

**OCENA WIARYGODNOŚCI FOTOINTERPRETACJI POWIERZCHNI
NIEPRZEPUSZCZALNYCH NA WYSOKOROZDZIELCZYCH OBRAZACH
SATELITARNYCH**

**THE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF IMPERMEABLE SURFACES
PHOTO INTERPRETATION USING HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGES**

Wojciech Drzewiecki, Andrzej Wróbel

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: fotointerpretacja, powierzchnie nieprzepuszczalne, wysokorozdzielcze obrazy satelitarne, ocena dokładności, pokrycie i użytkowanie terenu

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono ocenę dokładności oszacowania wskaźnika nieprzepuszczalności (*imperviousness factor*) na drodze fotointerpretacji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Przez wskaźnik nieprzepuszczalności dla danego obszaru rozumiemy stosunek pola powierzchni terenu pokrytego powierzchniami o charakterze nieprzepuszczalnym (na których woda pochodząca z opadu atmosferycznego nie będzie podlegać wsiąkaniu w głąb gruntu, np. dachy budynków, drogi asfaltowe, wybetonowane podjazdy przydomowe, parkingi, itp.) do całości pola powierzchni tego obszaru. Oszacowanie wskaźnika przeprowadzono w granicach kwadratów o boku 30 m, symulujących piksele obrazu satelitarnego Landsat TM. Fotointerpretacja powierzchni nieprzepuszczalnych wykonana została na obrazach z satelity Ikonos o rozdzielczości 1 m. Porównano rezultaty uzyskane z wykorzystaniem obrazu panchromatycznego i obrazu kolorowego o podwyższonej rozdzielczości (*pan-sharpened*).

Eksperyment przeprowadzono w ramach ćwiczeń terenowych dla studentów geodezji i kartografii. Testowane wysokorozdzielcze obrazy satelitarne pozwoliły na oszacowanie współczynnika nieprzepuszczalności dla symulowanych pikseli Landsata z błędem średnim wynoszącym 7.7% i 6.8% - odpowiednio dla obrazu panchromatycznego i kolorowego. Wyższa przydatność obrazów kolorowych uwidoczniła się zwłaszcza w odniesieniu do terenów, na których przeważały powierzchnie o charakterze nieprzepuszczalnym.

1. WPROWADZENIE

Niewątpliwie najpowszechniejszym zastosowaniem obrazów satelitarnych jest sporządzanie na ich podstawie map pokrycia i sposobu użytkowania terenu. Proces ten może mieć charakter mniej lub bardziej zautomatyzowany – od procedury opartej na fotointerpretacji po wykorzystanie różnorodnych technik automatycznej klasyfikacji obrazów. Jego efektem jest zwykle przedstawienie form użytkowania i pokrycia terenu zgodnych z przyjętym schematem (strukturą) wydzieleni, odpowiednim dla przyjętej skali. Mapa taka, stanowiąc zobrazowanie przestrzennego układu form pokrycia i użytkowania terenu, jest swoistą inwentaryzacją (dokumentacją) krajobrazu, umożliwiającą śledzenie

dynamiki, rozkładu przestrzennego i charakteru zachodzących w nim zmian (por. m.in.: Baranowska i in. 2002, Barredo i in. 2003).

Informacja zawarta na klasycznych mapach użytkowania i pokrycia terenu nie zawsze jest jednak wystarczająca dla oceny zachodzących w krajobrazie procesów. Dobry przykład stanowią procesy urbanizacji. Przejawiać mogą się one nie tylko w przeznaczaniu pod zabudowę nowych obszarów, ale mogą również przybierać postać „dogęszczania” zabudowy, rozwoju infrastruktury, itp.. Pomimo, iż nie zmienia się kategoria użytkowania, do której zaliczony jest dany fragment terenu (np. zabudowa jednorodzinna typu miejskiego czy wiejskiego), to w sposób znaczący ulec mogą zmianie proporcje pokrycia terenu wewnątrz tej kategorii. Pozyskanie informacji umożliwiającej śledzenie tego rodzaju zmian jest możliwe w oparciu o zdjęcia lotnicze czy wysokorozdzielcze obrazy satelitarne, są to jednak podejścia kosztowne i pracochłonne, co ogranicza ich stosowanie na dużych obszarach. Rozwiązaniem stanowią może klasyfikacja średniorozdzielczych zobrazowań satelitarnych, której efektem jest nie klasyczna mapa użytkowania, ale mapa przedstawiająca dla każdego piksela procent pokrycia terenu określonym rodzajem powierzchni (np. wodą, roślinnością, itp.).

W Katedrze Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH realizowany jest obecnie projekt badawczy zatytułowany: „Badanie zmian przestrzennych struktury użytkowania i funkcji krajobrazu w oparciu o wieloczasowe obrazy teledetekcyjne jako wsparcie dla planowania krajobrazu”. Jednym z realizowanych w jego ramach zadań jest opracowanie w oparciu o obrazy pochodzące z satelitów serii Landsat (TM i ETM+) map przedstawiających zmiany pokrycia terenu powierzchniami nieprzepuszczalnymi (wszystkie powierzchnie, na których woda pochodząca z opadu atmosferycznego nie będzie podlegać wsiąkaniu w głąb gruntu, np. dachy budynków, drogi asfaltowe, wybetonowane podjazdy przydomowe, parkingi, itp.) dla obszaru zlewni rzek Prądnik i Dłubnia. Wzrost procentowego udziału tego rodzaju powierzchni stanowią może indikator zachodzących procesów urbanizacyjnych. Zjawisko to wpływa również w sposób oczywisty na funkcjonowanie krajobrazu, np. w aspekcie odtwarzania wód gruntowych czy transformacji odpływu.

Próby wykorzystania średniorozdzielczych obrazów satelitarnych do opracowania map przedstawiających stopień pokrycia terenu powierzchniami o charakterze nieprzepuszczalnym podejmowano już w latach 70-tych ubiegłego stulecia, a więc właściwie od pojawienia się tego rodzaju danych (por. Jackson 1975). Początkowo bazowały one na klasyfikacji (nadzorowanej i nienadzorowanej), której celem było wydzielenie form użytkowania terenu, takich jak ulice, parkingi czy budynki. W ostatnich latach nastąpił znaczący rozwój badań w tej dziedzinie. Zaproponowano wiele nowych podejść umożliwiających oszacowanie procentowego udziału powierzchni nieprzepuszczalnych w obszarze piksela, np. opartych na analizie zmieszania spektralnego (ang. *spectral mixture analysis*) (por. np. Phin i in., 2002; Wu i Murray 2003; Weng i Lu 2006) czy wykorzystaniu drzewa regresji (ang. *regression tree*) (por. Xian i Crane 2005; Xian, 2006).

Niezależnie od stosowanej metody etapem koniecznym dla przeprowadzenia tego rodzaju klasyfikacji jest pozyskanie danych kalibracyjnych. Te swoiste „pola treningowe” mają w tym przypadku postać pojedynczych pikseli średniorozdzielczego obrazu satelitarnego, dla których pozyskiwana jest informacja o rzeczywistym udziale procentowym powierzchni nieprzepuszczalnych. Tego samego rodzaju dane

wykorzystywane są również do weryfikacji otrzymanych wyników. Podawany przez poszczególnych autorów błąd średni określenia wskaźnika nieprzepuszczalności w oparciu o średniorozdzielcze obrazy satelitarne wynosi zazwyczaj kilkanaście procent.

Pozyskanie danych o rzeczywistych powierzchniach nieprzepuszczalnych odbywa się zazwyczaj na drodze fotointerpretacji zdjęć lotniczych lub wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. W tym miejscu pojawia się pytanie o ich wiarygodność. Deguchi i Sugio (1994) określili błąd oszacowania wskaźnika nieprzepuszczalności na podstawie zdjęć lotniczych na 10%. Można przypuszczać, iż oszacowanie dokonane na podstawie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych cechować się będzie większą niedokładnością. Postanowiono to sprawdzić przeprowadzając własny eksperyment badawczy.

2. OPIS EKSPERYMENTU

Eksperyment przeprowadzono w ramach ćwiczeń terenowych dla studentów geodezji i kartografii, co umożliwiło otrzymanie dla każdego pola testowego kilku wyników uzyskanych przez niezależnych obserwatorów. Pola testowe o rozmiarach 600 x 600 metrów zlokalizowano na obszarach o charakterze podmiejskim i miejskim. Wybrano 13 rejonów, przy czym rejony sąsiednie częściowo pokrywały się.

W badaniach brało udział około stu dwudziestu studentów. Ze względów organizacyjnych zostali oni podzieleni na pięć kilkudziesięciosobowych grup odbywających zajęcia w różnych terminach. Każda kilkudziesięciosobowa grupa do interpretacji powierzchni nieprzepuszczalnych dostawała ten sam obszar, przy czym dzielono grupę na zespoły dwuosobowe, z których każdy opracowywał inne pole testowe. W ten sposób obszar badań był opracowywany niezależnie pięć razy, przy czym z powodu różnej liczebności grup studenckich niektóre pola testowe podlegały interpretacji nieco rzadziej. Zespół dwuosobowy otrzymywał dla danego pola testowego obrazy z satelity Ikonos o rozdzielczości 1 m – panchromatyczny oraz kolorowy o podwyższonej rozdzielczości (*pan-sharpened*). Jedna osoba wykonywała interpretację obrazu panchromatycznego, druga kolorowego, a weryfikację terenową wykonywali wspólnie. Taka organizacja eksperymentu pozwoliła, dla większości pól testowych, na uzyskanie pięciu niezależnych wyników interpretacji obrazu panchromatycznego, pięciu kolorowego i pięciu weryfikacji terenowej.

Proces interpretacji obrazu studenci wykonywali w wydziałowej pracowni komputerowej pod kontrolą prowadzącego zajęcia. Wykorzystano program QuantumGIS [<http://qgis.org>], w którym dokonywano wektoryzacji obszarów uznanych przez interpretującego obrazy za nieprzepuszczalne. W czasie weryfikacji terenowej, która następowała już po interpretacji kameralnej, na powiększenia obrazów nanoszono granice stwierdzonych w terenie obszarów nieprzepuszczalnych. Jako osobną klasę wprowadzono te miejsca, na których, w okresie pomiędzy rejestracją obrazów a weryfikacją fotointerpretacji, nastąpiła zmiana użytkowania terenu. Wyniki weryfikacji terenowej przedstawiano w postaci wektorowej ponownie korzystając z programu QuantumGIS.

3. WYNIKI

Do dalszego opracowania wybrano siedem obszarów testowych. Ze względu na cel eksperymentu uzyskane wyniki interpretacji przetworzono do postaci przedstawiającej mapy procentowego udziału powierzchni nieprzepuszczalnych w obszarze symulowanych pikseli Landsata (30x30 m). Ponieważ analizowane obszary częściowo się pokrywały, całkowita liczba symulowanych pikseli Landsata wyniosła 2447. Pierwszy etap przetworzenia stanowiła rasteryzacja z pikselem o rozmiarach 0,25x0,25 m. Oznacza to, że na jeden symulowany piksel Landsata przypadało 14400 (120x120) pikseli powstałych w wyniku rasteryzacji rezultatów interpretacji wizualnej. Uzyskane obrazy stanowiły podstawę dla obliczenia wskaźnika nieprzepuszczalności dla obszarów odpowiadających powierzchni pikselom obrazu z satelity Landsat (30x30 m). W związku z tym, że pole testowe zajmowało obszar 600x600m, dla każdego obrazu uzyskiwano 400 wartości, które eksportowano do arkusza kalkulacyjnego w celu przeprowadzenia dalszych analiz.

W taki sam sposób przetworzono wyniki po weryfikacji terenowej, przy czym w tym przypadku rezultaty opracowań studenckich, po usunięciu błędów grubych, zostały dodatkowo skontrolowane przez doświadczonego fotointerpretatora z wykorzystaniem ortofotomapy (z panchromatycznych zdjęć lotniczych wykonanych w tym samym czasie co rejestracja obrazu satelitarnego) o rozmiarze piksela wynoszącym 0,25 m. Wskaźnika nieprzepuszczalności nie obliczano dla pikseli, dla których stwierdzono wystąpienie zmian w okresie pomiędzy rejestracją obrazu a wykonaniem weryfikacji terenowej.

Opracowanie wyników polegało na porównaniu, dla poszczególnych symulowanych pikseli Landsata, wartości współczynników nieprzepuszczalności uzyskanych na drodze fotointerpretacji (W_f) z wartościami współczynników nieprzepuszczalności obliczonymi w oparciu o rezultaty weryfikacji terenowej (W_t). Porównanie przeprowadzono w trzech wariantach: dla wszystkich pikseli (2447 pikseli), dla pikseli o wartościach W_t powyżej 0.005 (898 pikseli) oraz stosując podział na klasy w zależności od wartości W_t (1.0÷0.9; 0.9÷0.8; 0.8÷0.7; 0.7÷0.6; 0.6÷0.5; 0.5÷0.4; 0.4÷0.3; 0.3÷0.2; 0.2÷0.1; 0.1÷0.005; 0.005÷0.0). W każdym przypadku dla obrazu panchromatycznego i kolorowego obliczono wartości błędu średniego (RMSE) oraz błędu systematycznego (SE), według zależności:

$$(1) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (W_f - W_t)^2}{N}}$$

$$(2) \quad SE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_f - W_t),$$

gdzie:

W_f – wartość współczynnika nieprzepuszczalności uzyskana w wyniku fotointerpretacji,

W_t – wartość współczynnika nieprzepuszczalności uzyskana po weryfikacji terenowej,

N – ilość pikseli.

W wyniku oceny dokładności przeprowadzonej dla wszystkich symulowanych pikseli Landsata (Tab 1) dla obu testowanych obrazów uzyskano zbliżone wartości błędu średniego szacowanego wskaźnika nieprzepuszczalności – odpowiednio 7.7% i 6.8% dla obrazu panchromatycznego i kolorowego. Po wyłączeniu z analiz pikseli, na obszarze których powierzchnie nieprzepuszczalne praktycznie nie występują (wartości W_t poniżej 0.005), średni błąd szacowanego wskaźnika wzrasta odpowiednio do 12.4% i 10.7%. Wartości błędów systematycznych wskazują na minimalne niedoszacowanie mierzonego wskaźnika.

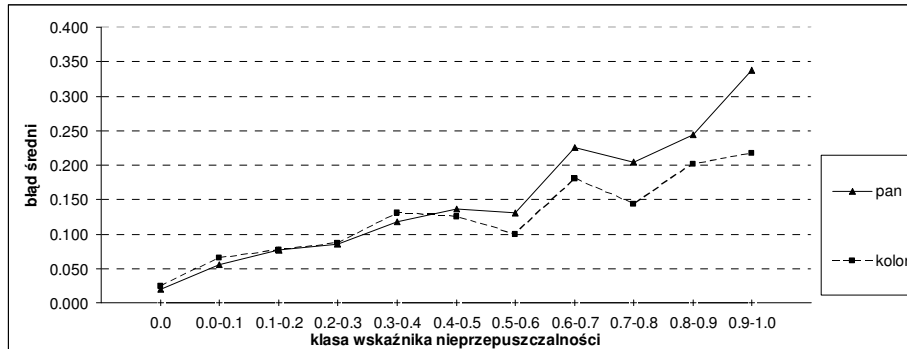
Tab 1. Ocena dokładności fotointerpretacji – całość obszaru

	Obraz panchromatyczny		Obraz kolorowy	
	Błąd średni	Błąd systematyczny	Błąd średni	Błąd systematyczny
Wszystkie piksele	0.077	-0.014	0.068	-0.004
Piksele o $W_t > 0.005$	0.124	-0.045	0.107	-0.018

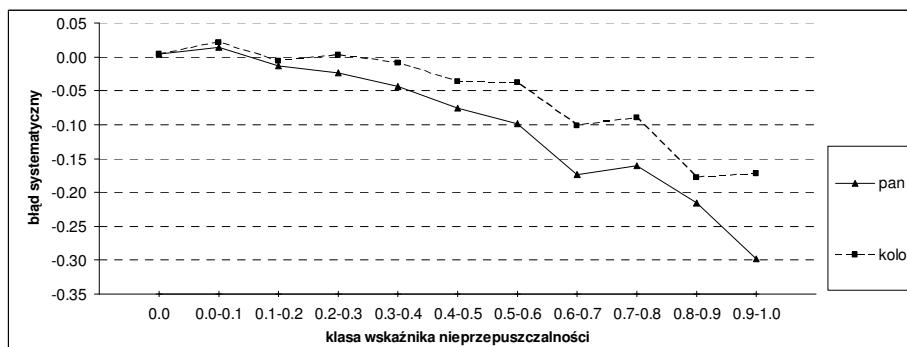
Analiza dokładności przeprowadzona dla symulowanych pikseli pogrupowanych w klasy w zależności od rzeczywistego współczynnika nieprzepuszczalności (W_t) wykazała, iż błąd oszacowania wzrasta wraz ze stopniem pokrycia terenu powierzchniami nieprzepuszczalnymi (Tab 2). Zastosowanie obrazów panchromatycznych i kolorowych skutkowało zbliżonymi wartościami błędów średnich dla pikseli o przewadze powierzchni przepuszczalnych (wartości $W_t < 0.5$). W przypadku pikseli, na których dominowały powierzchnie o charakterze nieprzepuszczalnym lepsze oszacowanie wskaźnika nieprzepuszczalności uzyskano w wyniku fotointerpretacji obrazów kolorowych (por. Rys. 1, Rys. 2). Analiza wartości błędów systematycznych pozwala na stwierdzenie, iż błąd oszacowania wskaźnika nieprzepuszczalności dla tych pikseli powstawał wskutek niedoszacowania udziału powierzchni nieprzepuszczalnych.

Tab 2. Ocena dokładności fotointerpretacji dla poszczególnych klas wskaźnika nieprzepuszczalności

W_t	Ilość pikseli	Obraz panchromatyczny		Obraz kolorowy	
		Błąd średni	Błąd systematyczny	Błąd średni	Błąd systematyczny
1.0÷0.9	30	0.337	-0.298	0.217	-0.173
0.9÷0.8	23	0.245	-0.215	0.201	-0.178
0.8÷0.7	32	0.204	-0.161	0.143	-0.090
0.7÷0.6	34	0.225	-0.174	0.180	-0.102
0.6÷0.5	38	0.131	-0.099	0.099	-0.039
0.5÷0.4	66	0.136	-0.075	0.125	-0.037
0.4÷0.3	93	0.118	-0.044	0.130	-0.009
0.3÷0.2	142	0.085	-0.024	0.086	0.003
0.2÷0.1	179	0.077	-0.014	0.077	-0.007
0.1÷0.005	252	0.055	0.014	0.066	0.021
0.005÷0.0	1548	0.020	0.004	0.024	0.004



Rys. 1. Wartości błędu średniego dla poszczególnych klas wskaźnika nieprzepuszczalności



Rys. 2. Wartości błędu systematycznego dla poszczególnych klas wskaźnika nieprzepuszczalności

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Testowane wysokorozdzielcze obrazy satelitarne (Ikonos) pozwoliły na oszacowanie wskaźnika nieprzepuszczalności dla symulowanych pikseli Landsata z błędem średnim wynoszącym 7.7% i 6.8% - odpowiednio dla obrazu panchromatycznego i kolorowego. Jeśli z analizy dokładności wyłączone zostaną piksele pozbawione powierzchni o charakterze nieprzepuszczalnym ($W_c < 0.005$), błąd współczynnika nieprzepuszczalności oszacowanego na drodze fotointerpretacji wzrasta do 12.4% i 10.7%.

- Uzyskane dokładności są porównywalne z wynikami uzyskiwanymi na drodze interpretacji zdjęć lotniczych (por. Deguchi i Sugio 1994).
- Lepsze rezultaty uzyskano wykonując fotointerpretację w oparciu o obrazy kolorowe o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej. Ich przewaga nad obrazami panchromatycznymi uwidoczniła się przede wszystkim na obszarach, gdzie dominowały powierzchnie o charakterze nieprzepuszczalnym.

Porównując wyniki przeprowadzonego eksperymentu oraz podawane w literaturze rezultaty szacowania wskaźnika nieprzepuszczalności w oparciu o średniorozdzielcze obrazy satelitarne należy stwierdzić, iż obie metody pozwalają na uzyskanie wyników o zbliżonym poziomie dokładności. Konstatacja taka prowadzi do wniosku, iż klasyfikacja średniorozdzielczych obrazów satelitarnych z powodzeniem stosowana być może jako alternatywna wobec fotointerpretacji metoda szacowania stopnia pokrycia terenu powierzchniami nieprzepuszczalnymi. Jednocześnie powstaje jednak zasadnicza wątpliwość, czy wyniki fotointerpretacji wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych (podobnie jak mało- i średnioskalowych zdjęć lotniczych o zbliżonym rozmiarze terenowym piksela) stanowią odpowiednie dane do kalibracji i weryfikacji modeli stosowanych do opracowania map wskaźnika nieprzepuszczalności na drodze klasyfikacji średniorozdzielczych obrazów satelitarnych.

Oczywiście na dokładność oszacowania wskaźnika nieprzepuszczalności w przypadku przeprowadzonego przez nas eksperymentu wpływać może negatywnie kilka czynników, z których za najważniejsze uznać należy niewielkie doświadczenie fotointerpretatorów (studentów) oraz wpływ czasu pomiędzy rejestracją obrazów a weryfikacją terenową (część zaistniałych w terenie zmian mogła nie zostać zidentyfikowana). Przewiduje się kontynuację badań, a w jej ramach zarówno powtórzenie eksperymentu z udziałem doświadczonych fotointerpretatorów, jak i ocenę wiarygodności fotointerpretacji powierzchni nieprzepuszczalnych na zdjęciach lotniczych w różnych skalach.

5. LITERATURA

Baranowska T., Gronet R., Poławski Z. F., 2002. Koncepcja mapy użytkowania ziemi w skali 1:50 000 dla obszaru Polski. Instytut Geodezji i Kartografii, Seria Monograficzna Nr 4.

Barredo J. I., Lavalle C., Demicheli L., Kasanko M., McCormick N., 2003. Sustainable urban and regional planning: The MOLAND activities on urban scenario modelling and forecast. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Deguchi C., Sugio S., 1994. Estimations for percentage of impervious area by the use of satellite remote sensing imagery. *Water Science Technology*, 29, 135-144.

Jackson T. J., 1975. Computer-aided techniques for estimating the percent of impervious area from Landsat data. *Proceedings of Workshop on the Environmental Application of multispectral Imagery*. American Society of Photogrammetry, Fort Belvoir, Virginia, 140.

Phinn S., Stanford M., Scarth P., Murry A. T., Shyy P.T., 2002. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation – impervious surface – soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 4131-4153.

Xian G., Crane M., 2005. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 97, s. 203-215.

Xian G., 2006. Assessing Urban Growth with Subpixel Impervious Surface Coverage. [w:] Weng Q., Quattrochi D. A. (red.): *Urban Remote Sensing*. CRC Press. Taylor&Francis Group, Boca Raton, London, New York, 179-199.

Weng Q., Lu D., 2006. Subpixel Analysis of Urban Landscapes. [w:] Weng Q., Quattrochi D. A. (red.): *Urban Remote Sensing*. CRC Press. Taylor&Francis Group, Boca Raton, London, New York, 71-90.

Wu C., Murray A.T., 2003. Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 84, 493-505

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy „Badanie zmian przestrzennych struktury użytkowania i funkcji krajobrazu w oparciu o wieloczasowe obrazy teledetekcyjne jako wsparcie dla planowania krajobrazu” (N526 029 32/2621)

THE ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF IMPERMEABLE SURFACES PHOTO INTERPRETATION USING HIGH-RESOLUTION SATELLITE IMAGES

KEY WORDS: photo interpretation, sealed areas, high-resolution satellite images, accuracy assessment, land-use/land cover

SUMMARY: The paper presents the accuracy assessment of non-permeability factor determined by high-resolution satellite image interpretation. The non-permeability factor can be defined as the percentage of the total area considered, covered by impermeable surfaces (any materials that are resistant to water, such as rooftops, streets, driveways, parking lots, etc.). The assessment of the non-permeability factor was performed for 30x30 m squares to simulate Landsat TM pixels, by interpretation of Ikonos images with spatial resolution of 1 m. The results obtained from panchromatic and natural colour pan-sharpened images were compared.

The experiment was performed during field exercises for surveying and cartography students. The non-permeability factor of overall accuracy of 7.7% and 6.8% was estimated, for panchromatic and pan-sharpened images respectively. Natural colour pan-sharpened images proved to be more appropriate especially for the areas with higher percentage of impermeable surfaces.

Dr inż. Wojciech Drzewiecki
e-mail: drzewiec@agh.edu.pl
telefon: 12 617 2302
fax: 12 617 3993

Dr inż. Andrzej Wróbel
e-mail: awrobel@agh.edu.pl
telefon: 12 617 3826
fax: 12 617 3993