MODELOWANIE PRZESTRZENNE ZMIAN POKRYCIA TERENU

Katarzyna Ostapowicz
Zakład Systemów Informacji Geograficznej, Kartografii i Teledetekcji, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

1 WPROWADZENIE

Zmiany pokrycia terenu są powszechnym lokalnie i znaczącym globalnie zjawiskiem wynikającym ze złożonego oddziaływania czynników naturalnych oraz antropogenicznych. Pokrycie terenu jest fizycznym stanem powierzchni ziemi [26], który odnosi się do jej właściwości biofizycznych lub właściwości związanych z działalnością człowieka [15, 26, 27]. Pojęciem bezpośrednio związanym z pokryciem terenu jest użytkowanie ziemi, odzwierciedlające cele, dla których ludzie eksploatują dany typ pokrycia terenu [27]. Większość zmian pokrycia terenu jest rezultatem zmian kierunków użytkowania ziemi [16]. Zmiany pokrycia terenu dzielone są na dwie szerokie kategorie [27]: konwersję oraz modyfikację i są bardzo złożonym procesem [26]. Dlatego w różnych badaniach rozpatrywane są tylko wybrane aspekty zmian, które przedstawiane są przy pomocy modeli. Pojęcie modelu jest szeroko stosowane w matematyce, logice i naukach empirycznych, nie posiada jednak wyraźnej i jednoznacznej definicji. Modele mogą być albo wzorem, albo odwzorowaniem, lub jednym i drugim jednocześnie i są zasadniczo tworzone dla udoskonalenia teoretycznego zrozumienia problemów, a nie duplikowania każdego elementu świata rzeczywistego. Główne zamierzenia modeli pokrycia terenu dotyczą [14, 16]:

- lepszego zrozumienia przyczyn i mechanizmów rządzących zmianami,
- predykcji przyszłych zmian, na podstawie czynników determinujących,
- oddziaływania na założenia kierunków polityki odpowiedzialnej za zmiany pokrycia terenu.

Każda z metod modelowania zmian pokrycia terenu powinna więc umożliwiać odpowiedź na przynajmniej jedno z następujących pytań [16, 28]:

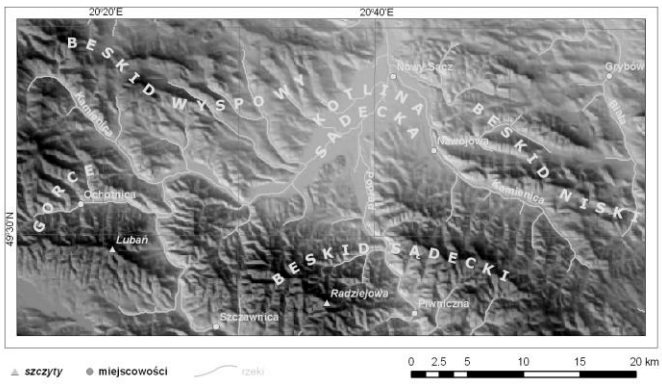
- jakie czynniki mają największy wpływ na zmiany pokrycia terenu – dlaczego?
- jaka lokalizacja w przestrzeni sprzyja zmianom – gdzie?
- z jaką szybkością postępuje proces zmian pokrycia terenu – kiedy?

W literaturze przedstawiane są obecnie różne podejścia do modelowania zmian pokrycia terenu, które mogą być rozpatrywane w czterech aspektach: przestrzennym, czasowym, jakościowym i analitycznym, odpowiednio jako modele przestrzenne i nie-przestrzenne (lokalne, regionalne i globalne), statyczne i dynamiczne (ciągłe i dyskretne), przyrodnicze i antropogeniczne oraz przyrodniczo-antropogeniczne, ekonomiczne i nieekonomiczne, mechaniczne i empiryczne oraz symulacyjne i hybrydowe [1, 3, 8, 16, 17, 29]. Wydaje się jednak, że ciągle jeszcze, w szczególności dla obszaru Polski, brakuje opracowań dotyczących modelowania zmian na poziomie regionalnym, opartych na danych empirycznych, szczególnie z wykorzystaniem zaawansowanych metod statystycznych w połączeniu z technikami GIS, które pozwalają na uzyskanie złożonych, w pełni przestrzennych modeli zmian, uwzględniających zintegrowane oddziaływanie czynników naturalnych i antropogenicznych.

Celem pracy było wypracowanie metod modelowania przestrzennego zmian pokrycia terenu (konwersji i modyfikacji), które umożliwiają odpowiedź na trzy podstawowe pytania: gdzie, kiedy i dlaczego nastąpiły w przeszłości takie

zmiany pokrycia terenu. Wybór metod zastosowanych w poszczególnych etapach pracy oparto na założeniach:
- modelowany jest jeden typ pokrycia terenu;
- konstruowane modele mają być w pełni przestrzenne (przestrzeń euklidesowa), w skali regionalnej;
- modelowanie przeprowadza się na bazie materiałów empirycznych, o wysokiej rozdzielczości przestrzennej;
- modelowane jest pokrycie terenu w dwóch momentach czasowych (modele statyczne) i zmiany pomiędzy nimi (modele dynamiczne);
- uwzględniony jest wpływ czynników naturalnych i antropogenicznych.

Na modelowany typ pokrycia terenu wybrano powierzchnię leśną, ponieważ zmiany powierzchni leśnej są jedną z najbardziej istotnych zmian pokrycia terenu, wpływającą na równowagę środowiska przyrodniczego, szczególnie na obszarach górskich, na przykład z uwagi na ochronę stoków przed erozją i udział w obiegu wody. Ponadto lasy górskie są jednymi z najbogatszych biocenoz Ziemi [7], dlatego jako obszar testowy wybrano fragment Polskich Karpat Zachodnich (część Gorców, Beskidu Sądeckiego, Pienin, Kotliny Sądeckiej oraz Beskidu Niskiego; powierzchnia obszaru badań wynosiła 16 2450 ha; rys. 1).



Rys. 1. Obszar testowy.

Dodatkowym czynnikiem decydującym o wyborze typu pokrycia terenu i obszaru badań była dostępność przestrzennych danych cyfrowych o wysokiej rozdzielczości (poniżej 100 m). Przyjęte założenia pozwalały na poszukiwanie ogólnie obowiązujących prawidłowości w zmianach pokrycia terenu.

2 MATERIAŁY I METODY

Dane wykorzystane w pracy opisują przestrzenne zróżnicowanie powierzchni leśnej i pokrycia terenu oraz wybranych komponentów środowiska przyrodniczego i antropogenicznego obszaru testowego. Wybór danych wykorzystanych w analizach był zdeterminowany regionalną skalą badań oraz dostępnością materiałów. Odpowiednio do celu pracy i założeń w modelowaniu przeszłych zmian zdecydowano się wykorzystać model empiryczno-statystyczny.

2.1 *Materiały źródłowe*

Podstawowym źródłem informacji o pokryciu terenu w pracy były satelitarne mapy leśne dla lat 1987 i 2000 (rozdzielczość przestrzenna 28,5m). Informacje o środowisku naturalnym i antropogenicznym zaczerpnięto z modelu wysokość SRTM oraz mapy nadleśnictw.

Dane otrzymano w formie cyfrowej i analogowej. Materiały analogowe wymagały odpowiednio: digitalizacji, transformacji do zadanego układu odniesienia i konwersji do postaci rastrowej, natomiast materiały cyfrowe transformacji do jednego systemu odniesień przestrzennych (UTM, strefa 34), a w przypadku danych wektorowych konwersji do formatu rastrowego. Dane poddano następnie dalszym przetworzeniom – z mapy SRTM wygenerowano mapę nachyleń (modelowanie terenu) i mapę dostępności (modelowanie hydrologiczne i odległości), a z mapy nadleśnictw – mapę własności gruntów leśnych (reklasyfikacja).

Wstępne przetwarzanie materiałów źródłowych oraz późniejsze analizy wykonano, wykorzystując oprogramowanie GIS: Erdas Imagine (8.7) i ArcGIS (8.2 i 9.0) oraz pakiet statystyczny *STATISTICA*.

2.2 *Metody*

Zmiany powierzchni leśnej modelowano, stosując metody empiryczno-statystyczne bazujące na metodzie regresji nieliniowej, która w połączeniu z technikami GIS pozwala na tworzenie modeli w pełni przestrzennych [20]. Metody zastosowano do modelowania statycznego (analizę początkowego i końcowego stanu powierzchni leśnej) i dynamicznego (zmiany – model stop-klatki). Modelowanie obejmowało lata 1987-2000. W modelach objaśniane były

zmiany występowania powierzchni leśnej (konwersja) oraz zmiany struktury lasu na poziomie krajobrazu, wyrażane przez zmiany udziału krawędzi (średni efekt krawędzi wynosił około 30 m ≈ 1 piksel) i wnętrza lasu w całkowitej powierzchni lasu (modyfikacja). Przyjęto, że na poziomie regionalnym modelowanie statyczne lasu dotyczyć będzie wpływu czterech czynników (przyrodniczych i antropogenicznych; zmienne pierwotne): wysokości bezwzględnej, nachyleń stoków oraz własność lasów (Lasy Państwowe (LP) i lasy nie LP) i dostępności (komunikacja i odległość od obszarów zabudowanych). W modelu dynamicznym uwzględniono dodatkowo wpływ dwóch czynników: lesistości i struktury lasu.

Pierwszym etapem w konstruowaniu modelu było zdefiniowanie pól obliczeniowych (analiza autokorelacji – semiwariogramy; [21]). Następnie wyznaczono wartości zmiennych objaśniających i objaśnianych. Liczbę zmiennych pierwotnych (dla modeli statycznych i dynamicznych) zredukowano, wykorzystując analizę głównych składowych PCA [10, 17, 22]. Założono, zgodnie z kryterium Kaisera-Guttmana, że w modelu uwzględniane będą tylko składowe główne o wartościach własnych większych od 1.

Zmiennymi objaśnianymi w modelu były lesistość i struktura lasu oraz ich zmiany przedstawione w postaci sześciu wskaźników: lesistości i wskaźnika struktury lasu (statyczne), względnej zmiany lesistości, względnego zalesienia, względnego wylesienia oraz zmiany wskaźnika struktury lasu (dynamiczne) (tab. 1).

Tabela 1. Zmienne objaśniane w modelu empiryczno-statystycznym [20].

Nazwa zmiennej	równanie
Lesistość	$L_{it}=l_{it}*100/p_i$
Wskaźnik struktury lasu	$KW_{it}=k_{it}*100/w_i$
Względna zmiana lesistości	$\Delta L_i=(l_{it} - l_{i(t-1)})*100/ l_{i(t-1)}$
Względne zalesienia	$ZL_i=zl_{i(t-1,t)}*100/ n_{i(t-1)}$
Względne wylesienia	$WL_i=wl_{i(t-1,t)}*100/ l_{i(t-1)}$
Zmiana wskaźnika struktury lasu	$\Delta KW_{i(t-1,t)}=KW_{it} - KW_{i(t-1)}$
l_{it}: powierzchnia leśna w i-tym polu obl. w momencie czasowym t; n_{it}: powierzchnia nieleśna w i-tym polu obliczeniowym w momencie czasowym t; p_i: powierzchnia i-tego pola obl.; $zl_{i(t-1,t)}$: powierzchnia obszarów zalesionych w i-tym polu obliczeniowym, między momentami czasowymi (t-1) i t; $wl_{i(t-1,t)}$: powierzchnia obszarów wylesionych w i-tym polu obliczeniowym, między momentami czasowymi (t- 1) i t	

Wartości wskaźników wygenerowano, wykorzystując analizę sąsiedztwa i algebrę map, w polach obliczeniowych na podstawie informacji zawartej na dwóch mapach: konwersji powierzchni leśnej (1987-2000) oraz modyfikacji powierzchni leśnej (1987-2000). Analiza wykresów rozrzutu wartości zmiennych objaśniających i objaśnianych pozwoliła sformułować wstępne założenie dotyczące charakteru zależności pomiędzy zmiennymi. Ustalono, że zależności opisane są przez funkcję asymptotyczną lub wykładniczą [20]. Odpowiednio równanie asymptoty zapisywane było w postaci:

$$y_i=a/[1+(b*exp(c*x_i))]$$

gdzie: x_i to zmienna objaśniająca w *i*-tym polu obliczeniowym, y_i to zmienna objaśniana w *i*-tym polu obliczeniowym, *a* określa asymptotyczny poziom nasycenia; na podstawie wykresu rozrzutu punktów z badanej próby i wcześniejszych założeń uwzględniających wyniki z dostępnej literatury został on ustalony na poziomie 100% dla modelu wykorzystywanego do opisu zmian związanych z udziałem procentowym, *b, c* to estymowane parametry funkcji określające odpowiednio: nachylenie funkcji i położenie punktu przegięcia.

Równanie wykładnicze przyjmowało natomiast postać:

$$y_i=d*exp(g*x_i)+h$$

gdzie: x_i to zmienna objaśniająca w *i*-tym polu obliczeniowym, y_i to zmienna objaśniana w i-tym polu obliczeniowym, *d, g, h* to estymowane parametry funkcji, określające odpowiednio nachylenie funkcji, maksimum lub minimum w zależności od charakteru funkcji oraz współczynnik przesunięcia na osi odciętych.

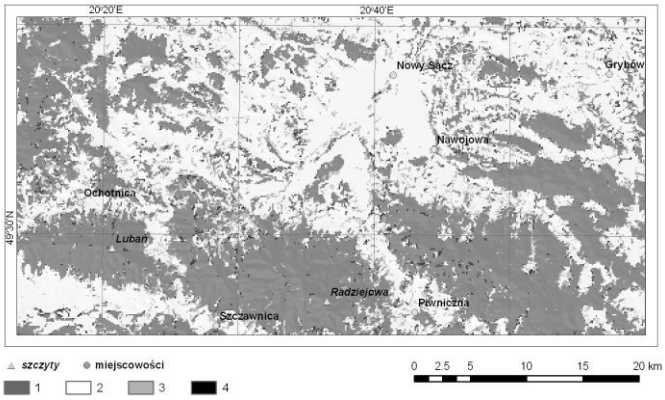
Do aproksymacji parametrów wszystkich równań regresji zastosowano estymację metodą najmniejszych kwadratów [2, 23]. Ewaluację dopasowania modelu do danych przeprowadzono, wykorzystując algorytm Levenberga-Marquardta (poziom ufności = 0,95, istotność α=0,05; [23]). Dodatkowo przeprowadzono wizualną ocenę wyników na podstawie wykresów zależności pomiędzy wartościami oczekiwanymi i przewidywanymi. Weryfikację przestrzenną umożliwiło przedstawienie na mapach wartości oczekiwanych i przewidywanych oraz reszt z regresji.

3 WYNIKI

W latach 1987-2000 na badanym obszarze Karpat lesistość względem stanu początkowego wzrosła o 7%. Zalesienia objęły około 13% terenów nieleśnych, a wylesienia ponad 5% obszarów leśnych. Wskaźnik struktury wzrósł o 5%. Największą dynamikę zmian zarówno dotyczących powierzchni leśnej, jak również jej struktury, zaobserwowano przy granicy lasu (tab. 2, rys. 2).

Tabela 2. Zmian powierzchni leśnej (1987-2000).

Rok	Pow. lasu [ha]	L [%]	KW [%]
1987	74863.05	46.08	22.00
2000	82824.81	50.98	26.64



Rys. 2. Konwersja powierzchni leśnej w okresie 1987-2000. (1) – las, bez zmian w okresie 1987-2000; (2) – obszary nielesne, bez zmian w okresie 1987-2000; (3) – obszary zalesione w okresie 1987-2000; (4) – obszary wylesione w okresie 1987-2000.

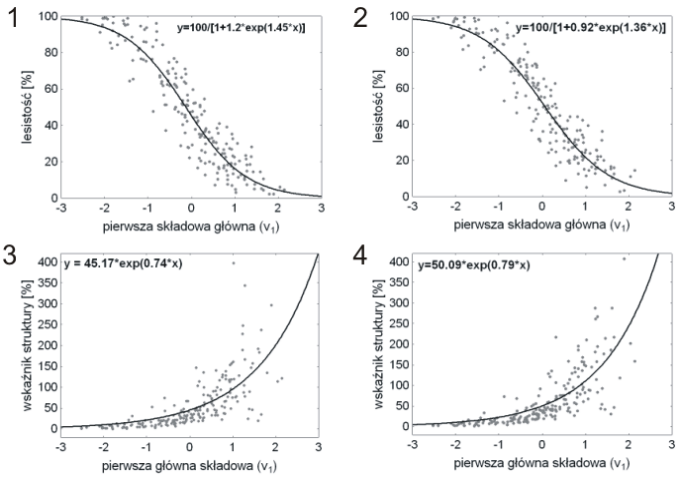
Tabela 3. Związki pomiędzy zmiennymi objaśniającymi i objaśnianymi.

Zmienna objaśniana	Funkcja	R	Ww	F	df	p
Lesistość 1987	as	0.94	0.87	2747.75	2	0.00
Lesistość 2000	as	0.93	0.87	3276.27	2	0.00
Struktura lasu 1987	wd	0.69	0.48	247.90	2	0.00
Struktura lasu 2000	wd	0.71	0.51	259.41	2	0.00
Względna zmiana lesistości	wd	0.67	0.45	168.61	2	0.00
Względne zalesienia	wd	0.83	0.69	830.51	2	0.00
Względne wylesienia	wd	0.82	0.67	565.55	2	0.00
Zmiana struktury lasu	wd	0.45	0.2	42.44	2	0.00

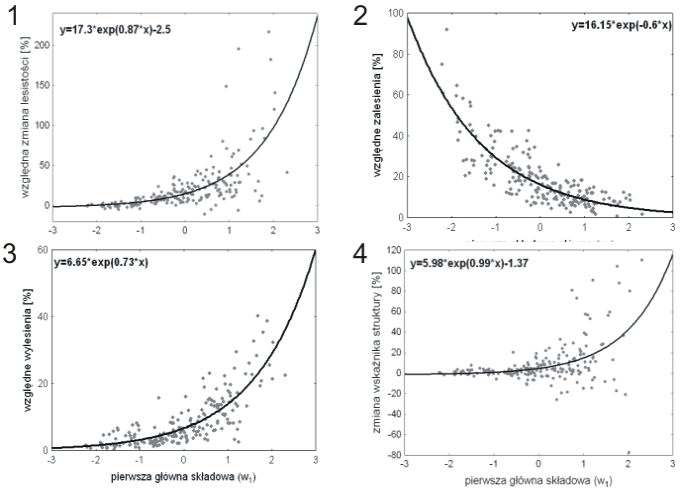
as: funkcja asymptotyczna; wd: funkcja wykładnicza;
R: współczynnik korelacji wielorakiej; Ww: udział wariancji wyjaśnionej.

Analiza PCA zmiennych pierwotnych ograniczyła liczbę zmiennych objaśnianych do dwóch: jednej dla modeli statycznych i jednej dla modeli dynamicznych (składowe wyczerpały odpowiednio 66,77% i 68,45% zmienności). Zmienne pierwotne były bardzo silnie lub silnie, liniowo, ujemnie (jedynie dostępność dodatnio) skorelowane ze składowymi głównymi.

Modele lesistości i struktury lasu dla lat 1987 i 2000 przedstawiały bardzo silne, dodatnie i istotne statystycznie, odpowiednio asymptotyczne i wykładnicze zależności między zmiennymi (tab. 3, rys. 3). Największą lesistością w latach 1987 i 2000 na badanym terenie charakteryzowały się pasma Beskidu Sądeckiego i Beskidu Niskiego, najmniejszą Kotlina Sądecka (rys. 2). Model względnej zmiany lesistości opisuje silną, dodatnią i istotną statystycznie wykładniczą zależność pomiędzy zmiennymi (tab. 3, rys. 4). Największe względne zmiany lesistości odnotowano w Kotlinie Sądeckiej i innych obniżeniach, najmniejsze w wyższych partiach pasm Beskidu Sądeckiego i Niskiego (rys. 2). Względne zalesienia wykładniczo malały, a względne wylesienia wzrastały ze wzrostem wartości składowej objaśniającej. Zależności były bardzo silne, dodatnie i istotne statystycznie (tab. 3, rys. 4). Udział zalesień wzrastał, a udział wylesień malał w kierunku z północy na południe. Zmiana struktury lasu wykładniczo wzrastała ze wzrostem wartości składowej objaśniającej dynamicznej. Zależność była słaba, dodatnia i istotna statystycznie (tab. 3, rys. 4).



Rys. 3. Statyczne modele zmian powierzchni leśnej. (1) – lesistość w roku 1987; (2) – lesistość w roku 2000; (3) – wskaźnik struktury w roku 1987 (4) – wskaźnik struktury w roku 2000.



Rys. 4. Dynamiczne modele zmian powierzchni leśnej. (1) – zmiana względnej lesistości; (2) – względne zalesienia; (3) – względne wylesienia (4) – zmiana wskaźnika struktury.

4 ZMIANY POWIERZCHNI LEŚNEJ W RELACJI DO WYBRANYCH CZYNNIKÓW NATURALNYCH I ANTROPOGENICZNYCH

Zmiany powierzchni leśnej związane z zalesieniami są obecnie obserwowane w całych Karpatach Polskich oraz wielu innych górach świata [11] i stanowią efekt zaniku wcześniejszej silnej presji człowieka na lasy górskie. Zmiany te wynikają przede wszystkim z rezygnacji z rolniczego użytkowania ziemi i sukcesji wtórnej na obszarach porzuconych oraz z planowych zalesień [18, 11, 12]. Procesy związane ze wzrostem powierzchni leśnej odnotowano również na obszarze testowym. Z utworzonych modeli lesistości wynika, że zróżnicowanie pokrycia terenu, opisanego w pracy przez dwie klasy, powierzchnię leśną i nieleśną, cechuje wyraźna strefowość determinowana przez zmienne objaśniane. Na obszarze testowym wyróżnić można trzy strefy: nieleśną (lesistość do 25%, duży udział krawędzi lasu), leśno-nieleśną (lesistością 25%-75% i podobnym udziałem krawędzi i wnętrza) i leśną (lesistość powyżej 75% oraz duży udział wnętrza lasu).

Przedstawiona strefowość jest w dużej mierze uwarunkowana przez wysokość bezwzględną i nawiązuje do piętrowego zróżnicowania pokrycia terenu, opisanego w skali całych Karpat między innymi przez Guzika [5, 6], Jagłę i in. [9] oraz w wybranych grupach górskich przez Trolla [24, 25]. Z porównania zależności otrzymanych dla badanych momentów czasowych wynika, że na całym obszarze obserwowany jest wzrost lesistości i współczynnika struktury lasu w latach 1987-2000. Odnotowane zmiany wskazują na wzrost homogeniczności i udziału powierzchni leśnych na obszarach marginalnych dla użytkowania rolniczego oraz jednocześnie dużą dynamikę zmian struktury lasu na obszarach korzystnych dla użytkowania rolniczego, która związana jest między innymi z małą powierzchnią gruntów należących do pojedynczych podmiotów, podlegających zalesieniu lub wylesieniu.

Pomimo wyróżnienia trzech stref pokrycia terenu można stwierdzić, że na obszarze testowym zaznacza się, obserwowana obecnie również w innych górach Europy [4, 11], polaryzacja tradycyjnego układu pokrycia terenu. Wzrost powierzchni leśnej oraz powstanie bardziej homogenicznych, zwartych obszarów lasu, może spowodować w nieodległej przyszłości znaczne zmiany w krajobrazie Karpat [11].

5 OCENA METOD MODELOWANIA ZMIAN POWIERZCHNI LEŚNEJ

Zastosowane metody modelowania prowadziły do przestrzennego, zintegrowanego ujęcia przeszłych zmian powierzchni leśnej w górach i odniesienia tych zmian do zróżnicowanego oddziaływania czynników przyrodniczych i antropogenicznych. Wykorzystane materiały i zastosowane metody wpłynęły na jakość uzyskanych wyników [19].

Jednym z założeń postawionych w pracy było wykorzystanie istniejących danych empirycznych, które nie są pozbawione błędów pomiarowych i wynikających z metod zastosowanych przy ich przetwarzaniu [31]. Błędy pojawiające się przy zastosowaniu map satelitarnych powstają przede wszystkim podczas klasyfikacji i dotyczą przeszacowania lub niedoszacowania występowania badanych klas pokrycia terenu. Z uwagi na rozmieszczenie błędów na wykorzystanych mapach leśnych i ich dużą dokładność, a także małe różnice pomiędzy wynikami analizy zmian z uwzględnieniem korekcji błędów i bez uwzględniania korekcji, wydaje się, że ewentualne błędy powstające podczas klasyfikacji zdjęć nie miały znaczącego wpływu na stwierdzone zmiany powierzchni leśnej i relacje w odniesieniu do analizowanych czynników. O dokładności uzyskanych wyników decydowały również błędy geometryczne

pojawiające się przy przetwarzaniu materiałów źródłowych, przede wszystkim mapy nadleśnictw, ze względu na jej jakość.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wysoka rozdzielczość przestrzenna (28.5 m) wykorzystanych w pracy materiałów źródłowych była wystarczająca i pozwalała na szczegółową analizę zmian powierzchni leśnej na obszarze testowym, który charakteryzuje się dużą heterogenicznością pokrycia terenu. Wybrana rozdzielczości czasowa: 13-letnia dla analizy zmian w przeszłości, zdeterminowana dostępnością danych o wysokiej rozdzielczości oraz 10-letnia, dla zmian w przyszłości, nawiązująca do 10-letnich okresów przewidywanych dla tworzenia planów urządzeniowych dla lasów [13, 33] wydaje się minimalną rozdzielczością, którą można stosować przy analizie zmian powierzchni leśnej.

Z rozdzielczością przestrzenną i czasową wiąże się problem autokorelacji przestrzennej [21], którą ograniczono dzięki analizie semiwariancji, na podstawie, której wyznaczono w prosty sposób wielkość pól obliczeniowych pozwalających na wprowadzenie do modelu wartości nieskorelowanych przestrzennie oraz jednocześnie stanowiących reprezentatywną próbę modelowanych zmiennych. Założony brak autokorelacji czasowej przy tylko dwóch momentach czasowych w modelu zmian w przeszłości wydaje się być odpowiedni.

Kolejnymi zagadnieniami dotyczącymi zmiennych uwzględnianych w modelowaniu jest ich redundancja oraz ich zbyt duża liczba [17]. Zastosowanie PCA efektywnie zmniejszało redundancję oraz liczbę zmiennych objaśniających. Zaletą metody jest również możliwość uzyskania wag dla poszczególnych zmiennych pierwotnych w pierwszej składowej głównej, reprezentujących wielkości wpływu poszczególnych czynników przyrodniczych i antropogenicznych na zmiany powierzchni leśnej. Wadą zastosowanej metody jest możliwa zmiana zależności między zmiennymi pierwotnymi a zmiennymi objaśnianymi. W pracy prawie wszystkie zmienne pierwotne są bardzo silnie skorelowane ze zmiennymi otrzymanymi z PCA, nie odnotowano więc tego problemu.

Wyniki uzyskane w modelowaniu empiryczno-statystycznym, wartości współczynników regresji, korelacji wielorakiej i udziału wariancji objaśnionej oraz wizualna ocena wykresów i rycin potwierdzają, że dobrano odpowiednie równania regresji dla modelowania zmian w przeszłości. Prawie wszystkie otrzymane zależności były bardzo silne. Jedynie w przypadku analizy modyfikacji powierzchni leśnej uzyskano słabsze dopasowanie modelu. Obserwowany na wykresach rozrzut wartości uniemożliwiał jednak dobre dopasowanie jakiejkolwiek funkcji i sugerował, że albo zjawisko jest losowe, albo należałoby w dalszych analizach wykorzystać inne zmienne objaśniające. Zastosowanie nieliniowych funkcji, w porównaniu z liniowym dopasowaniem funkcji, zastosowanym m.in. w pracach Trolla [24, 25] i Kozaka [11], pozwoliło na lepsze dopasowanie zależności. Wykorzystanie samych metod statystycznych nie pozwalało na przestrzenne ujęcie zmian powierzchni leśnej [14, 16]. Dodanie metod GIS doprowadziło do utworzenia w pełni przestrzennych modeli.

Przedstawiony powyżej wysoki stopień dopasowania funkcji regresji pozwala stwierdzić, że kolejny element wpływający na dokładność modeli – zmienne – zostały odpowiednio dobrane. Dodatkowo potwierdzona została teza, że aby oszacować zmiany pokrycia terenu niekonieczne jest uwzględnianie wszystkich możliwych przyczyn bezpośrednich i pośrednich [30]. W modelu udało się ponadto zintegrować wpływ czynników przyrodniczych i antropogenicznych (wysokości bezwzględnej, nachylenia, dostępności, własności gruntów leśnych, lesistości i struktury lasu), objaśniających zmiany powierzchni leśnej. Dwa z czynników objaśniających w modelu dynamicznym są jednocześnie czynnikami objaśnianymi w modelu statycznym, ponieważ zmiany pokrycia terenu uwarunkowane są stanem analizowanych zmiennych w momencie początkowym badań [32].

Wykorzystane czynniki są również odpowiednio dobrane do regionalnej skali badań. Przy modelowaniu zmian powierzchni leśnej w skali lokalnej, należało by uwzględnić większą ilość czynników o bardziej szczegółowym charakterze, między innymi czynniki siedliskowo-glebowe, które powinny mieć znaczący wpływ na decyzje podejmowane przy delimitacji obszarów pod zalesienia. Przy analizach dla całego obszaru Polskich Karpat należałoby uwzględnić większą liczbę czynników społeczno-ekonomicznych, przede wszystkim demograficznych, odnoszących się między innymi do struktury zatrudnienia.

Utworzone modele zmian są modelami, w których polem podstawowym był piksel, a nie np. jednostki administracyjne o dużej powierzchni, jak gminy lub powiaty. Wykorzystanie małego pola podstawowego pozwalało na szczegółową przestrzenną analizę zjawiska, która jest istotna szczególnie w badaniach w skali regionalnej lub lokalnej.

Pomimo bardzo dobrych wyników dla obszaru testowego, wadą modelowania empiryczno-statystycznego jest jego ograniczenie do danego obszaru testowego i momentu czasowego. Charakter otrzymywanych zależności jest najczęściej zachowywany, natomiast dla poszczególnych obszarów testowych i momentów czasowych wskazana jest każdorazowa estymacja parametrów funkcji [16].

Poruszone problemy metodyczne wpływają bez wątpienia na jakość otrzymanych wyników, a duża ich część wynika z dokładności danych. Problemy te można łatwo usunąć, zmieniając zestaw materiałów źródłowych na materiały o większej rozdzielczości przestrzennej lub czasowej oraz obciążone mniejszym błędem pochodzącym z przetworzenia danych.

6 WNIOSKI

W pracy przedstawiono ścieżkę modelowania zmian wybranego typu pokrycia terenu (powierzchni leśnej) w przestrzeni i w czasie. Starano się przedstawić adekwatny dla rozważanego problemu tok postępowania, w którym możliwe jest wykorzystanie danych empirycznych o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Istotne było wykorzystanie szerokiego zakresu metod analizy przestrzennej oferowanych przez systemy informacji geograficznej oraz metod statystycznych, które mogą być przydatne zwłaszcza w modelowaniu złożonych zjawisk przestrzennych.

Stwierdzono związki rozmieszczenia lasów z wysokością bezwzględną, nachyleniem, dostępnością i własnością gruntów leśnych oraz zależność zmian powierzchni leśnej od czterech wymienionych czynników oraz lesistości i struktury lasu w momencie początkowym badań. Dobrane czynniki właściwie opisywały zarówno rozmieszczenie, jak i zmiany lasów w danym momencie czasowym.

Uznano, że przedstawiona ścieżka modelowania empiryczno-statystycznego z wykorzystaniem wielowymiarowej metody regresji nieliniowej w połączeniu z technikami GIS, jest odpowiednim narzędziem badawczym umożliwiającym w pełni przestrzenną analizę przeszłych zmian powierzchni leśnej. Może być ona również wykorzystana do modelowania innych dowolnie wybranych klas pokrycia terenu. Podejście dyskretne do modelowania zmian w czasie, z wykorzystaniem metody „stop-klatki", wydaje się być wystarczające dla analizy zmian pokrycia terenu.

Przedstawiony model może być wykorzystany w procesie planowania przestrzennego do wskazania odpowiednich kierunków zagospodarowania danego terenu. W ten sposób można przejść od badań naukowych do zastosowań praktycznych, w których istnieje potrzeba znajdowania obszarów najbardziej podatnych lub narażonych na zmiany.

Wyniki uzyskane dla obszaru testowego potwierdzają, że zastosowany tok postępowania umożliwia odpowiedź na trzy podstawowe pytania: „gdzie?", „kiedy?" i „dlaczego?" nastąpiły lub nastąpią zmiany modelowanego typu pokrycia terenu. Ścieżki postępowania zaproponowane w opracowaniu mogą być zaadaptowane dla innych regionów górskich, z tym samym zestawem czynników objaśniających zmiany pokrycia terenu. Analizy w innych obszarach na przykład nizinnych, wymagałyby zmiany zestawu zmiennych objaśniających.

BIBLIOGRAFIA

1) Baker W.L., (1989). A review of models of landscape change. Landscape Ecology, 2 (2), 111-133.
2) Brant S., (1999). Analiza danych, Metody statystyczne i obliczeniowe. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 730.
3) Briassoulis H., (2000). Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. [w:] *The Web book of Regional Science*. [red.] S. Loveridge, West Virginia University, Morgantown.
4) Caraveli H., (2000), A comparative analysis on identification and extensification in Mediterranean agriculture: dilemmas for LFA's policy. Journal of Rural Studies, 16, 231-242.
5) Guzik C., (1992). Pionowa zmienność użytkowania ziemi w Karpatach. Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 91, 55-71.
6) Guzik C., (1995). Rolnicze użytkowanie ziemi w Karpatach. [w:] Karpaty Polskie. Przyroda człowiek i jego działalność. [red.] J. Warszyńska, Uniwersytet Jagielloński, 239-252.
7) Hamilton L., Gilmour D.A., Cassels D.S., (1997). Mountain forests and forestry. [w:] Mountains of the World:

a global priority. [red.] B. Messerli, J. Ives, Parthenon Publishing Group, 281-311.
8) Irwin E.G., Geoghegan J., (2001). Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 85, 7-23.
9) Jagła S., Kostuch R., Kurek S., Pawlik-Dobrowolski J., (1981). Analiza użytkowania ziemi w Karpatach na tle środowiska przyrodniczego. Problemy Zagospodarowania Ziem Górskich, 22, 39-66.
10) Jollife I.T., (1986). Principal Component Analysis. Springer-Verlag, 271.
11) Kozak J., (2005). Zmiany powierzchni lasów w Karpatach Polskich na tle innych gór świata. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 136.
12) Kozak J., Ostapowicz K., Szablowska-Midor A., Widacki W., (2004). Environmental background of land abandonmention the western Beskidy Mts. Ekologia, Bratislava, 23, 1, 116-126.
13) Krajowy Program Zwiększania Lesistości. (2003). Ministerstwo Środowiska, 53.
14) Lambin E.F., (1994). Modelling deforestation processes.TREES Series B: RR 1, EC, 113.
15) Lambin E.F., Turner B.L., Geist H. J., Agbola S.B., Angelsen A., Bruce J.W., Coomes O. T., Dirzo R., Fischer G., Folke C., George P.S., Homewood K., Imbernon J., Leemans R., Li X., Moran E.F., Mortimore M., Remakrishnan P.S., Richards J.F., Skånes H., Steffen W., Stone G. D., Svedin U., Veldkamp T.A., Volgel C., Xu J., (2001). The cause of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environmental Change, 11 (4) 261-269.
16) Lambin E.F., Rounsevell M.D.A., Geist H.J., (2000). Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity. Agriculture, Ecosystems and Environment, 82, 321-331.
17) Lesschen J.P., Verburg P.H., Staal S.J., (2005). Statistical methods for analysing the spatial dimention of changes in land use and farming systems. LUCC Report Series 7, Wageningen University, 82.
18) McDonald A.J., Crabtree J.R., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Lazpita J.G., Gibon A., (1998). Investigation of the Utility of Spectral Vegetation Indices for Determining Information on Coniferous Forests. Remote Sensing of Environment, 66, 250-272.
19) Moser S.C., (1996). A Partial Instruction Module on Global and Regional Land Use/Cover Change: Assessing the Data and Searching for General Relationships. GeoJournal, 39, 3, 241-283.
20) Ostapowicz K., Spatial explicitly modelling of past land cover changes. Environmental & Ecological Statistics, (w recenzji).
21) Overmars K.P., de Koning G.H.J, Veldkamp A., (2003). Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. Ecological Modeling, 164, 257-270.
22) Rogerson P.A., (2001). Statistical Methods for Geography. SAGE Publications, 236.
23) Statsoft Inc., (2001). *STATISTICA* (data analysis software system), version 6. www.statsoft.com.
24) Troll M., (1999). Lasy i ich przemiany i przestrzenne zróżnicowanie. [w:] Przemiany środowiska przyrodniczego zachodniej części Beskidów pod wpływem antropopresji. [red.] W. Widacki, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, 15-32.
25) Troll M., 2000, Związek użytkowania ziemi z warunkami środowiska przyrodniczego w Beskidach Zachodnich. Praca doktorska, IGiGP UJ, 186.
26) Turner, B.L. II, Skole D., Sanderson S., Fischer G., Fresco L., Leemans R., (1995). Land-Use and Land-Cover Change; Science/Research Plan. IGBP Report 35, HDP Report 7, IGBP and HDP, 20.
27) Turner, B.L. II, Meyer W. B., (1994). Global Land Use and Land Cover Change: An Overview. [w:] Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. [red.] W. B. Meyer, B. L. Turner II, Cambridge University Press, 3-10.
28) Veldkamp A., Lambin E.F., (2001). Editorial: predicting land-use change. Agriculture, Ecosystems and Environment 85, 1-6.
29) Veldkamp A., Verburg P.H., Kok K., de Koning G.H.J., Priess J., Bergsma A.R., (2001). The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. Environmental Modeling and Assessment, 6, 111–121.
30) Verburg P.H., Schot P., Dijst M., Veldkamp A., (2005). Land use change modelling: current practice and research priorities. GeoJournal, 61 (4), 309-324.
31) Veregin H., (1999). Data quality parameters. [w:] Geographical Information Systems, Principles and Technical Issues. [red.] P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. Rhind, John Wiley & Sons, Inc., t.1, 177-189.
32) Young O.R., Lambin E.F., Alcock F., Haberl H., Karlsson S.I., McConnell W.J., Myint T., Pahl-Wostl C., Polsky C., Ramakrishnan P., Schroeder H., Scouvart M., Verburg P.H., (2006). A portfolio approach to analyzing complex human-environment interactions: institutions and land change. Ecology and Society, 11 (2) 31, (udostępniony online).
33) Zasady Hodowli Lasu obowiązujące w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe. (2002). Dyrektor Generalny Lasów Państwowych, 176.