

## **Opracowanie mapy użytkowania ziemi województwa mazowieckiego na podstawie obrazów satelitarnych wykonanych skanerem AVHRR z satelity NOAA**

*The elaboration of land use map of Mazowsze voivodship  
based on satellite images from NOAA AVHRR*

**Małgorzata KRÓWCZYŃSKA**

**P**eople have always changed their environment in order to satisfy their needs. One of the means by which to evaluate the current state of and identify any changes in land use is the land-cover map. In my work, I have created a method for the classification of low-resolution AVHRR/NOAA images from the May and September of 1999. The goal has been to make a 1:500 000 scale map of land use in Mazowsze voivodship.

One of the main problems with the appropriate classification of images from NOAA series satellites with AVHRR scanners is their low spatial resolution. In the Polish reality of small parcels, a few of the 1100 × 1100 m pixels are filled with just one form of land cover. However, most of the pixels are so called mixels composed of spectral values representing different forms of land use.

In order to find fields filled with just one form of land cover I have mixed low resolution AVHRR/NOAA images with a land-use map of 1980 from the Institute of Geodesy and Cartography in Warsaw. After analysing both AVHRR/NOAA images and the map, I created 8 land-use classes on my research polygon: bo-

dies of water, coniferous forests, deciduous forests, mixed forests, meadows and pastures, farming land, built-up areas and waste land. These were classified on the AVHRR/NOAA image and are present on the 1:500 000 land-use map of Mazowsze voivodship.

Using my algorithm, a computer automatically picked the most homogenous fields. These fields were used as training fields for the aforementioned land-use classes in a supervised classification.

Evaluation of this classification, which is present on the land-use map, has been based on a digital land-use map of the research polygon. It was conducted on two levels of significance: the general — informing us of the number of pixels on the map and on the image after classification; and the detailed — carrying information on land use in pixels of the classification image. Emerging as a result of the classification of these images was a digital map of land use for this area, which may be the source of direct supply of a GIS.

Polska od początku lat 90. przechodzi okres restrukturyzacji, zachodzą zmiany w gospodarce, prawie własności i administracyjnym. Nasz kraj ubiega się o przyjęcie do struktur Unii Europejskiej. To sprawia, iż informacje o użytkowaniu ziemi o zasięgu międzynarodowym, krajowym oraz regionalnym mają coraz większe znaczenie.

Coraz częściej wykorzystywane są zdjęcia satelitarnie przy tworzeniu baz danych pokrycia terenu. Przykładem takiej bazy danych jest program CORINE opracowany na podstawie zdjęć z satelity LANDSAT TM. Program ten objął swym zasięgiem wiele krajów europejskich, w tym również Polskę.

Satelity środowiskowe LANDSAT oraz SPOT wykonują zdjęcia satelitarne o wysokiej rozdzielczości terenowej rzędu kilkudziesięciu metrów i dostarczają dokładnych informacji o terenie. Informacje te zasilały bazy danych, które charakteryzują się wysokim stopniem szczegółowości, ale równocześnie związane są z wysokimi kosztami zdjęć oraz koniecznością czasochłonnego ich przetwarzania. Uaktualnienie tego typu baz zajmuje dużo czasu oraz jest przedsięwzięciem bardzo kosztownym.

Satelita NOAA wykonuje zdjęcia o stosunkowo małej rozdzielczości terenowej, wynoszącej zaledwie 1100 × 1100 m, mimo to uznano, że zdjęcia te zawie-

rają wystarczająco dużo informacji, aby na ich podstawie opracować przeglądową mapę użytkowania ziemi w skali 1:500 000. Dodatkową zaletą tych zdjęć jest duża częstotliwość ich pozyskania, nawet kilka razy dziennie, co zdecydowanie ułatwia uzyskanie zdjęć bez zachmurzeń. W wyniku klasyfikacji tych zdjęć powstała numeryczna mapa użytkowania ziemi wybranego terenu, która może bezpośrednio zasilić systemy informacji geograficznej.

Jako poligon badawczy wybrano obszar województwa mazowieckiego o powierzchni 35 597 km<sup>2</sup>. Dokonując wyboru poligonu starano się, aby był on możliwie reprezentatywny dla warunków użytkowania ziemi w Polsce, oraz aby jego wielkość była proporcjonalna do rozdzielczości terenowej obrazów z satelity AVHRR/NOAA.

### Wybór zdjęć oraz przygotowanie ich do analizy

Zdjęcia wykonane za pomocą skanera AVHRR satelity NOAA potrzebne do przeprowadzenia klasyfikacji użytkowania ziemi pochodziły z dwóch terminów: 20 maja i 4 września. Wybór miesięcy nie był przypadkowy. W maju następuje początkowa faza rozwoju fenologicznego roślinności, we wrześniu natomiast rośliny jednoroczne osiągają optimum rozwojowe. Połączenie danych z tych dwóch dat pozwoli uzyskać pełne informacje o występującej na tym terenie szacie roślinnej. Szukając odpowiedniego zdjęcia zwrócono szczególną uwagę, by na poligonie badawczym obraz nie był zasłonięty przez cienką warstwę chmur. Takie zakłócenie obrazu nie ma większego znaczenia przy wizualnej interpretacji zdjęć, gdyż jest prawie niezauważalne dla osoby interpretującej, jednak przy automatycznej klasyfikacji obrazu może być powodem wielu błędów, ponieważ zmieniona jest oryginalna wartość pikseli.

Z całej sceny obrazu NOAA wycięty został fragment składający się z 300 kolumn i 300 wierszy, w którym znajduje się województwo mazowieckie. Przed wycięciem potrzebnego fragmentu terenu, scena obrazu NOAA została zgeometryzowana. Metoda geometryzacji opiera się na danych dotyczących orbity satelity (*predict*) otrzymywanych z organizacji NOAA, uzupełnionych przez wprowadzenie kontrolnych punktów terenowych (Rożemski, 1990). Bazując jedynie na parametrach ruchu satelity z depeš „predict”, otrzymujemy błąd dowiązania geograficznego około 0–10 pikseli w poziomie i 0–30 pikseli w pionie (Struzik, 1999). Aby zwiększyć dokładność dowiązania, stosuje się metodę polegającą na wprowadzeniu terenowych punktów kontrolnych o znanych współrzędnych geograficznych. Punkty terenowe użyte do korekcji dowiązania geograficznego pochodziły ze zdjęć wykonanych przez satelitę LANDSAT MSS, przy użyciu programu Erdas. Na podstawie 9 punktów zostało przeprowadzone dopasowanie sceny do równopolewego, stożkowego odwzorowania Albersa. Przeprowadzona transformacja została wykonana z dokładnością około 0,9 wielkości pikseli NOAA.

### Opracowanie numerycznej mapy terenu

Mapę użytkowania ziemi w skali 1:500 000 opracowaną w IGiK na podstawie zdjęć z satelity LANDSAT MSS, wykonanych w latach 1977 i 1978 w różnych porach fenologicznych, zamieniono na postać cyfrową, digitalizując obszar województwa mazowieckiego. Biorąc pod uwagę skalę mapy oraz metodę opracowania danych satelitarnych, zdecydowano się na wybór następujących elementów środowiska geograficznego charakteryzujących użytkowanie ziemi w Polsce:

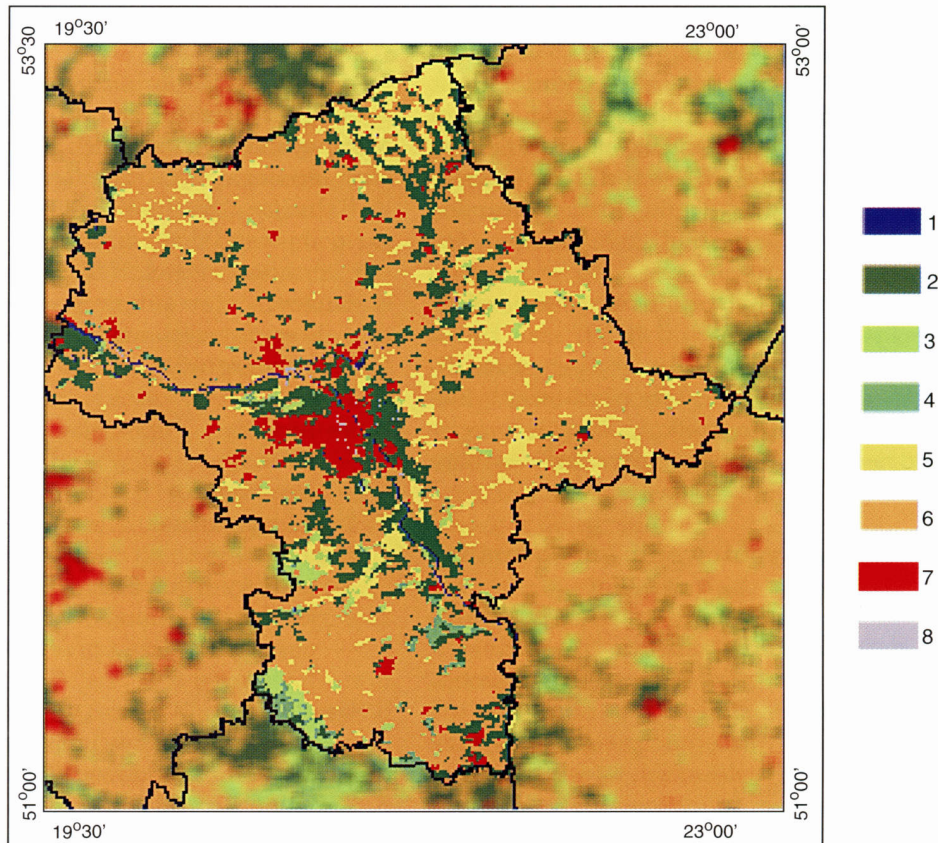
1. Sieć hydrograficzna
2. Lasy
  - iglaste
  - liściaste
  - mieszane
3. Łąki i pastwiska
4. Użytki rolne
  - obszary rolnicze z przewagą gospodarki wielko- przestrzennej
  - obszary rolnicze z przewagą gospodarki drobnotowarowej
5. Osadnictwo
  - miasta o zabudowie zwartej
  - miasta o zabudowie rozproszonej
6. Tereny przemysłowe
7. Tereny zdegradowane w wyniku działalności człowieka
8. Nieużytki

Ostatnim etapem pracy przy tworzeniu numerycznej mapy użytkowania ziemi była transformacja jej współrzędnych do układu równopolewego, stożkowego odwzorowania Albersa. Do transformacji wykorzystano następujące parametry:

1. Elipsoidę WGS 86
2. Pierwszy równoleżnik sieczny —  $\phi = 50^{\circ}30'$
3. Drugi równoleżnik sieczny —  $\phi = 53^{\circ}30'$
4. Współrzędne punktu głównego —  $\phi = 53^{\circ}30'$   
—  $\lambda = 19^{\circ}00'$

Zdigitalizowana mapa miała lokalny układ odniesienia, który w pierwszym etapie pracy zamieniono na układ współrzędnych geograficznych za pomocą funkcji *Geometric Correction* systemu Erdas. Następnie układ współrzędnych geograficznych przekształcono na odwzorowanie Albersa. Transformacja została wykonana na podstawie 13 punktów dopasowania, które rozmieszczone były po trzy na każdym boku zeskanowanego i połączonego arkusza mapy oraz jednego punktu w jego środku. Takie rozmieszczenie punktów zapewnia uniknięcie błędu skręcenia mapy, który mógł wystąpić przy skanowaniu. Położenie tych punktów było znane, gdyż zostały one umieszczone na przecięciu linii siatki geograficznej. Błąd transformacji wyniósł około 80 m.

Tak przygotowana mapa została wykorzystana do wydzielenia pól treningowych oraz, w ostatnim etapie pracy, do weryfikacji klasyfikacji wykonanej na obrazie satelitarnym AVHRR/NOAA.



Ryc. 1. Mapa użytkowania ziemi województwa mazowieckiego: 1 — wody, 2 — lasy iglaste, 3 — lasy liściaste, 4 — lasy mieszane, 5 — łąki i pastwiska, 6 — grunty rolne, 7 — osadnictwo, 8 — nieużytki (IGiK, 1980, LANDSAT TM 1978, 1979)

Fig. 1. Land use map of Mazowsze voivodship: 1 — waters, 2 — coniferous forests, 3 — deciduous forests, 4 — mixed forests, 5 — meadows and pastures, 6 — arable lands, 7 — built-up areas, 8 — waste lands (IGiK, 1980, LANDSAT TM 1978, 1979)

### Utworzenie kompozycji z wybranych kanałów

Do klasyfikacji wykorzystuje się zestaw kilku kanałów zdjęcia w celu wzbogacenia obrazu w informacje. Przy wyborze powinno się zwracać uwagę, by kanały nie były ze sobą skorelowane oraz by wybrać możliwie najmniej liczny zestaw kanałów. Zdjęcia wykonane w różnych kanałach mogą powielić informacje, co wyraża się wzrostem jasności pikseli w kanale 4 oraz wzrostem jasności pikseli w kanale 5. Wówczas jedno z takich zdjęć można odrzucić, gdyż nie wnosi ono nic nowego do procesu rozpoznawania obrazów (Ciołkosz, Kęsik, 1989). W celu określenia stopnia skorelowania poszczególnych kanałów z satelity NOAA obliczono współczynnik korelacji. Tabela 1 przedstawia uzyskane wyniki. Z przeanalizowanych kanałów stosunkowo dobra zależność istnieje między kanałem 1 (zakres widzialny) i kanałem 2 (podczerwień), jak również kanałem 2 i *NDVI*. Niski stopień korelacji występuje pomiędzy kanałami 2 i 4 (termalny) oraz między *NDVI* a kanałami 1 i 4.

Przy ocenie stopnia skorelowania zdjęć, prócz kanałów standardowych, dołączono zdjęcie wagowe — wskaźnik zieleni *NDVI*, niosą one bowiem cenne informacje. Zdjęcia zarówno wagowe, jak i różnicowe podkreślają różne detale na obu oryginalnych zdjęciach, a wygaszają szczegóły wspólne dla obu zdjęć (Sabins, 1987).

Tabela 1.

Współczynniki korelacji pomiędzy obrazami z wybranych kanałów AVHRR

*Correlation coefficient between images from selected channels AVHRR*

| Kanał spektralny<br><i>Spectral channel</i> | 1    | 2     | 4   |
|---|------|-------|-----|
| 1   |      |       |     |
| 2   | 0,86 |       |     |
| 4   | -0,4 | -0,02 |     |
| <i>NDVI</i>                                 | -0,2 | 0,65  | 0,3 |

Wartość *NDVI* została wyliczona w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie na podstawie zmodyfikowanego równania:

$$NDVI = [(Y2 - Y1) / (Y2 + Y1)] \times A$$

gdzie:

$$Y1 = 0,1065 \times 4 \times AVHRR/NOAA\_K1 - 4,01$$

$$Y2 = 0,1062 \times 4 \times AVHRR/NOAA\_K2 - 3,76$$

$$A = 1,21$$

AVHRR/NOAA\_K1 — kanał 1 z AVHRR/NOAA (0,58–0,68  $\mu\text{m}$ )

AVHRR/NOAA\_K2 — kanał 2 z AVHRR/NOAA (0,7–1,1  $\mu\text{m}$ )

Wartości uzyskane na podstawie powyższego wzoru miały wartości z przedziału  $<-0,208, 0,847>$  i zostały zamienione przy użyciu funkcji ALGEBRA sys-

temu ERDAS, na liczby całkowite z przedziału 0–65535. Na rysunku 4 przedstawiony jest obraz *NDVI*, który w porównaniu z kanałami 1 i 2 (ryc. 2 i 3) niesie więcej informacji o roślinach występujących na terenie badań.

Do klasyfikacji wykorzystano kombinację kanałów: *NDVI*-majowe, *NDVI*-wrześniowe, kanał 4. Odnaczają się one małym stopniem wzajemnej korelacji, czyli dużą pojemnością informacyjną (ryc. 5).

### Połączenie danych satelitarnych z numeryczną mapą użytkowania ziemi

W celu wydzielenia pól treningowych na obrazie satelitarnym połączono dane satelitarne z mapą użytkowania terenu w środowisku systemu Erdas. Powstały warstwy informacyjne zapisane w osobnych plikach dla wszystkich form pokrycia terenu występujących na mapie użytkowania terenu. Są to: grunty orne, użytki zielone, zabudowa miejska, las iglasty, las mieszany, nieużytki, wody, tereny niesklasyfikowane.

W związku z różnicą rozdzielczości obrazów wykonanych skanerem AVHRR i mapy użytkowania terenu, dokonano „resamplingu” czyli zmiany wielkości piksela mapy użytkowania z 275 m na 1 km.

Na mapie użytkowania terenu grunty orne zostały opisane atrybutem 1, użytki zielone — 2, zabudowa miejska — 3, las iglasty — 4, las mieszany — 5, nieużytki — 6, wody — 7 oraz tereny niesklasyfikowane — 8. Dokonując podziału na pojedyncze pliki wymienionych form pokrycia terenu, zmieniono wartość ich atrybutów. Wyzdzielając grunty orne przypisano im wartość 1, a wszystkim pozostałym klasom 0. W wyniku tej operacji otrzymano plik z gruntami ornymi o wartości pikseli 1 i całą resztę, czyli 0, o wartości pikseli 0. Pozostałe klasy zostały wydzielone w ten sam sposób. Podział ten został wykonany przy użyciu funkcji „Recode” systemu Erdas.

Osiem powstałych plików związanych z mapą użytkowania terenu połączono z trzema warstwami (kanałami) informacyjnymi obrazu satelitarnego NOAA. Połączenie zostało wykonane na podstawie współrzędnych terenowych obiektów. Obie warstwy łączone znajdowały się w jednym układzie współrzędnych — odwzorowaniu równopolewym, stożkowym Albersa.

Każdy plik reprezentujący daną formę pokrycia terenu został przemnożony z warstwą kompozycji barwnej składającej się z *NDVI*-majowego, *NDVI*-wrześniowego oraz kanału 4 (termalnego) obrazu satelitarnego NOAA. Taki układ kanałów został ustalony po przeanalizowaniu macierzy i ustaleniu stopnia korelacji (tabela 1). Dotychczasowe pliki reprezentujące wydzielone klasy po pomnożeniu ich wartości z kompozycją barwną obrazu satelitarnego uzyskały wartości tegoż obrazu. I tak, grunty orne opisane zostały atrybutem 1, a wszystko to, co nie jest gruntami ornymi otrzymało atrybut 0. Mnożąc tak utworzony plik przez dane satelitarne, grunty orne otrzymują oryginalną wartość obrazu satelitarnego, natomiast

cała reszta wartość 0. Wszystkie pliki reprezentujące formy użytkowania terenu zostały przemnożone z danymi satelitarnymi. W rezultacie tych przekształceń wydzielono pliki zawierające informacje o występowaniu danej klasy oraz o jej wartości, zapisanej na obrazie wykonanym skanerem AVHRR. Otrzymano gotowe pola treningowe do klasyfikacji.

W wyniku wszystkich opisanych powyżej procesów związanych ze zmianą formatów, rekodowaniem i mnożeniem danych w systemie Erdas, powstała końcowa warstwa zapisana w ośmiu plikach, która zawiera sumę informacji dotyczących użytkowania ziemi na terenie badawczym i obrazu satelitarnego NOAA.

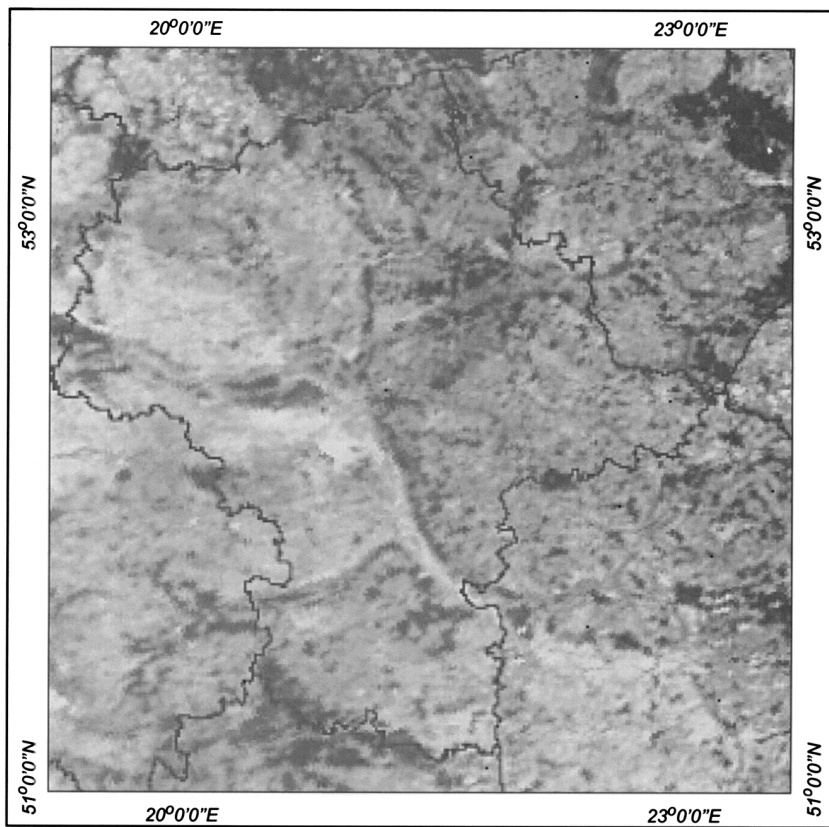
Przy łączeniu danych należało pamiętać o błędzie transformacji warstw informacyjnych, jaki wystąpił podczas dopasowania do wspólnego odwzorowania kartograficznego. Zdjęcia z satelity NOAA zostały zgeometryzowane z dokładnością 0,9 piksela czyli 900 m; średni błąd transformacji mapy użytkowania terenu to 80 m. Dane te pozwalają określić średni błąd kwadratowy połączenia tych dwóch warstw, wynosi on  $(900^2 + 80^2)^{1/2} = 903,5$  m.

### Wybór pól treningowych obrazu NOAA

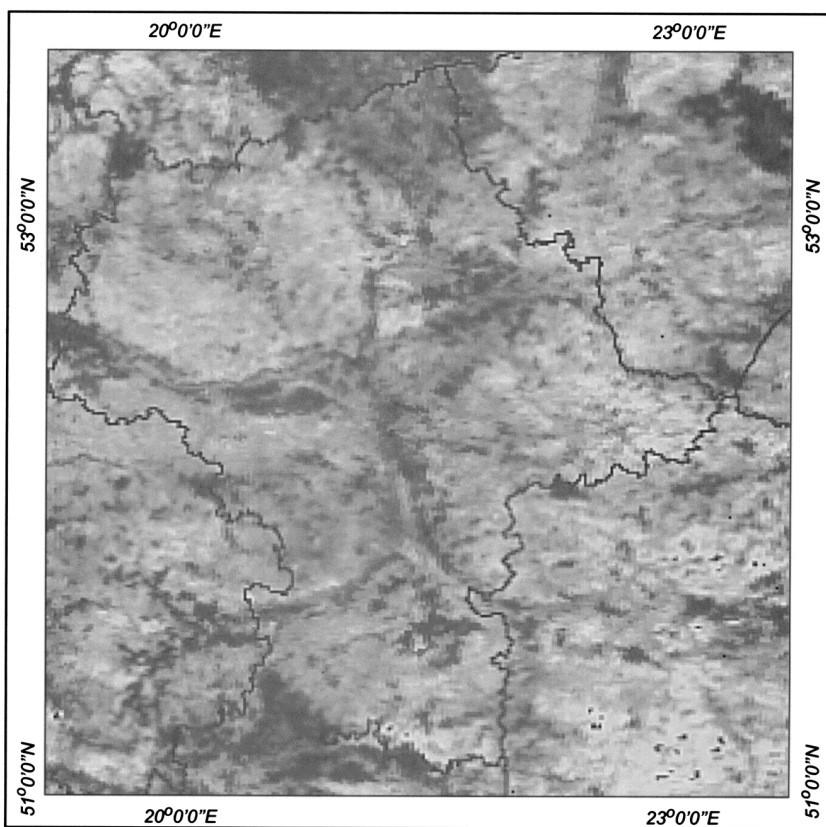
Celem klasyfikacji obrazu satelitarnego jest możliwie najdokładniejszy podział jego treści na grupy pikseli nazwane klasami (tworzące w przestrzeni wielospektralnej tzw. klastry) oraz określenie związanych z nimi rodzajów pokrycia terenu (Domański, 1980). W zastosowanej metodzie klasyfikacji nadzorowanej, podział na klasy przeprowadzony zostaje na podstawie parametrów statystycznych, określonych na podstawie pól treningowych. Poprawność zdefiniowania pól treningowych jest jednym z głównych parametrów decydujących o dokładności przeprowadzonej klasyfikacji. Jako pola treningowe powinny więc zostać wybrane piksele w 100% reprezentujące daną klasę.

Pamiętając o rozdzielczości terenowej obrazów NOAA zdawano sobie sprawę z trudności znalezienia obszaru o powierzchni 1 km<sup>2</sup> wypełnionego jedną formą użytkowania terenu. Większość pikseli wypełniona jest różnymi formami użytkowania terenu. Pola treningowe w opracowanej metodzie klasyfikacji zostały wybrane automatycznie w środowisku systemu Erdas, co pozwoliło znaleźć piksele jednorodne. Obszary wydzielono na zapisie rastrowym — piksele z mapy użytkowania ziemi po zmianie rozdzielczości z 275 m na 1 km zostały połączone z pikselami obrazu NOAA o rozdzielczości terenowej 1 km. W wyniku tego połączenia powstała warstwa informacyjna zawierająca sumę informacji o użytkowaniu terenu na badanym obszarze według mapy i obrazu satelitarnego. Tak zdefiniowane pola treningowe zawierają jeszcze kilka błędów co sprawia, iż nie reprezentują pól treningowych w 100% wypełnionych jedną formą pokrycia terenu. Pierwszy błąd, który nie został uwzględniony podczas przecięcia mapy użytkowania terenu według obrazu satelitarnego NOAA, to błąd transfor-

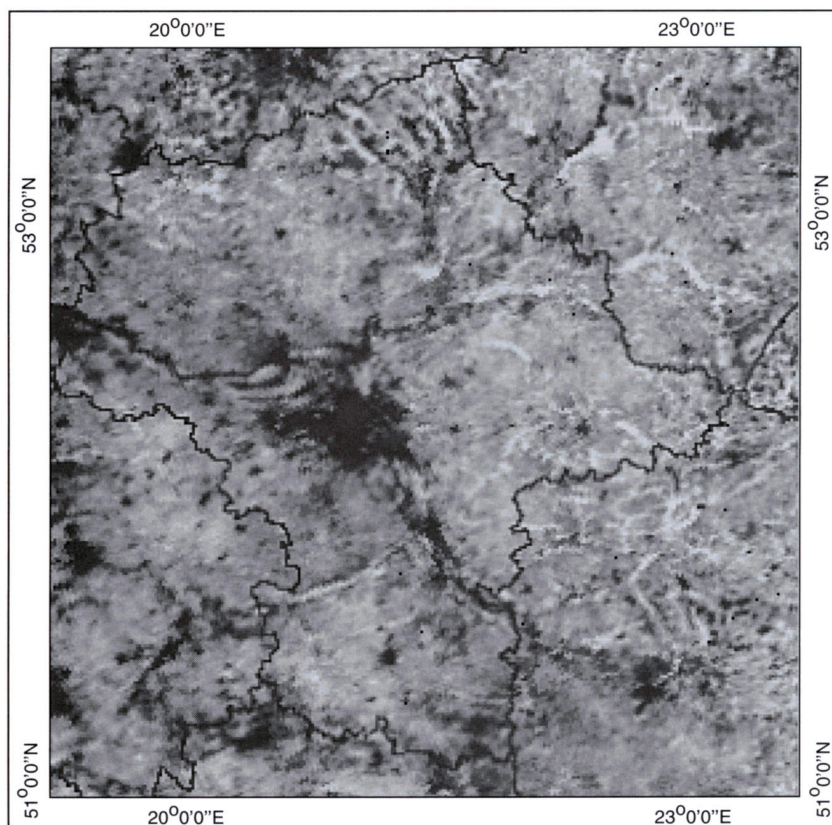




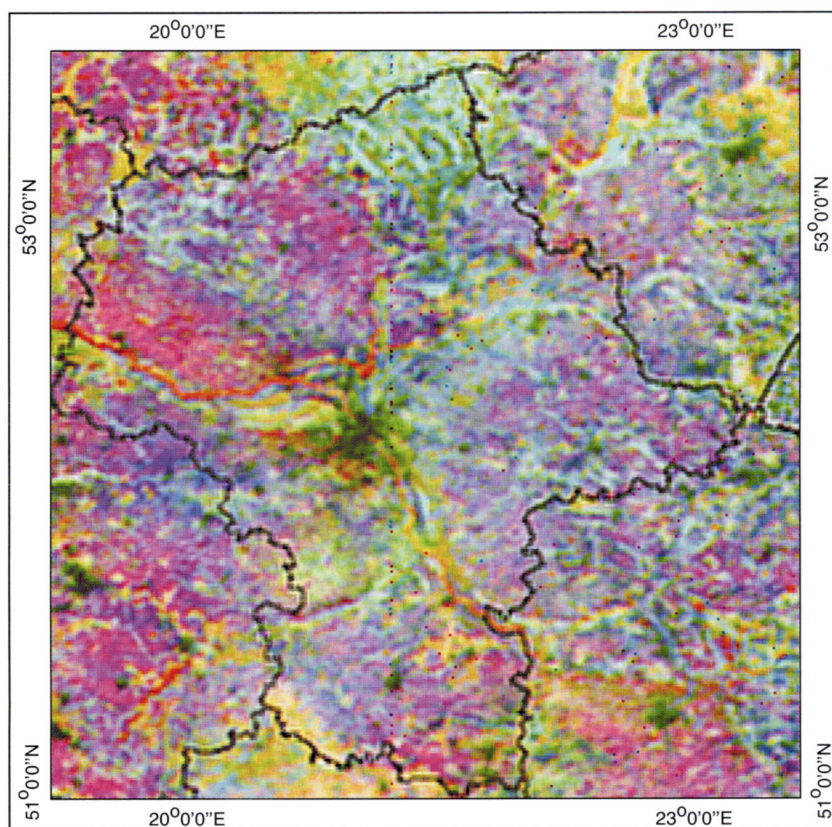
Ryc. 2. Zdjęcie kanału 1 AVHRR/NOAA wykonane w dniu 20 V 1999 r. nad województwem mazowieckim  
 Fig. 2. AVHRR/NOAA image, spectral channel 1 registered on 20 V 1999 over Mazowsze voivodship



Ryc. 3. Zdjęcie kanału 2 AVHRR/NOAA wykonane w dniu 20 V 1999 r. nad województwem mazowieckim  
 Fig. 3. AVHRR/NOAA image, spectral channel 2 registered on 20 V 1999 over Mazowsze voivodship



Ryc. 4. Zdjęcie NDVI AVHRR/NOAA wykonane w dniu 4 IX 1999 r. nad województwem mazowieckim  
 Fig. 4. AVHRR/NOAA image NDVI registered on 4 IX 1999 over Mazowsze voivodship



Ryc. 5. Kompozycja barwna z NDVI-20 V 1999, NDVI-4 IX 1999, kanał 4 — 20 V 1999 ze zdjęć AVHRR/NOAA  
 Fig. 5. AVHRR/NOAA multitemporal colour composite NDVI-20 V 1999, NDVI-4 IX 1999, channel 4 — 20 V 1999

Tabela 2.  
Agregacja klas użytkowania ziemi  
*Aggregation of land use classes*

| Kod Code | Klasy użytkowania ziemi<br><i>Description of classes</i>                   | Kod Code | Klasy połączone<br><i>Description of combined classes</i> |
|----------|--|----------|---|
| 1        | Sieć hydrograficzna<br><i>Water bodies</i>                                 | 1        | Sieć hydrograficzna<br><i>Water bodies</i>                |
| 2        | Lasy iglaste<br><i>Coniferous forests</i>                                  | 2        | Lasy iglaste<br><i>Coniferous forests</i>                 |
| 3        | Lasy liściaste<br><i>Deciduous forests</i>                                 | 3        | Lasy liściaste<br><i>Deciduous forests</i>                |
| 4        | Las mieszany<br><i>Mixed forests</i>                                       | 4        | Las mieszany<br><i>Mixed forests</i>                      |
| 5        | Łąki i pastwiska<br><i>Meadows and pastures</i>                            | 5        | Łąki i pastwiska<br><i>Meadows and pastures</i>           |
| 6        | Obszary rolne wielkoprzestrzenne<br><i>Farming land large areas</i>        | 6        | Obszary rolne<br><i>Farming land</i>                      |
| 7        | Obszary rolne rozdrobnione<br><i>Farming land small areas</i>              |          |   |
| 8        | Osadnictwo — zabudowa zwarta<br><i>Built-up areas – compact settlement</i> | 7        | Osadnictwo<br><i>Built-up areas</i>                       |
| 9        | Obszary rolne<br><i>Farming land</i>                                       |          |   |
| 10       | Tereny przemysłowe<br><i>Industrial areas</i>                              |          |   |
| 11       | Nieużytki<br><i>Waste lands</i>  | 8        | Nieużytki<br><i>Waste lands</i>                           |
| 12       |  | 9        | Niesklasyfikowane<br><i>Not classified</i>                |

macji. Poprzednio obliczono jego wartość, która wyniosła w przybliżeniu 1 km. Uzyskana informacja pozwoliła określić jedynie wielkość przesunięcia, natomiast jego kierunek pozostaje nieznany. W celu pominięcia błędów transformacji w wydzielonych plikach reprezentujących poszczególne formy pokrycia terenu zastosowano funkcję *Bufor* systemu Erdas. Funkcją tą zmniejszono powierzchnię pól treningowych o jeden piksel, czyli 1 km z każdej strony poligonów, i jednocześnie pominięto błąd transformacji. Drugi błąd związany jest z zapisem w postaci rastra granic poszczególnych form pokrycia terenu na mapie użytkowania ziemi. Przyjęcie bowiem modelu rastrowego ma wiele zalet, takich jak łatwość przetwarzania oraz przechowywania danych (Egenhofer, Herring, 1991), lecz mniejsza precyzję lokalizacji obiektów liniowych a także deformuje obwody (Davis, Simonett, 1991). Linia graniczna oddzielająca dwie klasy została odwzorowana jako kwadrat o boku 1 km, co spowodowało zapisanie w jego obrębie więcej niż jednej klasy — w ten sposób powstały piksele o zróżnicowanym charakterze użytkowania ziemi, które należy odrzucić przed procesem klasyfikacji. Ponowne zastosowanie funkcji *Bufor* z odrzuceniem powierzchni reprezentowanej przez 1 piksel wokół poligonów, niweluje błędy związane z zastosowaniem zapisu rastrowego.

Mapa użytkowania ziemi zawiera 11 elementów środowiska geograficznego charakteryzujących użytkowanie ziemi w Polsce. Klasy te zostały wydzielone na podstawie interpretacji wizualnej barwnych kalek wysokorozdzielczego obrazu satelitarnego LANDSAT

MSS. Biorąc pod uwagę wielkość pikseli AVHRR/NOAA  $1000 \times 1000$  m i LANDSATa MSS  $80 \times 80$  m, nie jest możliwe automatyczne przeniesienie wszystkich klas występujących na mapie użytkowania ziemi. Po przecięciu mapy użytkowania ziemi z satelitarnym obrazem AVHRR/NOAA oraz nałożeniu dwupikselowego bufora w celu wyeliminowania błędów transformacji i zapisu rastrowego, niektóre klasy mają bardzo małe powierzchnie. Są one reprezentowane przez kilkanaście lub tylko kilka pikseli obrazu NOAA. Postanowiono połączyć klasy tematycznie ze sobą powiązane o małej powierzchni, bowiem wydzielenie pól treningowych dla tych klas na obrazie AVHRR/NOAA jest zadaniem bardzo trudnym lub wręcz niemożliwym. Tabela 2 przedstawia osiem nowo powstałych klas użytkowania ziemi.

Kodem 9 oznaczono nową klasę „niesklasyfikowane”. Są to

piksele, które nie zostały w procesie klasyfikacji zaliczone do żadnej z klas.

Wszystkie zmiany, które przedstawia tabela 2, naniesiono na numeryczną mapę użytkowania ziemi. Połączenie klas wykonano przy użyciu funkcji *Recode* systemu Erdas. W wyniku przekształceń zwiększyły się powierzchnie poligonów poszczególnych klas.

### Klasyfikacja obrazu NOAA

Klasyfikację obrazu AVHRR/NOAA przeprowadzono na kompozycji barwnej utworzonej z kanałów: *NDVI*-maj, *NDVI*-wrzesień i 4 kanał-maj, według przygotowanego algorytmu. W algorytmie tym pola treningowe zostały wybrane automatycznie przez system, w wyniku przecięcia cyfrowej mapy użytkowania dla poszczególnych form pokrycia terenu z satelitarnym obrazem AVHRR/NOAA. W celu przetworzenia obrazu wykorzystano funkcję klasyfikacji nadzorowanej — największego prawdopodobieństwa systemu Erdas.

### Jakościowa i ilościowa analiza klasyfikacji obrazu AVHRR/NOAA

Jakościową i ilościową analizę klasyfikacji obrazu AVHRR/NOAA wykonano na podstawie klasyfikacji: *NDVI*-maj, *NDVI*-wrzesień i 4 kanał-maj. Ilościowa weryfikacja klasyfikacji polega na porównaniu liczby pikseli danej klasy występującej na poligonie badawczym z liczbą pikseli sklasyfikowanych jako ta klasa. W tabeli 3 przedstawione są uzyskane wyniki.

Tabela 3.

Porównanie wyników klasyfikacji obrazów AVHRR z mapą użytkowania ziemi

*Comparison of results from the classification of AVHRR images with the land use map*

| Kod Code | Opis klas połączonych<br><i>Description of classes</i> | Pow. poligonów (km <sup>2</sup> )<br><i>Polygon area (km<sup>2</sup>)</i> | Pow. poligonów po klasyfikacji (km <sup>2</sup> )<br><i>Polygon area after classification (km<sup>2</sup>)</i> | Klasyfikacja/poligon (%)<br><i>Classification/polygon (%)</i> |
|----------|--|---|--|---|
| 1        | Sieć hydrograficzna<br><i>Water bodies</i>             | 454   | 454  | –   |
| 2        | Lasy iglaste<br><i>Coniferous forests</i>              | 8 180   | 7 914  | 96,7  |
| 3        | Lasy liściaste<br><i>Deciduous forests</i>             | 1 005   | 504  | 50,1  |
| 4        | Lasy mieszane<br><i>Mixed forests</i>                  | 2 501   | 2 472  | 98,8  |
| 5        | Łąki i pastwiska<br><i>Meadows and pastures</i>        | 6 958   | 5 172  | 75,0  |
| 6        | Obszary rolne<br><i>Farming land</i>                   | 38 784  | 41 087   | 106,0   |
| 7        | Osadnictwo<br><i>Built-up areas</i>                    | 1 215   | 1 494  | 123,0   |
| 8        | Nieuzytki<br><i>Waste land</i>                         | 148   | 148  | –   |

Największą powierzchnię (38 784 km<sup>2</sup>) na poligonie badawczym obejmującym 300 × 300 pikseli obrazu NOAA zajmują obszary rolne. Jest to klasa dominująca. W klasyfikacji klasa obszary rolne reprezentowana jest przez 41 087 pikseli, co stanowi 106% liczebności tej klasy. Przeszacowanie wynosi więc 6%.

Las iglasty i las mieszany są klasami, dla których uzyskano największą zgodność między ich liczebnością w klasyfikacji a liczbą pikseli, które te klasy reprezentują na mapie użytkowania ziemi. Może to świadczyć o wysokim stopniu poprawności klasyfikacji. Wyniki uzyskane dla tych klas wynoszą: las mieszany — 98,8% oraz las iglasty — 96,7.

Las liściasty jest klasą związaną z 504 pikselami klasyfikacji, co stanowi zaledwie 50,1% w porównaniu z 1005 pikselami tej klasy występującymi na mapie użytkowania ziemi.

Dla osadnictwa uzyskano wynik 123%, liczebność tej klasy podobnie jak dla obszarów rolnych została przeszacowana, w tym wypadku o 23%.

Ostatnią klasą są łąki i pastwiska, które w klasyfikacji reprezentowane są przez 5172, co stanowi 75% pikseli tej klasy.

Dwie klasy — wody oraz nieużytki — wymagają osobnego wyjaśnienia. Klasy te są związane z bardzo małą liczbą pikseli spełniających założone kryterium jednorodności, dlatego pominięto je w procesie klasyfikacji. Zostaną one w końcowym etapie nałożone jako oddzielne warstwy na wynik klasyfikacji. Przed analizą ilościową odjęto piksele reprezentowane przez wody i nieużytki od klasy grunty orne oraz las iglasty, gdyż na nich występowały piksele tych klas. W wyniku tego przekształcenia uzyskano jednakową licz-

bę pikseli klasyfikacji i pikseli występujących na mapie użytkowania ziemi.

Podsumowując wyniki ilościowej oceny klasyfikacji obrazu AVHRR/NOAA, można stwierdzić, że dobre wyniki zostały osiągnięte dla klas: las mieszany — 98,8%, las iglasty — 96,7% oraz obszary rolne — 106%. Błąd dla tych klas nie przekroczył 6%. Klasy osadnictwo oraz łąki i pastwiska zostały sklasyfikowane również z dość dużą zgodnością. Największym błędem jest obarczony las liściasty. Efektywność wynosi tu zaledwie 50,1%.

Przedstawiona powyżej analiza ilościowa pozwala jedynie na ocenę klasyfikacji obrazów

AVHRR/NOAA pod względem liczebności klas. Na jej podstawie nie wiemy nic o strukturze pikseli tego obrazu. W celu uzyskania tych informacji przeprowadzono analizę jakościową. Analizę jakościową klasyfikacji wykonano poprzez porównanie wylosowanej próby 300 pikseli z mapą użytkowania ziemi. Poprawność zarówno całej klasyfikacji jak i poszczególnych klas obliczono porównując kategorie zdefiniowane przez wzorzec z klasą będącą efektem klasyfikacji. W tabeli 4 przedstawiono, jaka liczba pikseli pól weryfikacyjnych została zakwalifikowana w poszczególnych kategoriach użytkowania. Informację tę można odczytać w wierszach. Na przykład, na 58 pikseli pól weryfikacyjnych lasy iglaste, 47 zostało zakwalifikowane poprawnie, a 9 jako obszary rolne. W kolumnach tabeli odczytać można jaka liczba pikseli zakwalifikowanych do określonej kategorii przypada na poszczególne pola weryfikacyjne, na przykład, w kolumnie obszary rolne można odczytać, że na 180 pikseli sklasyfikowanych jako obszary rolne w polu weryfikacyjnym lasy iglaste znalazło się 9 pikseli, w polu weryfikacyjnym lasy liściaste 3 piksele, w polu weryfikacyjnym łąki i pastwiska 10 pikseli, w polu weryfikacyjnym osadnictwo 1 piksel, natomiast w polu weryfikacyjnym obszary rolne znalazło się 157 pikseli. Uwzględniając powyższy przykład, stwierdzić można, że na 58 pikseli pola weryfikacyjnego lasy iglaste dobrze zakwalifikowanych zostało  $47/58 \times 100\% = 81\%$  pikseli. W tabeli 4 podana jest również (w prawym dolnym rogu) łączna ocena klasyfikacji. Określa ona udział poprawnie zakwalifikowanych pikseli, czyli leżących na głównej przekątnej tabeli.

Klasa obszary rolne odznacza się bardzo dużą licz-



Tabela 4.  
Poprawność jakościowa klasyfikacji (według pikseli)  
*Qualitative correctness of the classification (by pixel)*

| Zdjęcie<br>Image<br>Mapa<br>Map                 | Lasy iglaste<br><i>Coniferous forests</i> | Lasy mieszane<br><i>Mixed forests</i> | Lasy liściaste<br><i>Deciduous forests</i> | Łąki i pastwiska<br><i>Meadows and pastures</i> | Obszary rolne<br><i>Arable lands</i> | Osadnictwo<br><i>Built-up areas</i> | Razem<br><i>Total</i> | Piksele dobrze zakwalifikowane (%)<br><i>Pixels properly classified (%)</i> |
|---|---|---------------------------------------|--|---|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|---|
| Lasy iglaste<br><i>Coniferous forests</i>       | 47  | 0                                     | 0  | 0   | 9                                    | 2                                   | 58                    | 81,0  |
| Lasy mieszane<br><i>Mixed forests</i>           | 0   | 5                                     | 3  | 0   | 0                                    | 0                                   | 8                     | 62,5  |
| Lasy liściaste<br><i>Deciduous forests</i>      | 0   | 2                                     | 5  | 0   | 3                                    | 0                                   | 10                    | 50,0  |
| Łąki i pastwiska<br><i>Meadows and pastures</i> | 1   | 0                                     | 0  | 28  | 10                                   | 0                                   | 39                    | 71,7  |
| Obszary rolne<br><i>Arable lands</i>            | 4   | 0                                     | 1  | 8   | 157                                  | 2                                   | 172                   | 91,2  |
| Osadnictwo<br><i>Built-up areas</i>             | 2   | 0                                     | 0  | 0   | 1                                    | 10                                  | 13                    | 76,9  |
| Razem<br><i>Total</i>                           | 54  | 7                                     | 9  | 36  | 180                                  | 14                                  | 300                   | 84,0  |

ba pikseli dobrze sklasyfikowanych. Stanowią one 91,2% wszystkich pikseli. Świadczy to o dużej jednorodności pikseli wydzielonych jako pola treningowe przy klasyfikacji. Pozostałe piksele związane są głównie z łąkami i pastwiskami — 4,6%, około 2,3% z lasem iglastym, około 1,1% z osadnictwem i 0,5% z lasami liściastymi.

Las iglasty jest klasą, w której występują piksele w 81% poprawnie sklasyfikowane. Reszta pikseli reprezentowana jest głównie przez obszary rolne — 15,5% oraz przez osadnictwo — 3,4%.

Z klasą łąki i pastwiska związanych jest 71,7% pikseli prawidłowo określonych w klasyfikacji. Formą pokrycia terenu, która w istotny sposób występuje w klasie łąki i pastwiska są grunty orne stanowiące około 28%.

W klasie osadnictwo, obok pikseli tej klasy, sklasyfikowane zostały piksele lasu iglastego. Piksele tych obu klas na obrazach AVHRR/NOAA charakteryzowały się bardzo podobnymi wartościami pikseli, co mogło spowodować błąd klasyfikacji.

W klasach las liściasty i las mieszany udział pikseli poprawnie sklasyfikowanych jest dość niski: 50% i 62,5%. Są to klasy wymieszane między sobą. W lesie liściastym 20% stanowią lasy mieszane, a w lesie mieszanym aż 37,5% stanowią lasy liściaste.

Podsumowując, analiza jakościowa wykazała, że według zastosowanej klasyfikacji występuje większość klas poprawnie sklasyfikowanych. W klasie grunty orne poprawnie sklasyfikowanych jest 91,2%, nieznacznie gorszy wynik wynoszący 81% uzyskał las iglasty. Dla klas osadnictwo i łąki i pastwiska uzyskano wynik powyżej 70%. Las mieszany oraz las liściasty w stosunku do pozostałych klas charakteryzują się małym procentem poprawnej klasyfikacji — odpowiednio 62,5% i 50%. Wyniki uzyskane na podstawie oceny ilościowej dla klasy las mieszany zdecydowanie się

różnią. Liczebność tej klasy jest różna od „rzeczywistości” jedynie o 2%. Taki wynik sugerował bardzo dobrą klasyfikację, ale bliższe przyjrzenie się tej klasie wykazało, że jedynie 62,5% pikseli jest rzeczywiście związana z lasem mieszanym.

Biorąc pod uwagę fragment analizowanych obrazów AVHRR/NOAA można stwierdzić, iż poprawność klasyfikacji wyniosła 84%. Jest to wynik dobry, zważywszy na bardzo niską terenową rozdzielczość obrazów rejestrowanych skanerem AVHRR. Sądzę, że te dobre wyniki związane są przede wszystkim z wykorzystaniem zdjęć z dwóch pór fenologicznych roślin, co pomogło rozróżnić charakterystyki spektralne niektórych form pokrycia terenu.

## Podsumowanie

Na podstawie opracowanego algorytmu komputer automatycznie wybierał pola o możliwie najwyższym poziomie jednorodności. Pola te zostały wykorzystane jako pola treningowe wymienionych powyżej klas użytkowania ziemi w klasyfikacji nadzorowanej.

Ocenę klasyfikacji, która jest treścią mapy użytkowania ziemi, przeprowadzono na podstawie numerycznej mapy użytkowania ziemi poligonu badawczego. Została ona przeprowadzona na dwóch poziomach istotności: ogólnym, szacunkowym, informującym o liczbie pikseli na mapie i na obrazie sklasyfikowanym oraz szczegółowym, niosącym informacje o użytkowaniu ziemi w pikselach obrazu klasyfikacyjnego.

Obrazy satelitarne wykonane przez satelitę NOAA mają zbyt małą zdolność rozdzielczą, aby mogły zobrazować sieć rzeczną województwa mazowieckiego. Dlatego klasa ta została wycięta z numerycznej mapy użytkowania ziemi poligonu badawczego i naniesiona na klasyfikację AVHRR/NOAA jako oddzielna warstwa.

Stosunkowo łatwo rozpoznawalnym elementem środowiska są obszary rolne oraz lasy iglaste. Klasy tych form pokrycia terenu zostały wydzielone z największym stopniem zgodności z „rzeczywistością”, wyniósł on ponad 85%. Trzeba podkreślić, iż wpływ na taki wynik miała przede wszystkim duża powierzchnia poligonów tych klas, które wypełnione były jedną formą pokrycia terenu.

Klasyfikacja łąk okazała się dość trudna, gdyż są one reprezentowane przez bardzo wąskie poligony o niejednorodnych pikselach. Dlatego wystąpiły przypadki, gdzie łąki o małej powierzchni nie zostały zaznaczone na mapie opracowanej na podstawie klasyfikacji obrazu AVHRR/NOAA. Natomiast w miejscach, w których się pojawiły, zajmują znaczne powierzchnie.

Podobnie jak łąki, także osadnictwo jest słabo czytelne na obrazach wykonanych skanerem AVHRR. Miasta o liczbie mieszkańców powyżej 20 000 w większości zostały sklasyfikowane poprawnie. Duże aglomeracje miejskie, na przykład Warszawa, zostały przeiększone, wkraczając w obszar lasów iglastych.

W wielu przypadkach lasy liściaste oraz lasy mieszane zostały sklasyfikowane nieprawidłowo. Trzeba podkreślić, że w tych przypadkach klasyfikacja napotkała na pewne trudności. Mianowicie klasy lasu mieszanego oraz liściastego są ze sobą wymieszane, to znaczy w miejscu gdzie powinien występować las mieszany jest las liściasty, a tam gdzie las liściasty jest mieszany. Powodem tego jest zapewne z jednej strony trudność zdefiniowania oraz wydzielenie lasu mieszanego, a z drugiej znalezienie na terenie województwa

mazowieckiego pól jednorodnych, charakteryzujących te klasy.

Wstępne porównanie mapy użytkowania ziemi wykonanej w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie w roku 1980 z mapą wykonaną na podstawie niskorozdzielczych obrazów AHHRR/NOAA wykazuje niewielkie zmiany w osadnictwie – duże ośrodki miejskie zwiększają swą powierzchnię. Również obszary łąk i pastwisk charakteryzują się większą powierzchnią. Może to być spowodowane zaprzestaniem osuszania łąk i pastwisk i niewykorzystywania ich jako grunty orne.

## Literatura

- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989: *Teledetekcja satelitarna*, PWN, Warszawa.
- Davis F.W., Simonett D.S., 1991: *GIS and Remote Sensing*, vol. 1, Longman, London.
- Domański J., 1980: *Metody analizy cyfrowej wielospektralnych danych teledetekcyjnych*, Przegląd Geodezyjny, nr 3.
- Egenhofer M.J., Herring J.R., 1991: *High-level Spatial Data Structures for GIS*, vol. 1, Longman, London.
- Lewiński S., 1993: *Ocena szczegółowości kartowania użytkowania ziemi na podstawie zdjęć wykonanych skanerem AVHRR z satelity NOAA*, Rozprawa doktorska, Warszawa.
- Rożemski K., 1990: *Zastosowanie kontrolnych punktów terenowych do geograficznej lokalizacji obrazów satelitarnych AVHRR/NOAA*, Przegląd Geodezyjny, nr 11.
- Sabins F.F., 1987: *Principles and interpretation*, Remote Sensing, San Francisco.
- Struzik P., 1999: *Zastosowanie informacji satelitarnej AVHRR/NOAA do klasyfikacji rodzaju pokrycia terenu*, IMiGW, Warszawa.



Małgorzata Krówczyńska ukończyła studia na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych w systemie Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych, w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Obecnie jest na

pierwszym roku Studium Doktoranckiego WGiSR, w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Interesuje się zdjęciami satelitarnymi wykonywanymi przez satelity nowej generacji i ich zastosowaniem w badaniu dynamicznych procesów środowiska.