



KAZIMIERZ TRAFAS*

ANALIZA ELEMENTÓW STRUKTURY MIASTA KRAKOWA W OPARCIU O NADZOROWANĄ KLASYFIKACJĘ TREŚCI OBRAZU SATELITARNEGO LANDSAT

Duże miasta, a szczególnie miejskie aglomeracje, tworzą często na obrazach satelitarnych skomplikowane struktury, które na ogół dość wyraźnie odróżniają się od otaczających je terenów rolniczych, leśnych i innych, z wyjątkiem sytuacji gdy to otoczenie posiada te same lub zbliżone cechy spektralne co tereny zabudowane, na przykład tereny pustynne i inne nie pokryte roślinnością, skały itp. W przypadku takich miast jak Kraków, otoczonych terenami rolnymi i leśnymi, szczególnie w okresie wegetacyjnym, kontrast terenów zabudowanych jest oczywisty. Należy jednak pamiętać, że krzywe spektralne dla terenów nie pokrytych roślinnością w paśmie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni są bardzo podobne i w związku z tym obrazy otrzymane w tych obu kanałach nie wykazują dużej różnicy (Harris, 1987). Tereny miejskie to nie tylko obszary zainwestowane i pozbawione roślinności. Poza zwykle intensywnie zabudowanymi terenami centrum, pozostałe obszary, z wyjątkiem terenów przemysłowych i komunikacyjnych, stanowią mozaikę terenów zabudowanych i „zielonych”, które mają także swój wyraz w obrazie pikselowym. W wyznaczaniu obszaru miasta najważniejszym wydaje się określenie tej subtelnej granicy, do której jeszcze w odpowiedzi spektralnej uczestniczy element zabudowy. Charakterystycznym przy tym jest to, że obszary zurbanizowane, nie będące przecież jednolitymi jeśli chodzi o rodzaj pokrycia terenu, w zapisie skaneryowym wyróżniają się w sposób dość zdecydowany, nawet jeśli w obrębie wyraźnie zarysowanego konturu „obszaru miejskiego” występują także tereny rolne, leśne lub wody. Tłumaczyć to można dominacją terenów zabudowanych w obrębie terenowego zasięgu

*Dr Kazimierz Trafas, Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Zakład Kartografii i Teledetekcji, ul. Grodzka 64, 31-044 Kraków.

poszczególnych pikseli, przy czym ich większy rozmiar, a więc mniejsza rozdzielczość terenowa, wpływa korzystniej na wydzielenie terenów miejskich spośród otoczenia. Tak więc, pod tym względem tak zwane chwilowe pole widzenia skanera MSS (79x59 m) jest lepsze niż skanera TM (30x30 m).

Mniejszy piksel daje oczywiście większą dokładność szczegółów i pozwala na lepsze zróżnicowanie obszarów ze względu na pokrycie terenu, ale przez to uzyskuje się bardziej mozaikowy obraz i czasem uniemożliwia to wyróżnienie bardziej ogólnych cech obszarów miejskich. Większy piksel kumulujący w sobie kilka elementów pokrycia terenu, ale przy dominacji w odpowiedzi spektralnej wartości jaskrawości charakterystycznej dla zabudowy, włączony zostaje do obszaru miejskiego. Tak więc dla analitycznych studiów użytkowania ziemi, gdy chodzi nam o konkretne szczegółowe kategorie, większa rozdzielczość pikseli jest korzystniejsza, natomiast gdy chodzi o wyróżnienie terenów zurbanizowanych, jako całości, lepiej korzystać z obrazu utworzonego przez skaner o mniejszym chwilowym polu widzenia. W rozważaniach nad przydatnością obrazów satelitarnych do wyróżniania na nich obszarów miejskich należy wziąć pod uwagę przede wszystkim dwa aspekty: termin obrazowania oraz zakresy rejestrowanego promieniowania. Wiadomym jest, że okres wegetacyjny sprzyja maskowaniu zabudowy szczególnie obszarów peryferyjnych miasta, gdzie przeważa niska zabudowa w zieleni. Korony drzew są tam często wyższe od budynków. W Polsce, w niektórych miastach, na przykład we Wrocławiu lub Szczecinie udział takich terenów jest znaczny i obrazy „zimowe” i „letnie” tych miast bardzo się różnią. Do wyznaczenia obszaru zabudowy miejskiej lepsze będą obrazy pochodzące z okresu gdy drzewa pozbawione są liści, wtedy też i cienie ich nie będą modyfikowały w istotny sposób odpowiedzi spektralnych.

Nie zawsze jednak dysponuje się takimi materiałami, bardziej uniwersalne, w aspekcie badań wszystkich form pokrycia terenu i użytkowania ziemi, są obrazy uzyskane w okresie kwiecień — październik. Z tego okresu pochodzi także analizowana tu scena krakowska zarejestrowana przez skaner wielospektralny MSS umieszczony na satelicie LANDSAT-3.

Jeśli chodzi o wybór odpowiedniego kanału spektralnego to dla analizy zabudowanych terenów miejskich, najlepiej nadaje się obraz wykonany w kanale MSS-5 a także układ kanałów MSS-4 + MSS-7 oraz standardowa kompozycja barwna utworzona z trzech kanałów: MSS-4 (filtr niebieski) + MSS-5 (filtr zielony) + MSS-7 (filtr czerwony), gdzie jakby równoważą się wpływy poszczególnych elementów pokrycia terenu. W przedstawionych tu badaniach wykorzystano połączenie kanałów MSS-4, MSS-5 i MSS-7 dające dobrą czytelność obszaru miejskiego, co jednak w połączeniu z nie najkorzystniejszą porą obrazowania (czerwiec) dało co najwyżej średnie warunki rozpoznania miasta jako całości. Nie było to jednak jedynym celem badań. Chodziło bowiem także o uzyskanie wewnętrznego zróżnicowania struktury przestrzennej miasta poprzez wydzielenie chociaż kilku kategorii użytkowania ziemi. Nie wyczerpuje to oczywiście możliwości wydzielenia większej liczby form użytkowania przestrzeni miejskiej poprzez zastosowanie na przykład innych metod przetwarzania i klasyfikacji obrazów satelitarnych. Mając dostęp, w czasie mojego pobytu w Szkockim Uniwersytecie St. Andrews w roku 1989, do systemu przetwarzania obrazów GEMS, przetestowano go w aspekcie wyznaczenia obszaru miejskiego oraz badania wewnętrznej struktury miasta. Z syste-

mem tym zapoznał mnie oraz udzielił pomocy dr J.Solsby, któremu za to, w tym miejscu serdecznie dziękuję.

INFORMACJE O SYSTEMIE GEMS

System GEMS został opracowany i skonstruowany w brytyjskim Centrum Badań Komputerowych RAE (*Royal Aircraft Establishment*) w Farnborough. Umożliwia on przetwarzanie obrazów cyfrowych. Składa się on z jednostki wyświetlającej dane (VDU) oraz jednostki pamięci, połączonej poprzez interfejs z komputerem VAX. Ponadto możliwy jest do niego dostęp z monitora czarno-białego oraz z konsoli operatora poprzez zestaw interaktywnych pakietów oprogramowania. Zarejestrowane na taśmie CCT dane wielospektralne pochodzące z satelitów meteorologicznych, LANDSAT-a lub SPOT-a są wczytywane na dysk, w który wyposażony jest komputer VAX, a następnie przetwarzane i wizualizowane przez GEMS. Odbywa się to za pomocą serii interaktywnych zbiorów komend tak zwanego „menu”. Z głównego menu istnieje dostęp do innych pomocniczych menu, które obsługują poszczególne funkcje jak na przykład rozciąganie kontrastu. Oprogramowanie posiada pojawiający się na ekranie monitora system podpowiedzi, który prowadzi użytkownika poprzez poszczególne menu. Utworzony na ekranie monitora kolorowy obraz jest najczęściej kompozycją barwną w kolorach nierzeczywistych, ale możliwe jest uzyskanie także kolorów „naturalnych” lub zbliżonych do tych, które używane są na mapach topograficznych lub tematycznych.

W systemie GEMS można wykonać większość głównych operacji przetworzeniowych, a więc: rozciąganie kontrastu, porównywanie wartości spektralnych, rozdzielanie linii i ich poprawianie, wzmacnianie krawędzi, wygładzanie obrazu, kompresje danych, segmentowanie gęstości optycznych, ale przede wszystkim klasyfikacje treści obrazu (metodą równoległościaków oraz największego prawdopodobieństwa). Dodatkowo można uzyskać takie informacje jak: liczbę pikseli jako liczby absolutne oraz jako procent ich występowania w obrazie. Można także uzyskać przekrojowe wykresy pomiędzy dowolnymi punktami obrazu oraz ekstrahować i maskować część obrazu, a także wprowadzać tekst, skalę lub granice administracyjne.

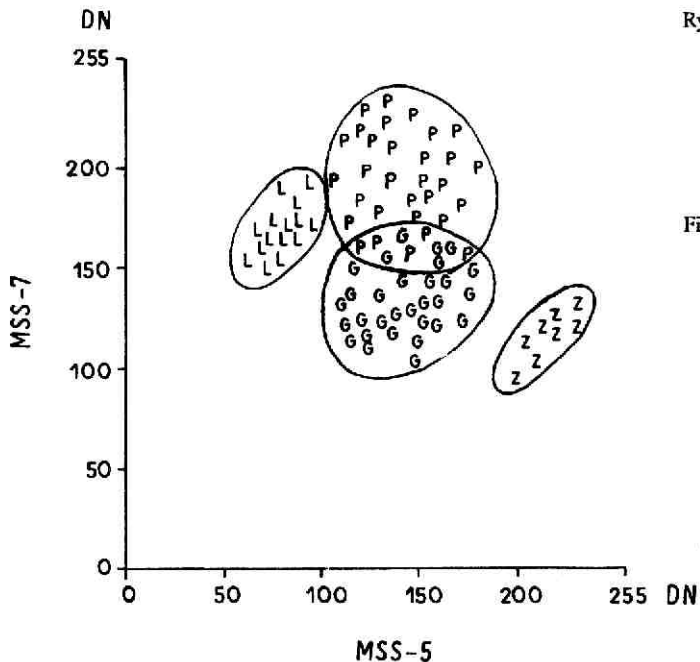
System GEMS jest stosunkowo prosty i skuteczny ale nie jest zbyt rozpowszechniony w świecie. Najczęściej stosowany jest jego program nadzorowanej klasyfikacji metodą równoległościaków (*box classification*).

ZASADY KLASYFIKACJI NADZOROWANEJ

Klasyfikacja nadzorowana może być definiowana jako proces polegający na użyciu próbek terenu o znanej tożsamości tzw „pól testowych”, które tworzą zespoły zidentyfikowanych i przypisanych danym kategoriom pikseli, do sklasyfikowania pozostałych pikseli o nieznanym jeszcze przynależności.

Jak wiadomo landsatowskie obrazy satelitarne uzyskane za pomocą skanerów MSS lub TM, posiadają strukturę dyskretną tzn. zapisaną za pomocą liczb odpowiadających różnym stopniom jaskrawości pikseli (od 0 do 255) w poszczególnych kanałach spektralnych. Liczby (wartości) te tworzą układ macierzowy składający się z kolumn i wierszy,

stanowiący podstawę do wykorzystania odpowiednich procedur matematycznych stosowanych w systemach komputerowych. W zależności od liczby kanałów spektralnych (MSS — cztery, TM — siedem), każdy piksel posiada tyle też wartości. Można więc utworzyć układy współrzędnych, których osiami będą poszczególne kanały. W płaszczyźnie (lub przestrzeni) spektralnej utworzonej przez takie układy współrzędnych różne obiekty na przykład będące kategoriami pokrycia lub użytkowania terenu tworzą zgrupowania punktów zwane klastrami (ryc. 1).



Ryc. 1. Przykładowy rozrzut pikseli reprezentujących cztery formy użytkowania ziemi oraz utworzone przez nie klastry: L - lasy, G - grunty orne, Z - zabudowa, P - łąki i pastwiska

Fig. 1. Example of spatial distribution of pixels which represents of four land use categories and their clusters: L - forest, G - arable land, Z - urban area, P - pastures

W zależności od różnic w odpowiedziach spektralnych poszczególnych obiektów (kategorii) klastry leżą w różnych odległościach od siebie lub częściowo nakładają się na siebie. Klasyfikacja treści obrazu między innymi zmierza do precyzyjnego wyodrębnienia poszczególnych klastrów. Niestety jest to nieraz bardzo trudne ponieważ oprócz wyraźnych skupisk jednoimiennych punktów w przestrzeni pomiarowej znajduje się wiele, swobodnie rozrzuconych pojedynczych punktów, których przypisanie do poszczególnych klastrów stanowi poważny problem i musi uwzględniać ich własności geometryczne i statystyczne. Nawet tylko częściowe pokrywanie się różnych klastrów świadczy o tym, że pewne wartości pikseli przynależą do więcej niż jednej z wyróżnionych kategorii. Jeżeli takich punktów jest niewiele można je pominąć, obniżając nieznacznie przez to dokładność opracowania, ale jeśli jest ich więcej należy przede wszystkim skorygować zakresy spektralne przypisane danym kategoriom (Domanski, 1989). Pierwszym i kluczowym etapem klasyfikacji nadzorowanej, niezależnie od zastosowanej metody jej

przeprowadzania, jest wybór „pól testowych”. Nie powinny one dotyczyć obszarów bardzo specyficznych, ani też nie powinny obejmować więcej niż jedną z wydzielonych kategorii. Rozmiar, kształt i lokalizacja muszą być takie, aby dogodna była identyfikacja zarówno w obrazie jak i w terenie. Piksele mieszczące się w tych polach tworzą próbki testowe używane do takiego prowadzenia algorytmu klasyfikacji, aby specyficzne wartości spektralne zostały przypisane właściwym klasom informacyjnym (Ciołkosz, Kęsik, 1989). Klasyfikacja nadzorowana odznacza się wieloma zaletami szczególnie w porównaniu z klasyfikacją nienadzorowaną. Analizujący ma kontrolę nad menu o selektywnej strukturze, dotyczącej kategorii informacyjnych dostosowanych do konkretnego celu i danego obszaru. Ta zaleta może mieć podstawowe znaczenie jeśli zajdzie konieczność wykorzystania klasyfikacji do specjalnego celu albo porównania z inną klasyfikacją tego samego terenu, ale dla innego odniesienia czasowego, lub też w przypadkach, gdy klasyfikacja musi być kompatybilna z wynikami klasyfikacji zdjęć obszarów sąsiadujących. Klasyfikacja nadzorowana jest związana z konkretnymi obszarami o znanej tożsamości. Zaletą jej jest też fakt, że operator jest w stanie wykryć poważne błędy w klasyfikacji poprzez analizę danych treningowych, tak by określić, czy zostały one prawidłowo sklasyfikowane w trakcie procedury klasyfikacyjnej. Prawidłowy dobór danych treningowych nie zawsze musi oznaczać prawidłowe sklasyfikowanie całego obszaru.

Są też i wady klasyfikacji nadzorowanej. Po pierwsze, analizujący w rzeczywistości narzuca danym pewną strukturę klasyfikacyjną podczas gdy na przykład klasyfikacja nienadzorowana poszukuje tzw. klas „naturalnych”. Te, określone przez operatora klasy mogą nie przystawać do klas naturalnych, w których grupują się dane, a zatem mogą nie być wyraźne lub dobrze zdefiniowane w wielowymiarowej przestrzeni danych. Po drugie, dane testowe często są tworzone na bazie kategorii informacyjnych, a dopiero w drugiej kolejności na podstawie właściwości spektralnych. Obszar testowy będący na przykład w całości lasem może być jednoznaczny względem samego określenia „las”, ale bardzo odmienny w takich aspektach jak gęstość, wiek, zacienienie, itp. Sumienny wybór danych testowych może być bardzo czasochłonny i kosztowny. Ze względu na inny typ zapisu mogą też wystąpić trudności w dopasowaniu pól testowych wyznaczonych na mapach lub zdjęciach lotniczych do obrazu, który ma zostać sklasyfikowany. Klasyfikacja nadzorowana nie zawsze musi się okazać efektywna przy rozpoznaniu i zobrazowaniu specjalnych lub unikalnych kategorii, które są nie ujęte polami treningowymi, bo nie są one znane analizującemu, lub zajmują bardzo małe powierzchnie na obrazie.

Pola testowe określa się zwykle poprzez wyznaczenie czterech narożników kwadratu lub obszaru prostokątnego przy użyciu linii i liczb elementarnych w ramach układu współrzędnych obrazu cyfrowego. Wybór musi być poprzedzony analizą map i zdjęć lotniczych obszaru, który ma zostać sklasyfikowany. Zakłada się też, że analizujący posiada pewną podstawową wiedzę o wybranym do badań obszarze i o problemie, będącym przedmiotem wykonywanej analizy, a także że przeprowadził on konieczne obserwacje w terenie zanim przystąpił do faktycznego wyboru pól testowych. Ważnym problemem jest całkowita liczba pikseli wybranych dla każdej wyróżnianej kategorii. Jako ogólną zasadę postępowania, operator winien przyjąć, że kilka indywidualnych obszarów treningowych zapewnić ma w sumie ilość co najmniej 100 pikseli dla każdej kategorii.

Nieobojętne są też rozmiary pól testowych. Powinny one być wszystkie wystarczają-

co duże aby zapewnić poprawne określenie właściwości każdej z klas informacyjnych. Muszą zatem zawierać wystarczającą liczbę pikseli aby utworzyć wiarygodne dane szacunkowe na temat właściwości spektralnych każdej klasy. Pojedyncze pola testowe nie powinny być jednak zbyt duże, jako że duże obszary powodują niepożądaną różnorodność. Całkowita liczba pikseli dla każdej klasy może być utworzona z wielu oddzielnych pól testowych, każdy obszar może być znacznie mniejszy niż całkowita liczba pikseli wymagana dla każdej klasy. Zaleca się aby miały one powierzchnię co najmniej 4 ha jako absolutne minimum, a w miarę możliwości obejmowały około 16 ha.

Małe obszary testowe sprawiają trudności przy dokładnej ich lokalizacji w obrazie pikselowym. Z drugiej strony, stosowanie dużych pól testowych zwiększa prawdopodobieństwo zaistnienia niejednorodności spektralnych. Biorąc pod uwagę dane ze skanera MSS gdzie jeden piksel odpowiada w rzeczywistości terenowej 4424 m², zaleca się od 10 do 40 pikseli dla każdego pola testowego.

Kształty pól testowych nie są tak istotne, z zastrzeżeniem, że nie powinny uniemożliwiać poprawnego wyznaczenia i zlokalizowania konturów obszarów w obrazach cyfrowych. Zazwyczaj najłatwiejsze jest wyznaczenie obszarów kwadratowych lub prostokątnych, jako że takie kształty minimalizują liczbę wierzchołków, co ułatwia pracę analizującemu. Pola testowe muszą być lokalizowane w odniesieniu do punktów łatwo rozpoznawalnych zarówno w terenie, na mapach i zdjęciach lotniczych, a także w obrazach cyfrowych.

Każda kategoria informacyjna powinna być reprezentowana poprzez kilka pól testowych usytuowanych w różnych punktach obrazu. Skoro dane testowe mają odzwierciedlać zróżnicowanie obrazu, nie mogą one być położone w bliskim sąsiedztwie, byłoby to bowiem powodem powstania reprezentacji, która nie ilustrowałaby zróżnicowania obrazu warunków terenowych występujących na całym analizowanym obrazie. W wyborze pól testowych nie należy polegać tylko na pośrednim materiale badawczym szczególnie w sytuacjach gdzie jest możliwa bezpośrednia obserwacja w terenie.

Optymalna liczba pól testowych zależy od liczby wyróżnionych kategorii oraz od ich różnorodności. W sytuacji idealnej, każda kategoria informacyjna, lub każda podklasa spektralna, powinna być reprezentowana przez pewną liczbę, zwykle 5 do 10, a najmniej 3, pól testowych, tak by zapewnić możliwość przedstawienia właściwości spektralnych każdej z kategorii. Wybór liczniejszych pól testowych jest też pożądany, ponieważ później, w trakcie klasyfikacji może zajść konieczność odrzucenia, niektórych z nich jeżeli okażą się one nieodpowiednie. Doświadczenie uczy, że zazwyczaj lepiej jest wyznaczyć wiele małych pól testowych niż stosować tylko niewielką ilość dużych pól.

Pola testowe powinny być równomiernie usytuowane na obrazie tak by stały się bazą do odzwierciedlenia zróżnicowania istniejącego w rzeczywistości. Granice pól testowych powinny znajdować się w znacznej odległości od brzegów analizowanej sceny, tak by nie obejmowały pikseli położonych na jej obrzeżach. Być może najistotniejszą cechą dobrego pola testowego jest jego jednorodność. Dane wewnątrz każdego pola testowego powinny wykazywać jednomodalną dystrybucję częstotliwości dla każdego pasma spektralnego. Dane testowe dostarczają wartości, które winny mieć przybliżone średnie, wariacje i kowariancje wartości jaskrawości pikseli w poszczególnych zakresach spektralnych. W idealnej sytuacji, wartości te przedstawiają warunki występujące wewnątrz

każdej klasy w obrębie analizowanej sceny, i w ten sposób tworzą bazę dla klasyfikacji zdecydowanej większości pikseli. W praktyce oczywiście rozpatrywane sceny (ujęcia, krajobrazy) mogą różnić się bardzo istotnie co do stopnia skomplikowania, a poszczególni analizujący różnią się co do znajomości danego terenu, a także co do swoich zdolności w wyznaczaniu pól testowych, które w sposób wierny odzwierciedlają właściwości spektralne klas informacyjnych. Niektóre klasy informacyjne nie są całkowicie jednorodne spektralnie i nie mogą w dokładny sposób być reprezentowane przez pojedynczy zestaw danych testowych.

Im mniejszy przedział wartości pikseli w polu testowym tym większa jego jednorodność, im szerszy zakres tym większe możliwości zmienności i niejednorodności, większa obawa o pokrywanie się zakresów dla różnych kategorii. Uważa się, że selekcja danych testowych może być równie, a nawet bardziej, ważna jak sam wybór algorytmu klasyfikacyjnego. J. B. Campbell (1981) badał charakter danych testowych w aspekcie ich wpływu na dokładność klasyfikacji. Podane przez niego przykłady wykazały, że sąsiadujące ze sobą piksele w obrębie pól testowych miały tendencje do wykazywania podobnych wartości. W wyniku tego próbki składające się na każde pole testowe mogą okazać się niezależnymi próbkami właściwości istniejących wewnątrz wybranej kategorii. Próbki testowe zebrane w przylegających blokach mogą mieć tendencję do niewystarczająco precyzyjnego ilustrowania zmienności wewnątrz każdej klasy. Próbki zastosowane przez autora opracowania pokazują również, że stopień podobieństwa zmienia się wraz z kategoriami pokrycia terenu, od pasma do pasma oraz od punktu czasowego do punktu czasowego. Jeżeli próbki testowe są wybierane w sposób przypadkowy wewnątrz klas, nie zaś jako bloki sąsiadujących ze sobą pikseli, efekty wysokiego podobieństwa są zminimalizowane, a wierność klasyfikacji jest wtedy poprawiona. Specyficzne okoliczności w klasyfikacji nadzorowanej bywają bardzo różne, nie jest zatem możliwe szczegółowe omówienie procedur, które powinno się stosować przy selekcji danych testowych. Częściowo będą one zdeterminowane przez sprzęt i oprogramowanie, stosowane w konkretnym przypadku. Jednakże jest możliwe wskazanie pewnego modelu sekwencji kluczowych etapów. Są to:

1. Ustalenie kategorii informacyjnych oraz sprecyzowanie cech w nich dominujących.

2. Studia w terenie. Jeżeli analizujący zna ten teren bardzo dobrze, oraz jeśli istnieje dostęp do najnowszych map i zdjęć, dodatkowe obserwacje w terenie mogą nie być konieczne. Chociaż dostępność i czas mogą być ograniczone, ważne jest aby dokonać wizji wszystkich klas terenu napotkanych wewnątrz badanego obszaru. Obserwacje nie powinny się ograniczać do kilku łatwo obserwowalnych części obszaru. Analizujący winien prowadzić dokładne zapisy, a pożyteczne będzie także sporządzenie zdjęć fotograficznych w celu uzyskania trwałego zapisu zaobserwowanych okoliczności. Obserwacje w terenie winny być zsynchronizowane z terminem obrazowania, lub, kiedy to jest niemożliwe, winny przynajmniej mieć miejsce w tej samej porze roku kiedy je wykonano.

3. Wstępna analiza obrazu cyfrowego i zdefiniowanie punktów wyróżniających się w terenie, które mogą być przydatne przy lokalizacji pól testowych oraz ocena jakości obrazu.

4. Zidentyfikowanie obszarów ustalonych jako testowe.

5. Wyświetlanie obrazu cyfrowego, potem zlokalizowanie i wyznaczenie pól testowych w obrazie cyfrowym. Upewnienie się, czy granice obszarów testowych są umieszczone w „bezpiecznej” odległości od obrzeży sceny, tak by uniknąć obecności pikseli mieszanych wewnątrz pól testowych. Przy kończeniu tego etapu winno się uzyskać identyfikację wszystkich pól testowych pod względem współrzędnych kolumn i wierszy, w obrębie obrazu.

6. Wyświetlenie i skontrolowanie dla każdego pola testowego histogramów częstości dla wszystkich pasm spektralnych stosowanych w klasyfikacji. Jeżeli to możliwe, skontrolowanie średnich, miar dywergencji, kowariancji, i innych mierników, tak aby uzyskać ocenę stopnia użyteczności danych testowych.

7. Modyfikowanie granic pól testowych, lub też, w razie potrzeby, odrzucenie tych pól, które są nieodpowiednie i wtedy wyznaczenie nowych obszarów.

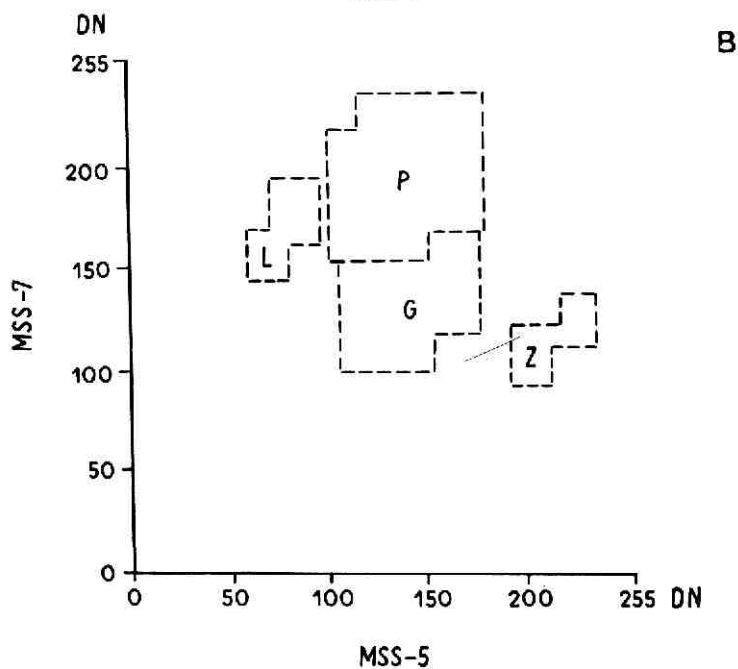
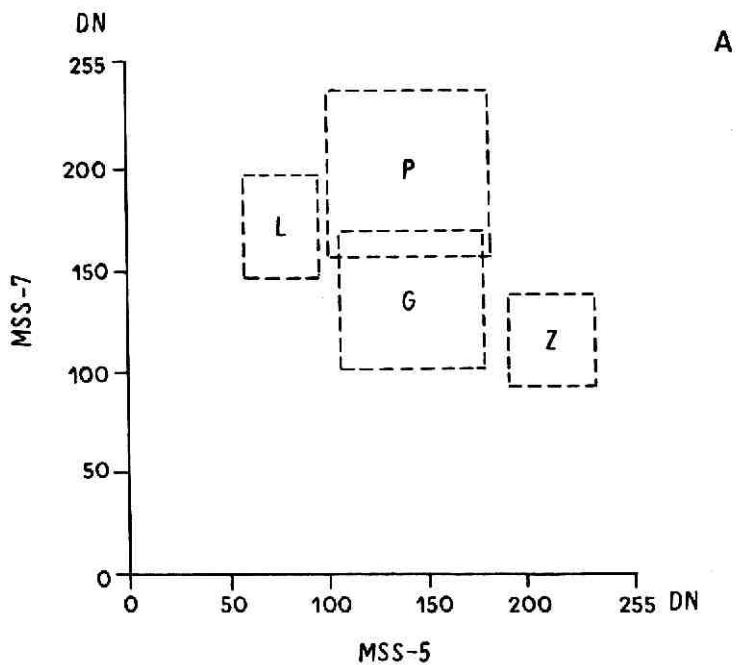
8. Przekształcenie wcielenia danych testowych w taką formę, która byłaby odpowiednia dla stosowania w wybranej procedurze klasyfikacyjnej.

Mając już według tych kryteriów wybrane pola testowe dla poszczególnych kategorii, identyfikuje się je i lokalizuje w obrębie zwizualizowanego obrazu na ekranie monitora. Dane lokalizacyjne przekazuje się do pamięci komputera wraz z określeniem klas, które reprezentują poszczególne pola testowe. Komputer analizuje jaskrawość pikseli danego pola testowego we wszystkich kanałach spektralnych i umieszcza ich wektory w wielowymiarowej przestrzeni pomiarowej, tworząc w ten sposób klastry dla każdej kategorii. Następnie komputer porównuje każdy piksel analizowanego obrazu z wartościami pikseli tworzącymi określony klaster testowy i w przypadku zgodności z nim zakwalifikuje go do danej kategorii zaś w przypadku nieznaledzenia tej odpowiedniości zalicza go do kategorii „nierozpoznane” (S a b i n s , 1987).

Wspomniane wyżej zachodzenie klastrów dwóch, a czasem kilku kategorii (ryc. 1) stwarza sytuację niejednoznacznego sklasyfikowania niektórych pikseli. Spowodowane to jest zbyt małymi różnicami jaskrawości pikseli odnoszących się do poszczególnych obiektów i to nawet czasem w kilku kanałach spektralnych.

Klasyfikacja równoległościenna polega na utworzeniu w wielowymiarowej przestrzeni danych spektralnych figur geometrycznych (równoległościannów), w których „mieszczą się” piksele danej kategorii. Wartości spektralne pikseli jeszcze niesklasyfikowanych ulegają projekcji w przestrzeni danych, i te które znajdują się w obrębie wieloboku wyznaczonego przez dane testowe są przypisywane odpowiednim kategoriom. Taka procedura może być prowadzona w korelacji nawet kilku kanałów spektralnych. Sam mechanizm klasyfikacji równoległościennej ilustruje przykład podany na ryc. 2, gdzie pokazano korelację tylko dwóch kanałów (MSS-4 i MSS-7) wybranych z większego zestawu danych — dla zwięzłego i łatwego zilustrowania. Cztery kategorie pokrycia terenu (L — lasy, G — grunty orne, P — łąki i pastwiska, Z — tereny zabudowane) nie mogą być, jak widać z ryc. 1, ściśle określone przez wybrany zakres wartości jaskrawości pikseli (DN^*). Na przykład gdy naszym celem byłoby zidentyfikowanie kategorii G, to biorąc pod uwagę jej zakres spektralny w kanale MSS-5, (od 100 do 180) można zauważyć, że będzie on reprezentował mieszaną klasę G plus P, ponieważ zakres P również części-

*DN — Digital Number



Ryc. 2. Klasyfikacja nadzorowana metodą równoległościaków: A - równoległościaki regularne, B - równoległościaki nieregularne

Fig. 2. Supervised classification - parallelepiped („box” classification). A - with off - the peg boxes, B - with beskope boxes

wo mieści się w tej klasie. Podobnie w kanale MSS-7, zakres pomiędzy 60 a 160 reprezentuje mieszaną klasę G plus Z (ryc. 1).

Natomiast klasyfikacja równoległościenna (ryc. 2A) daje wyraźnie wyselekcjonowaną kategorię G wyznaczoną przez równoległobok. Takie równoległościenny mogą być łatwo utworzone dla każdej kategorii określonej przez dane testowe i wszystkie piksele analizowanej sceny mogą być sklasyfikowane przez równoległościenny, w obrębie którego się znajdują. Problemy w zakwalifikowaniu poszczególnych pikseli wyłaniają się gdy poszczególne równoległościenny zachodzą na siebie (G i P na ryc. 2A). Takie zachodzenie może mieć miejsce wówczas kiedy wybrane zostały klasy o zbliżonych wartościach spektralnych, lub też wówczas, kiedy istnieje wysoki stopień korelacji pomiędzy własnościami spektralnymi obiektów w różnych kanałach. Wtedy występują w rezultacie wydłużone pasma pikseli, które nie pasują w sposób idealny do poszczególnych równoległościennów. Aby uniknąć takich problemów użytkownik nie powinien wyznaczać równoległościennów regularnych, lecz tworzyć nieregularne poprzez nakładanie na siebie równoległościennów regularnych, aż do uzyskania odpowiedniego wzajemnie wykluczającego się dopasowania. Rezultat takiego dopasowania widoczny jest na ryc. 2B, gdzie klasy P i G zostały od siebie oddzielone (Curran, 1986).

Pomimo wyraźnych zalet metoda klasyfikacji równoległościennej ma też i wady. Poza niemożnością całkowitego wyeliminowania przenikania się poszczególnych równoległościennów oraz uproszczenia polegającego na zliczaniu pewnej liczby pikseli leżących na obrzeżach do tego a nie sąsiedniego równoległościennu, poprzez przyjęcie określonego kształtu równoległościennu. Wadą jest także pozostawienie stosunkowo dużej liczby pikseli niesklasyfikowanych, ponieważ wyznaczone przez pola testowe kategorie nigdy nie obejmą całej gamy wartości pikseli jakie występują na analizowanym obrazie.

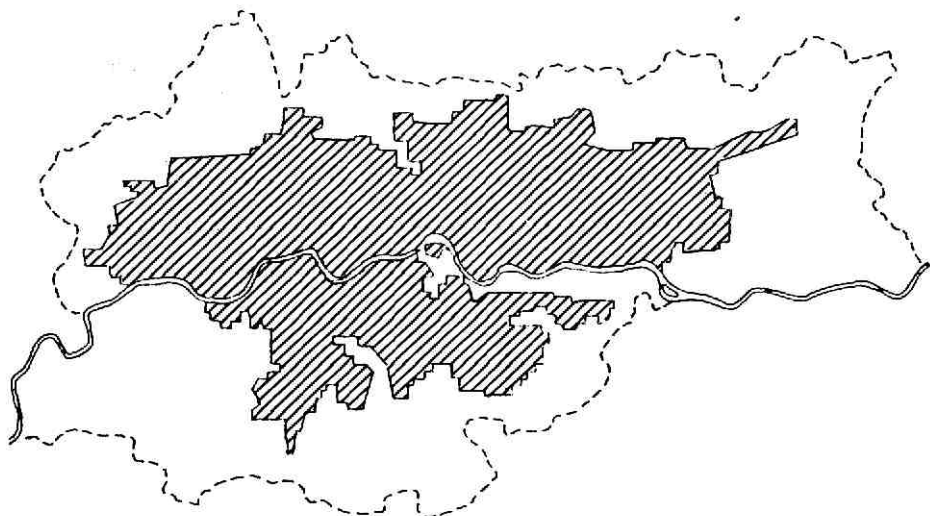
WYBRANE ELEMENTY STRUKTURY PRZESTRZENNEJ KRAKOWA UZYSKANE W WYNIKU KLASYFIKACJI RÓWNOLEGŁOŚCIENNEJ W SYSTEMIE GEMS

W wyborze kategorii informacyjnych kierowano się przede wszystkim kontrastowością ich obrazu spektralnego aby uniknąć wzajemnego pokrywania się klastrów, a przynajmniej znacznie ograniczyć takie sytuacje. Przy takim podejściu nie cały obszar miasta mógł być sklasyfikowany, nie było to jednak celem tych badań. Można było się wprawdzie zdecydować na wprowadzenie tzw. „klas mieszanych” uwzględniających kilka podstawowych kategorii, ale wówczas powstały w ten sposób obraz byłby zbyt mało zróżnicowany i zbyt ogólny. Takie ujęcie jest też bardzo użyteczne w mało i średnioskalowych prezentacjach kartograficznych dużych miast, zwłaszcza wówczas gdy chodzi o pokazanie ich stref funkcjonalnych.

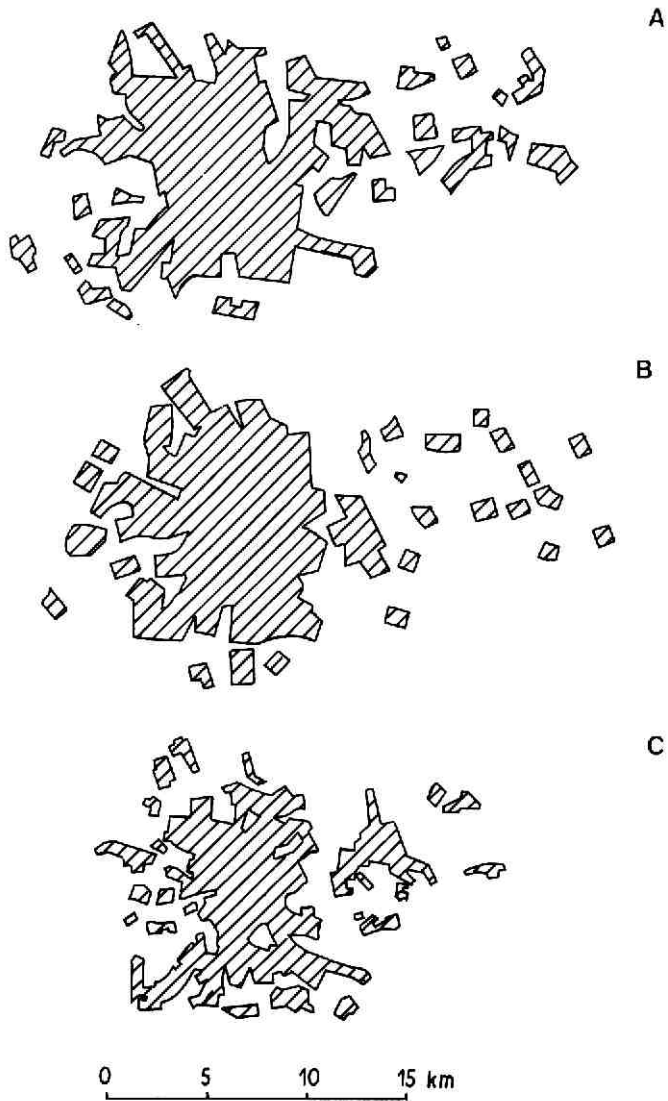
Pierwszym etapem było jednak samo wyodrębnienie właściwego „obszaru miejskiego”, który stał się obiektem analizy. Został on wydzielony wizualnie na ekranie monitora, na którym utworzono standardową kompozycję barwną z kanałów MSS-4, -5 i -7. Do tego obszaru bliżej niezdefiniowanego bo opartego tylko na zewnętrznych cechach fizjonomicznych wynikających z właściwości spektralnych obiektów, zaliczono te piksele, które miały wyraźnie niebiesko-zielone zabarwienie, uznane drogą wielu porównań z

rzeczywistością terenową jako najbardziej reprezentatywne dla obszarów zabudowanych, ale nie wykluczających także pewnego udziału roślinności. Drogą porównań obrazu pikselowego z wybranymi fragmentami miasta udało się określić ten udział na 25-30 procent, w obrębie jednego piksela — wtedy nie traci on jeszcze w sposób zdecydowany tego zabarwienia, które uznane zostało jako wskaźnik „miejskości”. Drugim czynnikiem pozwalającym na takie, a nie inne wyodrębnienie obszaru miejskiego był stopień jego zwartości. Chodziło o to, aby nie pominąć w analizie tych obszarów, które są wprawdzie oddalone od gęsto zabudowanego centrum i oddzielone są od niego, i od siebie, terenami niezabudowanymi, ale również pełniącymi funkcje miejskie, na przykład rekreacyjne. Nie brano natomiast pod uwagę administracyjnej przynależności do miasta, która ma często tylko formalne, a nie funkcjonalne podstawy. Znajomość terenowa była przy tym nieodzowna. Stąd wyznaczony „obszar miejski” odbiega od administracyjnego (ryc. 3) chociaż w jego konturze ujęto nie tylko tereny zabudowane ale też te, które znajdują się pomiędzy nimi (lasy, łąki, grunty orne) a nawet te na obrzeżu, o których wiadomo, że są bezpośrednio czy pośrednio związane z funkcjami miejskimi, na przykład Las Wolski, oczyszczalnia ścieków itp.

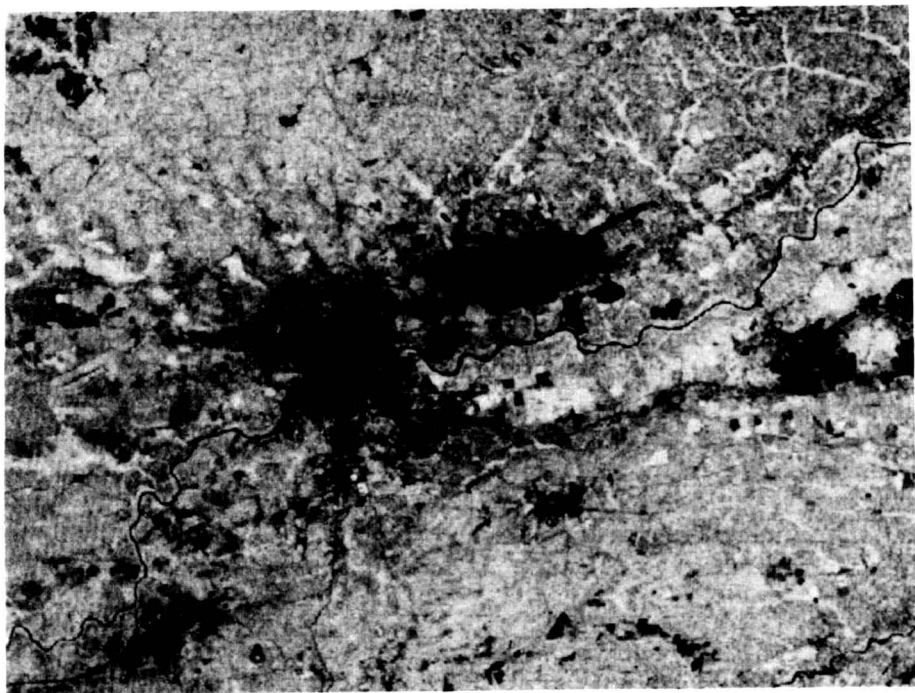
Umowność takiego zasięgu terytorialnego miasta Krakowa jest oczywista, może jednak stanowić on pewną propozycję kartograficznego obrazu miasta na przeglądowych, średnio i małoskalowych mapach topograficznych, ogólnoinformacyjnych jak i tematycznych, na przykład w atlasach regionalnych. Kartograficzna interpretacja obszaru miejskiego w postaci jego zgeneralizowanego konturu jest zwykle bardzo subiektywną ze względu na dużą niejednoznaczność kryteriów przy zaliczaniu do nich różnych rodzajów pokrycia lub użytkowania terenu. Dlatego obiektywne ujęcie miasta w obrazie satelitarnym może być tutaj bardzo pomocne nie mówiąc już o znacznie większej aktualności



Ryc. 3. Zasięg „obszaru miejskiego” Krakowa na podstawie obrazu satelitarnego z LANDSAT-3
Fig. 3. Cracov urban area (after visual interpretation of LANDSAT-3 imagery)



Ryc. 4. Obraz miasta Krakowa na mapach z: A – Atlasu Województwa Krakowskiego z roku 1979, B – przeglądowej mapy topograficznej województwa krakowskiego 1:300 000, C – Atlasu Samochodowego Polski
 Fig. 4. Cracov urban area. A – in Atlas of Cracov Voivodship, B – in general topographic map 1:300 000, C – in Road Atlas of Poland



Ryc. 5. Fragment obrazu satelitarnego z LANDSAT-3, przedstawiający miasto Kraków i okolice. Przetworzenie według funkcji liniowej

Fig. 5. Fragment of the scene of LANDSAT-3 with city of Cracov and their vicinity (linear stretching)

w stosunku do istniejących map, w oparciu o które dokonuje się często dość przypadkowej generalizacji. Na ryc. 4, podano trzy różne ujęcia obszaru miasta Krakowa na trzech mapach wydanych mniej więcej w tym samym okresie, zaś na ryc. 3, dostosowany do tej samej skali kontur miasta uzyskany na podstawie wizualnej interpretacji obrazu satelitarnego, ryc. 5.

Analizie klasyfikacyjnej poddano fragment sceny 203-25 LANDSAT-a zarejestrowanej w dniu 5 czerwca 1979 roku, wykorzystując trzy kanały: MSS-4, -5, i -7. Kanał MSS-6 pominięto jako niewiele różniący się od kanału MSS-7. Zwizualizowany obraz jako kompozycja barwna był dobrze czytelny nawet w rejonie stale obecnego zanieczyszczenia atmosferycznego występującego w sąsiedztwie Huty im. T. Sendzimira, gdzie jednak zapewne miało ono wpływ na odpowiedzi spektralne, a tym samym na wartości jaskrawości pikseli, szczególnie w kanale MSS-5. Ekstrahowany z fragmentu sceny obszar miejski tworzyło 25506 pikseli. Biorąc pod uwagę użycie trzech kanałów, łącznie liczba pikseli wzięta do analizy wynosi 76518. Przyjmując terenowy wymiar piksela w systemie MSS równy 4424 m^2 obszar ten wyniósł 11 284 ha.

Zdecydowano się na wyróżnienie sześciu kategorii informacyjnych będących jednocześnie elementami struktury przestrzennej miasta.

I — tereny zwartej zabudowy mieszkaniowej, głównie starej, średniowysokiej (do 4 kondygnacji) wraz z placami, parkingami i niektórymi terenami przemysłowymi oraz bardzo małym udziałem zieleni (na monitorze — kolor czerwony).

II — tereny zabudowy rozluźnionej ze znacznym udziałem zieleni występującej jako zadrzewienia uliczne, małe skwery, itp., ale bez parków (kolor purpurowy).

III — tereny tzw. „zabudowy niskiej w zieleni” występującej głównie na peryferiach miasta z dużym udziałem (do 60 procent) drzew (kolor ciemno-zielony).

IV — tereny zabudowy osiedlowej („blokowiska”) cechujące się na ogół dużymi kwaterami i wyspowo rozmieszczonymi grupami zieleni (kolor niebieski).

V — tereny zieleni wysokiej częściowo urządzonej (resztki naturalnych zbiorowisk roślinnych, parki miejskie, „stare” zespoły ogrodów działkowych (kolor jasno-zielony).

VI — tereny zieleni niskiej: błonia, łęgi nadrzeczne, tereny zadarnione (kolor żółty).

Tereny niesklasyfikowane na ekranie monitora wystąpiły jako czarne.

Wszystkie kategorie wydzielono tylko w obrębie wyznaczonego „obszaru miejskiego”. Dla każdej z tych kategorii wybrano po trzy pola testowe liczące od kilkunastu do kilkudziesięciu pikseli. Po przeprowadzonej klasyfikacji uzyskano barwny obraz w monitorze, który następnie po sfotografowaniu pozwolił na rozrysowanie sześciu mapek analitycznych dla poszczególnych kategorii elementów struktury przestrzennej Krakowa.

REZULTATY KLASYFIKACJI I ICH OCENA

Zwarta zabudowa miejska (I)

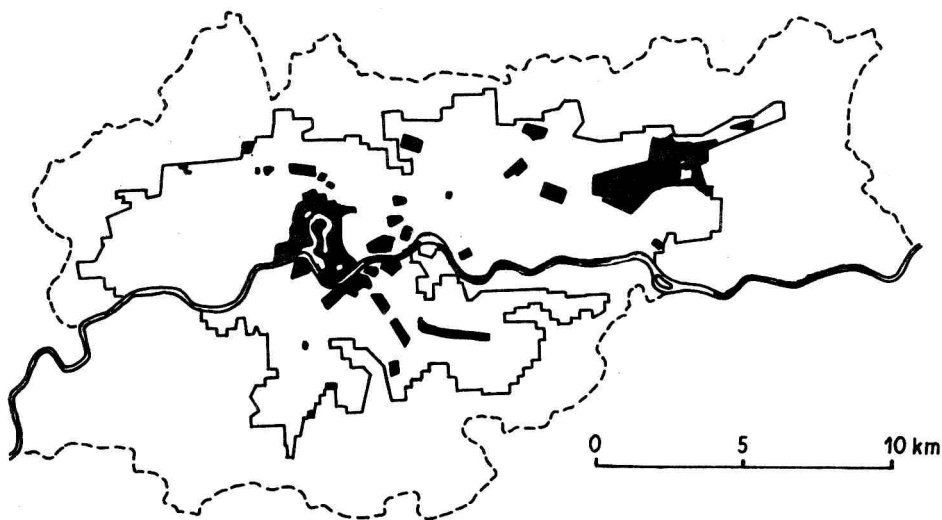
Lokalizacja pól testowych: 1) pomiędzy ul. Sławkowską a ul. Floriańską, 2) rejon Kazimierza 3) ul. Krowoderska – ul. Szlak – Stary Kleparz – pl. Matejki.

Tabela 1

Table 1

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odchylenie standardowe Standard deviation
4	42 - 47	43,6170	1,5338
5	40 - 49	44,2199	2,3149
7	25 - 57	41,0709	7,8255

Łącznie w trzech polach testowych ujęto 141 pikseli. W tej kategorii sklasyfikowanych zostało 3518 pikseli, co stanowi 11,39 % obszaru miejskiego. Bardzo wiernie zostało uchwycone centrum miasta: w zasadzie cała zabudowa Starego Miasta oraz okalająca ją zabudowa, głównie XIX-wieczna – pomiędzy pierwszą i drugą – obwodnicą, a także Stare Podgórze i Dębniki, ryc. 6. Inne, sklasyfikowane w tej grupie tereny są tylko fragmentami większych zwartych powierzchni zabudowy, na przykład dwa kwartały na terenie najstarszej części centrum Nowej Huty. Wyspowo sklasyfikowano w tej kategorii niezbyt zwartą zabudowę starych przedmieści, na przykład w Kobierzynie, ale nie wszystkich, a także niektóre fragmenty nowych osiedli mieszkaniowych (Bronowice), oraz wiele obszarów



Ryc. 6. Kategoria I – zwarta zabudowa miejska
 Fig. 6. Category I – compact urban settlement

zaliczanych do terenów przemysłowo-składowych zarówno starych (Zabłocie, rejon Polfy) jak i nowych (głównie duże tereny Huty im. T. Sendzimir). Do tej kategorii zaliczono również niektóre tereny komunikacyjne (rejon stacji Kraków-Prokocim). Kilka lokalizacji było fałszywych, na przykład plac budowy oczyszczalni ścieków. Pewnym zakończeniem było zakwalifikowanie w tej kategorii fragmentów rzeki Wisły. Prawdopodobnie jest to wynikiem jej nadmiernego zanieczyszczenia w tych miejscach. Ogólnie wiarygodność klasyfikacji oceniono wysoko, na — 80-85 %.*

Zabudowa miejska rozluźniona (II)

Lokalizacja pól testowych: 1) rejon na zachód od Parku Krakowskiego, 2) Półwieś Zwierzynieckie 3) Jurydyka „Lubicz”.

Łącznie pola testowe liczą 139 pikseli, a liczba sklasyfikowanych pikseli wyniosła 4382 (14.2 %).

Jak widać z powyższej tabeli zakresy wartości pikseli w kanale MSS-4 i MSS-5 obejmują prawie wszystkie obszary sklasyfikowane w klasie I natomiast o zaliczeniu danego terenu do kategorii II, zdecydował kanał MSS-7. Jest to jednocześnie chyba najmniej jednoznacznie określona kategoria. Obejmuje zarówno tereny dzielnic śródmiejskich jak i bardziej peryferyjne, ryc. 7. Czynnikiem decydującym było „nasycenie” obszarów objętych przez poszczególne piksele roślinnością, które maksymalnie oszaco-

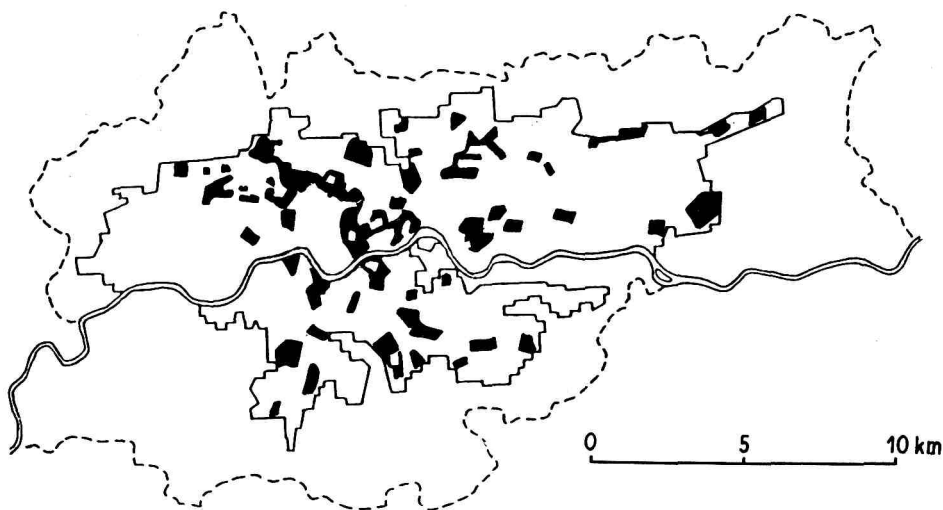
* Ponieważ nie stosuje się nigdzie podziału na tak sprecyzowane kategorie trudno o porównawcze materiały dające podstawę do dokładnej oceny wiarygodności.

wano — do 40 %. Są to przede wszystkim zadrzewienia uliczne i niezbyt duże ogródki, czasem kilka drzew na podworcach i w zapleczu budynków znajdujących się w ciągu ulicznym. Okazało się, że stosunkowo dużo jest tych mieszanych pikseli w starszej zabudowie uważanej raczej za zupełnie pozbawioną zieleni. Błędnie zaklasyfikowano, niektóre tereny peryferyjne, na przykład w północno-zachodniej części miasta oraz na terenie HTS (Huty im. T. Sendzimira) i wokół niej. Pomimo niejednoznaczności tej kategorii, wiarygodność rozpoznania mimo wszystko należy ocenić na ponad 60% (na podstawie porównania z mapami Atlasu Miasta Krakowa, 1988).

Tabela 2

Table 2

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odchylenie standardowe Standard deviation
4	43 - 53	48,1230	2,5029
5	44 - 67	53,3740	5,4904
7	55 - 81	64,9286	6,5570



Ryc. 7. Kategoria II – zabudowa miejska rozluźniona

Fig. 7. Category II – dispersed urban settlement

Zabudowa niska w zieleni (III)

Pola testowe: 1) Salwator, 2) tzw. „Osiedle Oficerskie”, 3) Krzesławice.

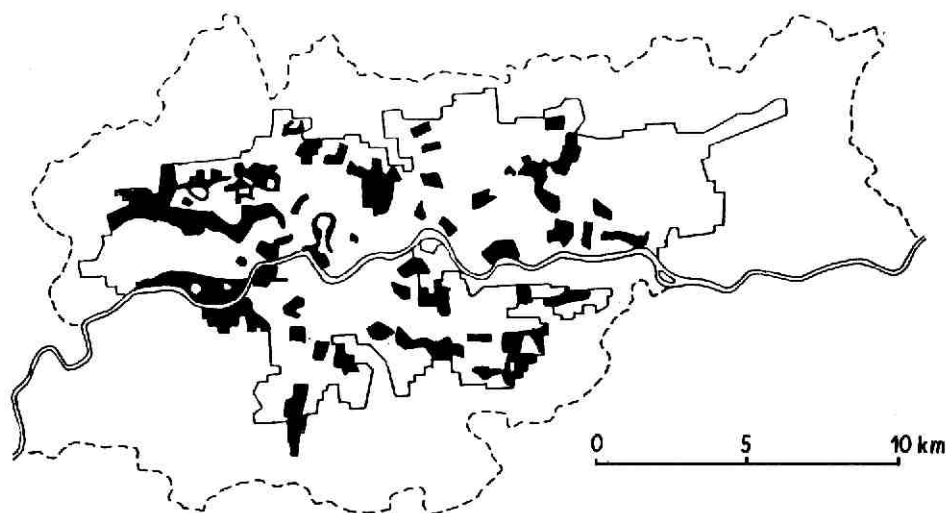
Łącznie pola testowe liczą 42 piksele, a liczba pikseli sklasyfikowanych wyniosła — 6382 (20.7 %). Podobnie jak w kategorii II, o bardziej zdecydowanym wydzieleniu tej kategorii

przesądził kanał MSS-7, o znacznej rozpiętości zakresu wartości jaskrawości pikseli. Jest więc to dalszy stopień zwiększającego się udziału terenów zielonych w obrębie pikseli, ale już bardziej zwartych. W polach testowych uwzględniono także pewną ilość pikseli typowo „roślinnych” bezpośrednio przylegających do pikseli identyfikowanych z zabudową. Należą tutaj głównie tereny zabudowy willowej z dużymi ogrodami i sadami a także tereny typowej zabudowy wiejskiej, ryc. 8. W tej ostatniej grupie obraz jest bardziej wiarygodny ponieważ zagrody wiejskie, czasem obiekty drewniane pomimo wszystko nie mają tak dużej dominaty zieleni (są też przecież tam zabudowania gospodarcze) natomiast obraz dzielnic willowych posiada jednak znaczną przewagę terenów zieleni, pomimo że w odpowiedziach spektralnych duży jest też udział jaskrawości pochodzących od murowanych zabudowań, przeważnie dość dużych i dających jasną tonację, a przez to kontrastujących z otoczeniem.

Tabela 3

Table 3

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odchylenie standardowe Standard deviation
4	42 - 49	44,8095	1,6710
5	41 - 52	44,9286	2,6710
7	74 - 104	88,8573	7,7385



Ryc. 8. Kategoria III – zabudowa niska w zieleni

Fig. 8. Category III – low settlement among green areas

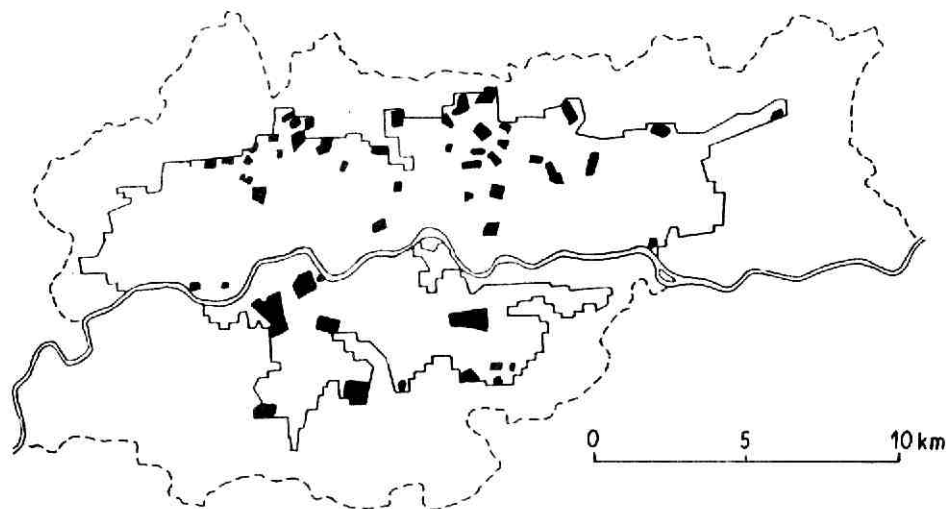
Na podwyższenie jasnych tonów mają wpływ także istniejące w tych obszarach liczne szklarnie o dużej wartości współczynnika odbicia spektralnego. Jest to największa kategoria pod względem sklasyfikowanego w niej obszaru i jest na tyle ogólnie określona (przez taki, a nie inny dobór pikseli w polach testowych), że wiarygodność rozpoznania jest wysoka, oceniono ją na 70-80 %. Z zaobserwowanych przypadków mylnie sklasyfikowanych terenów największa ich liczba spowodowana jest wliczeniem do tej kategorii zbyt dużej ilości terenów zieleni, szczególnie gdy były to pojedyncze piksele. Na uwagę zasługuje fakt, że w tej kategorii znalazły się Planty wokół Starego Miasta, ich szerokość bowiem nieznacznie tylko przekracza wymiar piksela, stąd w odpowiedzi spektralnej element roślinności nie był jedyny.

Nowe osiedla mieszkaniowe (IV)

Pola testowe: 1) Osiedle Bieżanów Nowy, 2) Osiedle Dywizjonu 303, 3) Osiedle Kurdwanów (w budowie).

Tabela 4
Table 4

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odchylenie standardowe Standard deviation
4	55 - 67	59,7905	2,9407
5	69 - 92	79,2952	5,4771
7	60 - 83	70,1333	5,7831



Ryc. 9. Kategoria IV – nowe osiedla mieszkaniowe
Fig. 9. Category IV – new housing development

Łącznie pola testowe liczą 105 pikseli, a liczba pikseli sklasyfikowanych wyniosła — 1818 (5,9 %). Wydzielenie tego rodzaju zabudowy jako oddzielnej kategorii było spowodowane łatwym zaobserwowaniem „blokowisk” nawet przy wizualnej interpretacji standardowej kompozycji barwnej. Jednolite jasne tony pochodzące od tzw. „wielkiej płyty”, dominującej technologii budownictwa mieszkaniowego lat 70 i 80-tych, doprowadziły do znacznego „wyrównania” zakresów wartości jaskrawości pikseli we wszystkich trzech kanałach spektralnych. Sklasyfikowane w tej kategorii tereny to nie tylko nowe osiedla. Zaliczono do niej także tereny w budowie, a także niektóre fragmenty terenów przemysłowych, do których przede wszystkim należą obszary eksploatacji kruszywa, na przykład Zakrzówek. Pojawia się w tej kategorii pewna liczba izolowanych pikseli w różnych miejscach nie związanych, jak stwierdzono, z tą kategorią zabudowy. Zostały one pominięte na ryc. 9.

Należy zauważyć, że sklasyfikowane piksele nie obejmują całych obszarów nowych osiedli. Są one więc mniejsze niż wyznaczone na mapach. Spowodowane to jest prawdopodobnie istnieniem na ich obrzeżach także innych kategorii użytkowania ziemi, na przykład terenów czasowo użytkowanych jako ogródki działkowe. Niektóre „starsze” osiedla (np. A-zory) dzięki „zarośnięciu” już roślinnością drzewiastą nie zostały sklasyfikowane. Ogólnie rzecz biorąc wiarygodność klasyfikacji oceniona została na ponad 70 %.

Zieleń Wysoka (V)

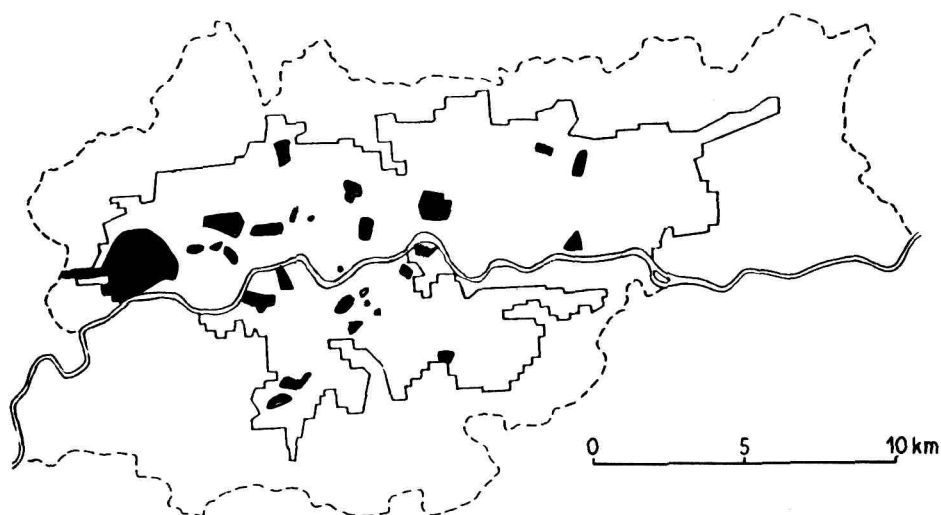
Pola testowe: 1) Las Wolski, 2) Lasek Mogilski, 3) fragment lasu w Kobierzynie.

Tabela 5
Table 5

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odchylenie standardowe Standard deviation
4	32 - 42	36,4706	2,5088
5	27 - 37	32,1765	2,6511
7	83 - 112	98,1564	7,9382

Łącznie liczba pikseli w polach tekstowych wyniosła — 51, a liczba pikseli sklasyfikowanych — 2527 (8,18 %). W kategorii tej zostały sklasyfikowane wszystkie naturalne i półnaturalne zbiorowiska roślinności drzewiastej (lasy), niektóre większe zespoły „starych” ogródków działkowych (na przykład nad Rudawą, w zakolu Wisły w Podgórzu, Dębniaki), parki miejskie oraz niektóre podmiejskie, a także ogrody przyklasztowe, na przykład OO. Misjonarzy na Stradomiu, ryc.10. Kategorię tę tworzą więc różnorodne formy zieleni, których wspólnym wyróżnikiem jest zieleń wysoka, tak też najwłaściwiej należy nazwać tę klasę. Sklasyfikowano też pewną liczbę izolowanych pojedynczych pikseli prawdopodobnie wówczas kiedy piksel objął jakąś większą grupę drzew. Były one jednak trudne do zlokalizowania w terenie i na mapie. Wiarygodność oceniona na podstawie porównania z mapami: „Zieleń ogrodowa i parkowa” oraz „Szata roślinna”

z Atlasu Miasta Krakowa, jest bardzo wysoka i wynosi ponad 95 %. Zastanawia tylko nie ujęcie dużego i starego parku w Swoszowicach.



Ryc. 10. Kategoria V – zieleń wysoka
Fig. 10. Category V – high vegetation

Zieleń niska (VI)

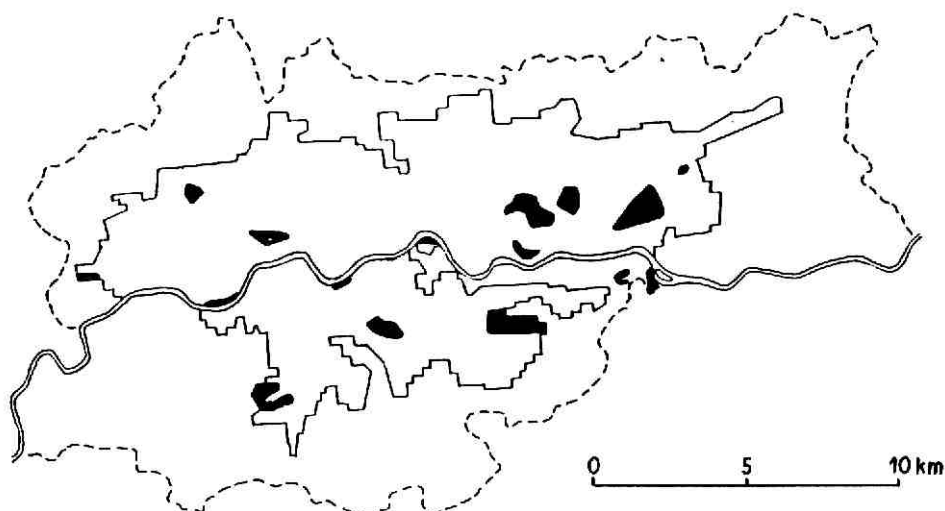
Pola testowe: 1) Błonia, 2) tereny na południe od Pl. Centralnego w Nowj Hucie, 3) łągi nad Wisłą w Przegorzałach.

Tabela 6
Table 6

Kanał spektralny Landsat MSS Landsat MSS bands	Zakres wartości jaskrawości pikseli Brightness value of pixels	Średnia wartość jaskrawości pikseli (z histogramu) Mean brightness value (from histogram)	Odczylenie standardowe Standard deviation
4	39 - 47	42,4688	2,3484
5	35 - 47	41,4668	2,5255
7	65 - 108	86,2813	10,8061

Łączna liczba pikseli w polach testowych wyniosła — 91, a liczba pikseli sklasyfikowanych — 2082 (6.74 %). Pomimo starannego wyboru pól testowych, które obejmowały wyłącznie tereny pokryte darnią nie sklasyfikowano wielu takich terenów co stwierdzono przez porównanie z mapą „Szata roślinna” w Atlasie Miasta Krakowa. Być może zaważył na tym inny stopień wilgotności, chociaż zakres wartości jaskrawości pikseli, we właściwym do badania takich terenów kanale MSS-7, jest

szeroki. Natomiast sklasyfikowano pewną liczbę pikseli należących do innych kategorii (III i V), nie uwzględniono ich jednak na mapce, ryc. 11. Jeśliby ten obraz uznać za wynik klasyfikacji to wiarygodność rozpoznania wyniosła ponad 70 %.



Ryc. 11. Kategoria VI – zieleń niska
Fig. 11. Category VI- low vegetation

Tereny niesklasyfikowane

W kategorii „niesklasyfikowane” pozostało ok 33 % „obszaru miejskiego”. Były to przede wszystkim nie uwzględnione w wyróżnionych kategoriach pola uprawne, wody oraz wymienione powyżej izolowane piksele, w niektórych kategoriach, które wyeliminowano z bilansowania.

Zamieszczone mapki (ryc.6-11) są już dostosowane do ogólnych wymogów kartograficznych o zgeneralizowanym obrazie i w tym względzie odpowiadają warunkom mapy przeglądowej w skali około 1 : 300 000 (porównaj z ryc.4).

WNIOSKI

1. Zarys miasta („obszaru miejskiego”) na potrzeby sporządzania map w skalach przeglądowych (1:300 000 i mniejszych) wyodrębniony na podstawie wizualnej analizy standardowej kompozycji barwnej obrazu z LANDSAT-a jest bardziej zbliżony do rzeczywistości aniżeli uzyskany drogą generalizacji kolejnych map w ramach redakcyjnych

prac kartograficznych (Lerner, 1986), chociaż jeszcze lepsze rezultaty można by uzyskać stosując metody wzmacniania kontrastu (Drachał, 1987).

2. Metoda klasyfikacji blokowej (równoległościenniej) daje szybkie rezultaty, ale niezbędny jest staranny wybór pól testowych. Okazało się, że trzy pola dla jednej kategorii to jednak za mało. Kategorie powinny być ściślej sprecyzowane. Może też być ich więcej niż sześć, tak aby nie powodować zbyt dużej liczby nie sklasyfikowanych pikseli.

3. Poza tzw. strefą „centralną” i „podmiejską”, które można w dużej mierze identyfikować z kategorią I i III przyjęta metoda klasyfikacji nie pozwala na zilustrowanie innych stref użytkowania ziemi wyróżnionych przez R. Mydła (1977), głównie ze względu na brak możliwości bilansowania w ewentualnie wyróżnionych strefach udziału poszczególnych użytków, co dopiero daje podstawy do wyznaczenia samych stref.

4. W porównaniu z opracowaniami opartymi na kartowaniu terenowym i materiałach kartograficznych zbieżność rozpoznania jest widoczna, ale specyfika zapisu obrazu satelitarnego nie daje pełnej adekwatności konturów, szczególnie w kontekście map dokładniejszych, na przykład mapy opracowanej przez R. Mydła w Atlasie Miasta Krakowa. Z kolei wydzielone przez B. Luchtera (1990) rejonu użytkowania ziemi operują jednostkami katastralnymi jako polami odniesienia, co w ogóle uniemożliwia porównanie lokalizacyjne. Ciekawie przedstawia się natomiast porównanie ogólnej struktury użytkowania ziemi przedstawionej przez tego autora ze statystycznymi rezultatami przeprowadzonej przeze mnie klasyfikacji.

I tak, użytki zielone stanowią według B. Luchtera — 69 % obszaru administracyjnego miasta. Odpowiada to w przedstawionych tu badaniach kategorii V i VI, stanowiących razem około 15 % „obszaru miejskiego” czyli 6 % całego terytorium miasta Krakowa. Do tego należy dodać napewno około 24 % nie sklasyfikowanego terenu w obszarze badań czyli 10 % całkowitej powierzchni miasta oraz około 43 % obszaru miasta Krakowa nie wziętego pod uwagę w badaniach. Łącznie daje to 59 %. Natomiast na pozostałe 10 % można oszacować udziały zieleni w kategoriach II, III i IV. Tak więc przy tak przeprowadzonym oszacowaniu wiarygodność klasyfikacji wydaje się być wysoka.

Podobnie jest z użytkami technicznymi. Według B. Luchtera zajmują one 26 % całego obszaru miasta. Odpowiada im kategoria I stanowiąca 4,4 % powierzchni miasta, jak również 5 % obszaru sklasyfikowanego w kategorii II, 5,6 % w kategorii III oraz 2,4 % z kategorii IV. Razem stanowi to 18 % ogólnej powierzchni miasta, a reszta do 26 %, czyli 8,6 % należy doszukiwać się w terenach nie zaliczonych do analizowanego obszaru miejskiego, chociaż tak duży udział wydaje się być nieco zawyżony.

5. Uzyskana wiarygodność rozpoznania, chociaż określona szacunkowo, wydaje się być zbieżna z wynikami innych badań prowadzonych w oparciu o klasyfikację nadzorowaną. Na przykład w odniesieniu do Jeleniej Góry Z. Bochenek i Z. Połaski (1987) osiągnęli wiarygodność rzędu 75-87 %. Podobne są rezultaty dla Warszawy, a także w badaniach cytowanych w literaturze zagranicznej (Sabins, 1986), chociaż zupełnie inne były kategorie użytkowania ziemi w analizowanych miastach, a ponadto stosowano już dokładniejsze obrazy pochodzące ze skanera TM, o siedmiu kanałach spektralnych.

LITERATURA

- Atlas Miasta Krakowa, plansze: K. Trafas: Mapa przeglądowa, K. Dubiel: Szata roślinna, R. Mydel: Użytkowanie przestrzeni miejskiej, J. Bogdanowski: Zieleń parkowa i ogrodowa, 1988: Uniwersytet Jagielloński i Urząd Miasta Krakowa, Kraków.
- Bochenek Z., Poławski Z.F., 1987: *Zastosowanie zdjęć satelitarnych Landsat Thematic Mapper do klasyfikacji terenów miejskich*. Prace IGiK. Tom XXXIV, z. 2 (79), Warszawa.
- Campbell J.B., 1981: *Spotlight correlation effects upon accuracy of supervised classification of land cover*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. XLVII.
- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989: *Teledetekcja satelitarna*. PWN, Warszawa.
- Curran P.J., 1986: *Principles of remote sensing*. Longman, London and New York.
- Domański J., 1989: *Metody analizy cyfrowej wielkospektralnych danych teledetekcyjnych*. Przegląd Geodezyjny, nr 3, Warszawa.
- Drachal J., 1987: *Podnoszenie wizualnej czytelności obrazów satelitarnych przez ich cyfrowe przetworzenie*. Fotointerpretacja w geografii, T. IX (19), Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego, nr 861, Katowice.
- Harris R., 1987: *Satellite remote sensing an introduction*. Routledge and Regan Paul, London and New York.
- Lerner J., 1986: *Application of satellite images for cartographic presentation of thematic maps*. Bull. du Com. Franc. de Cartogr. Fasc. n 109 - 110. Bull. no. 3 - 3.
- Luchter B., 1990: *Przestrzenne związki użytkowania ziemi w Krakowie*. Dokumentacja Geograficzna, z. 2-3, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.
- Mydel R., 1977: *Strefy użytkowania ziemi miasta Krakowa. Ich wewnętrzna i przestrzenna struktura*. Folia Geographica, Series Geographica-Oeconomica, T. 10, Kraków.
- Sabins F.F., jr., 1987: *Remote sensing. Principles and interpretation*. W.H. Freeman and Company, New York.

KAZIMIERZ TRAFAS

ANALYSIS OF THE CITY OF CRACOW STRUCTURE ELEMENTS ON THE BASIS OF SUPERVISED CLASSIFICATION OF THE IMAGERY FROM LANDSAT MSS

Summary

In the satellite imagery, the structures created by big cities are rather complex, it is true, but on the whole they are quite distinct. Defining the urban area — therefore, in the first place, the built-up area — is based on the analysis of the spectral brightness of individual pixels which can be observed as prevailing on the built-up area. This can be

done visually. The author, after defining the borders of the city, has used the parallelepiped or "box" classification of satellite image to describe internal spatial structure of the City of Cracow.

He has distinguished the following six categories of land use:

- I. Compact urban settlement,
- II. Dispersed urban settlement with greenery,
- III. Low settlements among green areas,
- IV. New housing development,
- V. High vegetation,
- VI. Low vegetation.

Three training fields have been selected to make possible the classification of the pixels that create the area of the city, in each of the above mentioned categories. The training areas have been designated in the colour composite mode of three spectral bands of LANDSAT MSS, i.e. 4, 5 and 7.

As a result, a spatial distribution pattern was created with regard to those particular categories on Cracow area, with the accuracy in the range from 60 per cent for category II to almost 90 per cent for categories I and V. The analysis has been limited to six classes because of the contrast problems. The areas belonging to the other categories have been treated jointly as category "VII" — unclassified. All classification operations have been made using the GEMS system. The author got acquainted with this system during his stay in Scotland, at the Andrew's University. The results (Fig. 6 to 11) confirm the usefulness of this method in analysing the use of land in urban areas. This positive aspect will probably become still more marked while using the imagery from LANDSAT TM, where there are more bands and the recognition of the land use categories is better.

The satellite image of the city such as Cracow has been accepted as more adequate in relation to reality than the image created as result of cartographic interpretations of different generalizations of maps, and inserted in many publications.

Translated by *K. Trafas*