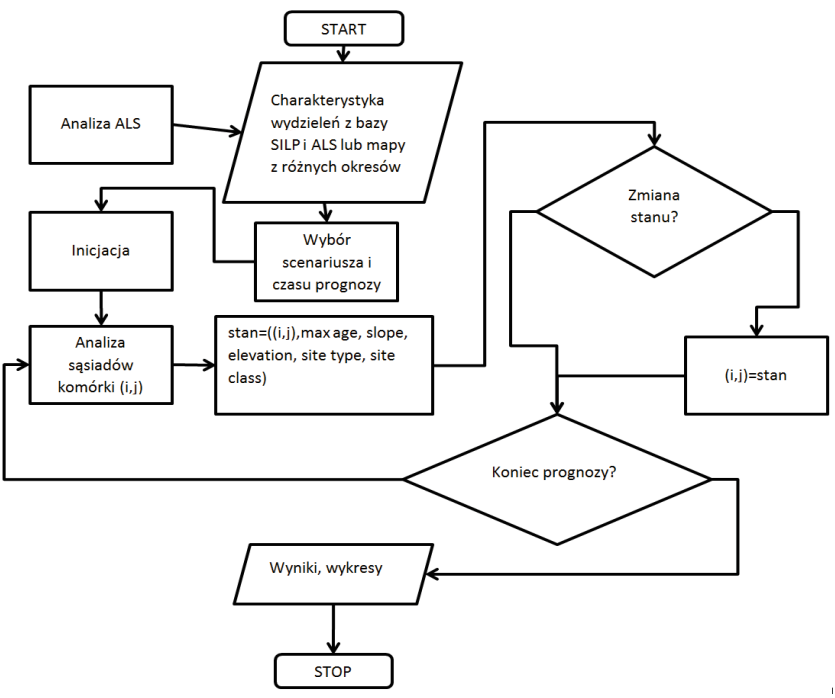
Ryc. 1: Teren badań w leśnictwie Zemborzyce. Liczby rzymskie od I do VIII – założone powierzchnie pomiarowe, liczby arabskie z literami – skrócone numery wydzieleń (autor: P. Kociuba).

Fig. 1. The research area in Zemborzyce Forest District. Roman numbers from I to VIII - research plots, arabic numerals with letters - abbreviated numbers of compartments (author: P. Kociuba).

lotnicze, a następnie statystyczną analizę korelacji pomiędzy danymi ALS i pomiarami z terenu, i kończy się wprowadzeniem danych do modelu i przeprowadzeniem prognozy. Procedura uwzględnia dane dotyczące składu gatunkowego drzewostanów, siedlisko, bonitację oraz wiek drzew. Bierze również pod uwagę dane z numerycznego modelu terenu (wysokość n.p.m., nachylenie). Procedura modelowania, wykorzystująca dane różnego pochodzenia (pomiary ręczne, dane ALS), pozwala na określenie dynamiki drzewostanów dla różnych scenariuszy przyszłych zmian klimatycznych.



Ryc. 2. Schemat koncepcyjny przygotowania danych do prognozy (autor: I. Kozak).
Fig. 2. Conceptual diagram of data preparation for the prognosis (author: I. Kozak).



Ryc. 3. Schemat procedury modelowania (autor: P. Kociuba).
Fig. 3. Flow diagram of the modelling procedure (author: P. Kociuba).

Część prognostyczna modelu, wykorzystująca przedstawione wyżej założenia, obejmuje następujące moduły:

- moduł wczytywania/zapisywania danych;
- moduł kontroli danych;
- moduł drzewa;
- moduł wydzieleń leśnych;
- moduł konkurencji;
- moduł obsługi komórek wydzielenia z zastosowaniem automatów komórkowych;
- moduł obliczający prognozy.

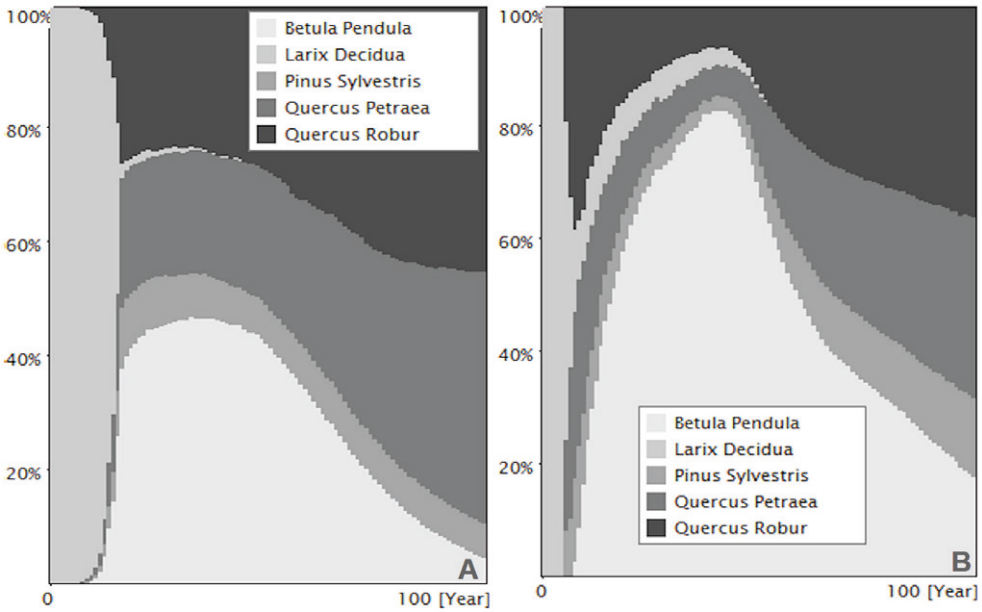
Dane do modelu wprowadzane są w postaci osobnych plików ASCII, utworzonych z warstw tematycznych w ArcMap. Podstawową jednostką w modelu jest jedna komórka, reprezentująca kwadrat 1m^2 w terenie. Każda warstwa tematyczna (gatunek, siedlisko, bonitacja itp.) została wcześniej poddana reklasyfikacji i przekodowaniu, tak, aby w programie możliwe było automatycznie rozpoznanie zmiennych i ich wartości oraz zastosowanie odpowiednich algorytmów.

Poszczególne etapy działania modelu prognostycznego opisuje schemat blokowy (ryc. 3). Podstawowym krokiem prognozy jest jeden rok. Po wczytaniu niezbędnych danych do prognozy i wyboru scenariusza następuje inicjacja, czyli kalibracja wprowadzonych danych z pomiarami z terenu. Kolejnym etapem jest analiza sąsiadów; zastosowano tutaj regułę czterech sąsiadów według Neumanna (Kozak i in. 2003b). Kolejny stan komórki wyliczany jest na podstawie aktualnej wartości komórki, maksymalnego wieku dla danego gatunku, nachylenia i wysokości terenu, typu siedliskowego i bonitacji, uwzględniając przy tym sąsiadów. Podczas modelowania zapisywana jest historia kolejnych kroków, dzięki czemu istnieje możliwość analizy poszczególnych lat prognozy. Na wyjściu programu otrzymujemy wyniki w postaci zapisywalnych plików .csv i wykresów.

Wyniki

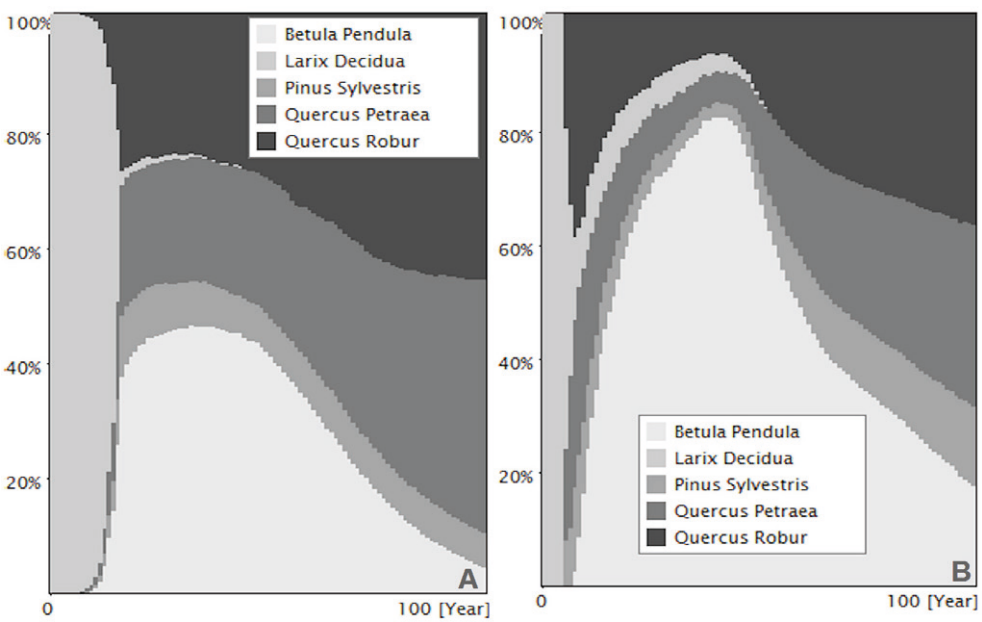
W tabeli 1 zestawiono charakterystyki drzewostanów otrzymane w wyniku pomiarów na gruncie oraz interpretacji danych ALS. Średnie wysokości drzew, wynikające z pomiarów na powierzchniach 25×25 m^2, są zbliżone do wysokości interpretowanej z danych ALS dla większych obszarów. Najmniejsze różnice (do 1 metra) dotyczą drzewostanów modrzewiowych i dębowych, nieco większe (do 2 m) występują w drzewostanie sosnowym, podczas gdy dla drzewostanu brzozowego różnice sięgają 3 metrów.

Wartości DBH wyliczone z wysokości drzew w dużej mierze zależą od maksymalnych wartości (DMAX i HMAX) ustalanych dla gatunku w badanym regionie (tab. 1). Zbliżone wartości z pomiarów na gruncie oraz z interpretacji danych ALS otrzymano dla 49-letniego drzewostanu modrzewiowego (32,80 cm na powierzchni pomiarowej i 32,50 cm - ze wzoru, który uwzględnia wysokości z ALS), dębowego w wieku 131 lat (odpowiednio 45,00 cm i 45,66 cm) i dębowego w wieku 102 lata (41,76 cm i 42,01 cm). Dla 71-letniego



Ryc. 4. Prognoza udziału poszczególnych gatunków na powierzchni modrzewiowej: A) w biomasie; B) w liczbie drzew (autor: I. Kozak).

Fig. 4. Prognosis of the share of separate species on the larch area: A) according to biomass; B) according to the number of trees (author: I. Kozak).



Ryc. 5. Prognoza udziału poszczególnych gatunków na powierzchni brzozowej: A) w biomasie; B) w liczbie drzew (autor: I. Kozak).

Fig. 5. Prognosis of the share of separate species on the birch area: A) according to biomass; B) according to the number of trees (author: I. Kozak).

drzewostanu sosnowego różnice są nieco większe (35,58 cm i 34,25 cm), a dla brzozowego największe (24,79 cm i 29,76 cm).

Tab. 1. Porównanie pomiarów terenowych na powierzchniach z danymi ALS.
Tab. 1. Comparison of field measurements on the research plots with ALS data.

	Pomiary na powierzchni 625 m^2			ALS na powierzchni powyżej 1 ha				
Wydzielenie/Wiek	H (m)	DBH (cm)	N/ha	DMAX (cm)	HMAX (cm)	H (m)	DBH ze wzoru (cm)	N/ha
MD/49	26,14	32,80	466	140	5000	26,59	32,50	422
BRZ/69	21,33	24,79	350	90	3500	24,45	29,76	491
SO/71	25,58	35,58	433	150	4500	23,60	34,25	513
DB/131	25,22	45	366	185	4500	25,60	45,66	469
DB/102	24,64	41,76	396	185	4500	23,46	42,01	497

Model prognostyczny dynamiki biomasy (ryc. 4A) oraz liczby drzew (ryc. 4B) dla drzewostanu modrzewiowego w wieku 49 lat wskazuje na zanikanie modrzewia i pojawianie się na jego miejscu brzozy, sosny i dębów. Zgodnie z prognozą początkowo brzoza będzie zwiększała swój udział (do około 50 roku objętego modelowaniem), a następnie jej rola będzie maleć, aż do 5% udziału w biomasie i 20% w liczbie drzew na końcu 100-letniego okresu prognozowania. Wtedy główną rolę będą odgrywały sosna i dąb, mające łącznie około 90% udziału w biomasie i 70% udziału w liczbie drzew.

Model prognostyczny dynamiki biomasy (ryc. 5A) oraz liczby drzew (ryc. 5B) dla drzewostanu brzozowego w wieku 69 lat wskazuje na zanikanie brzozy i pojawianie się na jej miejscu sosny i dębów. Model przewiduje stopniowy spadek udziału brzozy w biomasie, aż do 6% po stu latach. Inny wzór zmian dotyczy liczebności: przewiduje się szybki (mniej więcej po 30 latach) spadek liczby osobników brzozy, a następnie odbudowę udziału w liczebności dzięki powstaniu nowego pokolenia i dopiero od około 60 roku prognozy kolejny cykl spadkowy, prowadzący do osiągnięcia 30% udziału w liczbie drzew pod koniec 100 letniego okresu prognozowania. Przewiduje się, że po 100 latach drzewostan będzie zdominowany przez dwa gatunki dębów osiągające łącznie około 90% udziału w biomasie i 60% w liczbie drzew.

Dyskusja i wnioski

Zaprezentowane w artykule badania wykazały przydatność powierzchni pola o boku 25 m (625 m^2) do testowania i kalibrowania danych uzyskanych za pomocą ALS. Każda z powierzchni testowych (625 m^2), przy stosowaniu 200 sekwencji symulacyjnych za pomocą autorskiego modelu prognostycznego odpowiada powierzchni równowagi (equilibrium landscape) równej 12,5 ha. Jest to znacznie większa powierzchnia, niż w innych modelach symulacyjnych, gdyż np. w modelu FORSKA wynosi ona 0,5 ha (Leemans,

Prentice 1989), a w modelu JABOWA stosowano powierzchnie 10×10 m przy stu symulacjach (Botkin i in. 1972).

Wyniki prognoz przeprowadzonych za pomocą autorskiego modelu można uznać za reprezentatywne. Są one zgodne z danymi przedstawionymi przez Maciejewskiego (2007) z Roztoczańskiego Parku Narodowego. W ujęciu ogólnym model prognozuje zmiany drzewostanów brzozowych i modrzewiowych na sosnowe i dębowe w okresie 100 lat. Taki wynik otrzymano jednak przy założeniu trwania obecnych warunków klimatycznych przez cały modelowany okres. Możliwe jest jednak stosowanie modelu przy uwzględnieniu różnych scenariuszy klimatycznych, np. ocieplenia (ciepło-wilgotno oraz ciepło-sucho). Jest to szczególnie ważne dla Lubelszczyzny, gdzie obecnie przebiegają granice zasięgów niektórych gatunków drzew (buk, jodła, świerk) i prognozowanie ich zachowania się w warunkach zmian klimatu może dostarczyć wielu ważnych informacji naukowych i wskazań praktycznych. Na wagę modelowania rozwoju drzewostanów pod wpływem zmian klimatycznych zwracali m.in. uwagę Kozak i in. (2013), natomiast Fabijanowski i Jaworski (1996) analizowali problem hodowli lasów wobec prognozowanych zmian klimatu.

Możliwe do uzyskania, współczesne dane wielkopowierzchniowe, pochodzące np. z ALS, obejmujące całe wydzielenia lub nawet leśnictwa, wprowadzone do prezentowanego w artykule modelu prognostycznego, pozwolą na symulację dynamiki całych krajobrazów leśnych. Model jest skutecznym narzędziem do badań zależności i zmian w strukturze gatunkowej drzewostanów, biomasy gatunków, liczby drzew. Może uwzględnić różne scenariusze klimatyczne i użytkowe (np. cięcia i podsadzenia). Z drugiej strony, znane relacje między danymi naziemnymi i danymi z ALS umożliwią poszerzenie zastosowań lotniczego skanowania laserowego w gospodarce leśnej dla dokładniejszej oceny stanu lasów, ich składu gatunkowego oraz parametrów związanych z wyliczeniem objętości i biomasy różnych warstw lasu.

Prezentowany model nie jest strukturą zamkniętą. Przewiduje się, że w przyszłości zostaną opracowane algorytmy pozwalające za pomocą wizualizacji trójwymiarowej oraz automatów komórkowych uwzględnić konkurencję pomiędzy drzewami w wydzieleniu leśnym, a także ustalić zasady, według których będzie można symulować zmiany objętości pni czy biomasy całych drzewostanów w granicach wydzieleń leśnych. Planuje się również rozbudowę podejścia bazującego na koncepcji automatów komórkowych, poprzez dodanie innych reguł sąsiedztwa komórek (np. sąsiedztwo Moore'a czy rozszerzone sąsiedztwo Moore'a), co ułatwi prognozowanie całych wydzieleń leśnych.

Głównym atutem opracowanego modelu jest połączenie dokładnych pomiarów ze skanowania laserowego z automatami komórkowymi, czego brak w innych modelach prognostycznych. Niezależnie od przyszłej rozbudowy modelu już obecnie wyniki można wykorzystać nie tylko w dalszych badaniach naukowych, ale także w planowaniu przestrzennym i w gospodarce leśnej (szczególnie przy planowaniu zabiegów pielęgnacyjnych i jako uzupełnienie danych do bazy Systemu Informatycznego Lasów Państwowych – SILP).

Literatura

Botkin D.B., Janak F.J., Wallis J.R., 1972. Some ecological consequences of computer model of forest growth. Journal of Ecology 60 (3), s. 649-873.

Bugmann H.K.M., 1994. On the ecology of mountainous forests in a changing climate: a simulation study. Dissertation No. 10638. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich.

Brzeziecki B., Zajączkowski J., 2008. Ekologiczny model drzewostanu FORLAS. Program w wersji 2.2 i instrukcja obsługi. Katedra Hodowli Lasu, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.

Coates K.D., Canham C.D., Beaudet M., Sachs D.L., Messier C., 2003. Use of a spatially-explicit individual-tree model (SORTIE/BC) to explore the implications of patchiness in structurally complex forests. Forest Ecology and Managment 186 (1-3), s. 297-310.

Fabijanowski J., Jaworski A., 1996. Kierunki postępowania hodowlanego w lasach karpackich wobec zmieniających się warunków środowiska. Sylwan 140 (8), s. 5-28.

Kondracki J., 2000. Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kozak I., Brzeziecki B., 2007. Analiza wybranych modeli obliczania i prognozowania zasobów węgla w lasach (2): model FORBIG. [w:] K. Rykowski (red.), Rola lasów i gospodarki leśnej w kształtowaniu bilansu węgla w ekosystemach leśnych w Polsce. Instytut Badawczy Leśnictwa, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, s. 145-158.

Kozak I., Chłódek D. Zawadzki A., Kozak H., Potaczała G., 2007. Symulacja przebudowy drzewostanów świerkowych w Bieszczadach za pomocą modelu FORKOME. Leśne Prace Badawcze 2, s. 7-26.

Kozak I., Czekajska P., Kozak H., Stępień A., Kociuba P., 2013. Symulacja dynamiki drzewostanów sosnowych Polskiej i Ukraińskiej części Roztocza w warunkach zmian klimatu. Leśne Prace Badawcze 74 (3), s. 215-226.

Kozak I., Menshutkin V., 1999. Computer simulation of forests Ecosystem Dynamics. Biology Bulletin 26 (6), s. 586-592.

Kozak I., Menshutkin V., Ferchmin M., Potaczała G., Jóżwina M. i in., 2003a. Prognozowanie zmian lasu sosnowego w obszarze ochrony ścisłej Nart w Kampinoskim Parku Narodowym z wykorzystaniem modelu FORKOME. Parki Narodowe i Rezerwaty Przyrody 22 (4), s. 483-497.

Kozak I., Menshutkin V., Klekowski R., 2003b. Modelowanie elementów krajobrazu. Towarzystwo Naukowe Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego, Lublin.

Kozak I., Mikusiński G., Stępień A., Kozak H., Frąk R., 2012. Modeling forest dynamics in a nature reserve: a case study from south-central Sweden. Journal of Forest Science. 58 (10), s. 436-445.

Kräuchi N., 1994. Modelling Forest Succession as Influenced by a Changing Enviromnent. Mitteilungen der Eidgenoessischen Forschungsanstalt fur Wald, Schnee und Landschaft 69, Birmensdorf, s. 145-271.

Leemans R., Prentice I.C., 1989. FORSKA, a general forest succession model. Institute of Ecological Botany, Uppsala.

Maciejewski Z., 2009. Stabilność i dynamika naturalnych ekosystemów leśnych w świetle 35-letnich badań obszarów chronionych Roztoczańskiego Parku Narodowego. [w:] P. Marczakowski i in. (red.), Roztoczańskie Spotkania 6. Wykłady otwarte z lat 2006 – 2009. Ośrodek Edukacyjno – Muzealny Roztoczańskiego Parku Narodowego, Zwierzyniec, s. 92-105.

Mladenoff D.J., 2004. LANDIS and forest landscape models. Ecological Modelling 180 (1), s. 7-19.

Pacala S.W., Canham C.D., Silander J.A. Jr., 1993. Forest models defined by field measurements: I. The design of a northeastern forest simulator. Canadian Journal of Forest Research 23 (10), s. 1980-1988.

Porté A., Bartelink H.H., 2002. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. Ecological Modelling 150 (1-2), s. 141-188.

Semko I., 2014. Comparative analysis of single tree detection methods using airborne LiDAR. Data (in Ukrainian) Visnyk Heodezii ta kartohrafii 4, s. 31-37.

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 Managment 5, s. 161-179.

Zasada M., Stereńczak K., Brach M., 2011. Zależność między pierśnicą a cechami koron uzyskanymi z lotniczego skanowania laserowego. Sylwan 155 (11), s. 725-735.

http://rcin.org.pl