

Porównanie klasyfikacji wieloczasowych zdjęć satelitarnych MODIS

Comparison of multi-temporal classification of MODIS satellite data

Katarzyna Ewa LEWIŃSKA

Słowa kluczowe: klasyfikacja wieloczasowa, pokrycie terenu, MODIS

Key words: multi-temporal classification, land cover, MODIS

Otrzymano: 11 stycznia 2011; **Zaakceptowano:** 24 sierpnia 2011

Received: 11 January 2011 **Accepted:** 24 August 2011

Since the 1970's remote sensing enable constant monitoring of land cover and land use, which are considered as the most crucial environmental data. Obtaining this information at global, regional and local scales, becomes the goal of many research and application programs and has allowed for the deeper understanding of the entire Earth system.

In December 1999 NASA launched the EOS Terra Satellite, followed in 2002 by Aqua, both equipped with MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Thanks to its technical specification and free distribution of the majority of its products, MODIS is considered to be the most important sensor for the global vegetation mapping. Although has been originally designed for large-scale analysis, MODIS is also used in many regional research programs.

This paper presents results of two approaches of multi-temporal land cover classification of MODIS data. For the study polygon of 22100 square kilometres, situated in the western

Poland, four single day surface reflectance data sets, of spatial resolution of 250m and 500m, were collected for the year 2007 – one for spring and autumn, and two for summer.

In the first approach supervised land cover classification was conducted for each set of single day data separately. On the basis of obtained results, final classification was elaborated as an effect of analyse of the sequence of changes for each pixel. In second approach, independent classification was conducted for the aggregation of all possessed data.

The accuracy of all classifications' results was checked against Corine Land Cover 2000 database using 4200 randomly distributed points. Obtained statistics show that comparing with single-day classifications as well as with classification of aggregated data, multi-temporal approach based on the analysis of sequence, enabled crucial improvement of accuracy of the classification.

Wstęp

Od lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia teledetekcyjne techniki satelitarne pozwalają na ciągły monitoring środowiska naturalnego Ziemi. Informacje pozyskane w wyniku analizy obrazów satelitarnych o średniej i niskiej rozdzielczości odgrywają istotną rolę w procesie poznania i zrozumienia zależności istniejących między komponentami środowiska planety, jak również umożliwia modelowanie procesów przyrodniczych. Szczególny wkład, wniosły tutaj serie satelitów Landsat wyposażone między innymi w skanery obrazujące MSS, TM, ETM i ETM+; oraz NOAA Polar-Orbiting Operational Environmental Satellites ze skanerem AVHRR na pokładzie (Jensen, 1996). Opracowania powstałe na

podstawie danych dostarczonych przez jednostki wchodzące w skład obu programów, zapoczątkowały nową erę badań przyrodniczych Ziemi zarówno, w skali regionalnej jak i globalnej.

Szczególnie istotna okazała się możliwość pozyskania za pośrednictwem danych satelitarnych, informacji o pokryciu terenu w skali globalnej. Pierwszym takim opracowaniem była globalna mapa pokrycia terenu o rozdzielczości 1° (DeFries i Townshend, 1994), wykonana na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku, na podstawie miesięcznych kompozycji wskaźnika NDVI pozyskanych przez skaner AVHRR. Wraz z nieco późniejszą, ulepszoną wersją (DeFries i in. 1998), pozwoliły na poznanie rozmieszczenia i zróżnicowania form pokrycia terenu na całym globie ziemskim.

Przełomowym krokiem w dziedzinie monitoringu środowiska w skalach przeglądowych, ze szczególnym uwzględnieniem pokrycia terenu, było wyniesienie na orbitę w grudniu 1999 roku satelity Terra. Razem z działającą od maja 2002 misją Aqua, satelity zapewniają możliwość zintegrowanego i kompleksowego pomiaru i rejestracji procesów naturalnych zachodzących na Ziemi (The Earth Observing System).

Wyjątkowość oby misji polega przede wszystkim na fakcie, że poza innymi instrumentami pokładowymi, oba satelity zostały wyposażone w skaner MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Urządzenie to zostało skonstruowane w wyniku wielu lat badań i doświadczeń prowadzonych w ramach programu Earth Science Enterprise (ESE). MODIS łączy w sobie cechy takich skanerów jak: NOAA/AVHRR, Nimbus Coastal Zone Color Scanner (CZCS), Orbview-2 SeaWiFS, NOAA High-resolution Infrared Sounder (HIRS) oraz Landsat Thematic Mapper (Guenther i in., 2002). Wyjątkowa konstrukcja tego trzydziestosześcio-kanalowego skanera, 12-sto bitowa rozdzielczość radiometryczna oraz niespotykana stabilność kalibracji (Justice i in., 2002) połączona z parametrami satelitów Terra i Aqua (The Earth Observing) sprawiają, że zobrażenia pozyskiwane przez skaner MODIS, jak również produkty opracowywane na ich podstawie (Savtchenko i in., 2004), od lat są wykorzystywane w badaniach środowiska naturalnego.

Parametry skanera oraz dostępność zobrażeń sprawiły, że pozyskiwane przez niego dane środowiskowe są podstawą wielu opracowań prowadzonych w skali globalnej, takich jak MODIS Global Land Cover (Friedl i in., 2002) czy Vegetation Cover Conversion (Zhan i in., 2002), będących kontynuacją projektów zapoczątkowanych przy wykorzystaniu danych AVHRR. Dane MODIS są również z powodzeniem stosowane w badaniach w skalach regionalnych i lokalnych, takich jak obserwacja rozwoju fenologicznego roślin (Zhang X. i in., 2003) czy klasyfikacja upraw (Doraiswamy i in., 2007). Szczególnie korzystne w badaniach środowiska naturalnego jest wysoka rozdzielczość czasowa danych. Misje Aqua i Terra zostały zaprojektowane w taki sposób, że codziennie dla każdego punktu na ziemi jest dostępne co najmniej jedno zobrazenie MODIS. Daje to olbrzymie możliwości prowadzenia badań wymagających danych z więcej niż jednego terminu rejestracji, jak choćby obserwacji zmian i detekcja zagrożeń (Lunetta i in., 2006).

Celem niniejszej pracy jest sprawdzenie możliwości klasyfikacji form pokrycia terenu z wykorzystaniem zobrażeń MODIS pochodzących z więcej niż jednego terminu rejestracji. Zastosowanie danych wieloczasowych pozwala na poprawę dokładności końcowego rezultatu klasyfikacji. W artykule przeanalizowano wyniki dwóch różnych podejść klasyfikacyjnych uwzględniających zastosowanie zobrażeń satelitarnych z wielu terminów: jednoczesną klasyfikację wszystkich danych, oraz stosowaną do tej pory głównie w monitoringu zmian rozwoju fenologicznego roślinności (Zhang i in., 2003) i w badaniach erozji gleb (Marquinez i in., 2008), anali-

zę sekwencji zmian klas pokrycia terenu wykonaną na dla każdego piksela obrazu na podstawie pojedynczych, niezależnych obrazów klasyfikacyjnych pochodzących z kilku terminów rejestracji (Lewińska, 2009).

Dane

W analizie wykorzystano jednodniowe zobrażenia MODIS o rozdzielczości 250 i 500 metrów, pochodzące z tzw. drugiego poziomu przetworzenia danych (MODIS/Terra/Aqua Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V005 oraz MODIS/Terra/Aqua Surface Reflectance Daily L2G Global 1km 500m SIN Grid V005). Zgodnie z podziałem arkuszowym odwzorowania sinusoidalnego, w którym udostępniane są wszystkie produkty MODIS, terytorium Polski jest odwzorowywane na czterech arkuszach: h18v03, h18v04, h19v03 i h19v04. Z uwagi jednak na stosunkowo niewielką powierzchnię kraju znajdującą się na arkuszach południowych, ostatecznie zdecydowano się na wykorzystanie danych jedynie z arkuszy h18v03 i h19v03. W celu uchwycenia zmienności fenologicznej pokrywy roślinnej, mającej ułatwić rozpoznanie form pokrycia terenu, analizę wykonano na podstawie zdjęć zarejestrowanych w okresie jednego sezonu wegetacyjnego, definiowanego jako czas trwający od połowy marca (początek prac polowych) do końca października (ostatnie zbiory, zrzućanie liści przez drzewa). Podczas doboru zobrażeń głównymi czynnikami ograniczającymi było występowanie zachmurzenia i zamglenia, jak również występujące na zdjęciach błędy rejestracji skanera. Ostatecznie spośród dwunastu, wstępnie wyselekcjonowanych dla roku 2007 zestawów danych, do dalszej analizy wybrano zobrażenia z: 31 marca (Terra), 16 lipca (Terra), 2 sierpnia (Terra) i 13 października (Aqua).

Jako materiał pomocniczy podczas klasyfikacji użyto dwóch scen Landsat ETM+ zarejestrowanych 13 czerwca 2000 i 24 maja 2001. Kanały 3, 4 i 5 wykorzystane w kompozycji RGB (4,5,3) zostały pobrane z serwera USGS (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer>).

Materiałem referencyjnym dla wyników klasyfikacji, jak również pomocniczym podczas procesu definiowania klas pokrycia terenu możliwych do wydzielenia na zdjęciach MODIS była baza danych CORINE Land Cover 2000 (EEA, 2004).

Poligon badawczy

W wyniku selekcji dostępnych danych satelitarnych, oraz analizy zróżnicowania wielkości pól uprawnych na obszarze kraju, poligon badawczy został zdefiniowany jako prostokąt o powierzchni 22100 km² i wymiarach 130 na 170 km, położony w zachodniej części Polski (Ryc. 1). Zgodnie z podziałem administracyjnym kraju, obszar badawczy obejmuje tereny należące do trzech województw: lubuskiego, wielkopolskiego i dolnośląskiego. Pod względem przyrodniczym jest to obszar bardzo

urozmaicony i niejednorodny o skomplikowanej budowie geologicznej i morfologicznej (Geografia fizyczna Polski, 2005). Ze względu na właściwości fotomorficzne, w zasięgu poligonu badawczego można wyróżnić następujące regiony geograficzne: Pojezierze Lubuskie, Dolinę Środkowej Ordy z niewielkim obszarem Ziemi Zielonogórskiej, Wielkopolską Północną, Wielkopolską Środkową, Wielkopolską Południową, Dolny Śląsk a także część Przedgórze Sudeckiego i Sudetów Zachodnich (Olędzki, 2007).

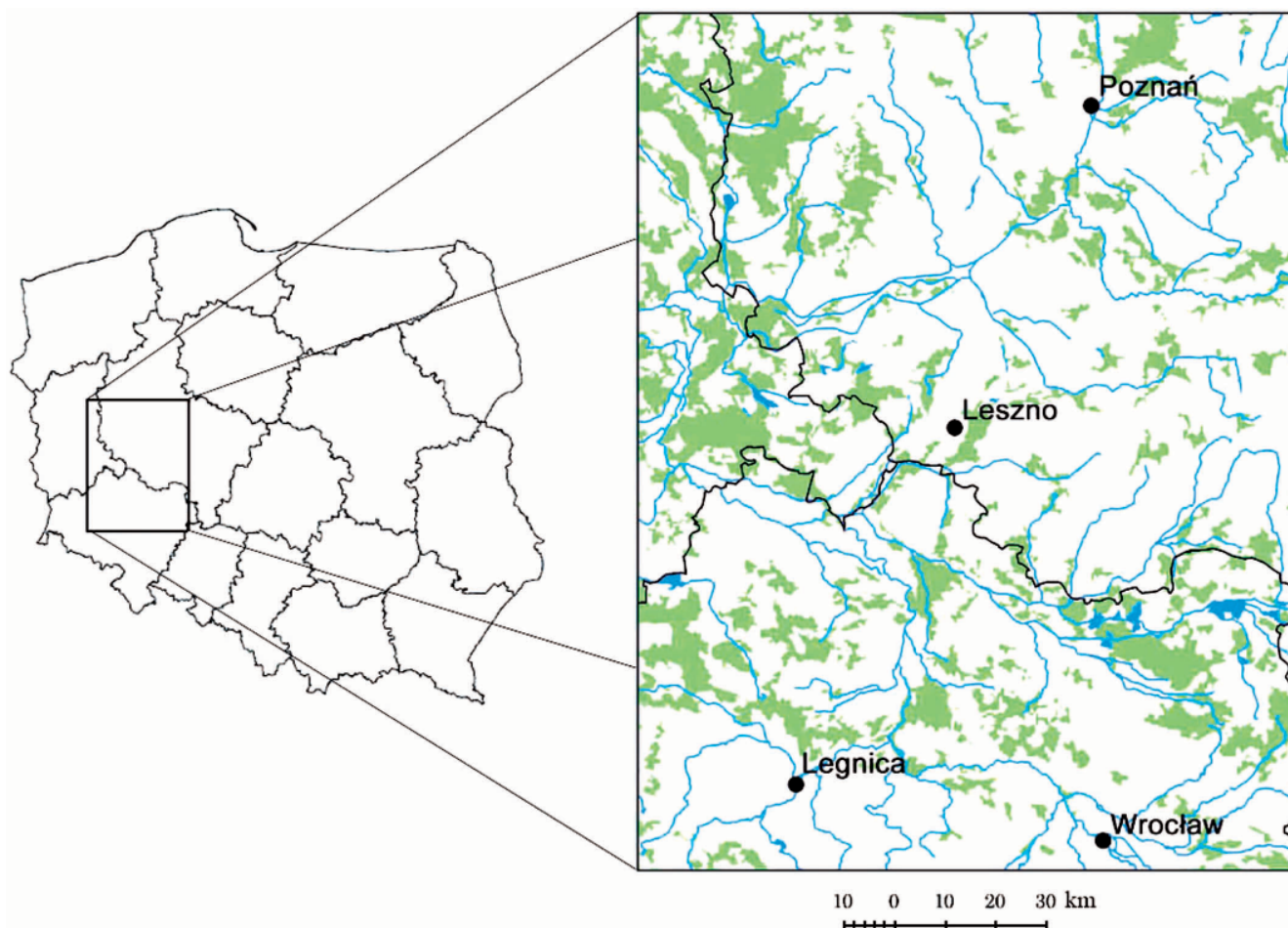
Na obszarze badań występuje klimat umiarkowany przejściowy z dominacją wpływów oceanicznych. Łagodny przebieg okresów zimowych i umiarkowanie upalne lato, wpływają korzystnie na długość okresu wegetacyjnego, który wynosi od 210 do 220 dni (Geografia Polski, 1999). Znajduje to odzwierciedlenie w strukturze użytkowania gruntów – użytki rolne stanowią tu przeszło 50% obszaru. Roślinność naturalna jest reprezentowana głównie przez zbiorowiska leśne zajmujące trochę ponad 13% powierzchni terenu, wśród których zdecydowanie dominują lasy iglaste (EEA, 2004).

Metody badań

Wstępne przetworzenie zdjęć

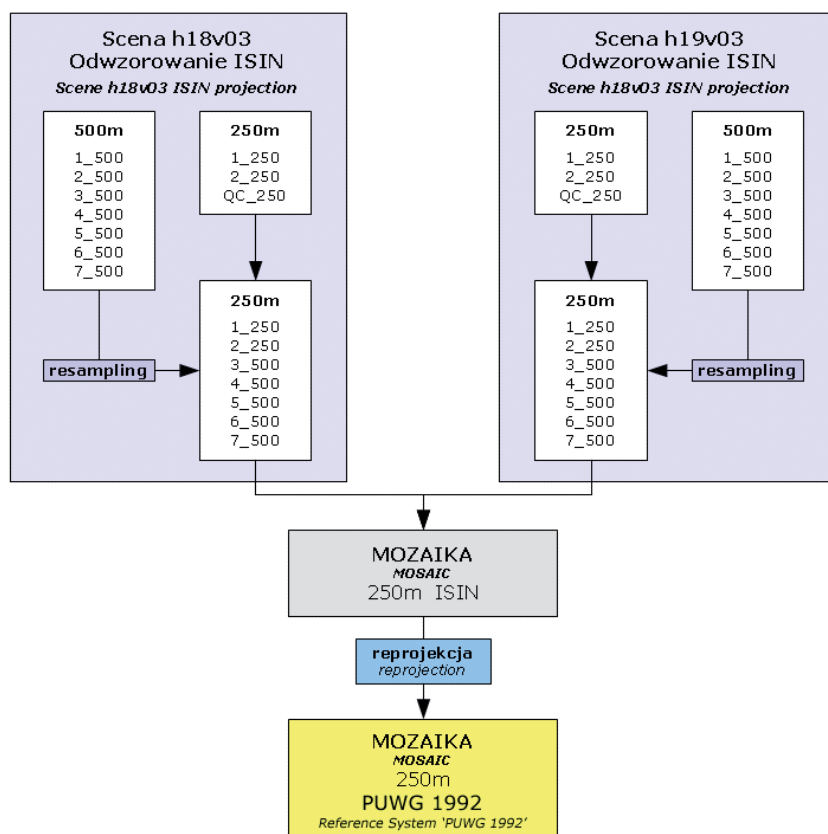
Przed przystąpieniem do właściwej analizy, wybrane zobrazowania MODIS zostały poddane wstępnemu przetworzeniu. Dla każdego z czterech terminów dysponowano pełnym zestawem danych składającym się w sumie z czterech plików – dwa arkusze każdy w rozdzielczości 250 i 500 metrów. Zgodnie ze schematem postępowania przedstawionym na rycinie 2, w pierwszej kolejności wykonany został resampling (nearest neighbour) zdjęć o rozdzielczości 500 metrów, do rozdzielczości 250 metrów. W efekcie tego zabiegu, dla każdego terminu uzyskano po dwa pełne zestawy danych o rozdzielczości 250 metrów. Ponieważ produkty o rozdzielczości 500 metrów posiadały także kanały 1 i 2, postanowiono usunąć je z nowo otrzymanych zbiorów. Podobnie postąpiono z dodatkowym kanałem QC – Reflectance Band Quality, dostępnym w pakiecie produktów o rozdzielczości 250 i charakteryzującym jakość zobrazowań (Vermote i Kotchenova, 2008).

Otrzymane w ten sposób siedmiokanałowe zestawy danych, zostały następnie pogrupowane zgodnie z datą



Ryc. 1. Usytuowanie poligonu badawczego (Baza Danych Ogólnogeograficznych: <http://maps.geoportal.gov.pl>).

Fig. 1. Location of the study area (General Geographic Data Base: <http://maps.geoportal.gov.pl>).



Ryc. 2. Schemat wstępnego przetworzenia danych (nazwy kanałów są zgodne z nazewnictwem produktów MODIS).

Fig. 2. Scheme of data's preprocessing (bands' names correspond with MODIS products' names).

rejestracji i automatycznie zmozaikowane w module OrthoEngine oprogramowania PCI Geomatica. W efekcie tego procesu dla każdego terminu uzyskano jeden plik zawierający kompletny zestaw danych. Ostatnim etapem była zmiana projekcji zobrazowań z odwzorowania sinusoidalnego do odwzorowania „PUWG 1992”.

Pojedyncze błędy rejestracji danych (piksele o wartości -28672, tak zwanej „fill value”) (Vermote i Kotchenova, 2008) zostały zastąpione wartościami obliczonymi z zastosowaniem filtra mediany o oknie 5x5 pikseli (wyjątek stanowiły tu dane z 2 sierpnia, dla których z powodu wielkości zakłóceń należało posłużyć się filtrem o oknie zwiększonym do wymiarów 13x13 pikseli).

Klasyfikacja danych z pojedynczych terminów i analiza sekwencji zmian

Zgodnie z założeniami, użycie w klasyfikacji danych pochodzących z różnych terminów sezonu wegetacyjnego ma ułatwić rozpoznanie form pokrycia terenu. Ostateczna klasa pokrycia terenu jest definiowana osobno dla każdego piksela obrazu, na podstawie analizy sekwencji zmian klas pokrycia terenu, uzyskanych dla danych pochodzących z różnych terminów rejestracji.

Klasyfikacja danych pochodzących z pojedynczych terminów rejestracji została wykonana niezależnie dla każdego zobrazowania z wykorzystaniem algorytmu klasyfikacji nadzorowanej największego prawdopodobieństwa.

W celu poprawnego wyznaczenia pól treningowych niezbędne było wcześniejsze określenie klas pokrycia

terenu możliwych do rozpoznania na zdjęciach MODIS. Ocena ta miała charakter wizualny i polegała na analizie porównawczej kompozycji (7,2,1) i (6,2,1) zdjęć MODIS z kompozycją (4,5,3) zobrazowań Landsat ETM+. Kompozycje barwne dla zdjęć MODIS zostały wybrane na podstawie wielkości wskaźnika OIF (Optimum Index Factor) (Chavez i in. 1984, za Jensen, 1996). Ponieważ materiałem referencyjnym dla końcowej klasyfikacji form pokrycia terenu miała być baza danych CLC2000, postanowiono aby punktem wyjścia w rozważaniach nad możliwościami wydzielania form pokrycia terenu był trzeci poziom legendy CORINE. Wykorzystanie pierwszego lub drugiego poziomu legendy wiązałoby się ze stratą wielu cennych informacji, jak choćby rozróżnienia zbiorowisk leśnych na liściaste, iglaste i mieszane. Przyjęte podejście zakłada utrzymanie jak największej liczby możliwych do prawidłowego rozpoznania klas, przy jednoczesnej agregacji tych wydzielen trzeciego poziomu legendy CORINE, których jednoznaczne rozpoznanie jest utrudnione lub też niemożliwe ze względu na rozdzielczość zdjęć MODIS (Waser, Schwarz, 2006).

W wyniku przeprowadzonych obserwacji, popartych próbami klasyfikacji, stwierdzono, że na zobrazowaniach MODIS można wydzielić 7 klas pokrycia terenu: zabudowa, grunty orne, łąki, lasy liściaste, lasy iglaste, lasy mieszane i woda. Schemat agregacji 24 klas trzeciego poziomu legendy CORINE został przedstawiony w tabeli 1.

Ponieważ klasa gruntów ornych jest wydzieleniem niejednorodnym, różnicującym się w zależności od pory roku i rodzaju upraw, w jej ramach wyróżniono cztery podklasy: grunty orne bez pokrywy roślinnej, grunty orne z pokrywą roślinną, grunty orne z pokrywą roślinną dojrzałych zbóż oraz grunty orne z pokrywą przejściową, oznaczającą ścierniska i pola z bardzo rzadką pokrywą roślinności. Podział ten służy nie tylko ułatwieniu klasyfikacji obszarów gruntów ornych ale także zwiększa możliwości analizy sekwencji zmian. Wyniki klasyfikacji danych z pojedynczych terminów różnią się zatem między sobą liczbą klas pokrycia terenu, wynikającą z odmiennej liczby wyróżnionych podklas gruntów ornych.

Pola treningowe dla klasyfikacji, zostały wyznaczone niezależnie dla zobrazowań ze wszystkich czterech terminów. Podczas tego procesu bardzo pomocna okazała się wiedza dotycząca kalendarza upraw oraz zobrazowania satelitarne Landsat ETM+. W zależności od terminu rejestracji zdjęcia, liczba pikseli treningowych dla każdej z możliwych do wyróżnienia klas była odmienna. Wartości te plasowały się między 350 a 1000 pikseli dla każdej klasy, przy średnim udziale pól treningowych

Tabela 1. Porównanie klas wyróżnionych na zobrażowaniach MODIS z legendą trzeciego poziomu klasyfikacji CORINE. W ostatniej kolumnie podane są powierzchnie klas na poligonie badawczym wg. bazy CLC2000. Klasa gruntów ornych jest przedstawiona wraz z czterema podklasami wydzielonymi zgodnie ze zmianami sezonu wegetacyjnego
Table 1. Comparison of land cover classes classified on MODIS data, with CORINE Level 3 legend. Last column presents area of each class according to the CLC2000 database. MODIS' agricultural areas are presented with four subclasses selected accordingly to the changes of growing season

Kod Code	MODIS	CORINE	
	Klasa Class name	Klasa trzeciego poziomu legendy Class of the third level	Obszar [km ²] Area [km ²]
1	Zabudowa Urban area	1.1.1. Zabudowa zwarta <i>1.1.1. Continuous urban fabric</i> 1.1.2. Zabudowa luźna <i>1.1.2. Discontinuous urban fabric</i> 1.2.1. Tereny przemysłowe i handlowe <i>1.2.1. Industrial or commercial units</i> 1.2.2. Tereny komunikacyjne i związane z komunikacją (drogową i kolejową) <i>1.2.2. Road and rail networks and associated land</i>	722,81
2	Grunty orne Agricultural areas 2.1 bez pokrywy roślinnej <i>2.1. areas of bare soil</i> 2.2. z pokrywą roślinną <i>2.2. areas of green crops</i> 2.3. z pokrywą dojrzałych zbóż <i>2.3. areas of ripe crops</i> 2.4. z pokrywą przejściową <i>2.4. areas briefly after harvest</i>	1.3.1. Miejsca eksploatacji odkrywkowej <i>1.3.1. Mineral extraction sites</i> 1.3.2. Zwałowiska i hałdy <i>1.3.2. Dump sites</i> 1.3.3. Budowy <i>1.3.3. Construction sites</i> 2.1.1. Grunty orne poza zasięgiem urządzeń nawadniających <i>2.1.1. Non-irrigated arable land</i> 2.4.2. Złożone systemy upraw i działek <i>2.4.2. Complex cultivation patterns</i> 3.3.3. Roślinność rozproszona <i>3.3.3. Sparsely vegetated areas</i>	12896,69
3	Łąki Grasslands	1.2.4. Lotniska <i>1.2.4. Airports</i> 2.2.2. Sady i plantacje <i>2.2.2. Fruit trees and berry plantations</i> 2.3.1. Łąki <i>2.3.1. Pastures</i> 2.4.3. Tereny głównie zajęte przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej <i>2.4.3. Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation</i> 3.2.1. Murawy i pastwiska naturalne <i>3.2.1. Natural grassland</i> 4.1.1. Bagna śródlądowe <i>4.1.1. Inland marshes</i>	2206,88
4	Lasy liściaste Broad-leaved forest	3.1.1. Lasy liściaste <i>3.1.1. Broad-leaved forest</i> 1.4.1. Miejskie tereny zielone <i>1.4.1. Green urban areas</i> 1.4.2. Tereny sportowe i wypoczynkowe <i>1.4.2. Sport and leisure facilities</i>	938,38
5	Lasy iglaste Coniferous forest	3.1.2. Lasy iglaste <i>3.1.2. Coniferous forest</i>	3635,13
6	Lasy mieszane Mixed forest	3.1.3. Lasy mieszane <i>3.1.3. Mixed forest</i> 3.2.4. Lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian <i>3.2.4. Transitional woodland/shrub</i>	1435,94
7	Woda Water bodies	5.1.1. Cieki <i>5.1.1. Water courses</i> 5.1.2. Zbiorniki wodne <i>5.1.2. Water bodies</i>	264,19

na poziomie około 1,5% poligonu badawczego. Rozróżnialność klas na polach treningowych została zweryfikowana z wykorzystaniem odległości Bhattacharrya (Bhattacharrya Distance) przyjmującej wartości od 0 do 2. Uzyskane wyniki, jedynie dla par klas lasów mieszanych i liściastych oraz mieszanych i iglastych, jak również łąk i gruntów ornych z pokrywą roślinną, mają wartości poniżej 1,9, ujawniając tym samym pewne, spodziewane problemy we wzajemnej rozróżnialności tych wydzieleni

Podczas procesu wyznaczania pól treningowych okazało się, że dane z 2 sierpnia cechują się niewielkim

wykonanych dla całej sceny oraz osobno dla obszaru objętego maską.

Dokładność wyników klasyfikacji została sprawdzona względem bazy danych CORINE CLC2000 z wykorzystaniem 4200 losowo rozmieszczonych punktów. W tym celu niezbędna była konwersja wektorowej bazy danych CLC2000 do formatu rastrowego o rozdzielczości 250 metrów oraz rekasyfikacja do 7 klas pokrycia terenu, zgodnie z tabelą 1. Podklasy gruntów ornych zostały dla potrzeb oszacowania dokładności klasyfikacji zagregowane do jednej klasy. Otrzymane statystyki są zaprezentowane w tabeli 2.

Tabela 2. Dokładność klasyfikacji na polach treningowych oraz całkowita dokładność klasyfikacji oszacowana na podstawie wyników z 4200 losowo rozmieszczonych punktów

Table 2. Classification accuracy for training sites and overall classification accuracy estimated using 4200 randomly distributed check points

Dane Data set	Liczba rozpoznanych klas Number of recognized classes	Dokładność klasyfikacji Classification accuracy			
		Pola treningowe Training sites		4200 punktów kontrolnych 4200 check points	
		Całkowita Overall	Wsp. Kappa Kappa statistic	Całkowita Overall	Wsp. Kappa Kappa statistic
21 marca 2007 31 March 2007	8	91,50%	0,902	73,24%	0,577
16 lipca 2007 16 July 2007	9	93,91%	0,931	75,33%	0,588
2 sierpnia 2007 2 August 2007	10	93,10% 93,55% *	0,922 0,927 *	76,91%	0,615
13 października 2007 13 October 2007	9	88,34%	0,866	73,67%	0,579

* Obszar zamglenia i zachmurzenia typu cirrus na zobrazowaniach z 2 sierpnia 2007, objęty maską
Masked area of cirrus clouds in data registered on the 2nd of August 2007

zamgleniem atmosferycznym. Obszary te zostały objęte maską.

Klasyfikacja nadzorowana największego prawdopodobieństwa została przeprowadzona dla wszystkich czterech terminów niezależnie. Pierwsze próby klasyfikacji wykazały, że zastosowanie dla klasy zabudowy parametru bias=0,01 ograniczającego prawdopodobieństwo wystąpienia klasy, wpływa korzystnie na uzyskane wyniki. Dobór optymalnych kanałów użytych w klasyfikacji każdego z terminów, został wykonany na podstawie wartości średniej transponowanej dywergencji (TDV – Average Transformed Divergence). Z analizy wykluczono kanały z widocznymi błędami rejestracji. Ostatecznie dla danych z 31 marca i 13 października, klasyfikacja została wykonana dla wszystkich 7 kanałów. W przypadku danych z 16 lipca pominięto kanały 5 i 7, a dla zobrazowań z 2 sierpnia nie uwzględniono kanałów 4 i 5.

W związku ze wspomnianymi wcześniej zamgleniem na scenie z 2 sierpnia, końcowy obraz klasyfikacyjny dla tego terminu jest efektem połączenia dwóch klasyfikacji

Klasyfikacje otrzymane dla zobrazowań z pojedynczych terminów wykorzystano następnie w analizie sekwencji zmian klas pokrycia terenu dla każdego piksela obrazu. Analizę sekwencji zmian wykonano dla wszystkich klas rozpoznanych w toku klasyfikacji pojedynczych zdjęć, z uwzględnieniem wszystkich podklas gruntów ornych. Ponieważ jednak wspomniane podklasy gruntów ornych mają charakter sezonowy, ostateczny wynik klasyfikacji z wykorzystaniem analizy sekwencji zmian uwzględnia jedynie siedem głównych klas pokrycia terenu.

Podczas procesu rekasyfikacji posługiwano się następującymi zasadami:

- cztery takie same wartości klasy w sekwencji dają w efekcie klasę dominującą,
- trzy takie same wartości klasy w sekwencji dają w efekcie klasę dominującą,
- wzajemne przeplatanie się podklas gruntów ornych daje w efekcie klasę gruntów ornych,
- dwie takie same wartości klasy w sekwencji dają w efekcie końcowym tą klasę.

Dodatkowo wyznaczono także pewną grupę przypadków szczególnych obejmujących:

- naprzemienne występowanie w sekwencji klas łąk i gruntów ornych z pokrywą roślinną lub dominacja w sekwencji klasy gruntów ornych z pokrywą roślinną daje w efekcie klasę łąk,
- ostateczna klasa lasu jest uzależniona od występowania określonych klas lasów w określonych miejscach sekwencji (na przykład sekwencja klasy lasu mieszanego i iglastego daje w efekcie końcowym klasę lasu iglastego, podczas gdy las liściasty występujący w sekwencji naprzemiennie z lasem mieszanym daje w rozrachunku końcowym klasę lasu mieszanego),
- sekwencja zmian obejmująca klasy: lasu liściastego, łąki i gruntów ornych z pokrywą roślinną daje w efekcie klasę łąk.

Na podstawie wyżej wymienionych reguł, w module EASI oprogramowania PCI Geomatica został napisany skrypt analizujący wyniki klasyfikacji dla poszczególnych pikseli zdjęć MODIS. Efektem jego działania jest ostateczny wynik klasyfikacji.

Jednoczesna klasyfikacja danych ze wszystkich terminów

Drugim rozpatrywanym podejściem klasyfikacji form pokrycia terenu z wykorzystaniem obrazowań pochodzących z więcej niż jednego terminu rejestracji, jest jednoczesna klasyfikacja danych ze wszystkich terminów.

W analizie wykorzystano już wcześniej przygotowane obrazowania zarejestrowane w czterech różnych terminach 2007 roku. Spośród wszystkich posiadanych danych, do klasyfikacji wybrano 26 kanałów – dla danych z 16 lipca i 2 sierpnia kanały 5 charakteryzowały się zakłóceniami rejestracji i zostały usunięte z ostatecznego zestawu danych. Ponieważ wartości średniej transponowanej dywergencji, sugerowały wykorzystanie danych głównie z terminów letnich, co w oczywisty sposób wpłynęłoby na ostateczne wyniki, postanowiono nie sugerować się otrzymanymi wartościami TDV.

Tak, jak w przypadku klasyfikacji danych pochodzących z pojedynczych terminów, w analizie użyto klasyfikacji nadzorowanej największego prawdopodobieństwa. Zgodnie z zaprezentowanymi wcześniej wynikami, na obrazowaniach MODIS można było rozpoznać siedem klas pokrycia terenu. Ponieważ klasyfikowano jednocześnie dane pochodzące z różnych okresów sezonu wegetacyjnego, zrezygnowano z wyróżniania czterech podklas gruntów ornych. Pola treningowe zostały ustalone na podstawie materiałów pomocniczych w postaci posiadanych scen Landsat ETM+ oraz wiedzy zdobytej podczas wcześniej przeprowadzonych niezależnych klasyfikacji danych ze wszystkich czterech terminów. Odległość Bhattacharrya użyta do określenia rozróżnialności klas na polach treningowych przyjął wartości 1,9 i większe. Jedynym wyjątkiem były tutaj lasy mieszane i lasy liściaste, dla których miara Bhattacharrya wyniosła 1,76. Podobnie jak miało to miejsce w przypadkach klasyfikacji

danych z pojedynczych terminów, dla klasy zabudowy określono ograniczający parametr $\text{bias}=0,01$.

Podsumowanie uzyskanych wyników

Ocena dokładności klasyfikacji pokrycia terenu, uzyskanej w wyniku analizy sekwencji zmian oraz jednoczesnej klasyfikacji wszystkich danych, została sprawdzona względem bazy danych CORINE Land Cover 2000, z wykorzystaniem 4200 losowo rozmieszczonych punktów.

Wyniki klasyfikacji opartej na analizie sekwencji zmian są przedstawione w tabeli 3. Całkowita dokładność opracowania została oszacowana na poziomie 81,21% przy współczynniku Kappa 0,697. Spośród wszystkich klas, najlepsze wyniki uzyskała klasa gruntów ornych. Zarówno w przypadku dokładności producenta jak i użytkownika wartości statystyk przekroczyły dla tego wydzielenia 93% przy współczynniku Kappa równym 0,834. Bardzo dobrą dokładnością rozpoznania cechuje się również klasa wody: pomimo pewnych błędów wynikających z rozdzielczości materiałów, końcowa wartość błędu niedoszacowania wyniosła 24% przy jedynie piętnastoprocentowym błędzie przeszacowania i statystyce Kappa na poziomie 0,843. Lasy iglaste uzyskały prawie 71% dokładności producenta i ponad 89% dokładności użytkownika, co sprawiło, że wartość współczynnika Kappa dla tej klasy jest największa w porównaniu z pozostałymi wydzieleniami i wynosi 0,879. Zabudowa cechuje się błędem niedoszacowania i przeszacowania na poziomie niecałych 30%. Zadowolające wyniki uzyskała również klasa łąk, choć kolizyjność tego wydzielenia z gruntami ornymi jest szczególnie widoczna i wyraźnie wpływa na wartość statystyki Kappa. Dokładność klasyfikacji lasów mieszanych i liściastych jest najmniejsza ze wszystkich siedmiu wydzieleni i wynika przede wszystkim ze słabej rozróżnialności lasów liściastych i łąk oraz lasów mieszanych i iglastych. W obu przypadkach wpływa to na bardzo niską, bo poniżej poziomu 0,5 wartość statystyki Kappa.

Wyniki dokładności jednoczesnej klasyfikacji danych ze wszystkich terminów zostały oszacowane na poziomie 73,50% przy współczynniku Kappa równym 0,552 (Tab. 4). Najlepszą dokładność uzyskała klasa gruntów ornych: 97% dla dokładności producenta i prawie 86% dla dokładności użytkownika. Współczynnik Kappa dla tej klasy wyniósł 0,664. Lasy iglaste uzyskały zaskakująco wysoką wartość współczynnika Kappa (0,958) przy dokładności użytkownika na poziomie 96% i ponad siedemdziesięcioprocentowym błędzie niedoszacowania. Podobna sytuacja wystąpiła w przypadku klasy łąk dla której dokładność producenta osiągnęła poziom prawie 42% przy aż nieco ponad 80% dokładności użytkownika, co jest najlepszym wynikiem osiągniętym dla tego wydzielenia w obu omawianych podejściach. Klasa zabudowy uzyskała niewiele ponad 30% błąd przeszacowania i niedoszacowania. Pozostałe klasy pokrycia terenu uzyskały dokładność znacznie niższą niż w przypadku analizy z wykorzystaniem procesów logicznych.

Tabela 3. Dokładność klasyfikacji form pokrycia terenu dla obrazu będącego wynikiem analizy sekwencji zmian z wykorzystaniem danych z czterech terminów rejestracji

Table 3. Accuracy report of final land cover classification obtained as the result of analyse of the sequence of changes for 4 data sets

Raport dokładności klasyfikacji: Conducplatio accuracy report:					
Dokładność całkowita: 81.21% Overall Accuracy:		95-cio% przedział ufności (80.02% ; 82.41%) 95% Confidence Interval			
Całkowity wsp. Kappa: 0.697 Overall Kappa Statistic:		Całkowita zmienność wsp. Kappa:-0.00% Overall Kappa Variance:			
Klasa Class code	Dokładność produ- centa [%] Producer's accu- racy [%]	95-cio% przedział ufności [%] 95% Confidence interval [%]	Dokładność użytkownika [%] User's accuracy [%]	95-cio% przedział ufności [%] 95% Confidence interval [%]	Wsp. Kappa Kappa Statistic
1	71,53	(63,61 ; 79,45)	73,13	(65,26 ; 81,01)	0,722
2	93,15	(92,13 ; 94,17)	93,07	(92,04 ; 94,09)	0,834
3	52,98	(48,09 ; 57,88)	63,79	(58,60 ; 68,99)	0,598
4	74,16	(67,45 ; 80,87)	38,48	(33,19 ; 43,78)	0,358
5	70,81	(67,35 ; 74,27)	89,91	(87,29 ; 92,53)	0,879
6	54,21	(48,12 ; 60,31)	44,58	(39,08 ; 50,08)	0,407
7	76,00	(63,16 ; 88,84)	84,44	(72,74 ; 96,15)	0,843

Tabela 4. Dokładność klasyfikacji form pokrycia terenu dla wyniku jednoczesnej klasyfikacji wszystkich danych

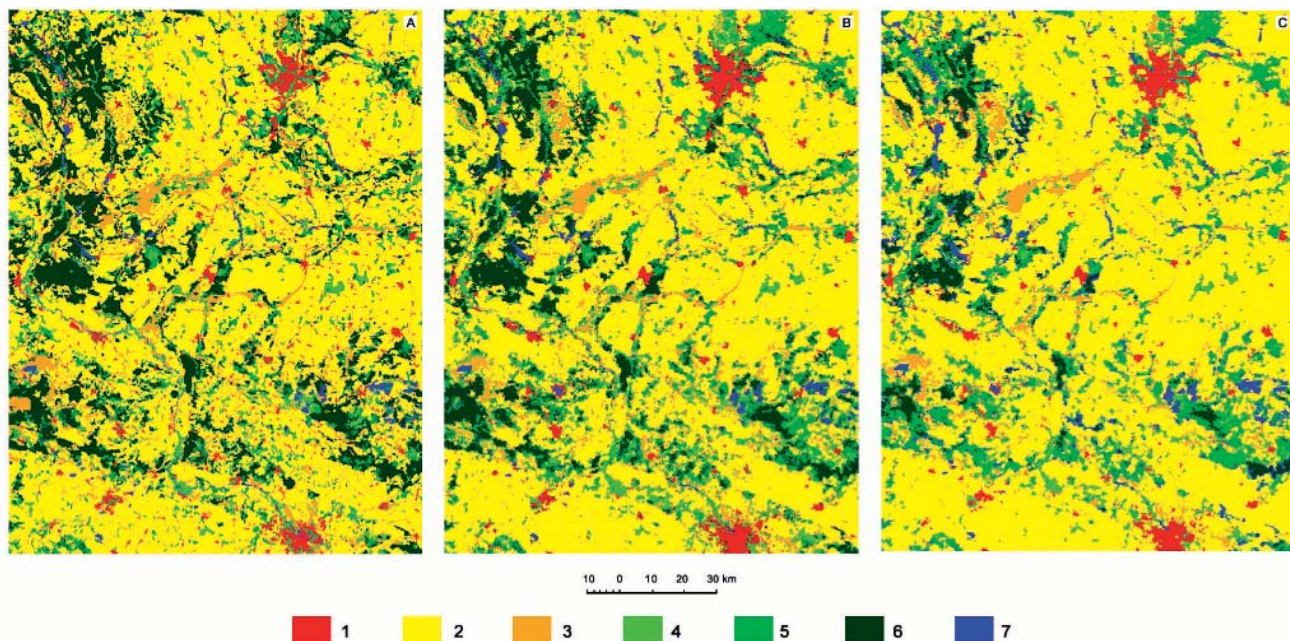
Table 4. Accuracy report of land cover classification obtained as a result of simultaneous classification of all data

Raport dokładności klasyfikacji: Classification accuracy report:					
Dokładność całkowita: 73.50% Overall Accuracy:		95-cio% przedział ufności (72.00% 75.00%) 95% Confidence Interval			
Całkowity wsp. Kappa: 0.552 Overall Kappa Statistic:		Całkowita zmienność wsp. Kappa: -0.00% Overall Kappa Variance:			
Klasa Class code	Dokładność produ- centa [%] Producer's accu- racy [%]	95-cio% przedział ufności [%] 95% Confidence interval [%]	Dokładność użytkownika [%] User's accuracy [%]	95-cio% przedział ufności [%] 95% Confidence interval [%]	Wsp. Kappa Kappa Statistic
1	69,37	(60,34 ; 78,39)	69,37	(60,34 ; 78,40)	0,683
2	97,13	(96,37 ; 97,89)	85,99	(84,53 ; 87,45)	0,664
6	41,59	(36,20 ; 46,99)	80,11	(73,93 ; 86,30)	0,779
7	50,00	(41,49 ; 58,51)	27,38	(21,80 ; 32,96)	0,242
8	29,23	(25,38 ; 33,09)	96,47	(93,40 ; 99,54)	0,958
9	38,01	(31,38 ; 44,64)	25,23	(20,41 ; 30,04)	0,200
10	85,00	(72,68 ; 97,32)	32,08	(22,72 ; 41,43)	0,313

Wizualne porównanie uzyskanych wyników z bazą danych CLC2000 sprowadzoną do rozdzielczości 250 metrów i poddaną agregacji do 7 klas ujawnia dość dużą różnicę w szczegółowości klasyfikacji (ryc 3). Obrazy klasyfikacyjne MODIS charakteryzują się dużym stopniem generalizacji wynikającym z rozdzielczości danych wejściowych. Wynik najbardziej zbliżony wizualnie do CLC2000 uzyskała analiza procesów logicznych z wykorzystaniem danych z 4 terminów rejestracji.

Inną widoczną różnicą jest duże zróżnicowanie obszaru zajętego przez zabudowę na obrazach klasyfika-

cyjnych względem materiału referencyjnego. W obu przypadkach widać powiększenie terenów należących do aglomeracji Poznania i Wrocławia. Wyraźnie zaznacza się również przeszacowanie powierzchni zajmowanej przez lasy liściaste i mieszane kosztem lasów iglastych. W przypadku wyniku jednoczesnej klasyfikacji wszystkich danych, widoczne jest również przeszacowanie powierzchni klasy wody, błędnie klasyfikowanej na obrzeżach zbiorowisk leśnych.



Ryc. 3. Materiał referencyjny: baza danych CLC2000 poddana procesowi agregacji klas i resamplingu (A), wyniki klasyfikacji form pokrycia terenu: efekt końcowy analizy sekwencji zmian dla danych z 4 terminów (B) i jednoczesna klasyfikacji wszystkich danych (C).

Fig. 3. Reference material: CLC2000 database after class aggregation and resampling (A), final classification results: analyse of the sequence of changes for 4 datasets (B) and simultaneous classification of all data (C)

Wnioski

Oba zaprezentowane wyniki klasyfikacji form pokrycia terenu charakteryzuje się dokładnością całkowitą przekraczającą 73%. Należy podkreślić, że najlepsze wyniki zostały uzyskane dla klasyfikacji będącej efektem analizy sekwencji zmian. Dokładność całkowita tego opracowania to 81,21%, a poprawa dokładności względem pojedynczych klasyfikacji w zależności od terminu wynosi od 4 do 8%. Wynik jednoczesnej klasyfikacji danych ze wszystkich terminów jest bardzo zbliżone do wyników klasyfikacji z pojedynczych terminów rejestracji i wyniósł 73,50%.

Uzyskane wyniki potwierdzają pierwotne założenie, że analiza różnicowania się form pokrycia terenu w zależności od pory okresu fenologicznego, zastosowana w postaci sekwencji zmian klas pokrycia terenu, pozwala na uzyskanie lepszych wyników klasyfikacji.

Jednoczesna klasyfikacja danych pochodzących z kilku terminów rejestracji okazała się w tym przypadku podejściem nie przynoszącym satysfakcjonujących wyników, aczkolwiek dla kilku klas pokrycia terenu otrzymana dokładność jest stosunkowo dobra.

W związku z rozdzielczością przestrzenną zobrażeń MODIS, końcowe klasyfikacje cechują się małym stopniem szczegółowości, dobrze widocznym w porównaniu z bazą danych CORINE CLC2000. Jest to szczególnie wyraźne w przypadku niewielkich wydzieleni oraz przebiegu granic między klasami. W związku z tym istotną rolę w uzyskanej dokładności odgrywa również zastosowany materiał referencyjny, który nawet po sprowadzeniu do rozdzielczości 250 metrów, ciągle cechuje się wysoką szczegółowością.

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania danych MODIS w analizach w skali regionalnej również w przypadku terenów o kompleksowym charakterze pokrycia terenu, zapewniając uzyskanie satysfakcjonujących wyników.

Podziękowania

Zaprezentowane analiza została w całości wykonana w oprogramowaniu PCI Geomatics Geomatica 10.1. Uzyskanie rocznej licencji nie byłoby możliwe bez pomocy i wsparcia pana Iaina MacInnesa z PCI.

Słowa podziękowania za wspólne dyskusje kieruję również do pani doktor Edyty Woźniak z Uniwersytetu Warszawskiego.

Literatura

- Baza Danych Ogólnogeograficznych (BDO) 1:1 000 000, grudzień 2009, Geoportal <http://maps.geoportal.gov.pl>
- Chavez P.S., Guptill S.C., Howell J.A., 1984, Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. Proceedings, ASPRS-ACSM Technical Papers, vol. 2, s. 728–742
- DeFries R., Hansen M., Townsend J.G.R., Sohlberg R., 1998, Global land cover classification at 8 km resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. International Journal of Remote Sensing, 19, s. 3141–3168
- DeFries R.S., Townshend J.G.R., 1994, NDVI derived land cover classifications at a global scale. International Journal of Remote Sensing, 5 s. 3567–3586
- Doraiswamy Paul C., Stern Alan J., 2007, Crop classification in the U.S. Corn Belt using MODIS Imagery, 2007. Presenta-

- tion at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium July 19–27, Barcelona
- European Environment Agency, 2004: Corine Land Cover 2000 database, luty 2009, <http://www.eea.europa.eu>
- Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., Schaaf C., 2002, Global land cover mapping MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83 s. 287-302
- Geografia fizyczna Polski, 2005, redakcja naukowa: Rychling A., Ostaszewska K., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Geografia Polski: Środowisko przyrodnicze, 1999, redaktor naukowy Starkel L., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa
- Guenther B., Xiong X., Salomonson V.V., Barnes W.L., Young J., 2002, On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data. *Remote Sensing of Environment*, 83, s. 16-30
- Jensen J.R., 1996, *Introductory Digital Image Processing A remote Sensing Perspective*. Prentice Hall, New Jersey
- Justice C.O., Townsend J.G.R., Vermote E.F., Masuoka E., Wolfe R.E., Saleous N., Roy D.P., Morissette J.E., 2002, An Overview of MODIS Land data processing nad product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, s. 3-15
- Lewińska K.E., 2009, Land cover classification using multi-temporal MODIS satellite data. *Annals of Geomatics*, vol 7 no. 2 (32), s. 75-81
- Lunetta Ross S., Knight Joseph F., Ediriwickrema Jayantha, Lyon John G., Worthy L. Dorsey, 2006, Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data, *Remote Sensing of Environment*, 105, s. 142-154
- Marquinez J., Woźniak E., Fernandez S., Martinem R., 2008, Analysis of the evolution of soil erosion classes using multitemporal Landsat imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 17, s. 549-558
- Olędzki J.R., 2007, *Regiony geograficzne Polski. Teledetekcja Środowiska*, tom 38, Klub Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego, Warszawa
- Savtchenko A., Ouzounov D., Ahmad S., Acker J., Leptoukh G., Koziana J., Nickless D., 2004, Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Space Research*, 34, s. 710-714
- The Earth Observing System: Mission Science Office, luty 2009, <http://eospsso.gsfc.nasa.gov/index.php>
- Vermote E.F., Kotchenova S.Y., 2008, MOD09 (Surface Reflectance) User's Guide, Version 1.1, MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility
- Waser L.T., Schwarz M., 2006, Comparison of large-area cover products with national forest inventories and CORINE land cover in the European Alps. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, s. 196-207
- Zhan X., Sohlberg R.A., Townshend J.R.G., DiMiceli C., Carroll M.L., Eastman J.C., Hansen M.C., DeFries R.S., 2002, Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*, 83, s. 336-350
- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C., Huete A., 2003, Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, s. 471-475



Katarzyna Ewa Lewińska jest absolwentką Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych (MISMaP) Uniwersytetu Warszawskiego. Pracę magisterską obroniła w czerwcu 2009 w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych. Od października 2009 do grudnia 2010 pracowała jako stażystka w Joint Research Centre (JRC) Komisji Europejskiej w Isprze, gdzie była członkiem akcji DESERT w Instytucie Środowiska i Zrównoważonego Rozwoju (IES). Obecnie w ramach pracy w European Academy of Bolzano (EURAC) bierze udział w realizacji unijnego programu EUFODOS. k.e.lewinska@10g.pl