

ZASTOSOWANIE RÓŻNYCH METOD OKREŚLANIA ZMIAN POKRYCIA TERENU NA OBSZARACH MIEJSKICH Z WYKORZYSTANIEM ZDJĘĆ SATELITARNYCH

Streszczenie. W referacie zostały przedstawione wyniki prac nad określeniem optymalnych metod badania zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi z wykorzystaniem wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych. W trakcie realizacji prac wykorzystano różne typy danych satelitarnych (Landsat TM, SPOT, IRS) w celu porównania ich przydatności dla potrzeb analizy środowiska miejskiego. Przebadano użyteczność różnych metod określania zmian pokrycia terenu, bazujących na cyfrowej analizie zdjęć satelitarnych: porównywania wartości odbicia spektralnego z dwóch terminów rejestracji, porównywania wartości wskaźników zieleni, metodę analizy składowych głównych, metodę analizy wektora zmian, klasyfikację obrazu utworzonego z dwóch terminów rejestracji oraz porównanie wyników niezależnych klasyfikacji. W efekcie wykonanych prac badawczych stwierdzono, że metoda oparta na porównaniu niezależnych klasyfikacji jest najbardziej efektywną dla sporządzania map zmian pokrycia terenów miejskich. Zastosowanie klasyfikacji obiektowej umożliwiło osiągnięcie dokładności wyznaczenia 4 klas gęstości zabudowy rzędu 80%. Analiza wykorzystania różnych typów zdjęć satelitarnych wykazała największą użyteczność do sporządzania map zmian terenów miejskich w przypadku zastosowania połączonych zdjęć wielospektralnych i panchromatycznych z satelity IRS.

1. Wprowadzenie

Śledzenie zmian środowiska geograficznego z wykorzystaniem obrazów satelitarnych stanowi jedno z głównych zastosowań teledetekcji. W miarę rozwoju numerycznych technik przetwarzania obrazów zarysował się problem opracowania efektywnych metod porównywania zdjęć pochodzących z różnych typów satelitów i różnych terminów rejestracji, bazujących na cyfrowej analizie danych. Problem ten ma złożony charakter, obejmuje bowiem zarówno zagadnienia zmienności radiometrycznej zdjęć w zależności od pory rejestracji i charakteru obiektów terenowych, jak również zagadnienia precyzji geometrycznej zdjęć pozyskiwanych za pomocą skanerów wielospektralnych z pokładów różnych satelitów. Ewolucja systemów informacji przestrzennej w kierunku zasilania danymi teledetekcyjnymi stwarza potrzebę opracowania wiarygodnych metod sporządzania map na podstawie analizy porównawczej zdjęć satelitarnych, które umożliwiłyby otrzymywanie informacji o zmianach pokrycia terenu w sposób automatyczny lub półautomatyczny.

Prace badawcze związane z metodyką cyfrowego tworzenia map zmian pokrycia terenu na podstawie zdjęć satelitarnych były prowadzone w kilku ośrodkach naukowo-badawczych w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych (Singh, 1989; Bruzzone, 1997; Mas, 1999; Niemeyer i in., 1999). W pracach tych stosowano przeważnie dane pochodzące z jednego typu satelity, zaś badania dotyczyły na ogół obszarów pokrytych roślinnością. Rozdzielczość terenowa obrazów rejestrowanych przez satelity teledetekcyjne poprzedniej generacji ograniczała jednak ich zakres

stosowania do szczegółowych studiów zmian na obszarach miejskich. Dopiero wprowadzony w ostatnich latach na orbitę indyjski satelita IRS, jak również satelity amerykańskie nowej generacji umożliwiają zwiększenie szczegółowości badań.

W niniejszym artykule zostały przedstawione wyniki prac nad określeniem optymalnej metodyki badania zmian użytkowania ziemi na podstawie numerycznej analizy porównawczej wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych, dostosowanej dla terenów o dużym zróżnicowaniu typów pokrycia, przede wszystkim dla obszarów zabudowanych. W trakcie prac przebadano różne rodzaje zdjęć w celu określenia typu danych satelitarnych najwłaściwszych dla opracowywania map użytkowania ziemi terenów zurbanizowanych oraz przeanalizowano różne metody tworzenia map zmian pokrycia terenu. W efekcie tych prac sformułowano wnioski dotyczące optymalnej metody określania zmian użytkowania ziemi z wykorzystaniem numerycznych sposobów porównywania zdjęć satelitarnych.

2. Obiekt badań

Dla przeprowadzenia prac badawczych wybrano fragment aglomeracji warszawskiej charakteryzujący się dużą różnorodnością typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Występują na nim różne typy zespołów urbanistycznych: obszary zwartej zabudowy wielkomiejskiej, zespoły luźnej zabudowy wielorodzinnej, reprezentowanej przez starsze dzielnice mieszkaniowe, tereny z zabudową luźną typu blokowego oraz obszary zabudowy luźnej jednorodzinnej typu miejskiego. Na badanym obszarze znajdują się duże obiekty przemysłowe i handlowe oraz tereny związane z komunikacją drogową i kolejową. Duże fragmenty obiektu badawczego pokrywają zantropogenizowane tereny zielone: parki miejskie, skwery, zieleńce, ogrody działkowe oraz cmentarze; występują także tereny nie użytkowane gospodarczo. W granicach obiektu znajdują się również grunty orne, łąki, drzewostany iglaste, liściaste i mieszane, a także rzeki i zbiorniki wodne.

Wybrany fragment aglomeracji warszawskiej charakteryzuje się dużą dynamiką zmienności typów pokrycia terenu. W jego obrębie znajdują się zespoły urbanistyczne nowych dzielnic mieszkaniowych, podlegających szybkim zmianom na skutek rozwoju zabudowy na terenach dotychczas użytkowanych rolniczo lub stanowiących nieużytki. Przeobrażenia występują także w obrębie zabudowy zwartej i luźnej w wyniku wznoszenia nowych obiektów handlowych, biurowych i mieszkaniowych. Przekształceniom podlegają również nowo wybudowane osiedla mieszkaniowe poprzez zakładanie na obszarze tych osiedli parków, zieleńców i trawników.

Dla przeprowadzenia prac badawczych wykorzystano dane pochodzące z trzech typów satelitów, charakteryzujących się różną rozdzielczością terenową oraz rozdzielczością spektralną. Były to dane wielospektralne rejestrowane za pomocą skanera Landsat TM i ETM+, skanera SPOT HRV oraz skanera LISS III, zainstalowanego na pokładzie satelity IRS. Ponadto wykorzystano dane panchromatyczne pochodzące z wyżej wymienionych trzech typów satelitów. Obrazy satelitarne pochodziły z przedziału czasowego 1986 – 2000. Zastosowanie różnych typów obrazów satelitarnych pozwoliło na przeprowadzenie analizy porównawczej i

wybór zestawu danych optymalnych dla analizy zmian pokrycia terenu na terenach zurbanizowanych.

3. Ogólna charakterystyka metod badawczych

Metody sporządzania map zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi można generalnie podzielić na trzy grupy:

1. Przetworzenia obrazów i porównywanie wartości odbicia spektralnego z różnych terminów rejestracji;
2. Klasyfikacja obrazu utworzonego z kanałów spektralnych pochodzących z różnych terminów rejestracji;
3. Porównywanie niezależnych klasyfikacji wykonanych dla poszczególnych terminów rejestracji obrazów satelitarnych.

W pierwszej grupie znajdują się metody obejmujące matematyczne kombinacje obrazów pochodzących z różnych dat rejestracji, takie jak: odejmowanie wartości odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych, stosowanie metody ilorazu kanałów, regresji obrazów lub metody składowych głównych. Wykorzystuje się tu także odejmowanie wartości różnorodnych wskaźników (roślinnych, glebowych itp.) utworzonych z oryginalnych kanałów spektralnych. Kluczową sprawą w tego typu pracach jest określenie wartości progowych rozdzielających obszary zmian od obszarów niezmienionych w badanym przedziale czasowym. Problem badawczy stanowi także określenie optymalnego przetworzenia obrazów umożliwiającego wyróżnianie zmian w pokryciu terenu z możliwie najwyższą dokładnością.

Drugie podejście zakłada utworzenie wielokanałowego zbioru składającego się z kanałów spektralnych pochodzących z dwóch terminów rejestracji i klasyfikację tego zbioru w celu określenia zmian w pokryciu terenu. Obszary podlegające zmianom w badanym przedziale czasowym powinny wykazywać charakterystyki spektralne istotnie różniące się od klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi, które nie uległy zmianom. Do sklasyfikowania obrazu można stosować metodę klasyfikacji nienadzorowanej (np. ISODATA) lub jedną z metod klasyfikacji nadzorowanej, jeśli jest możliwe określenie pól treningowych dla obszarów zmian.

Trzecia metoda polega na wykonaniu z możliwie najwyższą dokładnością oddzielnych klasyfikacji dla każdego terminu rejestracji oraz przeprowadzeniu porównania wynikowych map klasyfikacyjnych w celu wyznaczenia obszarów zmian. Liczba wydzielonych klas zależy od rozdzielczości spektralnej poszczególnych typów użytkowania ziemi i pokrycia terenu. Stąd też najistotniejszym zagadnieniem przy tym podejściu jest dobór optymalnej metody klasyfikacji, zapewniającej wysoką wiarygodność map klasyfikacyjnych, gdyż ich dokładność bezpośrednio rzutuje na dokładność sporządzanych map zmian w pokryciu terenu. Spośród najnowszych metod klasyfikacyjnych mogą być tu stosowane metody z wykorzystaniem sieci neuronowych lub metody klasyfikacji obiektowej, stosujące w algorytmach klasyfikacyjnych zasady logiki rozmytej.

4. Wyniki zastosowania poszczególnych metod badawczych

4.1. Metoda odejmowania wartości odbicia spektralnego

Do wykonania tego etapu prac wykorzystano wielospektralne obrazy satelitarne SPOT z 4 maja 1986 roku i z 17 kwietnia 2000 roku. W pierwszej fazie przeprowadzono normalizację obrazu zarejestrowanego w 1986 roku do obrazu z roku 2000. Następnie zastosowano trzy metody tworzenia obrazów różnicowych:

- odejmowania wartości odbicia w oryginalnych kanałach spektralnych,
- odejmowania wartości odbicia w kanałach przetworzonych metodą składowych głównych,
- odejmowania wartości wskaźnika zieleni NDVI utworzonego na podstawie oryginalnych kanałów spektralnych.

W pierwszej metodzie wykorzystano oryginalne wartości odbicia w kanałach SPOT_2 i SPOT_3 otrzymane w wyniku procesu normalizacji obrazów.

W drugiej metodzie zastosowano przetworzenie polegające na takim obrocie w przestrzeni spektralnej oryginalnych danych pochodzących z dwóch terminów rejestracji, aby uzyskać po przekształceniu składowe główne, z których pierwsza będzie reprezentować obszary niezmienione, zaś składowa druga będzie zawierać obszary zmian (Chavez i in., 1989). W celu efektywnego zastosowania tej metody wykorzystuje się tzw. selektywną analizę metodą składowych głównych - SPCA. Do tej analizy wybiera się z wielospektralnego, wieloczasowego zbioru danych ten sam kanał spektralny z dwóch terminów rejestracji i dokonuje obrotu w przestrzeni spektralnej. W niniejszej analizie do badań wykorzystano niezależnie dwa kanały SPOT_2 i SPOT_3.

W trzeciej metodzie wykorzystano przetworzenie umożliwiające wygenerowanie obrazów rozkładu znormalizowanego wskaźnika zieleni – NDVI. Obrazy te, różnicując obszary pokryte roślinnością od terenów antropogenicznych, mogą umożliwić wyróżnianie obszarów zmian polegających na przejściu z klas roślinnych do klas zabudowy. W niniejszej analizie utworzono obrazy rozkładu wskaźnika NDVI dla danych SPOT 1986 i SPOT 2000 i dokonano odjęcia wartości tego wskaźnika, tworząc w ten sposób obraz zmian.

Obrazy różnicowe powstające w wyniku stosowania procedury odejmowania obrazów za pomocą każdej z trzech wyżej wymienionych metod charakteryzowały się wartością średnią różnic odbicia, reprezentującą obszary niezmienione i normalnym rozkładem częstości – histogramem, którego brzegowe obszary reprezentowały obszary zmian. Najistotniejszym elementem tej fazy prac było określenie optymalnych wartości progowych, które umożliwiłyby odróżnienie obszarów zmian od obszarów niezmienionych. Procedurę progowania wykonywano, tworząc z obrazu różnicowego maski zawierające wartości wokół średniej o rozpiętości uzależnionej od wielkości odchylenia standardowego. Badano różne rozpiętości – od 0.5 do 1.5 odchylenia standardowego, każdorazowo oceniając dokładność podziału na obszary zmian i tereny niezmienione za pomocą pól testowych i kontrolnych. Do oceny dokładności zastosowano dwa parametry: dokładność całkowitą i współczynnik Kappa.

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, iż spośród trzech metod odejmowania wartości odbicia spektralnego stosunkowo najwyższą dokładność wyróżniania obszarów zmian, przekraczającą 80 %, zapewnia przetworzenie metodą

składowych głównych, przy wykorzystaniu kanału SPOT_2 i wartości progowej 0.7 odchylenia standardowego. Zbliżoną dokładność można otrzymać wykorzystując oryginalny kanał spektralny SPOT_2 z analogiczną wartością progową, jak w przypadku metody składowych głównych. Zastosowanie wskaźnika zieleni NDVI w tej metodzie wykazało nieco niższą użyteczność tego typu przetworzenia do wydzielenia obszarów zmian.

Optymalne wartości progowe odchylenia standardowego dla wszystkich badanych typów danych (oryginalnych i przetworzonych) zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki wyboru wartości progowych obrazów różnicowych

Typ przetworzenia	Optymalny próg odchylenia standard.	Dokładność całkowita [%]	Współczynnik Kappa
SPOT_2	0.7	83.1	0.5677
SPOT_3	1.2	80.1	0.4197
SPCA_SPOT_2	0.7	83.4	0.5777
SPCA_SPOT_3	1.1	81.3	0.4744
NDVI_SPOT	1.5	78.4	0.3661

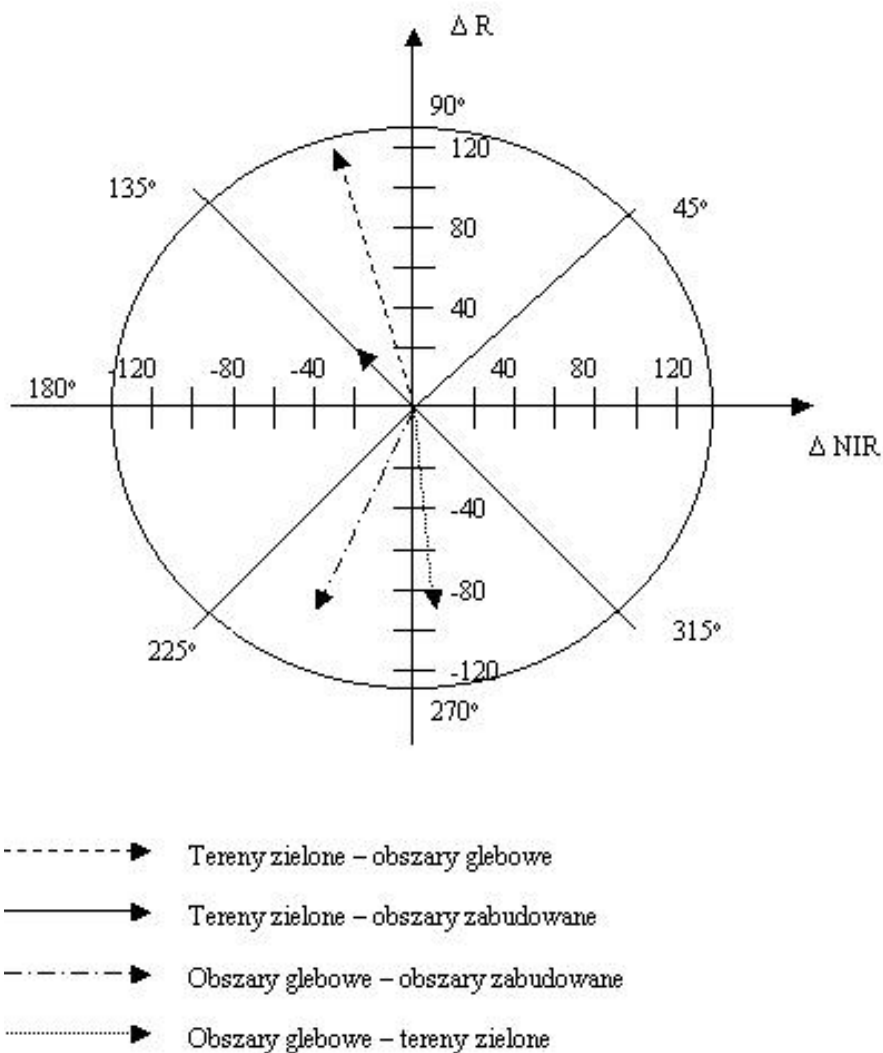
4.2. Metoda analizy wektora zmian

Przedstawione powyżej metody odejmowania wartości odbicia spektralnego pozwalają na wyróżnienie obszarów zmian, jednakże nie umożliwiają ich jakościowego sklasyfikowania. Dlatego też postanowiono przeanalizować użyteczność metody dającej tego typu możliwości, związanej z analizą wektora zmian. Metoda ta opiera się na założeniu, iż poszczególne typy przekształceń pokrycia terenu charakteryzują się określoną wielkością zmian odbicia w odpowiednich zakresach spektrum i kierunkiem tych zmian w przestrzeni spektralnej (Johnson i in., 1998). Najczęściej do wykonania analiz wykorzystuje się zakresy spektralne promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni, gdyż w nich są najlepiej uwidaczniane przeobrażenia środowiska, szczególnie związane z procesami urbanizacyjnymi. W prezentowanej pracy wykorzystano różnicowe obrazy satelitarne SPOT z lat 1986 i 2000, pochodzące z wymienionych zakresów spektrum. Na obszarze obiektu badawczego zostały wybrane zespoły pól testowych, reprezentujące 4 typy zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi:

- zmiany terenów zielonych na obszary zabudowy,
- zmiany terenów zielonych na obszary odkrytej gleby,
- zmiany obszarów odkrytej gleby na obszary zabudowy,
- zmiany obszarów odkrytej gleby na tereny zielone.

Dla każdej kategorii zmian wyznaczono wartości średnie różnic wartości odbicia w zakresie spektrum czerwonego (ΔR) i bliskiej podczerwieni (ΔNIR) - (SPOT – kanał 2 i SPOT – kanał 3). Następnie obliczono długości wektorów zmian oraz

orientację tych wektorów w przestrzeni spektralnej zdefiniowanej wyżej wymienionymi zakresami. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w na rysunku 1 oraz w tabeli 2.



Rys. 1. Charakter zmian pokrycia terenu na podstawie analizy obrazów SPOT 1986 i 2000

Tabela Nr 2
Ocena zmian pokrycia terenu na podstawie analizy obrazów SPOT 1986 i 2000

Charakter zmian pokrycia terenu	Wielkość zmian [%]	Kierunek zmian [°]
Zmiany terenów zielonych na obszary zabudowy	11.7	140
Zmiany terenów zielonych na obszary odkrytej gleby	49.1	105

Zmiany obszarów odkrytej gleby na obszary zabudowy	39.2	247
Zmiany obszarów odkrytej gleby na tereny zielone	33.7	274

Z przeglądu wyników zastosowania metody analizy wektorów zmian wynika, iż największe wielkości zmian, wyrażone długością wektora, występują w przypadku przejścia klasy terenów zielonych do klasy obszarów glebowych. Nieco mniejsze wielkości można zaobserwować w przypadku przejścia obszarów odkrytej gleby do kategorii obszarów nowej zabudowy, lub terenów zielonych, przy czym te dwa typy zmian są odróżnialne dzięki różnym kierunkom zmian, wyrażonym orientacją wektorów w przestrzeni spektralnej. Stosunkowo najmniejsze wielkości zmian występują w przypadku przejścia terenów zielonych bezpośrednio do klasy obszarów zabudowanych, szczególnie dla obszarów nowych osiedli mieszkaniowych charakteryzujących się dużym udziałem zieleni miejskiej.

4.3. Metoda klasyfikacji zbioru zawierającego dane spektralne z dwóch terminów rejestracji

W metodzie tej przyjmuje się, że w zbiorze wielospektralnym, składającym się z danych pochodzących z dwóch terminów rejestracji obszary zmian będą wykazywać charakterystyki spektralne, różniące się w sposób istotny od charakterystyk obszarów niezmiennych (Singh 1986).

Do badań w tej części prac wykorzystano obrazy wielospektralne SPOT z 1986 i 2000 roku. Kanały 1, 2 i 3 z obu obrazów połączono, tworząc jeden sześciokanałowy zbiór danych spektralnych. Następnie wykonano klasyfikację tego zbioru dwoma metodami:

- klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA,
- klasyfikacji nadzorowanej (metoda największego prawdopodobieństwa).

W trakcie klasyfikacji nienadzorowanej metodą ISODATA stosowano różne liczby naturalnych zgrupowań pikseli - klastrów - i iteracji, w celu wyodrębnienia klas o charakterze informacyjnym. W wyniku tych działań utworzono finalnie zbiór składający się z 15 klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi, w tym zawierający klasę obszarów zmian. W kolejnej fazie prac dokonano oceny jakości wyróżnienia klasy zmian za pomocą uprzednio wybranych pól kontrolnych. Ponieważ uzyskano niezadowalającą dokładność wydzielenia obszarów zmian ok. 44%, postanowiono zastosować drugą metodę sklasyfikowania zbioru – klasyfikacji nadzorowanej metodą największego prawdopodobieństwa.

W tym celu dokonano wyboru pól treningowych do przeprowadzenia tego typu klasyfikacji. Postanowiono wykonać klasyfikację z podziałem na główne typy pokrycia terenu i użytkowania ziemi: tereny zabudowane, drzewostany iglaste, drzewostany liściaste i mieszane, obszary rolnicze pokryte roślinnością, obszary glebowe nie pokryte roślinnością, wody. Po dokonaniu wyboru pól testowych przeprowadzono analizę rozdzielności klas, badając zbieżność ich charakterystyk w przestrzeni spektralnej. W przypadku klasy zmian najwyższą rozdzielność uzyskano w

stosunku do klas wód i drzewostanów iglastych, zaś najniższą w stosunku do klasy obszarów rolniczych pokrytych roślinnością.

Po wykonaniu klasyfikacji nadzorowanej przeprowadzono ocenę jej jakości za pomocą pól kontrolnych. Zastosowano 4 kryteria stosowane w oprogramowaniu do przetwarzania i klasyfikacji obrazów ENVI: dokładność producenta, dokładność użytkownika, dokładność całkowitą oraz współczynnik Kappa. Wyniki oceny dokładności klasyfikacji przedstawia tabela 3.

Tabela 3

Dokładność klasyfikacji nadzorowanej zbioru wieloczasowego SPOT 1986_2000

Nazwa klasy	Dokładność producenta [%]	Dokładność użytkownika [%]
Tereny zabudowane	87.8	96.6
Drzewostany liściaste	86.1	75.9
Drzewostany iglaste	95.0	99.7
Tereny glebowe	98.2	71.2
Obszary rolnicze	70.1	84.8
Wody	99.7	100.0
Obszary zmian	64.6	50.1

Generalnie osiągnięto dość dobrą dokładność, charakteryzującą się dokładnością całkowitą – 85.4% i współczynnikiem Kappa – 0.8267. Jednakże w przypadku obszarów zmian dokładność ta nie jest zbyt wysoka - 64.6% (dokładność producenta). Dlatego też, w celu znalezienia optymalnego rozwiązania, postanowiono przebadać różne metody niezależnej klasyfikacji obrazów i porównywania obrazów klasyfikacyjnych.

4.4. Metoda porównywania obrazów klasyfikacyjnych z poszczególnych terminów rejestracji

Podstawowym założeniem tej metody badania zmian jest wykonanie niezależnych klasyfikacji obrazów satelitarnych dla każdego terminu rejestracji, przy zastosowaniu tego samego zestawu klas pokrycia terenu oraz porównanie obrazów klasyfikacyjnych. Dokładność wyróżnienia poszczególnych klas pokrycia terenu bezpośrednio rzutuje na precyzję wyznaczania obszarów zmian. Stąd też niezwykle istotne jest zastosowanie takiej metody klasyfikacji, która zapewniłaby sklasyfikowanie obrazu satelitarnego z możliwie najwyższą dokładnością. W prezentowanej pracy przebadano różne sposoby klasyfikacji w celu wyboru metody optymalnej dla założonego celu badawczego.

W pierwszej fazie tego etapu prac postanowiono przebadać użyteczność zastosowania klasycznej metody klasyfikacji nadzorowanej – metody największego prawdopodobieństwa. Na badanym obszarze Warszawy wybrano najpierw pola treningowe reprezentujące poszczególne kategorie pokrycia terenu i użytkowania

ziemi. W pierwszym etapie zdecydowano wydzielić 13 następujących typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi:

- zabudowa zwarta miejska,
- zabudowa luźna wielorodzinna typu blokowego,
- zabudowa luźna wielorodzinna typu miejskiego,
- zabudowa luźna jednorodzinna typu miejskiego,
- lasy liściaste,
- lasy iglaste,
- lasy mieszane,
- ogrody działkowe,
- tereny przemysłowe, handlowe i komunikacyjne,
- grunty orne pokryte roślinnością,
- tereny glebowe nie pokryte roślinnością,
- obszary trawiaste,
- ciek i zbiorniki wodne.

Po wybraniu pól treningowych dla wymienionych klas i przeprowadzeniu analizy ich rozdzielności poprzez badanie zbieżności charakterystyk spektralnych (*transformed divergence*) stwierdzono stosunkowo niską rozdzielność kilku klas reprezentujących różne formacje roślinne oraz tereny antropogeniczne. Dokonano zatem połączenia klas: lasy liściaste, lasy mieszane i ogrody działkowe w jedną klasę – drzewostany mieszane oraz klas: zabudowa zwarta miejska i tereny przemysłowe w klasę zabudowa zwarta. Następnie wykonano klasyfikację nadzorowaną metodą największego prawdopodobieństwa (*maximum likelihood classifier*), wykorzystując zestaw pól treningowych dla 10 klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Ocena dokładności tej klasyfikacji została przedstawiona w tabeli 6.

Tabela 4

Wyniki oceny klasyfikacji nadzorowanej obrazu IRS 2000 dla 10 klas

Nazwa klasy	Dokładność producenta [%]	Dokładność użytkownika [%]
Zabudowa zwarta	95.4	84.5
Zabudowa luźna miejska	64.4	68.6
Zabudowa luźna blokowa	58.0	43.2
Zabudowa luźna jednorodzinna	56.0	36.7
Drzewostany mieszane	44.5	97.5
Drzewostany iglaste	99.8	97.2
Grunty orne pokryte roślinnością	92.2	94.5
Tereny glebowe nie pokryte roślinnością	99.9	100.0
Obszary trawiaste	78.0	38.0
Cieki i zbiorniki wodne	96.8	100.0

Dokładność całkowita – 77.0%

Współczynnik Kappa – 0.7425.

Wyniki zamieszczone w tabeli 4 wskazują, iż mimo dość dobrej generalnej dokładności klasyfikacji niektóre z klas, zwłaszcza związanych z podziałem obszarów zabudowanych na podkategorie, nie osiągają zadowalającej precyzji rozpoznania, występuje bowiem częściowe nakładanie się charakterystyk spektralnych poszczególnych typów zabudowy. W dalszej części prac postanowiono zatem przebadać użyteczność zastosowania innych metod klasyfikacji, wykorzystujących w procesie klasyfikacyjnym informacje pozaspektralne (tzw. klasyfikacja obiektowa).

4.5. Metoda tworzenia map różnicowych na podstawie porównywania klasyfikacji obiektowej obrazów satelitarnych

Do wykonania tego etapu prac wybrano wielospektralne dane LISS-III oraz dane panchromatyczne z satelity IRS-1C. Włączenie do analiz kanału panchromatycznego, dobrze oddającego dzięki wysokiej rozdzielczości (5 m) strukturę miasta, pozwoliło na badanie zróżnicowania terenów miejskich.

W prezentowanej pracy wykorzystano oprogramowanie eCognition. Oprogramowanie to umożliwia m.in. wykonanie segmentacji wielopoziomowej, pozwalającej na wyróżnienie homogenicznych elementów obrazu, które na dalszych etapach klasyfikacji mogą stanowić obiekty poddawane procesowi klasyfikacji (zamiast pojedynczych pikseli obrazu). W zależności od typu danych wejściowych (zróżnicowania obiektu badawczego) stosuje się różne wartości parametrów charakteryzujących stopień agregacji pikseli. W ramach prezentowanych prac przeprowadzono analizy w celu określenia optymalnych wartości tych parametrów dla obszarów miejskich. W wyniku tych prac postanowiono przeprowadzić segmentację na trzech poziomach szczegółowości (z różnymi parametrami skali), stosując odpowiednie wagi dla poszczególnych kanałów spektralnych, wydobywające użyteczność kanału panchromatycznego. Oprogramowanie eCognition umożliwia także założenie hierarchii wyznaczanych klas, co stanowi podstawę do wykorzystania funkcji systemu, pozwalających na korzystanie z wzajemnych relacji pomiędzy klasami i poziomami szczegółowości.

W pierwszym etapie prac wykonano pierwotną klasyfikację obrazów IRS z 1997 i 2000 roku, z podziałem na 9 klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi: 3 klasy zabudowy, 2 typy drzewostanów, 2 klasy terenów zielonych, tereny glebowe oraz wody. W procesie klasyfikacyjnym zastosowano metodę *standard nearest neighbour*. Metoda ta w odróżnieniu od klasycznej metody „najbliższego sąsiada” umożliwia wykorzystywanie jednej przestrzeni spektralnej dla wszystkich analizowanych klas, zapewniając tym samym ich lepszą separację. Oprogramowanie eCognition wykorzystuje do procesu klasyfikowania obiektów zasadę logiki rozmytej, bazującą na stosowaniu dla poszczególnych wyznaczanych klas tzw. funkcji przynależności, charakteryzujących stopień przynależności do danej klasy w zależności od warunków określonych przez operatora. Ten typ klasyfikowania, zwany „miękkim”, pozwala na wykorzystanie, w większym stopniu niż w przypadku klasyfikatorów „twardych”, (np. metodą prostopadłościów), wiedzy o obiekcie badawczym (Zhang i in., 1998)

W dalszej części prac dokonano zgrupowania wyżej wymienionych klas w trzy główne kategorie pokrycia terenu: obszary zabudowane, tereny niezurbanizowane oraz wody. Mapy utworzone w wyniku zgrupowania stanowiły najbardziej zagregowany poziom szczegółowości – tzw. superinformację służącą do wydzielenia

obszarów zwartej zabudowy. Następnie wykonano segmentację obrazów ze współczynnikami skalowymi umożliwiającymi podział obrazu na elementy bardzo drobne oraz średniej wielkości (subobiekty oraz obiekty). Poziomą szczegółowość w przypadku subobiektów został za pomocą współczynnika skali tak dobrany, aby wyróżnić pojedyncze elementy zabudowy. W kolejnej fazie prac wykonano klasyfikację obrazu podzielonego na subobiekty w taki sposób, aby wyróżnić jedynie obszary „czystej” zabudowy. W tym celu wykorzystano zarówno informację spektralną charakteryzującą zakres odbicia dla zabudowy w kanałach bliskiej i średniej podczerwieni, jak również kombinacje kanałów spektralnych i ich przetworzenia: współczynnik jasności, znormalizowany wskaźnik zieleni oraz stosunek odbicia w kanale bliskiej podczerwieni do jasności. Zastosowanie takiej wieloczynnikowej informacji pozwoliło na wyodrębnienie obszarów „czystej” zabudowy z dużym stopniem wiarygodności.

Na finalnym etapie prac przeprowadzono klasyfikację obrazów, wykorzystując informacje zawarte w warstwie o małym poziomie szczegółowości (superinformację) oraz w warstwie o dużym poziomie szczegółowości (subinformację). Postanowiono dokonać podziału obszarów zabudowanych na 4 klasy, charakteryzujące się różnym stopniem gęstości zabudowy:

- klasa 1: 1-25% zabudowy,
- klasa 2: 26-50% zabudowy,
- klasa 3: 51-75% zabudowy,
- klasa 4: 76-100% zabudowy.

W wyniku wykonania klasyfikacji utworzono dwie mapy klasyfikacyjne obszarów zabudowanych, przedstawiające podział tych obszarów na 4 kategorie gęstości zabudowy (stan 1997 i stan 2000). Wyprowadzono także statystyki określające procentowy udział poszczególnych klas pokrycia terenu w ramach obszarów zabudowanych oraz w granicach całego obiektu badawczego. Statystyki te zostały zamieszczone w tabeli 5.

Tabela 5.

Wyniki klasyfikacji obszarów zabudowanych na obrazach IRC-1C

Nazwa klasy	1997		2000	
	% pow. terenów zabudowy	% pow. obiektu badawczego	% pow. terenów zabudowy	% pow. obiektu badawczego
klasa 1: 0-25% zabudowy	22.5	10.1	23.0	10.6
klasa 2: 26-50% zabudowy	13.6	6.1	15.2	7.0
klasa 3: 51-75% zabudowy	19.0	8.5	17.5	7.8
klasa 4: 76-100% zabudowy	44.8	20.2	44.0	20.2

Zmiany pokrycia terenu i typów zabudowy przedstawiono w postaci mapy różnicowej. Mapa ta w sposób szczegółowy przedstawia przejście klas terenów zabudowy o małej gęstości do klasy obszarów zurbanizowanych o dużej gęstości zabudowy. Pod względem ilościowym charakter tych zmian w stosunku do całego obiektu badawczego wygląda następująco:

- zmiany terenów niezurbanizowanych na obszary o małej gęstości zabudowy – 7.1%,
- zmiany terenów niezurbanizowanych na obszary o dużej gęstości zabudowy – 1.3%,
- zmiany terenów o małej gęstości zabudowy na obszary zabudowy zwartej – 5.8%.

5. Podsumowanie

W efekcie wykonanych prac badawczych dokonano oceny przydatności różnych metod przetwarzania z punktu widzenia precyzji i szczegółowości wydzielenia zmian użytkowania ziemi i pokrycia terenu na obszarach podlegających procesom urbanizacji. Stwierdzono, iż najbardziej efektywną metodą dla tworzenia map różnicowych za pomocą cyfrowej analizy obrazu jest metoda niezależnej klasyfikacji obiektowej danych satelitarnych pochodzących z różnych terminów rejestracji i porównanie wyników klasyfikacji. Metoda ta pozwala na wykorzystanie w procesie klasyfikacyjnym nie tylko cech spektralnych obrazu, lecz także relacji zachodzących pomiędzy obiektami, oraz cech pozaspektralnych, charakteryzujących teksturę i strukturę poszczególnych klas pokrycia terenu. Zastosowanie tej metody dla obszaru Warszawy umożliwiło wydzielenie czterech klas gęstości zabudowy, charakteryzujących się różnym procentowym udziałem obiektów antropogenicznych i terenów zielonych. Porównanie sporządzonych tą metodą map klasyfikacyjnych z dwóch terminów rejestracji pozwoliło na opracowanie mapy różnicowej, przedstawiającej charakter zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Szczegółowość wyróżnienia zmian jest zdeterminowana rozdzielczością terenową stosowanych danych teledetekcyjnych. Wykorzystanie obrazów satelitarnych najnowszej generacji, pochodzących z satelitów QuickBird i Ikonos, o podwyższonej rozdzielczości terenowej (0.61–4 m), pozwoli w najbliższym czasie na analizę zmian użytkowania ziemi i pokrycia terenu z większą precyzją, w miarę opracowywania efektywnych metod klasyfikowania tego typu danych, bazujących na klasyfikacji obiektowej, segmentacji wielopoziomowej oraz numerycznym modelu terenu.

Literatura

- Bruzzone L/, Serpico S.B., 1997: *Detection of changes in remotely sensed images by the selective use of multispectral information*. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 10.
- Chavez P.S., Kwarteng A.Y., 1989: *Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 3, 339-348.
- Johnson R.D., Kasischke E.S., 1998: *Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring of land cover and condition*. Int. Journal of Remote Sensing. Vol 19, No. 3.
- Mas J.F., 1999: *Monitoring land cover changes: a comparison of change detection algorithms*. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 20, No 1.

- Niemeyer I., Canty M., Klaus D., 1999: *Unsupervised change detection techniques using multispectral satellite images*. Proceedings of the IGARSS'99 Symposium, 28 June – 2 July 1999, Hamburg, Germany.
- Singh A., 1989: *Digital change detection techniques using remotely sensed data*. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 10, No. 6.
- Zhang J., Foody G.M., 1998: *A fuzzy classification of sub-urban land cover from remotely sensed imagery*. Int. Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 14.

Recenzował: dr inż. Katarzyna Osińska-Skotak