

ZBIGNIEW BOCHENEK

**OPRACOWANIE METODYKI OKREŚLANIA ZMIAN
UŻYTKOWANIA ZIEMI NA PODSTAWIE CYFROWEJ ANALIZY
WYSOKOROZDZIELCZYCH ZDJĘĆ SATELITARNYCH**

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych
w latach 2001–2003 jako projekt badawczy Nr 8 T12E 050 21

ZARYS TREŚCI: W artykule zostały przedstawione wyniki prac nad utworzeniem metody określania zmian użytkowania ziemi z wykorzystaniem cyfrowej analizy wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych. Przebadano różne typy danych satelitarnych – Landsat, SPOT, IRS, jak również różne sposoby tworzenia map różnicowych, bazujące na odejmowaniu wartości spektralnych oraz na klasyfikacji danych. W wyniku tych prac sformułowano wnioski dotyczące optymalnej metody określania zmian użytkowania ziemi na przykładzie fragmentu aglomeracji warszawskiej.

1. WPROWADZENIE

Monitorowanie zmian środowiska geograficznego za pomocą zdjęć satelitarnych jest jednym z podstawowych zastosowań teledetekcji. W miarę rozwoju technik pozyskiwania satelitarnych obrazów wielospektralnych i numerycznych metod ich przetwarzania pojawił się problem opracowania efektywnych metod porównywania zdjęć pochodzących z różnych typów satelitów i różnych terminów rejestracji. Problem ten ma charakter wieloaspektowy, 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. Rozwój systemów informacji przestrzennej zasilanych danymi teledetekcyjnymi stwarza pilną potrzebę utworzenia wiarygodnych metod sporządzania map różnicowych na podstawie analizy porównawczej zdjęć satelitarnych – metod bazujących na nowoczesnych osiągnięciach w zakresie cyfrowego przetwarzania obrazów.

Badania związane z metodyką numerycznego sporządzania map różnicowych na podstawie wieloczasowych zdjęć satelitarnych były

prorowadzone w kilku ośrodkach naukowo-badawczych w latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych (Singh A., 1989; Bruzzone L., 1997; Johnson R.D. i in., 1998; Mas J.F., 1999; Niemeyer I. i in., 1999). W pracach tych wykorzystywano na ogół dane pochodzące z jednego typu satelity, koncentrując badania na obszarach pokrytych roślinnością. Rozdzielczość przestrzenna zdjęć wykonywanych przez satelity teledetekcyjne poprzedniej generacji ograniczała jednak ich zakres stosowania do szczegółowych studiów zmian na obszarach zurbanizowanych. Dopiero wprowadzony ostatnio na orbitę indyjski satelita IRS, jak również satelity amerykańskie nowej generacji umożliwiające zwiększenie szczegółowości badań.

Celem projektu badawczego było opracowanie metodyki określania zmian użytkowania ziemi na podstawie analizy porównawczej wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych, odpowiedniej dla terenów o dużym zróżnicowaniu typów pokrycia, przede wszystkim dla obszarów zabudowanych. W trakcie prac przebadano różne typy zdjęć w celu określenia optymalnych danych satelitarnych dla opracowywania map użytkowania ziemi terenów zurbanizowanych oraz przeanalizowano różne metody tworzenia map różnicowych. W efekcie tych prac sformułowano wnioski dotyczące optymalnej metody określania zmian użytkowania ziemi z wykorzystaniem numerycznych sposobów porównywania zdjęć satelitarnych.

2. OPIS OBIEKTU BADAWCZEGO

Jako obiekt prac badawczych w niniejszym projekcie został wybrany fragment aglomeracji warszawskiej. Fragment ten obejmuje obszary północnej i środkowej części aglomeracji, zawierając dzielnice Żoliborz, Bielany, Wola, Bemowo, Śródmieście, Mokotów, Ochota, Włochy, Praga Północ, Praga Południe, Białołęka, Targówek. Wybrany obiekt charakteryzuje się dużą różnorodnością typów pokrycia terenu. 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.

Tabela 1. Charakterystyka i daty rejestracji obrazów satelitarnych wykorzystywanych w pracach badawczych

Satelita	Radiometr	Daty rejestracji	Zakres spektralny [μm]	Rozdzielczość [m]
Landsat	TM	16.08.1993	0.45–0.52	30
			0.52–0.60	30
			0.63–0.69	30
			0.76–0.90	30
			1.55–1.75	30
			2.08–2.35	30
			10.4–12.5	120
Landsat	ETM+	07.05.2000	0.45–0.52	30
			0.52–0.60	30
			0.63–0.69	30
			0.76–0.90	30
			1.55–1.75	30
			2.08–2.35	30
			10.4–12.5	60
			0.52–0.90 (PAN)	15
SPOT	HRV	04.05.1986	0.50–0.59	20
			0.61–0.68	20
			0.78–0.89	20
SPOT	HRV	17.04.2000	0.50–0.59	20
			0.61–0.68	20
			0.78–0.89	20
			1.58–1.75	20
			0.50–0.73 (PAN)	10
IRS	LISS III	24.08.1997	0.52–0.59	23
			0.62–0.68	23
			0.77–0.86	23
			1.55–1.70	70
IRS	PAN	17.09.1997	0.50–0.75	5
IRS	LISS III	30.09.2000	0.52–0.59	23
			0.62–0.68	23
			0.77–0.86	23
			1.55–1.70	70
IRS	PAN	30.09.2000	0.50–0.75	5

Wybrany fragment aglomeracji warszawskiej charakteryzuje się dużą dynamiką zmienności typów pokrycia terenu. W jego obrębie znajdują się zespoły urbanistyczne nowych dzielnic mieszkaniowych, takich jak Bemowo, Tarchomin, Goćław, 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. Dlatego też wybrany fragment Warszawy stanowi odpowiedni obiekt dla przeprowadzenia prac badawczych zmierzających do opracowania metodyki określania zmian użytkowania ziemi. Dodatkowym jego atutem jest możliwość szybkiej kontroli terenowej wyników analiz porównawczych i klasyfikacji zdjęć satelitarnych w przypadkach wymagających ich bezpośredniego sprawdzenia.

3. DANE WYKORZYSTYWANE W PRACACH BADAWCZYCH

W ramach niniejszego projektu postanowiono przebadąć użyteczność wykorzystania różnych typów wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych do określania zmian użytkowania ziemi. Do badań wybrano trzy rodzaje danych pochodzących z funkcjonujących co najmniej kilka lat satelitów środowiskowych – Landsat, SPOT i IRS. Dane techniczne dotyczące charakterystyk radiometrów umieszczonych na pokładach tych satelitów oraz daty rejestracji obrazów wykorzystywanych w pracach badawczych zostały podane w tabeli 1.

4. WSTĘPNE PRZETWORZENIE DANYCH SATELITARNYCH

4.1. Korekcja geometryczna

Pierwszym etapem prac było przeprowadzenie precyzyjnej korekcji geometrycznej zgromadzonych obrazów satelitarnych. Ten etap ma niezwykle istotne znaczenie dla metodyki i wyników badań, gdyż od prawidłowo wykonanej transformacji geometrycznej wyjściowych zbiorów danych satelitarnych jest uzależniona dokładność analiz porównawczych przeprowadzanych w dalszych fazach projektu badawczego.

W pierwszej części tego etapu prac dokonano transformacji oryginalnego obrazu panchromatycznego Warszawy, zarejestrowanego z pokładu satelity IRS 30 września 2000 roku. Przeprowadzono dostosowanie tego obrazu do mapy topograficznej w skali 1:25 000, opracowanej w odwzorowaniu Gaussa-Krügera (układzie 1942). W celu wykonania korekcji z odpowiednio wysoką dokładnością na oryginalnym zdjęciu i mapie topograficznej wybrano 93 punkty dostosowania, rozmieszczone równomiernie na obszarze Warszawy i okolic. Transformację przeprowadzono, stosując afiniczny model dostosowania; osiągnięto dokładność terenową 5 m. Ten etap prac został zrealizowany w środowisku oprogramowania Intergraph, umożliwiającego współpracę ze stołem digitalizacyjnym.

Następna faza prac polegała na przeprowadzeniu korekcji geometrycznej pozostałych obrazów satelitarnych metodą ich dostosowania do uprzednio transformowanego obrazu panchromatycznego IRS z 30 września 2000 roku. W tej fazie wykonano analizy dotyczące modelu dostosowania oraz optymalnej liczby punktów do transformacji obrazu. Przebadano metodę dostosowania transformowanego obrazu wielomianem pierwszego i drugiego stopnia; w wyniku tych prac stwierdzono, iż użycie wielomianu drugiego stopnia jedynie w nieznacznym stopniu zmniejsza średni błąd dostosowania, wprowadzając zarazem nieliniowości w przekształceniu obrazu; w efekcie zdecydowano się wykorzystywać do dostosowania wielomian pierwszego stopnia. Badania dotyczące optymalnej liczby punktów dostosowania doprowadziły do wniosków, iż dla wybranego obiektu badawczego o wymiarach 20 x 20 km około trzydziestu odpowiednio rozmieszczonych punktów jest wystarczającym zestawem dla uzyskania dokładności transformacji rzędu 0.5 piksela. Po wykonaniu powyższych analiz przeprowadzono korekcję geometryczną wszystkich typów danych satelitarnych przewidzianych do wykorzystania w dalszych pracach badawczych. Całość prac związanych z korekcją geometryczną obrazów satelitarnych została przeprowadzona w środowisku oprogramowania do przetwarzania obrazów ENVI.

4.2. Korekcja radiometryczna i normalizacja

Drugim etapem prac związanych ze wstępnym przetworzeniem obrazów satelitarnych było przeprowadzenie analiz zmierzających do wyboru optymalnej metody ich radiometrycznego przetworzenia. Obrazy pochodzące z różnych terminów rejestracji mają odmienne charakterystyki radiometryczne ze względu na zmiany oświetlenia, warunki atmosferyczne wpływające na absorpcję i rozpraszanie promieniowania oraz stan detektorów skanerów dokonujących rejestracji danych satelitarnych. Dlatego też, w przypadku ilościowego porównywania obrazów, co ma miejsce podczas analizy wieloczasowej, podstawowym zadaniem jest takie ich skorygowanie, aby umożliwić wiarygodną analizę porównawczą. Istnieją dwie podstawowe metody radiometrycznej korekcji zdjęć satelitarnych:

- 1) radiometryczna kalibracja, czyli zamiana surowych wartości rejestrowanego promieniowania (DN) na wartości współczynnika odbicia na powierzchni ziemi;
- 2) normalizacja, czyli dostosowanie wartości radiometrycznych porównywanych obrazów satelitarnych.

Radiometryczna kalibracja danych satelitarnych jest złożonym, dwustopniowym procesem ich przetworzenia. W pierwszej fazie dokonuje się przeliczenia surowych wartości zarejestrowanego promieniowania (DN) na wartości luminancji na poziomie satelity (górnej warstwy atmosfery).

W drugiej fazie przeprowadzana jest korekcja atmosferyczna – wartości luminacji są przeliczane na wartości odbicia na powierzchni ziemi, z uwzględnieniem modelu atmosfery. Normalizacja polega na dopasowaniu rozpiętości radiometrycznych obrazów poprzez wykorzystanie parametrów statystycznych obszarów stabilnych pod względem radiometrycznym w obu terminach rejestracji.

W niniejszej pracy postanowiono przebadать obie wymienione metody, aby wybrać sposób korekcji optymalny z punktu widzenia prowadzenia analiz porównawczych w trakcie dalszych prac badawczych.

W pierwszej fazie tego etapu prac przeprowadzono pełną korekcję radiometryczną obrazów Landsat TM z 16 sierpnia 1993 roku oraz Landsat ETM+ z 7 maja 2000 roku. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu opracowanego w Instytucie, wykorzystującego w fazie korekcji atmosferycznej elementy oprogramowania 6S.

Następnie przystąpiono do opracowania metody normalizacji obrazów satelitarnych. Do badań normalizacyjnych zastosowano obrazy z satelity SPOT, charakteryzujące się największą rozpiętością czasową, a co za tym idzie, największymi zmianami w pokryciu terenu. Postanowiono przebadать dwie metody normalizacji:

- 1) klasyczną, bazującą na wykorzystaniu zespołu pól testowych, reprezentujących stabilne w czasie elementy pokrycia powierzchni ziemi;
- 2) metodę zautomatyzowanej regresji, bazującą na wykorzystaniu skaterogramu (Elvidge i in. 1995).

W tym celu założono na badanym obszarze zespół pól testowych, reprezentujący stabilne w czasie pod względem odbicia promieniowania elementy pokrycia terenu (antropogeniczne powierzchnie, zbiorniki wodne, powierzchnie lotniska). Następnie przeprowadzono analizę regresji wartości odbicia oddzielnie w każdym zakresie spektralnym obrazów SPOT. Wyznaczono równania regresji i dokonano normalizacji obrazu satelitarnego SPOT z 4 maja 1986 roku do obrazu z 17 kwietnia 2000 roku. Dokonano porównania średnich wartości odbicia po wykonaniu regresji dla całego obszaru badawczego oraz dla zespołu pól testowych. Wyniki tego porównania zostały przedstawione w tabeli 2.

Przebadano także drugi sposób normalizacji zdjęć – metodę zautomatyzowanej regresji. Metoda ta bazuje na wykorzystaniu skaterogramu do określenia obszarów nie podlegających zmianom pomiędzy datami rejestracji obrazów satelitarnych, niezależnie dla każdego kanału spektralnego. Wartości do określenia tych obszarów są wyznaczone automatycznie na podstawie rozpiętości odbicia spektralnego i założonych wartości progowych, charakteryzujących wielkość zmian. W niniejszej pracy przetestowano tę metodę, przeprowadzając normalizację danych satelitarnych SPOT_3 z 1986 roku do danych SPOT_3 z 2000 roku. Jednakże osiągnięta

precyzja normalizacji (wyrażająca się różnicą wartości po znormalizowaniu) była znacznie niższa niż w przypadku zastosowania metody klasycznej. Dlatego też w dalszych pracach zdecydowano się wykorzystać do znormalizowania pozostałych typów danych satelitarnych metodę klasyczną.

Tabela 2. Zestawienie średnich wartości odbicia po normalizacji obrazów SPOT

Zakres spektralny	SPOT 1986 cały obraz przed korekcją	SPOT 1986 cały obraz po korekcji	SPOT 2000 cały obraz	2000 minus 1986 cały obraz	SPOT 1986 pola testowe	SPOT 2000 pola testowe	2000 minus 1986 pola testowe
SPOT_1	38.91	100.78	99.05	-1.73	86.40	86.83	+0.43
SPOT_2	26.91	96.00	98.05	+2.05	76.50	77.21	+0.71
SPOT_3	36.80	117.00	117.89	+0.89	90.81	91.27	+0.46

Z porównania wyników normalizacji trzech typów danych satelitarnych: Landsat, IRS i SPOT wynika, iż najwyższą dokładność znormalizowania, wyrażoną różnicą wartości odbicia mierzonych na polach testowych, osiągnięto w przypadku zdjęć satelitarnych IRS LISS III. Dla wszystkich typów danych uzyskana precyzja normalizacji jest zadowalająca; wyraża się ona niewielkimi różnicami wartości odbicia na polach testowych oraz wysokimi współczynnikami korelacji otrzymywanymi w procesie regresji dla poszczególnych kanałów spektralnych ($r > 0.90$).

W końcowej fazie tego etapu prac porównano metody radiometrycznej kalibracji i normalizacji obrazów na przykładzie danych z satelity Landsat. W wyniku zestawienia skorygowanych oraz znormalizowanych wartości odbicia na obszarze pól testowych w dwóch terminach rejestracji stwierdzono, iż normalizacja obrazów metodą klasyczną zapewnia bardziej precyzyjne dostosowanie wartości odbicia. Daje ona zatem lepsze możliwości w zakresie wykorzystywania metod porównywania wartości radiometrycznych z różnych terminów rejestracji dla wykrywania zmian użytkowania ziemi.

5. ZARYS METOD WYKRYWANIA ZMIAN UŻYTKOWANIA ZIEMI Z WYKORZYSTANIEM NUMERYCZNEJ ANALIZY OBRAZÓW

Problem opracowania wiarygodnych metod określania zmian użytkowania ziemi z wykorzystaniem numerycznej analizy obrazów był przedmiotem licznych prac badawczych prowadzonych od lat osiemdziesiątych w wielu ośrodkach naukowych. W pracach tych stosowano trzy podejścia do wykrywania zmian:

- 1) przetworzenia obrazów i porównywanie wartości odbicia spektralnego z różnych terminów rejestracji;
- 2) klasyfikacja obrazu utworzonego z różnych terminów rejestracji;
- 3) porównywanie niezależnych klasyfikacji wykonanych dla poszczególnych terminów rejestracji.

Pierwsze podejście obejmuje różnorodne matematyczne kombinacje obrazów pochodzących z różnych dat rejestracji, takie jak odejmowanie wartości odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych, stosowanie metody stosunków kanałów, regresji obrazów lub metody składowej głównej. Wykorzystuje się tu także odejmowanie wartości odbicia przetworzonych kanałów spektralnych w postaci różnorodnych wskaźników (roślinnych, glebowych itp.). W tego typu pracach najbardziej istotnym elementem jest określenie wartości progowych rozdzielających obszary zmian od obszarów niezmiennych w badanym przedziale czasowym. Problem badawczy stanowi także określenie optymalnego przetworzenia obrazów umożliwiającego wyróżnianie zmian w pokryciu terenu z możliwie najwyższą dokładnością.

Drugie podejście polega na utworzeniu wielokanałowego zbioru składającego się z kanałów spektralnych pochodzących z dwóch terminów rejestracji i klasyfikacji tego zbioru w celu wyodrębnienia zmian w pokryciu terenu. Obszary zmian powinny wykazywać charakterystyki spektralne istotnie różniące się od obszarów nie podlegających zmianom w badanym przedziale czasowym. Do sklasyfikowania obrazu można zastosować metodę klasyfikacji nienadzorowanej lub jedną z metod klasyfikacji nadzorowanej, jeśli jest możliwe określenie pól treningowych dla obszarów zmian.

Trzecie podejście sprowadza się do wykonania z możliwie najwyższą dokładnością oddzielnych klasyfikacji dla każdego terminu rejestracji oraz przeprowadzenia ich porównania w celu wyznaczenia obszarów zmian. Szczegółowość klasyfikacji zależy od rozdzielczości spektralnej poszczególnych typów użytkowania ziemi. Najistotniejszym zagadnieniem jest zatem w tym przypadku dobór optymalnej metody klasyfikacji, zapewniającej wysoką wiarygodność map klasyfikacyjnych, gdyż od ich dokładności zależy precyzja sporządzenia mapy zmian w pokryciu terenu. Spośród najnowszych metod klasyfikacyjnych mogą być tu stosowane metody z wykorzystaniem sieci neuronowych lub metody klasyfikacji obiektowej.

W niniejszej pracy postanowiono przebadать wszystkie wyżej wymienione podejścia do wykrywania zmian użytkowania ziemi na wieloczasowych zdjęciach satelitarnych w celu określenia metody optymalnej dla wybranego obiektu badawczego charakteryzującego się dużą zmiennością form pokrycia terenu. Analizy prowadzono na danych satelitarnych pochodzących z trzech typów satelitów, co pozwoliło na sprecyzowanie

wniosków dotyczących optymalnego doboru obrazów i zakresów spektralnych dla sporządzania map zmian użytkowania ziemi.

6. ANALIZA NUMERYCZNYCH METOD WYKRYWANIA ZMIAN UŻYTKOWANIA ZIEMI

6.1. Metody oparte na porównywaniu wartości odbicia spektralnego

W pierwszej części tego etapu prac postanowiono przeanalizować różne metody przetwarzania obrazów i porównywania wartości odbicia spektralnego. Do tych analiz wybrano zestaw obrazów z satelity SPOT, charakteryzujący się z tytułu dat rejestracji (1986 i 2000) największymi zmianami w pokryciu terenu i użytkowaniu ziemi.

6.1.1. Metoda odejmowania wartości odbicia spektralnego obrazów nieprzetworzonych

Do wykonania tego etapu prac wykorzystano wielospektralne obrazy satelitarne SPOT z 4 maja 1986 roku i z 17 kwietnia 2000 roku. Po przeprowadzeniu normalizacji obrazów (1986 do 2000) utworzono oddzielnie dla kanału 2 (zakres czerwony) i kanału 3 (zakres podczerwony) obrazy różnicowe, poprzez odjęcie wartości odbicia spektralnego. Każdy z tych obrazów charakteryzował się wartością średnią różnic odbicia, reprezentującą obszary nie podlegające zmianom i normalnym rozkładem częstości – histogramem, którego brzegowe obszary reprezentowały obszary zmian. Najistotniejszym elementem tej fazy prac było wyznaczenie optymalnych wartości progowych, które oddzielałyby obszary zmian od obszarów niezmienionych. Kontrolni jakości progowania dokonywano poprzez ocenę dokładności sklasyfikowania pól testowych, reprezentujących obszary niezmienione oraz pól kontrolnych reprezentujących obszary zmian. Procedurę progowania realizowano, 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 najwyższą dokładność wyróżnienia obszarów zmian (rzędu 80%) osiągnięto w przypadku kanału SPOT_2 dla wartości progowej 0.7 odchylenia standardowego, zaś w przypadku kanału SPOT_3 dla wartości 1.2 odchylenia standardowego. Porównanie precyzji wydzielenia, wyrażonej współczyn-

nikiem Kappa, dla obu kanałów wskazuje na wyższą użyteczność kanału SPOT_2.

6.1.2. Metoda odejmowania wartości odbicia spektralnego obrazów przetworzonych

W tej fazie prac do badań wykorzystano przetworzenia oryginalnych obrazów wielospektralnych SPOT z 4 maja 1986 roku i z 17 kwietnia 2000 roku. Zgodnie z doświadczeniami innych ośrodków naukowo-badawczych (Mas, 1999) postanowiono przebadać dwa typy przetworzeń:

- 1) wyznaczenie znormalizowanych wskaźników zieleni – NDVI na podstawie wartości odbicia w kanałach SPOT_2 i SPOT_3;
- 2) przekształcenie oryginalnych wartości odbicia metodą składowych głównych (Selective Principal Component Analysis) – SPCA.

Pierwsza metoda pozwala na utworzenie obrazów rozkładu znormalizowanego wskaźnika zieleni, różnicując obszary pokryte roślinnością od terenów antropogenicznych. Zatem w przypadku zmian w pokryciu terenu polegających na przejściu z klas roślinnych do klas zabudowy obrazy takie mogą je dość efektywnie uwidaczniać. 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.

Druga metoda polega 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 Kwarteng, 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 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.

Po utworzeniu obrazów zmian dwoma przedstawionymi metodami przeprowadzono, analogicznie jak w przypadku danych nieprzetworzonych, procedurę progowania w celu oddzielenia obszarów zmian od obszarów niezmienionych. W wyniku zastosowania tej procedury wyznaczono optymalne wartości progowe, pozwalające na osiągnięcie najwyższej dokładności wyznaczenia zmian.

Wykonana analiza wykazała, iż najwyższą dokładność wyróżnienia obszarów zmian osiągnięto w przypadku metody składowych głównych przy wykorzystaniu kanału SPOT_2 dla wartości progowej 0.7 odchylenia standardowego, zaś przy wykorzystaniu kanału SPOT_3 dla wartości 1.1 odchylenia standardowego. Zastosowanie wskaźnika zieleni NDVI do tych

badania przyniosło najwyższą dokładność wyróżnienia obszarów zmian dla wartości 1.5 odchylenia standardowego. Porównanie precyzji wydzielenia, wyrażonej współczynnikiem Kappa, dla wymienionych trzech typów przetworzeń wskazuje na najwyższą użyteczność metody składowych głównych z wykorzystaniem kanału SPOT_2.

Optymalne wartości progowe odchylenia standardowego dla wszystkich badanych typów danych (przetworzonych i nieprzetworzonych) zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. 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

6.1.3. Metoda analizy wektora zmian

Przedstawione metody odejmowania wartości odbicia spektralnego umożliwiają wyznaczenie obszarów zmian, nie pozwalają jednak na kwantyfikację i jakościowe sklasyfikowanie tych zmian. Dlatego też postanowiono przeanalizować użyteczność metody bazującej na analizie wektora zmian. Metoda ta opiera się na założeniu, iż poszczególne typy przekształceń pokrycia terenu charakteryzują się określoną wielkością zmian odbicia spektralnego i kierunkiem tych zmian. Najczęściej do przeprowadzenia badań wykorzystuje się zakresy spektralne promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni, gdyż w tych zakresach uwidaczniają się najlepiej przeobrażenia środowiska od terenów zielonych do obszarów zurbanizowanych. W niniejszej pracy postanowiono wykorzystać różnicowe obrazy satelitarne SPOT z lat 1986 i 2000, pochodzące z wymienionych zakresów spektrum. Na obszarze obiektu badawczego założono zespoły pól testowych, reprezentujące 4 typy zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi:

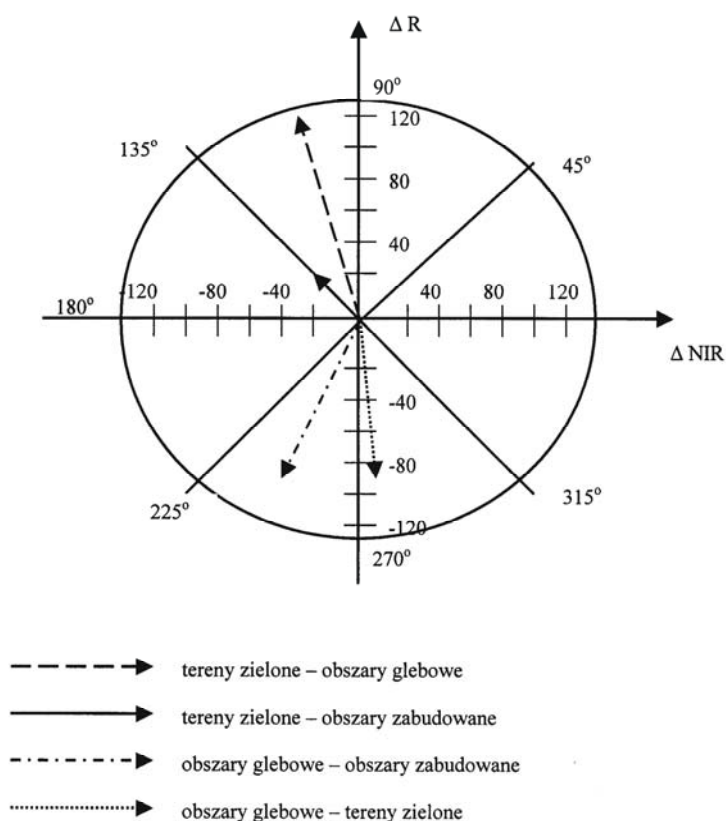
- zmiany terenów zielonych na obszary zabudowy;
- zmiany terenów zielonych na obszary odkrytej gleby;
- zmiany obszarów odkrytej gleby na obszary zabudowy;
- zmiany obszarów odkrytej gleby na tereny zielone.

Dla każdej kategorii zmian wyznaczono wartości średnie różnic odbicia spektralnego w zakresie czerwieni (ΔR) i bliskiej podczerwieni (ΔNIR)

(SPOT – kanał 2 i SPOT – kanał 3). Następnie obliczono wielkości wektorów zmian oraz kierunki tych wektorów w przestrzeni spektralnej zdefiniowanej wyżej wymienionymi zakresami. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w tabeli 4 oraz na rysunku 1.

Tabela 4. Ocena zmian pokrycia terenu na podstawie analizy obrazów SPOT 1986–2000

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



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

Z oceny wyników analizy wektorów zmian poszczególnych typów pokrycia terenu wynika, iż największe wielkości zmian, wyrażone długością wektora, można zaobserwować w przypadku przejścia klasy terenów zielonych do klasy obszarów glebowych. Nieco mniejsze wielkości występują 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 wielkością kąta. Stosunkowo najmniejsze wielkości zmian zostały stwierdzone w przypadku przejścia terenów zielonych bezpośrednio do klasy obszarów zabudowanych, charakteryzujących się na nowych osiedlach mieszkaniowych dużym udziałem zieleni miejskiej.

6.2. Metody oparte na wykorzystaniu obrazów klasyfikacyjnych

Metody bazujące na analizie obrazów klasyfikacyjnych wymagają w procesie klasyfikacji zastosowania informacji o pokryciu terenu i użytkowaniu ziemi, które stanowiłyby materiał referencyjny do przeprowadzenia etapów „treningu” (w przypadku klasyfikacji nadzorowanej) oraz do kontroli wyników klasyfikacji. Aby taki materiał był wiarygodnym źródłem informacji, powinien być opracowany na podstawie szczegółowej analizy danych lotniczych i satelitarnych, wspartej terenową wiedzą o typach użytkowania ziemi na obszarze badań. W niniejszej pracy postanowiono opracować materiał referencyjny dla prac klasyfikacyjnych w postaci map użytkowania ziemi i pokrycia terenu na podstawie specjalnie przetworzonych wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych. W tym celu do utworzenia mapy obrazującej stan użytkowania w 2000 roku wykorzystano obraz satelitarny IRS, w którym dokonano połączenia danych wielospektralnych (o rozdzielczości 23 m) z danymi panchromatycznymi (o rozdzielczości 5 m). W ten sposób uzyskano dobrą rozróżnialność niewielkich elementów terenowych oraz duże zróżnicowanie spektralne. Przy tworzeniu finalnego obrazu zastosowano tzw. technikę wyostrzania obrazu wielospektralnego metodą RGB-IHS.

Tak przygotowany obraz wielospektralny został poddany analizie wizualnej w celu sporządzenia szczegółowej mapy użytkowania ziemi i pokrycia terenu. Analizę prowadzono przy wsparciu zdjęć lotniczych w skali 1:26 000 oraz informacji terenowej. Przyjęto założenie, że legenda opracowywanej mapy będzie odpowiadać szczegółowością czwartemu poziomowi legendy stosowanej w programie CORINE Land Cover, z uwzględnieniem specyfiki obszaru badań, czyli jej dostosowaniem do charakteru terenu. W wyniku analizy wyróżniono łącznie wyróżniono 24 klasy, zgrupowane w czterech głównych kategoriach: terenów zantropogenizowanych, terenów rolnych, lasów i ekosystemów naturalnych oraz wód.

W drugiej fazie tego etapu prac wykorzystano wielospektralny obraz satelitarny SPOT z 1986 roku. W wyniku analizy porównawczej tego obrazu z opracowaną mapą użytkowania ziemi i pokrycia terenu – stan 2000 utworzono mapę zmian w pokryciu terenu 1986–2000.

Obie mapy stanowiły materiał referencyjny do wykonywania następnych etapów prac, związanych z klasyfikacją danych wielospektralnych i badaniem dokładności różnych metod bazujących na obrazach klasyfikacyjnych.

6.2.1. Metoda klasyfikacji zbioru wieloczasowego zawierającego dane spektralne z dwóch terminów rejestracji

W metodzie tej zakłada 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).

W tej fazie prac do badań wykorzystano oryginalne obrazy wielospektralne SPOT z 4 maja 1986 roku i z 17 kwietnia 2000 roku. Kanały 1, 2 i 3 z obu obrazów połączono, tworząc jeden sześciokanałowy zbiór danych spektralnych. Następnie przeprowadzono klasyfikację tego zbioru dwoma metodami:

- 1) klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA;
- 2) klasyfikacji nadzorowanej (metoda największego prawdopodobieństwa).

W metodzie klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA (samoorganizująca się technika analizy danych) dzieli się przestrzeń spektralną na naturalne zgrupowania pikseli, zwane klastrami. Poszczególne piksele są przypisywane do klastrów na zasadzie najmniejszej odległości, z tym że centra klastrów zmieniają się w wyniku kolejnych iteracji dokonujących się w przestrzeni cech. Parametrami wejściowymi w tej metodzie są założona liczba klastrów, liczba iteracji, minimalna liczba pikseli w ramach klasy oraz wartości progowe dotyczące minimalnej odległości klas.

W niniejszej pracy wykonano kilka klasyfikacji metodą ISODATA, stosując różną liczbę klastrów i iteracji. W wyniku tych działań utworzono finalnie zbiór składający się z 15 klastrów, którym następnie przypisano nazwy klas pokrycia terenu, w tym klasę obszarów zmian. W kolejnej fazie prac dokonano oceny jakości wyróżnienia klasy zmian za pomocą uprzednio wybranych pól kontrolnych. Uzyskano niezadowalającą dokładność wydzielenia obszarów zmian rzędu 44%. Postanowiono zatem 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 rozdzielczości klas, badając zbieżność ich charakterystyk w przestrzeni spektralnej. W przypadku klasy zmian najwyższą rozdzielczość 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 – miara określająca prawdopodobieństwo, z jakim zostały sklasyfikowane piksele poszczególnych klas na polach kontrolnych tych klas;
- dokładność użytkownika – miara określająca prawdopodobieństwo, z jakim wśród wszystkich pikseli zaliczonych do danej klasy znajdujące się piksele należące do pól kontrolnych tej klasy;
- dokładność całkowita – miara stanowiąca stosunek sumy wszystkich prawidłowo sklasyfikowanych pikseli do sumy wszystkich pikseli obrazu;
- współczynnik Kappa – współczynnik zgodności zdefiniowany jako stosunek różnicy między wynikami obserwowanymi na głównej przekątnej macierzy przejść a wynikami teoretycznymi, do różnicy między pełną zgodnością a zgodnością oczekiwaną.

Wyniki oceny klasyfikacji przedstawia tabela 5.

Tabela 5. 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 wysoką dokładność całkowitą – 85.4%, współczynnik Kappa – 0.8267. Jednakże w przypadku obszarów zmian dokładność ta nie jest zbyt wysoka – 64.6% (dokładność producenta). Dlatego, aby znaleźć optymalne rozwiązanie, na następnym etapie prac

postanowiono przebadać różne metody niezależnej klasyfikacji obrazów i porównywania wyników klasyfikacji.

6.2.2. Metoda porównywania obrazów klasyfikacyjnych z poszczególnych terminów rejestracji

W metodzie tej zakłada się niezależne wykonanie klasyfikacji obrazów satelitarnych z każdego terminu rejestracji przy wykorzystaniu tych samych klas pokrycia terenu i porównanie wyników klasyfikacji. Jakość powstałej w ten sposób mapy zmian jest bezpośrednio uzależniona od dokładności porównywanych obrazów klasyfikacyjnych. Dlatego też niezwykle istotne jest zastosowanie takiej metody klasyfikacji, która zapewniłaby w możliwie najwyższym stopniu precyzję wydzielenia klas pokrycia terenu. W niniejszej pracy postanowiono zatem przebadać różne metody klasyfikacyjne w celu wyboru metody optymalnej dla założonego celu badawczego.

Do tych badań postanowiono wykorzystać obraz wielospektralny IRS, ze względu na odpowiedni zestaw kanałów spektralnych, obejmujących zakresy promieniowania widzialnego oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Dodatkowym atutem przemawiającym za tym wyborem był fakt posiadania obrazu panchromatycznego IRS o rozdzielczości 5 m, co pozwalało na bardziej precyzyjne wydzielenie pól treningowych i kontrolnych, niezbędnych w procesie klasyfikacji nadzorowanej.

W pierwszej fazie tego etapu prac postanowiono przebadać użyteczność zastosowania klasycznej metody klasyfikacji nadzorowanej – metody największego prawdopodobieństwa. Na badanym obszarze Warszawy najpierw wybrano pola treningowe reprezentujące poszczególne kategorie pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Istotnym zagadnieniem w tej fazie prac była decyzja dotycząca rodzajów wydzielanych klas. Na pierwszym etapie zdecydowano wydzielić 13 typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, którymi są:

- 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 przeprowadzono analizę ich rozdzielczości poprzez badanie zbieżności charakterystyk spektralnych (*transformed divergence*). W wyniku tej analizy stwierdzono stosunkowo niską rozdzielczość następujących klas (maksymalna rozdzielczość TD = 2.00):

- lasy liściaste – ogrody działkowe 1.62
- zabudowa luźna miejska – drzewostany liściaste 1.63
- zabudowa zwarta – tereny przemysłowe 1.63
- lasy liściaste – lasy mieszane 1.66
- zabudowa zwarta – zabudowa luźna miejska 1.67
- lasy mieszane – ogrody działkowe 1.71.

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.

Po połączeniu pól treningowych dla wymienionych klas wykonano klasyfikację nadzorowaną metodą największego prawdopodobieństwa (*maximum likelihood classifier*), wykorzystując zestaw pól treningowych dla 10 klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Następnie przeprowadzono ocenę jakości tej klasyfikacji za pomocą pól kontrolnych. Wyniki tej oceny zostały przedstawione w tabeli 6.

Tabela 6. Wyniki oceny klasyfikacji nadzorowanej obrazu IRS 2000 –
– 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.

Z tabeli 6 wynika, iż mimo dość dobrej generalnej dokładności klasyfikacji niektóre z klas, zwłaszcza związanych z podziałem obszarów zabudowanych na subkategorie, nie osiągają zadowalającej precyzji

rozpoznania, występuje bowiem częściowe nakładanie się charakterystyk spektralnych poszczególnych typów zabudowy.

Postanowiono zatem przebadać, czy klasyfikacja nadzorowana oparta na przetworzonych kanałach spektralnych przyczyni się do zwiększenia dokładności wyróżniania klas pokrycia terenu. W tym celu zastosowano przetworzenie metodą składowych głównych (*principal component*), optymalizujące położenie klastrów poszczególnych typów pokrycia terenu w n-kanałowej przestrzeni spektralnej. Następnie dokonano klasyfikacji nadzorowanej nowo utworzonego zbioru, wykorzystując te same pola treningowe, które stosowano w przypadku zbioru kanałów oryginalnych. Ocena jakości tej klasyfikacji za pomocą pól kontrolnych wykazała jedynie nieznaczne zwiększenie dokładności całkowitej oraz fluktuacje dokładności wyznaczenia poszczególnych klas wokół wartości uzyskanych dla zbioru oryginalnego. Wnioskiem z tych prac było stwierdzenie, że dla założonej szczegółowości wydzielenia klas, z podziałem obszarów zabudowy na 4 kategorie, klasyfikacja bazująca wyłącznie na charakterystykach spektralnych nie daje zadowalającej precyzji rozpoznania, tym samym uniemożliwiając wiarygodne porównywanie map klasyfikacyjnych. W dalszej części prac postanowiono zatem przeprowadzić dwutorowe badania:

- 1) określić poziom szczegółowości, na którym mogą być z powodzeniem stosowane klasyczne metody klasyfikacji i porównywania map klasyfikacyjnych;
- 2) przebadać użyteczność wykorzystania innych metod klasyfikacji, wykorzystujących w procesie klasyfikacyjnym informacje pozaspektralne (tzw. klasyfikacja obiektowa).

W pierwszej fazie tej części prac przeanalizowano problem szczegółowości klasyfikacji w zestawieniu z jej dokładnością. Na podstawie wyników uzyskanych podczas oceny mapy klasyfikacyjnej z podziałem na 10 kategorii pokrycia terenu dokonano agregacji zbliżonych spektralnie klas. Postanowiono przeprowadzić klasyfikację z podziałem na 6 głównych typów pokrycia terenu, a mianowicie:

- obszary zabudowane
- tereny zielone (drzewostany mieszane, ogrody działkowe, zieleńce, łąki)
- drzewostany iglaste
- grunty orne pokryte roślinnością
- tereny glebowe nie pokryte roślinnością
- wody.

Dla tych kategorii uzyskano wysoką rozdzielczość wszystkich klas pokrycia terenu, określoną małą zbieżnością charakterystyk spektralnych. Przeprowadzono więc klasyfikację nadzorowaną z wykorzystaniem zagregowanych pól treningowych oraz ocenę jakości tej klasyfikacji za pomocą pól kontrolnych. Uzyskano wysoką dokładność rozpoznania dla

wszystkich typów pokrycia terenu, przekraczającą 90%. Postanowiono zatem przeprowadzić klasyfikację nadzorowaną na tym poziomie szczegółowości dla obrazu satelitarnego IRS z 1997 roku oraz dla pozostałych typów obrazów satelitarnych – SPOT i Landsat. Celem tych prac było opracowanie map zmian pokrycia terenu i analiza porównawcza przydatności poszczególnych typów danych satelitarnych do tworzenia tego typu map.

Przed przystąpieniem do finalnej klasyfikacji wszystkich typów danych satelitarnych dokonano jakościowej oceny mapy klasyfikacyjnej opracowanej na podstawie obrazu IRS 2000. Stwierdzono, że ze względu na dużą heterogeniczność obszaru badań występują na mapie dość licznie izolowane piksele lub ich niewielkie grupy, zakłócając jednorodność większych wydzieleni. Postanowiono zatem zastosować procedurę „wygładzania” wyników klasyfikacji poprzez użycie filtru realizującego proces wygładzania. W wyniku analizy dokonano wyboru optymalnej wielkości filtru i przeprowadzono „wygładzenie” mapy klasyfikacyjnej IRS 2000. Następnie wykonano ocenę jakości tej mapy za pomocą zestawu pól kontrolnych. Wyniki tej oceny wykazują podniesienie dokładności wyznaczenia poszczególnych typów pokrycia terenu.

Następnie wykonano klasyfikację dla wszystkich trzech typów danych satelitarnych: IRS, SPOT i Landsat dla obu terminów rejestracji. W wyniku przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej wyżej wymienionych obrazów utworzono mapy użytkowania ziemi i pokrycia terenu dla poszczególnych typów danych satelitarnych i terminów rejestracji. Następnie dokonano oceny dokładności tych map za pomocą pól kontrolnych.

Z porównania dokładności klasyfikacji dla trzech typów danych satelitarnych: IRS, SPOT i Landsat wynika, iż najwyższą precyzję rozpoznania sześciu głównych typów użytkowania ziemi i pokrycia terenu można osiągnąć przy zastosowaniu obrazów satelitarnych IRS. Wyraża się ona wysoką dokładnością całkowitą – przekraczającą 90% – oraz dużym współczynnikiem zgodności Kappa osiągającym wartość 0.9. Zbliżoną dokładność klasyfikacji uzyskano także w przypadku wykorzystania obrazów satelitarnych Landsat, natomiast nieco niższą w przypadku zastosowania obrazów SPOT. Osiągnięta wysoka dokładność klasyfikacji obrazów pochodzących z różnych terminów rejestracji pozwala na ich wykorzystanie do tworzenia map zmian użytkowania ziemi i pokrycia terenu. Na kolejnym etapie prac podjęto więc próbę utworzenia map różnicowych poprzez porównanie klasyfikacji pochodzących z dwóch terminów rejestracji oraz ocenę jakości utworzonych w ten sposób map.

Zastosowano dwie metody tworzenia map i ich oceny. Pierwsza metoda, bazująca na klasycznych narzędziach oprogramowania ENVI, składała się z następujących etapów:

- odejmowanie obrazów klasyfikacyjnych pochodzących z dwóch terminów rejestracji;
- utworzenie mapy prezentującej na tle terenów niezmiennych obszary zmian;
- ocena dokładności wyznaczenia tych zmian za pomocą pól kontrolnych.

Metodę tę zastosowano dla map klasyfikacyjnych opartych na trzech typach danych satelitarnych: IRS, SPOT i Landsat. Wyniki oceny zostały przedstawione w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki oceny wyznaczenia zmian na mapach różnicowych IRS, SPOT i Landsat (za pomocą pól kontrolnych)

Nazwa klasy	IRS 1997–2000	
	dokładność producenta [%]	dokładność użytkownika [%]
Obszary zmian	75.9	96.1
Obszary niezmiennione	98.6	89.6
	dokładność całkowita – 91.3% współczynnik Kappa – 0.7884	
	SPOT 1986–2000	
	dokładność producenta [%]	dokładność użytkownika [%]
Obszary zmian	80.7	71.0
Obszary niezmiennione	86.5	91.7
	dokładność całkowita – 84.8% współczynnik Kappa – 0.6462	
	Landsat 1993–2000	
	dokładność producenta [%]	dokładność użytkownika [%]
Obszary zmian	78.8	93.7
Obszary niezmiennione	97.8	91.8
	dokładność całkowita – 92.2% współczynnik Kappa – 0.8038	

Z tabeli wynika, że dokładność wyznaczenia obszarów zmian, określona za pomocą pól kontrolnych, waha się w zależności od typu danych satelitarnych w granicach 76–81% (dokładność producenta) oraz 71–96% (dokładność użytkownika). Biorąc pod uwagę oba kryteria oceny dokładności, obrazy satelitarne IRS i Landsat wykazują większą przydatność do wyróżniania zmian od obrazów SPOT.

Poza oceną na polach kontrolnych istotnym elementem oceny jakości mapy zmian pokrycia terenu jest również przestrzenny rozkład tych zmian oraz informacja o ich wielkości i charakterze na całym obiekcie badań. Aby

uzyskać taką informację, postanowiono zastosować nową metodę oceny zmian, opracowaną w ramach najnowszej wersji oprogramowania ENVI. Metoda ta opiera się na porównaniu map klasyfikacyjnych z dwóch terminów rejestracji i utworzeniu statystyk informujących w sposób wymierny o charakterze zmian oraz masek obrazujących przestrzennie rozkład tych zmian. Wyniki są prezentowane w postaci tabeli przejść, w której w kolumnach są reprezentowane klasy stanu wyjściowego (data 1), zaś w rzędach klasy stanu końcowego (data 2). W rzędzie „zmiany klas” podane są liczby określające procent zmian klasy pomiędzy dwoma terminami, zaś w rzędzie „różnica obrazów” wartości stanowiące różnice między łączną liczbą pikseli dla danej klasy w pierwszym i drugim terminie rejestracji. Przedstawiona metoda została zastosowana do porównania map klasyfikacyjnych pochodzących z trzech typów danych satelitarnych: IRS, SPOT i Landsat. Wyniki tego porównania są zawarte w tabelach 8, 9 i 10.

Tabela 8. Wyniki porównania map klasyfikacyjnych IRS 1997 i 2000 (w %)

Nazwa klasy	Obszary zabudowane	Tereny zielone	Drzewostany iglaste	Tereny glebowe	Grunty orne z rośl.	Wody
Obszary zabudowane	87.3	28.7	2.5	7.5	9.6	13.8
Tereny zielone	5.2	52.1	19.6	2.8	7.9	0.0
Drzewostany iglaste	0.6	0.5	77.9	0.0	0.0	0.0
Tereny glebowe	3.8	2.6	0.0	46.4	8.9	0.6
Grunty orne z rośl.	2.8	16.0	0.0	43.3	73.6	0.2
Wody	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	85.4
Zmiany klas	12.7	47.9	22.1	53.6	26.4	14.6
Różnica obrazów	32.6	-35.7	-10.3	0.1	13.8	-8.4

Na podstawie analizy zawartych w tabelach wyników porównania można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) W przypadku porównania map klasyfikacyjnych SPOT 1986 i 2000 zaobserwowano duże zmiany wszystkich sześciu klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi – w granicach 44–61%. Zmniejszyła się powierzchnia gruntów ornych pokrytych roślinnością i drzewostanów

- iglastych, natomiast wzrosła powierzchnia terenów zielonych oraz terenów glebowych nie pokrytych roślinnością.
- 2) W przypadku porównania map klasyfikacyjnych Landsat 1993 i 2000 zaobserwowano mniejsze zmiany klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi, niż dla obrazów SPOT 1986 i 2000 – w granicach 12–50%. Podobnie jak w przypadku mapy różnicowej SPOT zmniejszyła się powierzchnia gruntów ornych i drzewostanów iglastych, zaś powiększył obszar terenów zielonych oraz terenów glebowych nie pokrytych roślinnością, lecz skala tych zmian była znacznie mniejsza.
 - 3) W przypadku porównania map klasyfikacyjnych IRS 1997 i 2000 zaobserwowano podobne zmiany klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi jak dla obrazów Landsat 1993 i 2000 – w granicach 13–54%. Zmniejszyła się powierzchnia terenów zielonych i drzewostanów iglastych, zaś wzrosła powierzchnia obszarów zabudowanych.

Tabela 9. Wyniki porównania map klasyfikacyjnych SPOT 1986 i 2000 (w %)

Nazwa klasy	Obszary zabudowane	Tereny zielone	Drzewostany iglaste	Tereny glebowe	Grunty orne z rośl.	Wody
Obszary zabudowane	53.3	16.3	13.0	12.8	16.8	32.4
Tereny zielone	23.0	53.0	27.9	5.9	22.9	10.3
Drzewostany iglaste	0.6	3.3	54.2	0.0	0.0	0.0
Tereny glebowe	14.4	9.0	1.2	56.1	21.2	1.3
Grunty orne z rośl.	8.1	18.4	3.6	25.2	39.1	0.6
Wody	0.5	0.0	0.1	0.1	0.0	55.4
Zmiany klas	46.7	47.0	45.8	43.9	60.9	44.6
Różnica obrazów	-0.4	37.5	-28.1	72.4	-36.5	-38.3

Oprogramowanie ENVI, wersja 6.2 (2003), oprócz tworzenia wartości statystycznych dla porównywanych map, umożliwia także przedstawienie zmian użytkowania ziemi i pokrycia terenu w postaci map zmian, obrazujących przejścia poszczególnych klas pomiędzy pierwszą i drugą datą rejestracji.

Tabela 10. Wyniki porównania map klasyfikacyjnych Landsat 1993 i 2000 (w %)

Nazwa klasy	Obszary zabudowane	Tereny zielone	Drzewostany iglaste	Tereny glebowe	Grunty orne z rośl.	Wody
Obszary zabudowane	74.2	7.6	9.2	16.3	11.3	7.9
Tereny zielone	8.6	72.9	12.7	5.0	11.0	2.8
Drzewostany iglaste	0.3	2.4	76.2	0.0	0.0	0.1
Tereny glebowe	6.6	3.7	0.4	50.7	16.0	1.3
Grunty orne z rośl.	10.0	13.1	1.3	27.2	61.6	0.0
Wody	0.4	0.3	0.0	0.8	0.0	87.9
Zmiany klas	25.8	27.1	23.8	49.3	38.3	12.1
Różnica obrazów	-8.9	18.8	-6.7	12.0	-3.3	5.7

Z analizy charakteru przestrzennego rozkładu tych zmian wynika, że w przypadku przejść do klasy obszarów zabudowanych największe powierzchniowo zmiany występują w przypadku terenów odkrytej gleby. Lokalizowane są w ten sposób najczęściej tereny budów na nowych osiedlach mieszkaniowych oraz wzdłuż nowych tras komunikacyjnych. Podobny powierzchniowo charakter zmian można zaobserwować w przypadku terenów gruntów ornych pokrytych roślinnością, z tym że zmiany te najczęściej występują w peryferyjnych dzielnicach miasta i na terenach podmiejskich. Stosunkowo mniejsze zmiany zaobserwowano w przypadku przejścia terenów zielonych do klasy obszarów zabudowanych.

Analizując przestrzenny rozkład zmian uzyskanych w wyniku utworzenia mapy różnicowej metodą porównywania map klasyfikacyjnych oraz zmian otrzymanych poprzez porównanie map utworzonych metodą interpretacji analogowej stwierdzono, że istnieją pewne rozbieżności w lokalizacji tych zmian. Wynikają one głównie z charakteru klasyfikacji nadzorowanej, uwzględniającej w procesie klasyfikacyjnym informację spektralną pochodzącą z pojedynczych pikseli obrazu satelitarnego. W efekcie mapy klasyfikacyjne obrazują poszczególne kategorie pokrycia terenu w sposób mniej zagregowany niż w przypadku interpretacji analogowej, uwidaczniając w niektórych przypadkach niewielkie powierzchniowo zmiany na mapach różnicowych, będące „efektem brzegowym” porównywanych klasyfikacji. Dlatego też zdecydowano się przeanalizować nową metodę

klasyfikowania obrazów satelitarnych, uwzględniającą w procesie klasyfikacyjnym cechy pozaspektralne obrazu satelitarnego.

Metoda ta, zwana metodą klasyfikacji obiektowej, umożliwia włączenie do procesu klasyfikacyjnego, poza wartościami odbicia spektralnego, również innych cech obrazu, związanych z kształtem, położeniem i teksturą obiektów, a także z wzajemnymi relacjami pomiędzy poszczególnymi klasami pokrycia terenu. Została ona oprogramowana w postaci pakietu software'owego eCognition firmy Definiens Imaging. Pakiet ten umożliwia analizowanie informacji pochodzących nie tylko z pojedynczych pikseli obrazu, lecz także z grup pikseli (obiektów), wyróżnionych w trakcie procesu segmentacji obrazu. Zastosowanie w tym pakiecie klasyfikacji metodą logiki rozmytej pozwala na integrację różnych atrybutów obiektu, takich jak wartości spektralne i ich przetworzenia oraz cechy dotyczące kształtu, tekstury i usytuowania względem innych obiektów terenowych. Pakiet eCognition daje także możliwości jednoczesnej analizy różnych typów danych, tym samym wzmacniając wiarygodność wyników klasyfikacji.

6.2.3. Metoda klasyfikacji obiektowej obrazów satelitarnych na przykładzie wybranego obiektu badawczego

Do wykonania tego etapu prac wybrano dane satelitarne IRS-1C. Charakteryzują się one odpowiednim zestawem zakresów promieniowania, obejmujących pasmo widzialne oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Klasyfikacja nadzorowana tych danych z podziałem na 6 klas pokrycia terenu dała wysoką dokładność rozpoznania tych klas, przekraczającą 90%, wskazując na dobrą rozdzielczość spektralną głównych kategorii użytkowania ziemi. Dodatkowym atutem wykorzystania tych danych w analizie porównawczej są terminy pozyskania obrazów; dane z lat 1997 i 2000 lat pochodzą w przybliżeniu z tej samej pory roku.

W pierwszej fazie tego etapu prac utworzono wyjściowe zbiory wielospektralne do wykonania klasyfikacji, zawierające 4 zakresy promieniowania: 3 pasma spektralne skanera LISS-III (2, 3 i 4) oraz kanał panchromatyczny. Włączenie do analiz kanału panchromatycznego, dobrze oddającego dzięki wysokiej rozdzielczości (5 m) strukturę miasta, pozwoliło na badanie zróżnicowania terenów miejskich.

Następnie przeprowadzono proces segmentacji obrazów. Oprogramowanie eCognition umożliwia wykonanie segmentacji wielopoziomowej. Pozwala ona 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 niniejszych 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.

Następnym etapem prac było wykonanie pierwotnej klasyfikacji obrazu wielospektralnego. W tym celu na obszarze badawczym założono zespół pól treningowych reprezentujących 9 klas pokrycia terenu i użytkowania ziemi. Były to następujące klasy:

- zabudowa zwarta miejska i przemysłowa
- zabudowa stara z udziałem zieleni miejskiej
- zabudowa rozproszona (tereny nowych osiedli mieszkaniowych typu blokowego i jednorodzinnego)
- drzewostany iglaste
- drzewostany liściaste i mieszane
- ogrody działkowe
- tereny zielone (rolnicze i łąkowe)
- tereny glebowe
- wody.

Następnie przeprowadzono klasyfikację obrazów, wykorzystując do tego celu 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 prostopadłościaków) wiedzy o obiekcie badawczym.

W wyniku wykonanych klasyfikacji utworzono dwie mapy użytkowania ziemi, obrazujące stan na rok 1997 oraz rok 2000. Mapy te zostały poddane ocenie jakości klasyfikacji. Zastosowano trzy metody oceny, które umożliwia oprogramowanie eCognition: ocenę stabilności klasyfikacji, najlepszego wyniku oraz ocenę bazującą na macierzy błędów generowanej w wyniku zastosowania pól kontrolnych. Dwie pierwsze metody pozwalają na określenie bezwzględnych wartości funkcji przynależności oraz różnic pomiędzy tymi wartościami dla poszczególnych klas. Przeprowadzona ocena wykazała dla obu terminów rejestracji wysokie wartości funkcji przynależności dla wyznaczanych klas pokrycia terenu oraz dobrą stabilność klasyfikacji. Wykonano także klasyczną ocenę jakości klasyfikacji poprzez

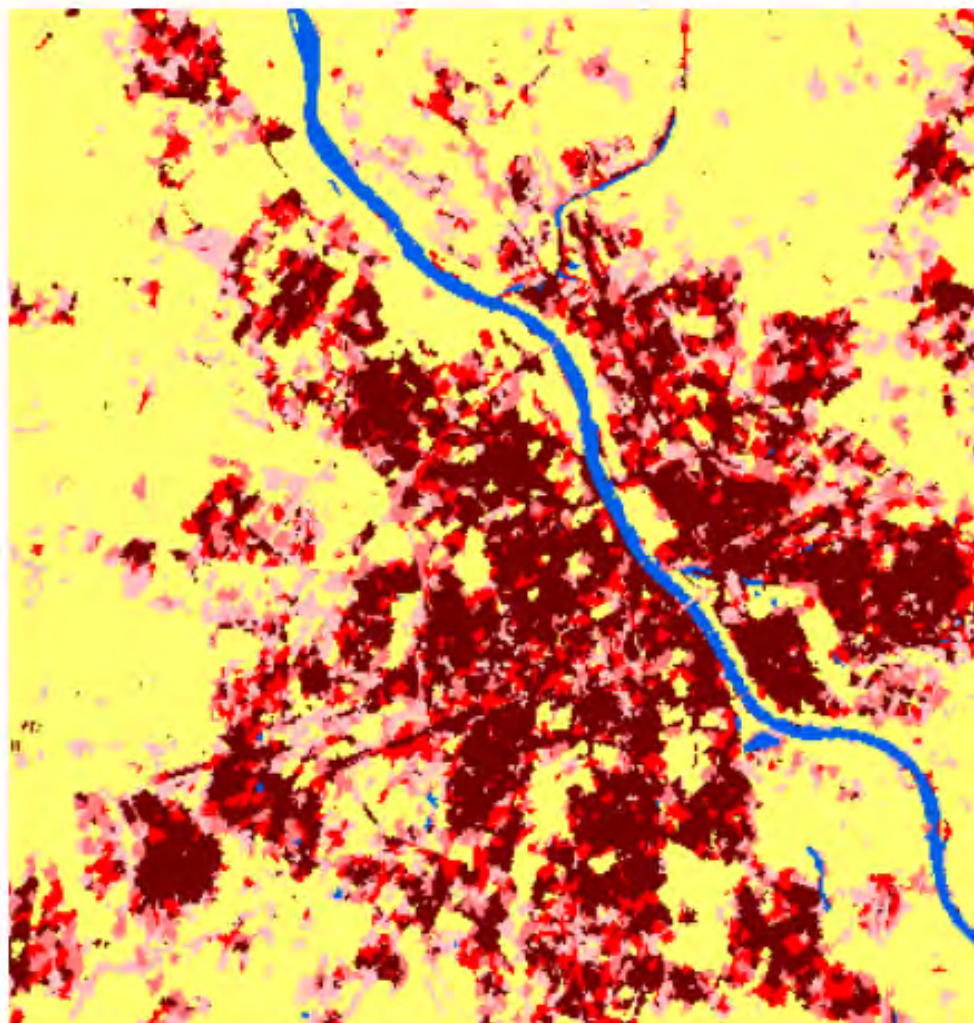
zastosowanie pól kontrolnych. Wyniki tej oceny zostały przedstawione w tabeli 11.

Tabela 11. Ocena dokładności klasyfikacji obrazów satelitarnych IRS-1C za pomocą oprogramowania eCognition (metoda *standard nearest neighbour*) (w%)

Nazwa klasy	1997		2000	
	dokł. prod.	dokł. użyt.	dokł. prod.	dokł. użyt.
Zabudowa zwarta	58	93	100	94
Zabudowa stara	100	67	100	85
Zabudowa rozproszona	75	100	68	69
Drzewostany iglaste	100	100	100	100
Drzewostany liściaste i mieszane	100	79	100	100
Ogrody działkowe	69	70	85	100
Tereny zielone (rolnicze i łąkowe)	88	100	100	100
Tereny glebowe	100	100	100	100
Wody	96	100	97	100
Dokładność całkowita	87.2		96.0	
Współczynnik Kappa	0.853		0.954	

Z tabeli 11 wynika, iż osiągnięto generalnie wysoką jakość obu klasyfikacji, charakteryzowaną dokładnością całkowitą i współczynnikiem zgodności Kappa. Jednakże szczegółowa analiza wykazuje, iż dla wyznaczania typów zabudowy w niektórych przypadkach dokładność (producenta lub użytkownika) nie osiąga zadowalającego poziomu. Dlatego też postanowiono wykorzystać w pełni możliwości oprogramowania eCognition, pozwalające na stosowanie w procesie klasyfikowania hierarchii wyznaczanych klas, segmentacji wielopoziomowej oraz informacji pozaspektralnej.

Oprogramowanie eCognition umożliwia założenie hierarchii wyznaczanych klas, co stanowi podstawę do wykorzystania funkcji systemu, pozwalających na korzystanie z wzajemnych relacji pomiędzy klasami i poziomami szczegółowości. W niniejszej pracy dokonano zgrupowania wymienionych klas w trzy główne kategorie pokrycia terenu: obszary zabudowane, tereny niezurbanizowane oraz wody. To zgrupowanie umożliwiło przeprowadzenie dalszych etapów klasyfikacji obrazów satelitarnych.



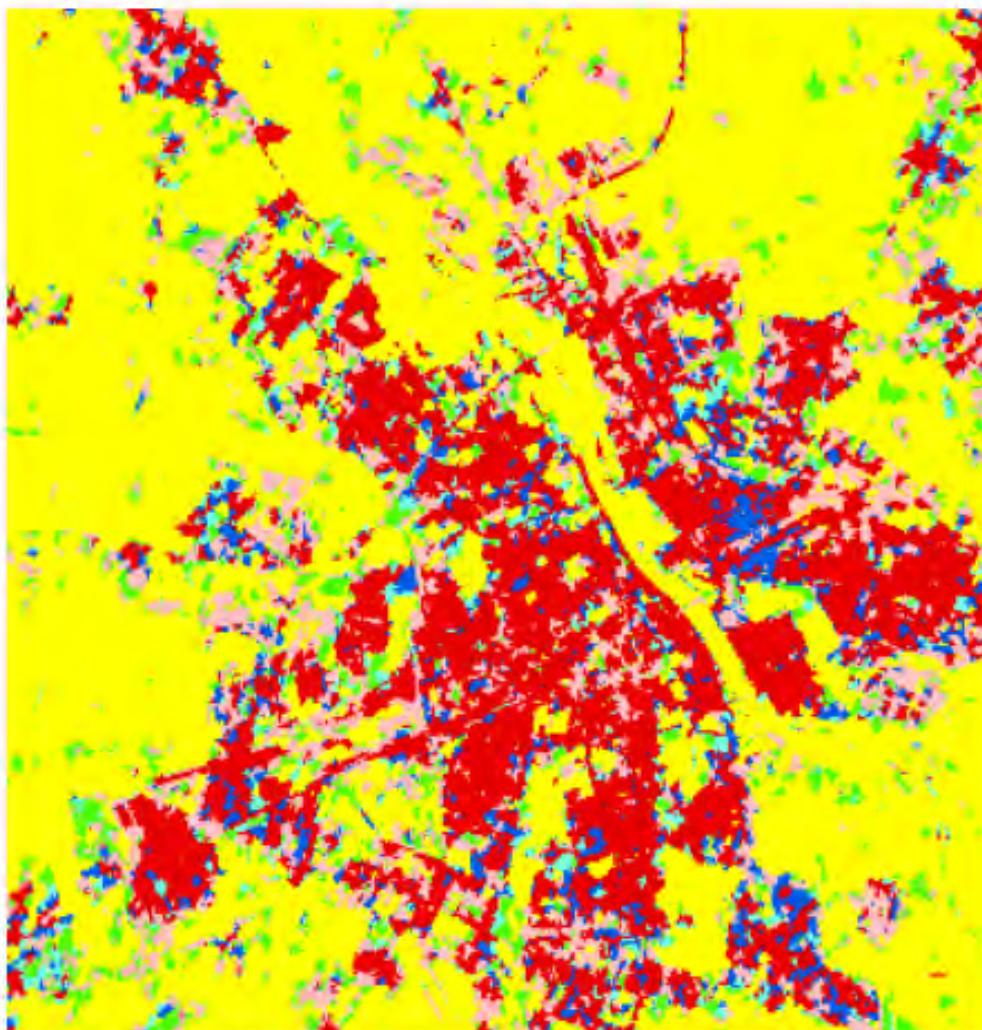
Rys. 2. Mapa klasyfikacyjna obrazu IRS+PAN 2000

Na pierwszym etapie przeprowadzono połączenie klas uzyskanych w wyniku pierwotnej klasyfikacji, tworząc nową mapę klasyfikacyjną z podziałem na trzy wymienione generalne typy pokrycia terenu. Mapa ta stanowiła najbardziej zagregowany poziom szczegółowości – tzw. superinformację służącą do wydzielenia obszarów zabudowanych w całości. Następnie wykonano segmentację obrazów ze współczynnikami skalowymi umożliwiającymi podział obrazu na elementy bardzo drobne oraz średniej wielkości (subobiekty oraz obiekty). Poziom szczegółowości 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: 0–25% 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). Przykładowa mapa obrazująca stan z 2000 roku została przedstawiona na rysunku 2. 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 12.



LEGENDA

- bez zmian tereny nieurbanizowane
- bez zmian zabudowa rozproszona
- bez zmian zabudowa zwarta
- zmiany terenów nieurbanizowanych na zab. rozproszona
- zmiany terenów nieurbanizowanych na zab. zwarta
- zmiany zabudowy rozproszonej na zab. zwarta

Rys. 3. Mapa zmian typów zabudowy 1997–2000

Tabela 12. Wyniki klasyfikacji obszarów zabudowanych na obrazach IRC-1C

Nazwa klasy	1997		2000	
	% terenów zabudowy	% obiektu badawczego	% terenów zabudowy	% 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

Z przedstawionej tabeli oraz z analizy map klasyfikacyjnych wynikają następujące wnioski:

- 1) W analizowanym okresie (1997–2000) zwiększyła się powierzchnia obszarów zabudowanych charakteryzujących się niewielką gęstością zabudowy (0–25% oraz 26–50%). Ten stan został spowodowany rozwojem nowych osiedli mieszkaniowych o strukturze zabudowy rozproszonej, z dużą ilością przestrzeni między budynkami i zieleni miejskiej.
- 2) W efekcie wzrostu powierzchni obszarów zabudowy rozproszonej zmniejszył się procentowy udział terenów o dużej gęstości zabudowy (51–75% oraz 76–100%).
- 3) W badanym okresie wystąpiły zmiany w przestrzennym rozmieszczeniu poszczególnych klas gęstości zabudowy: zwiększyła się powierzchnia klasy 4 (76–100% zabudowy) w części starej Pragi, Żoliborza i Ursusa, powiększyły się także tereny zabudowy rozproszonej (0–25% zabudowy) na obszarze Ochoty, Bemowa i Tarchomina.

Zmiany pokrycia terenu i typów zabudowy przedstawiono w postaci mapy różnicowej na rysunku 3. Mapa ta w sposób bardziej 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%.

Aby dokonać szczegółowej weryfikacji rozmieszczenia przestrzennego poszczególnych klas na mapach klasyfikacyjnych i mapach zmian pokrycia terenu postanowiono porównać wydzielenia tych klas z obrazem referencyjnym. Za taki obraz wybrano zdjęcie satelitarne najnowszej generacji, zarejestrowane przez satelitę QuickBird. Skaner zainstalowany na pokładzie satelity QuickBird umożliwia zarejestrowanie obrazów

panchromatycznych o rozdzielczości 0.7 m oraz obrazów wielospektralnych w 4 zakresach spektrum o rozdzielczości 2.8 m. Tego typu dane satelitarne dają możliwość szczegółowej interpretacji typów pokrycia terenu i użytkowania ziemi, zapewniając tym samym odpowiedni materiał referencyjny do wykonania kontroli poprawności klasyfikacji.

W niniejszej pracy wykorzystano obraz satelitarny QuickBird o wymiarach terenowych 8x8 km, zarejestrowany dla obszaru centralnej części aglomeracji warszawskiej dnia 9 maja 2002 roku. Obraz ten został poddany we wstępnej fazie przetwarzania korekcji geometrycznej w celu dostosowania go do odwzorowania kartograficznego Gaussa-Krügera, zastosowanego dla pozostałych analizowanych danych satelitarnych. Następnie utworzono kompozycję barwną z trzech kanałów spektralnych (3, 4, 2) oraz dokonano jej wzmocnienia poprzez połączenie danych wielospektralnych (o rozdzielczości 2.8 m) z danymi panchromatycznymi (o rozdzielczości 0.7 m). W ten sposób uzyskano bardzo dobrą rozróżnialność drobnych elementów terenowych oraz duże zróżnicowanie spektralne. Przy tworzeniu finalnego obrazu zastosowano tzw. technikę wyostrzania obrazu wielospektralnego metodą RGB-IHS.

Tak przygotowany obraz satelitarny został poddany interpretacji analogowej w celu wyodrębnienia na obszarach zabudowanych czterech kategorii gęstości zabudowy. W wyniku interpretacji utworzono mapę z podziałem terenów miejskich na stopnie gęstości obszarów zabudowanych odpowiadające legendzie zastosowanej do klasyfikacji obrazów wielospektralnych IRS-1C. Opracowana mapa została wykorzystana do weryfikacji map klasyfikacyjnych sporządzonych w wyniku zastosowania w procesie klasyfikacyjnym oprogramowania eCognition. Dla każdej kategorii gęstości zabudowy wybrano pola kontrolne i dokonano oceny dokładności klasyfikacji obrazów IRS-1C. Wyniki tej oceny zostały przedstawione w tabeli 13.

Tabela 13. Ocena klasyfikacji obszarów zabudowanych w 2000 roku na podstawie analizy obrazów satelitarnych IRS-1C za pomocą oprogramowania eCognition

Nazwa klasy	Dokładność producenta [%]	Dokładność użytkownika [%]
klasa 1: 0–25% zabudowy	82.5	100.0
klasa 2: 26–50% zabudowy	65.6	79.4
klasa 3: 51–75% zabudowy	82.7	60.5
klasa 4: 76–100 % zabudowy	87.0	83.1
Dokładność całkowita	79.3%	
Współczynnik Kappa	0.724	

Z tabeli 13 wynika, iż osiągnięto generalnie dość wysoką dokładność klasyfikacji czterech typów gęstości zabudowy, przekraczającą w przypadku klas o najmniejszej i największej gęstości 80%. Dokładność wydzielenia klas o pośredniej gęstości zabudowy (26–50 % oraz 51–75 %) jest w głównej mierze uzależniona od precyzji zdefiniowania obszarów „czystej” zabudowy oraz zastosowania odpowiedniego poziomu szczegółowości podczas segmentacji obrazu.

7. PODSUMOWANIE

W trakcie realizacji prac zostały przeprowadzone kompleksowe badania zmierzające do utworzenia optymalnej metody określania zmian użytkowania ziemi na podstawie cyfrowej analizy wieloczasowych zdjęć satelitarnych. W badaniach tych wykorzystano typy danych satelitarnych, charakteryzujące się różną rozdzielczością terenową i rozdzielczością spektralną, pochodzące z różnych terminów rejestracji: obrazy satelitarne Landsat, SPOT, IRS oraz QuickBird. W fazie przygotowawczej przeanalizowano metody korekcji geometrycznej i radiometrycznej oraz metody normalizacji pochodzących z różnych źródeł danych satelitarnych. W wyniku tych prac określono metodę normalizacji optymalną z punktu widzenia porównywania obrazów wielospektralnych pochodzących z różnych terminów rejestracji.

W drugiej fazie prac wielostronnie przeanalizowano metody tworzenia map różnicowych na podstawie wieloczasowych zdjęć satelitarnych. W ramach tych prac przebadano użyteczność następujących metod:

- odejmowania wartości radiometrycznych w poszczególnych kanałach spektralnych;
- odejmowania wartości znormalizowanego wskaźnika zieleni;
- porównywania obrazów po ich przekształceniu według zasady składowych głównych;
- klasyfikacji zbioru wielospektralnego składającego się z obrazów pochodzących z różnych terminów rejestracji;
- porównywania dwóch obrazów klasyfikacyjnych.
- analizy wektora zmian.

W efekcie wykonanych prac badawczych dokonano oceny przydatności wymienionych metod 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 danych satelitarnych z pochodzących z różnych terminów rejestracji i porównanie wyników klasyfikacji. W przypadku tak złożonych pod względem pokrycia terenu obszarów, jakimi są tereny zurbanizowane, optymalną metodą klasyfikowania okazała się metoda tzw. klasyfikacji obiektowej. Metoda ta pozwala na wykorzystanie

w procesie klasyfikacyjnym nie tylko cech spektralnych obrazu, lecz także relacji zachodzących pomiędzy obiektami, jak również 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. Mapa ta obrazuje zmiany dotyczące przejścia terenów niezurbanizowanych do klas obszarów zabudowanych oraz przekształceń związanych z gęstością zabudowy w obrębie terenów zurbanizowanych. 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 modelem terenu.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Chan J.C., Chan K., Yeh A.G., 2001, *Detecting the nature of change in a urban environment: a comparison of machine learning algorithms*. Photogrammetric and Remote Sensing. Vol. 67, No. 2.
- [3] 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.
- [4] Elvidge C. D., Yuan D., Weerackoon R.D., Lunetta R.S., 1995, *Relative radiometric normalization of Landsat MSS data using an automatic scattergram-controlled regression*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 61, No 10.
- [5] Fung T., Ledrew E., 1988, *The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. No. 10.
- [6] 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.

- [7] Lambin E.F., Strahler A.H., 1994, *Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land cover change processes using high temporal-resolution satellite data*. Remote Sensing of Environment No. 48.
- [8] Lyon J.G., Yuan D., Lunetta R.S., Elvidge C.D., 1998, *A change detection experiment using vegetation indices*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 64, No. 2.
- [9] Macleod R.D., Congalton R.G., 1998, *A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 64, No. 3.
- [10] Mas J.F., 1999, *Monitoring land cover changes: a comparison of change detection algorithms*. Int. Journal of Remote Sensing Vol. 20, No 1.
- [11] Muchoney D.M., Haack B.M., 1994, *Change detection for monitoring forest defoliation*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol. 60, No. 10.
- [12] 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.
- [13] Singh A., 1989, *Digital change detection techniques using remotely sensed data*. Int. Journal of Remote Sensing Vol. 10, No. 6.
- [14] 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.

ZBIGNIEW BOCHENEK

**PREPARATION OF THE METHOD OF LAND USE
CHANGE DETECTION ON THE BASIS OF ANALYSIS OF
MULTITEMPORAL HIGH-RESOLUTION SATELLITE DATA**

S u m m a r y

Results of complex studies aimed at preparation of optimal method for detection of land use changes on the basis of digital analysis of multitemporal satellite data were presented in the article. Various types of satellite images, characterized by different ground and spectral resolutions – Landsat TM, SPOT HRV, IRS 1C and QuickBird – were used in these studies. At the preparatory phase methods of geometric and radiometric correction, as well as normalization methods, were analyzed. As a result of these works

normalization method, optimal for comparing multispectral, multitemporal images, based on stable in time land cover types, was determined.

At the second stage of the works methods of creating change detection maps on the basis of multitemporal satellite data were thoroughly analyzed. The following approaches were studied:

- Method of subtracting radiometric values in particular spectral channels
- Method of subtracting normalized difference vegetation index
- Method of comparing principal component images
- Classification of multitemporal dataset
- Method of comparing two classification images
- Method of analysis of change vectors

As a result of the performed research works usefulness of the above mentioned methods was assessed, considering precision of distinguishing changes of land use within urban areas. In case of the methods based on subtraction of original and transformed images the work was concentrated on finding optimal threshold levels for separating changed and non-changed areas. It was found, that values of threshold level depends on type of satellite data and on spectral band. In case of the methods based on classifications the research works were aimed at determination of the method, which enables to distinguish the detailed land use/land cover classes, especially within urban areas, with the adequate accuracy. As a result of comparison of various methods it was found, that the method of independent classification of satellite data collected at different dates and their comparison is the most effective method for creating change detection maps. For urban areas, characterized by very complex land use pattern, method of object-oriented classification, which allows to take into consideration spectral and non-spectral image features, proved to be optimal. Application of this method for Warsaw area enabled to distinguish four levels of urban density, characterized by various contribution of anthropogenic objects and green areas.

Comparison of two classification maps, prepared with the use of this method, allowed for preparation of change detection map, presenting character of changes of land use and land cover within Warsaw area. This map represents changes concerning transition of non-urban areas to built-up land and transformations related to urban density.

