

Wykorzystanie zdjęć satelitarnych MODIS do badania stopnia pokrycia terenu roślinnością

Use of MODIS Satellite Images to Study the Percentage of Vegetation Cover

Monika TOMASZEWSKA, Stanisław LEWIŃSKI, Edyta WOŹNIAK

Słowa kluczowe: Stopień pokrycia terenu roślinnością, NDVI, Landsat TM, MODIS

Key words: Degree of a Vegetation Cover, NDVI, Landsat TM, MODIS

Otrzymano: 20 lutego 2011; **Zaakceptowano:** 28 czerwca 2011

Received: 20 February 2011; **Accepted:** 28 June 2011

The work presents a methodology of processing MODIS satellite images in order to obtain information on the degree of correlation and dependence between vegetation index NDVI and a percentage of a vegetation cover. The low resolution satellite image from MODIS scanner placed on AQUA satellite was used in the analysis and as a reference data – an image from Landsat TM satellite. The test area was Warsaw and its surroundings.

The analysis allowed to obtain a function which defines the relation between NDVI index and a percentage of vegetation cover ($R^2 = 0,85$) This analysis permitted to create vegetation cover maps of Masovian Voivodeship. The work proved the possibility of mapping land vegetation cover on the base of low resolution satellite images. That kind of a map can be used as a background material to carry out various types of environmental studies.

Wprowadzenie

Obecny poziom i rozwój teledetekcji daje bardzo duże możliwości badania środowiska, monitorowania zmian w nim zachodzących i pozwala na szacowanie oraz prognozowanie kierunku tych zmian w przyszłości. Prowadzenie badań na podstawie materiałów satelitarnych jest jedną z najefektywniejszych metod badawczych. Szeroki wybór analiz i sposobów przetworzenia materiałów teledetekcyjnych – od prostych analiz przestrzennych, poprzez wskaźniki roślinne, do skomplikowanych matematycznie algorytmów – pozwala na uzyskanie dużo lepszych wyników niż za pomocą tradycyjnych metod. Tym bardziej, że zmiany w środowisku są procesem dynamicznym, szybkim i wielokrotnie nieodwracalnym, wymagającym ciągłej kontroli (Bański, 2009). Każde pojedyncze badanie może być wstępem bądź podstawą do prowadzenia kolejnego, analizującego stan środowiska. Niniejsza praca, przedstawia metodykę, która może być wykorzystywana we wstępnych fazach badań związanych ze zmianami stanu środowiska przyrodniczego.

Pokrywa roślinna jest jednym z podstawowych komponentów zapewniających równowagę energetyczną ekosystemu Ziemi. Spełnia ona rolę naturalnego łącznika między powierzchnią naszej planety a jej atmosferą (Song, 2008). Dlatego też badania związane z określe-

niem stopnia pokrycia Ziemi roślinnością mają znaczenie z punktu widzenia postępujących zmian klimatycznych oraz są istotnym elementem globalnego monitoringu środowiska.

Stopień pokrycia terenu roślinnością jest bardzo ważną zmienną w modelach opisujących procesy klimatyczne, hydrologiczne, geomorfologiczne. Szata roślinna jest zasadniczym czynnikiem kształtującym obieg wody, CO₂, NO₂, itp. w przyrodzie, toteż jest obiektem badań nauk przyrodniczych. Jednym z głównych aspektów badań nad roślinnością jest określenie zmian jej zasięgu oraz przyczyn i skutków tego zjawiska. Dlatego, każde nowe spojrzenie lub narzędzie umożliwiające przeprowadzenie badań w tym temacie, przybliży do dokładnego zrozumienia mechanizmów występujących w przyrodzie.

Głównym celem badań było opracowanie metodyki przetworzenia zdjęć satelitarnych, której podstawą jest wskaźnik roślinny, aby w efekcie końcowym móc wykonać mapę stopnia pokrycia terenu roślinnością.

Artykuł składa się z dwóch części: pierwszej teoretycznej, omawiającej materiały oraz źródła danych, z jakich korzystano podczas badania. Druga część dotyczy metodyki przetworzenia danych. Ma ona na celu określenie stopnia zależności pomiędzy procentowym pokryciem terenu roślinnością, uzyskanym ze zdjęcia z satelity Landsat TM otrzymanym na podstawie wskaź-

nika roślinności NDVI, a tym wskaźnikiem obliczonym na podstawie zdjęcia niskorozdzielczego MODIS.

Prace nad określeniem zwartości pokrywy roślinnej z zastosowaniem wskaźników teledetekcyjnych prowadzone są w całym świecie. Najczęściej analizowane są wartości wskaźników roślinności: NDVI, SAVI, MSAVI, TSAVI (Purevdorj i in. 1998, Hansen i in. 2002).

Inspiracją do przeprowadzenia prezentowanych badań był artykuł opublikowany w 2005 roku przez fińskich badaczy z Instytutu Środowiska SYKE (Törmä, 2006). Zamierzeniem autorów było opracowanie takiego modelu matematycznego, który byłby pomocny w znalezieniu sposobu ułatwiającego walkę z zanieczyszczeniem rzek. Model pokrycia terenu miał pozwolić na wydzielenie potencjalnych źródeł powierzchniowych zanieczyszczeń azotanami, fosforanami, itd. wynikających z działalności rolniczej: nawożenia i hodowli zwierząt; przemysłowej: produkcji żywności, drewna; oraz gospodarki ściekami przemysłowymi i komunalnymi. Zweryfikowano stopień korelacji pomiędzy wskaźnikiem NDVI obliczonym na podstawie niskorozdzielczych zdjęć MODIS a stopniem pokrycia terenu wyznaczonym przy użyciu zdjęć Landsat. Dodatkowo sprawdzono czy korelacja również zachodzi dla innego obszaru badawczego, a także oceniono czy własna metoda opracowania materiałów teledetekcyjnych pozwala na uzyskanie podobnych rezultatów. Oprócz zdjęć satelitarnych, fińscy badacze posilkowali się badaniami naziemnymi i zdjęciami lotniczymi.

NDVI – znormalizowany wskaźnik zieleni

Obecnie podstawowym źródłem informacji wykorzystywanym w monitoringu środowiska są wielospektralne zdjęcia satelitarne, na których rejestrowany jest obraz powierzchni Ziemi w różnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Stan zobrazowanej na nich roślinności jest oceniany na podstawie tzw. wskaźników roślinnych, które zdefiniowane są najczęściej jako przekształcenia algebraiczne wartości pikseli w odpowiednio dobranych kanałach spektralnych. Pozwalają one nie tylko identyfikować miejsca występowania roślinności, ale również na wykonanie ocen ilościowych i jakościowych.

Wartości wskaźników są wypadkową cech optycznych i wegetacyjnych roślin. Właściwości optyczne roślin to absorpcja, odbicie, emisyjność oraz przepuszczalność, które są związane z długością fali rejestrowanego na zdjęciach promieniowania. Natomiast do cech wegetacyjnych zaliczamy strukturę wewnętrzną i budowę rośliny, zawartość wody w niej oraz w glebie, temperaturę powierzchni rośliny oraz zawartość chlorofilu (Ciołkosz i Białousz, 2008). Stopień koncentracji chlorofilu jest bardzo istotny, gdyż jest to związek organiczny występujący w roślinach zielonych (zielony barwnik), który umożliwia przemianę energii światła w energię chemiczną wykorzystywaną w procesie fotosyntezy. Dwa najpowszechniej występujące chlorofile w roślinach, chlorofil a — niebieskozielony oraz chlorofil b — żółtozie-

lony, stanowią przeważającą większość masy wszystkich barwników w organie fotosyntetyzującym. Chlorofil absorbuje w paśmie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego w przedziale 400 – 700 nm. Najwyższy poziom absorpcji osiągany jest dla 690 nm. Chlorofil a absorbuje promieniowanie w zakresie 430 nm i 660 nm, natomiast chlorofil b pochłania w pasmach 450 nm i 650 nm (Jarocińska i Zagajewski, 2008). Charakterystyczne jest niskie pochłanianie w paśmie zielonym, co powoduje najwyższe odbicie w okolicach 540 nm. Badanie zawartości wody w roślinach, gdzie ilość absorbowanego promieniowania jest zależna od ilości wody możliwe jest dla zakresu od 1300 do 2500 nm. Bardzo duża absorpcja występuje w okolicach 1400 nm, 1900 nm oraz 2700 nm. Maksymalne odbicie występuje w dwóch pasmach: 1600 nm i 2200 nm (Jarocińska i Zagajewski, 2008). Pomiar dla tych zakresów, służy przede wszystkim do badania warunków wilgotnościowych upraw.

W badaniach teledetekcyjnych jednym z najczęściej wykorzystywanych wskaźników jest Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Po raz pierwszy został on zastosowany przez Rouse i inni (1973), jako iloraz różnicy i sumy promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni (IR) i czerwieni (R): $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$. Może on osiągnąć minimalną wartość -1, a maksymalną 1. Roślinność charakteryzuje się dużą wartością NDVI ze względu na wysokie odbicie w podczerwieni i niskie w zakresie czerwonym. Jest to spowodowane zawartością w roślinach chlorofilu, który odpowiada za pochłanianie promieniowania czerwonego, oraz miękiszu gąbczastego odbijającego promieniowanie podczerwone. Wysokie wartości NDVI są związane z aktywnością procesu fotosyntezy (Kowalski, 2008). Natomiast niskie wartości NDVI mogą świadczyć o stresie roślinności wywołanym niedoborem wody lub zanieczyszczeniami.

Wykorzystanie wskaźnika NDVI jest powszechne w różnorodnych badaniach przyrodniczych oraz w monitoringu środowiska w skali lokalnej i globalnej. Prowadzone są między innymi badania związków pomiędzy tym wskaźnikiem a zanieczyszczeniami dostającymi się do gleby oraz do atmosfery (Burgheimer i inni, 2005). W badaniach z zakresu uprawy roślin dużo uwagi poświęca się zastosowaniom nowych rozwiązań technologicznych, umożliwiających redukcję ilości stosowanych środków ochrony roślin w celu minimalizacji wpływu rolnictwa na środowisko (Nieróbca i inni, 2007). Okazuje się, że za pomocą zdalnych metod m.in. wskaźnika NDVI można wyznaczyć ogniska porażenia roślin przez choroby grzybicowe (Kuckenberger i in. 2007). Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat udowodniono, że zmiany zachodzące w atmosferze i mające wpływ na szatę roślinną, mogą być monitorowane dzięki stosowaniu w teledetekcji satelitarnej wskaźników roślinnych (Zhou i inni, 2001). Zaobserwowano występowanie korelacji pomiędzy NDVI a parametrami meteorologicznymi, tj. opadem atmosferycznym i temperaturą (Song, 2008). Posłużył on również do oceny wpływu obszarów leśnych na zmiany klimatyczne (Zoran i Stefan, 2006). Katagis i Gitas (2007) wykonywali ocenę stanu roślinności wy-

korzystając w tym celu 16-dniowe kompozycje NDVI uzyskane na podstawie zdjęć MODIS.

Charakterystyka materiałów źródłowych

Badanie korelacji między wartością wskaźnika NDVI a stopniem pokrycia terenu roślinnością wykonano na podstawie zdjęcia satelitarnego MODIS. Jako materiał referencyjny wykorzystano zdjęcie Landsat TM charakteryzujące się dużo większą rozdzielczością przestrzenną.

Skaner MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) zainstalowany jest na pokładzie satelitów TERRA i AQUA. Oba satelity poruszają się po zbliżonych orbitach. Różnica polega przede wszystkim na kierunku przelotu. Pierwszy przemieszcza się z północy na południe i przekracza równik w godzinach przedpołudniowych. Drugi satelita okrąża Ziemię z południa na północ, a równik przecinana parę godzin później, w godzinach popołudniowych (czasu lokalnego). Parametry orbity oraz skanera pozwalają na ciągłą rejestrację obrazów. Codziennie z satelity TERRA i AQUA pozyskiwane są zdjęcia MODIS tego samego fragmentu powierzchni Ziemi. Satelity należą do międzynarodowego programu badawczego EOS (System Obserwacji Ziemi), który został utworzony w 1991 roku, w ramach ustaleń Szczytu Ziemi. Badania prowadzone są przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) oraz Amerykańską Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA).

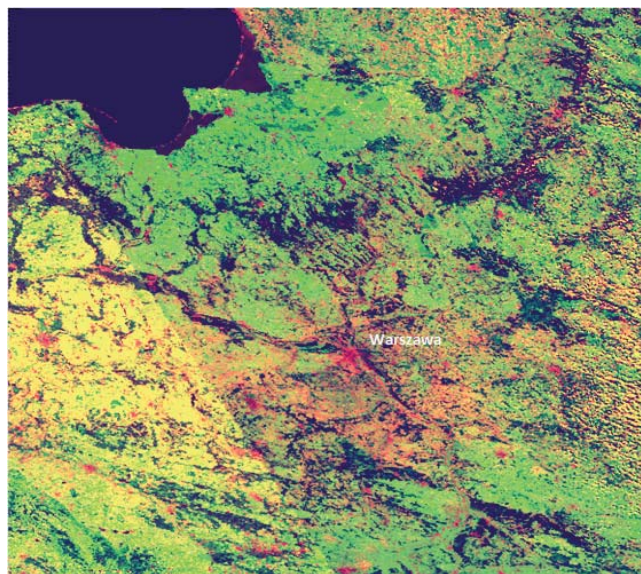
Skaner MODIS jest urządzeniem typu whiskbroom (tzn. poprzecznie zbierający). Obrazy powierzchni Ziemi są rejestrowane w 36 specjalnie dobranych i nieskorelowanych ze sobą kanałach, obejmujących zakresy spektralne od 0,405 do 14,385 μm . Rozdzielczość przestrzenna nie jest jednakowa dla wszystkich kanałów. Wynosi ona 250, 500 i 1000 m. Rozdzielczość radiometryczna jest jednakowa – 16 bitów.

Zdjęcia MODIS są dystrybuowane bezpłatnie. Przez Internet, ze strony <https://wist.echo.nasa.gov> można pozyskać oryginalne dane obrazowe jak również produkty, w liczbie 39, które są generowane automatycznie na ich podstawie (Kotarba, 2010). Wszystkie dane są udostępniane w formacie HDF i w odwzorowaniu sinusoidalnym.

W pracy wykorzystano dane obrazowe MODIS o rozdzielczości 250 m. Scena oznaczona symbolem 19v3 zarejestrowana została z pokładu satelity AQUA w dniu 3 lipca 2006. Kompozycja barwna wykonana na jej podstawie przedstawiona jest na rysunku 1.

Na zdjęciu widać linię biegnącą w poprzek sceny, rozgraniczającą zdjęcie na dwie części, zachodnia strona jest wyraźnie jaśniejsza. Jest to wynik automatycznego łączenia dwóch zdjęć. Obszar badań został dobrany w taki sposób aby ominąć strefę łączenia.

Zdjęcie satelitarne Landsat TM o rozdzielczości przestrzennej 30 m, pełniące rolę materiału referencyjnego, zostało pobrane z ogólnie dostępnej bazy danych <http://glovis.usgs.gov>. Wybrano scenę 188/024, która została zarejestrowana w tym samym dniu co zdjęcie MODIS, 3



Ryc. 1. Scena 19v3 zarejestrowana przez skaner MODIS w dniu 3 lipca 2006.

Fig. 1. Scene 19v3 acquired by MODIS sensor on the 3rd of July 2006.

lipca 2006. Na jej podstawie zdefiniowano poligon badań, który przedstawiony jest na rysunku 2.

Teren badań

Teren badań o powierzchni 2173,5 km², zlokalizowany został wokół Warszawy. Wybrano ten teren ze względu na występowanie na nim dużego zróżnicowania środowiska co bezpośrednio wpływa na wartości wskaźnika NDVI. Jego obraz na zdjęciu Landsat TM ma rozmiar 1890 x 1840 pikseli co odpowiada w terenie 47,25 km x 46 km (ryc. 2).



Ryc. 2. Teren badań przedstawiony na kompozycji barwnej RGB (4,5,3) zdjęcia Landsat TM.

Fig. 2. Study area shown in Landsat TM scene (RGB: 4,5,3)

Teren badań jest zlokalizowany w obrębie Równin Środkowopolskich, w dolinie Środkowej Wisły na północy i wschodzie, aglomeracji Warszawskiej w części środkowej i Mazowsza Środkowego w części południowozachodniej (Olędzki, 2007). Wysokości bezwzględne wynoszą tu od 60 do 140 m, a formy terenu powstały głównie w wyniku procesów fluwialnych, denudacyjnych i eolicznych. W krajobrazie dominują równiny denudacyjne i tarasy rzeczne, urozmaicone występowaniem wydm. Gleby są przeważnie bielicoziemne, ale w dnach dolin występują różnego rodzaju mady, zaś na równinie denudacyjnej w okolicach Błonia czarneziemie wykształcone na peryglacialnych utworach pylastych lub ilach.

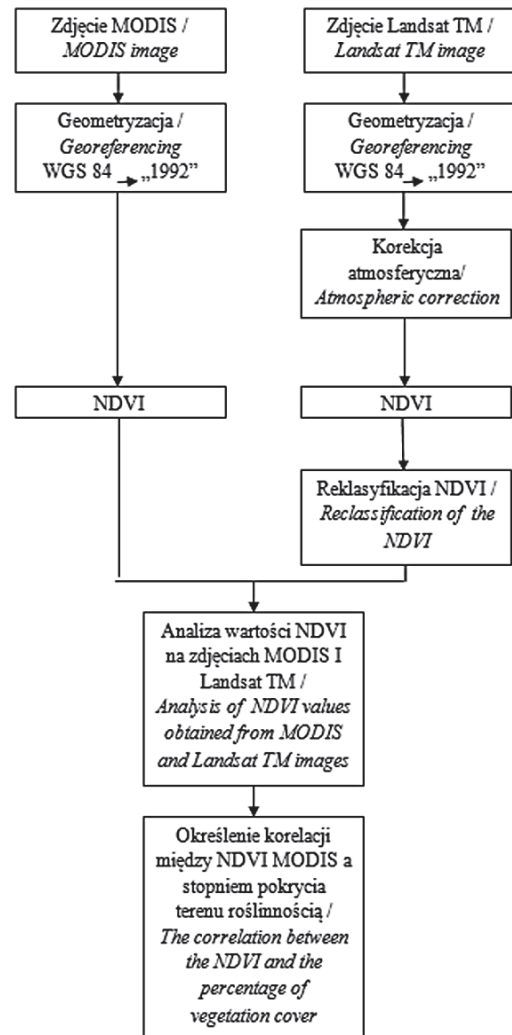
Na obszarze tym możemy wyróżnić 5 rodzajów pokrycia terenu: obszar antropogeniczny – aglomeracja Warszawy; obszary leśne (lasy liściaste, iglaste i mieszane) – Puszcza Kampinoska, Kozienicka; pola uprawne (intensywne rolnictwo i ogrodnictwo) – obszary podmiejskie i wiejskie okolic Warszawy oraz łąki (tereny zalewowe wzdłuż Wisły) i rzekę Wisłę.

Na kompozycji barwnej RGB (4,5,3) zdjęcia Landsat TM obszary antropogeniczne odwzorowane są w barwach granatowej i niebieskiej, wyraźnie dominuje zabudowa Warszawy. Północno – zachodni obszar stanowi Puszcza Kampinoska odwzorowana w barwach od pomarańczowej po brązową. Obszary rolnicze to mozaika kolorów i kształtów. Mają one różnorodną fototeksturę, od porfirowej, przez ziarnistą zróżnicowaną, po skibową i poligonalną. Czyli od nierównomiernego rozmieszczenia elementów obrazu, momentami bezładnego, po regularne, geometryczne i pasmowe ułożenie pól (Olędzki, 2007). Barwa obrazu zmienia się od białej po seledynową dla terenów pozbawionych roślinności oraz od zieleni do barwy pomarańczowej w przypadku występowania pokrywy roślinnej.

Metodyka badań

Schemat algorytmu postępowania zastosowanego w prezentowanych badaniach przedstawiony jest na rysunku 3. Składa się on z trzech podstawowych etapów. Najpierw wykonywane jest wstępne przetworzenie zdjęcia MODIS oraz zdjęcia Landsat TM pełniącego istotną rolę materiału referencyjnego. Następnie wartości współczynnika NDVI uzyskane na podstawie obu zdjęć są analizowane z zastosowaniem programu, który został opracowany specjalnie w tym celu. Na podstawie informacji uzyskanych w wyniku działania programu określana jest zależność między wartościami wskaźnika NDVI uzyskanego ze zdjęcia MODIS a stopniem pokrycia terenu roślinnością.

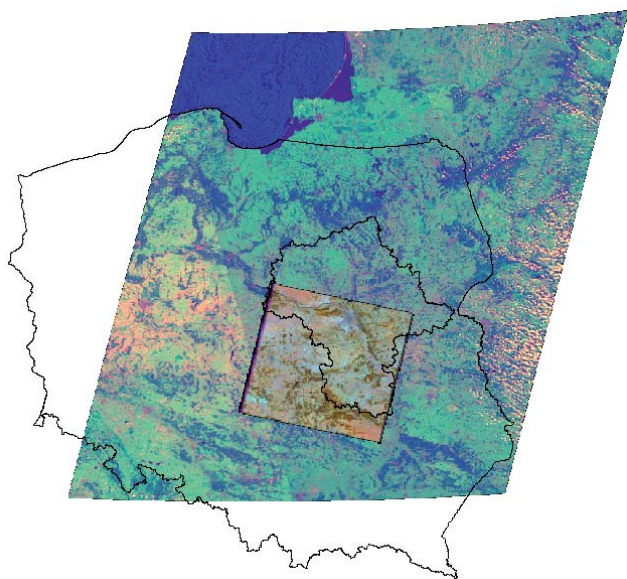
Wstępne przetworzenie zdjęć MODIS oraz Landsat TM wykonano niezależnie. W przypadku zdjęcia MODIS przetworzono jedynie pierwszy i drugi kanał o rozdzielczości przestrzennej 250 m, które są związane odpowiednio z zakresem promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni. Dane obrazowe, udostępniane



Ryc. 3. Schemat przetwarzania danych satelitarnych.
Fig. 3. Scheme of satellite data processing.

w odwzorowaniu sinusoidalnym ISIN, przekształcono do układu współrzędnych „1992”. Zostało to wykonane automatycznie funkcją oprogramowania PCI Geomatica, nowe wartości pikseli obliczono z zastosowaniem resamplingu wykonanym metodą najbliższego sąsiada. Następnie utworzono warstwę z wartościami NDVI.

Przetwarzanie danych Landsat TM również rozpoczęto od zmiany odwzorowania. Oryginalny obraz w odwzorowaniu WGS 84 został doprowadzony do geometrii układu „1992”. Tym razem jednak nie można było wykorzystać funkcji automatycznych. Wyznaczono 7 punktów kontrolnych a następnie wykonano przekształcenie z zastosowaniem wielomianu 2-go stopnia. Średni błąd kwadratowy położenia punktów wyniósł 0,23 piksela. Podobnie jak w wypadku zdjęcia MODIS zastosowano metodę resamplingu najbliższego sąsiada. W czasie geometryzacji zdjęcia Landsat TM zmieniono rozdzielczość przestrzenną z 30 na 25 m. Zostało to podyktowane później wykonywanymi obliczeniami polegającymi na analizie wartości pikseli zdjęcia Landsat zawartych w granicach dużych pikseli zdjęcia MODIS. Dzięki zmianie



Ryc. 4. Scena zdjęcia MODIS oraz scena z Landsat TM na tle granic Polski i województwa mazowieckiego.

Fig. 4. The MODIS and Landsat TM scenes against a background of borders of Poland and Masovian Voivodeship

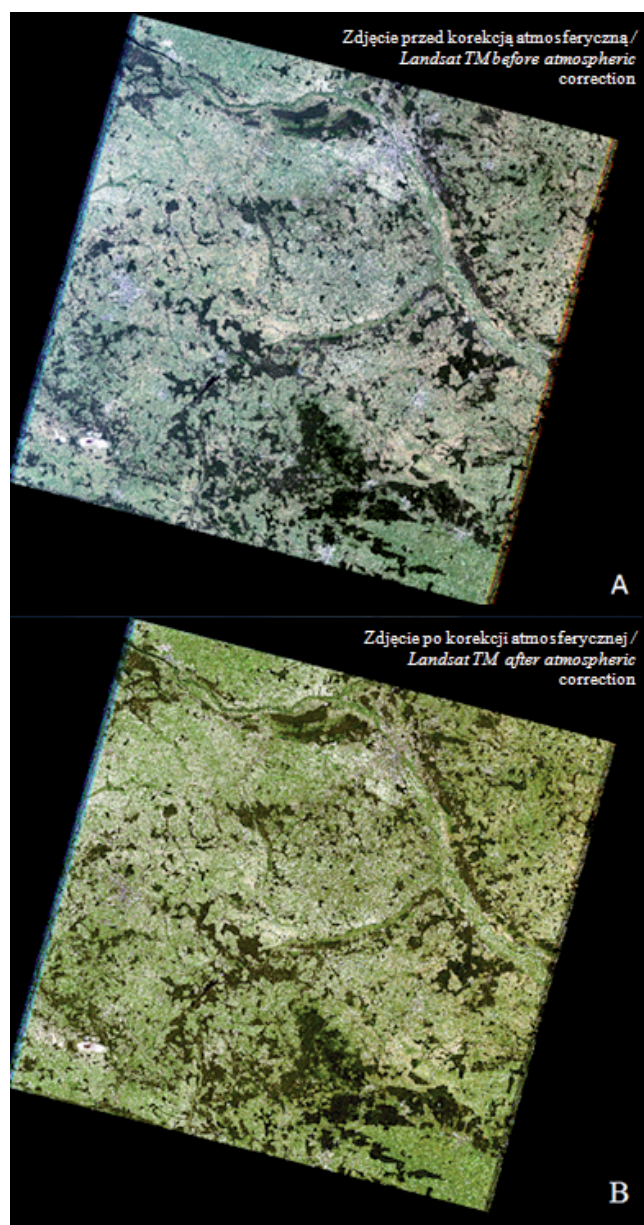
rozdzielczości uzyskano równy podział pikseli MODIS na 100 mniejszych pikseli zdjęcia Landsat. Na rysunku 4 przedstawione jest wzajemne położenie zdjęć MODIS i Landsat TM po doprowadzeniu ich do jednakowego układu współrzędnych „1992”.

Kolejnym etapem przetwarzania zdjęcia Landsat TM jest korekcja atmosferyczna. Wykonano ją z zastosowaniem programu ATCOR w środowisku oprogramowania PCI GEOMATICA. Na ryc. 5 przedstawiono zdjęcie przed (A) i po (B) korekcji atmosferycznej. Na zdjęciu B zauważalna jest różnica w nasyceniu barw, wynikająca z przesunięcia histogramu w stronę niższych wartości. Obraz stał się bardziej wyrazisty i kontrastowy, dodatkowo został zmniejszony stopień zamglenia obrazu. Ten etap przetwarzania został pominięty w przypadku zdjęcia MODIS, ponieważ są one dystrybuowane już po automatycznie wykonanej korekcji atmosferycznej.

Na podstawie kanału 3 i 4 zdjęcia Landsat TM obliczono wskaźnik NDVI, który został wykorzystany w czasie dalszych analiz, jego obraz przedstawiony jest na rysunku 6. Obszary o ubogiej szacie roślinnej, tereny antropologiczne i obszary wodne mają ciemny fototon. Powierzchnie jasne są pokryte roślinnością np. tereny leśne, łąki.

Reklasyfikacja wartości NDVI na zdjęciu Landsat TM

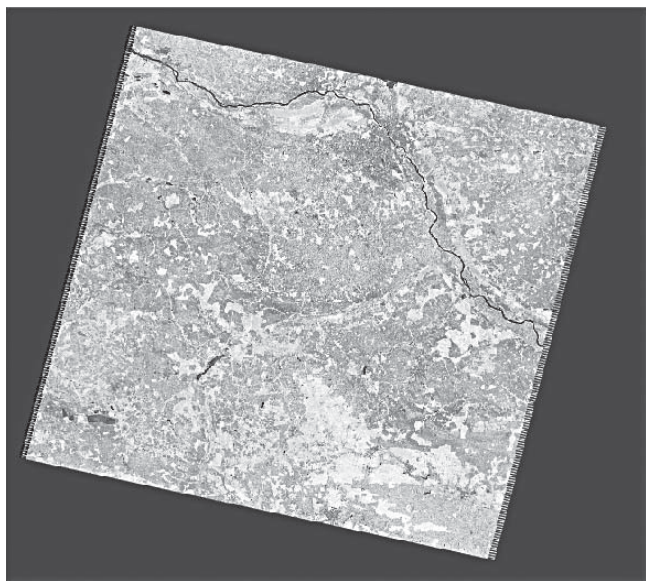
Wartości NDVI obliczone na zdjęciu Landsat TM posłużyły do uzyskania informacji referencyjnej o stopniu pokrycia powierzchni poligonu badawczego roślinnością.



Ryc. 5. Kompozycja RGB (3,2,1) zdjęcia Landsat TM przed (A) i po (B) korekcji atmosferycznej.

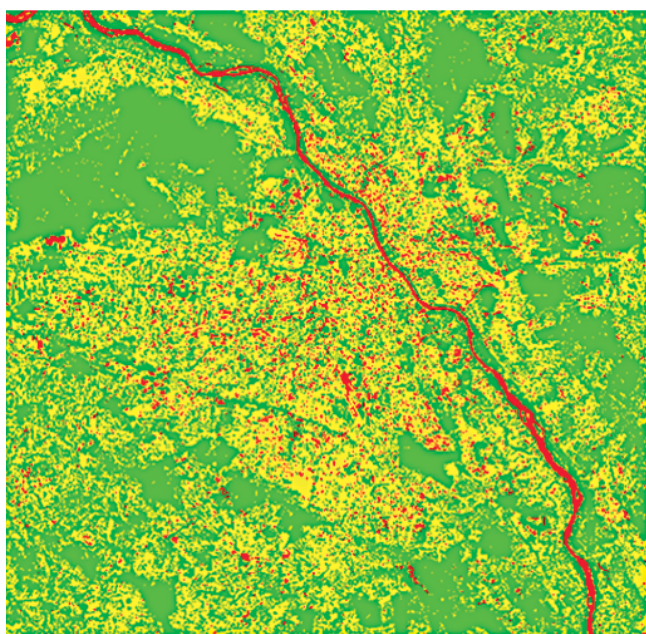
Fig. 5. Landsat TM (RGB: 3,2,1): before (A) and after (B) atmospheric correction.

Przyjęto założenie, że piksele, których wartość NDVI jest niższa niż 0,3 reprezentują obszary bez roślinności, natomiast o wartości powyżej 0,7 reprezentują obszary o intensywnej roślinności. Pozostałe wartości są związane z częściową pokrywą roślinną. Na tej podstawie wykonano reklasyfikację przyporządkowującą wartościom NDVI z przedziałów $<-1, 0.3>$, $(0.3, 0.7)$, $<0.7, 1>$ odpowiednio wartości 0, 0.5 i 1. Podobną zasadę reklasyfikacji NDVI zastosował Grenzdörffer (2004) w badaniach terenów zurbanizowanych. Na rysunku 7 przedstawiony jest obraz NDVI po wykonaniu reklasyfikacji wartości do trzech klas: 0 - barwa czerwona, 0.5 - barwę żółtą, 1 - barwa zielona. Na obrazie występuje najmniej pikseli o wartości 0.



Ryc. 6. Obraz wartości NDVI uzyskanych na podstawie zdjęcia Landsat TM.

Fig. 6. NDVI image obtained from Landsat TM.



KLASA/ Label	NDVI
	0
	0.5
	1

Ryc. 7. Obraz poligonu badawczego po reklasyfikacji wartości NDVI zdjęcia Landsat TM.

Fig. 7. Reclassified values of NDVI obtained from Landsat TM for the study area.

Wyznaczenie funkcji pomiędzy wskaźnikiem NDVI i stopniem pokrycia terenu

W celu wyznaczenia funkcji opisującej zależność pomiędzy wskaźnikiem NDVI otrzymanym ze zdjęcia MODIS a procentowym pokryciem terenu, obliczonym

na podstawie zdjęcia Landsat według wyżej opisanej metodyki, został napisany skrypt w języku Visual Basic. Jego działanie polega na obliczeniu, na podstawie sklasyfikowanych danych Landsat procentowego udziału roślinności dla poszczególnych pikseli MODIS. Ustalono, że do wyznaczania funkcji użyty będzie, co trzeci piksel MODIS, czyli odległość terenowa pomiędzy kolejnymi próbkami wynosiła 750m.

Dwa pliki: przeklasyfikowane wartości NDVI obrazu TM i warstwę NDVI z MODIS-a zostały zapisane w formacie ASCII i zaimplementowane do napisanego programu. Utworzono dwie tablice: jedna dla warstwy MODIS, druga dla Landsata. Następnie dla tablicy Landsat utworzono ruchome okno o wymiarach 10x10 poruszające się po tablicy w interwale 30 komórek w każdym kierunku. Interwał ten wynikał z gęstości próbkowania. Wymiary okna, zaś zostały ustalone tak aby wszystkie pierwotne piksele Landsata o rozdzielczości 25m pokrywały się z jednym pikselem MODISA (250 m). Stosując technikę ruchomego okna zsumowano wszystkie wartości i w ten sposób określono udział procentowy roślinności w pokryciu terenu na obszarze odpowiadającym powierzchni piksela MODIS. Liczebność pobranej próby wynosiła 3843 rekordy. Każdy z nich zawierał informację o wartości NDVI piksela MODIS oraz stopień jego wypełnienia roślinnością.

Następnie określono zależność między NDVI a stopniem pokrycia roślinnością. W tym celu uszeregowano wartości procentowego pokrycia terenu roślinnością w kolejności od najmniejszej do największej. Wszystkie te wartości zostały zaokrąglone do liczb całkowitych. Dla każdej procentowej wartości wyliczono medianę ze wszystkich przypisanych jej pikseli NDVI. Po tym zabiegu otrzymano tabelę z trzema kolumnami składającą się z 101 wierszy (uszeregowanych od 0 do 100% pokrycia roślinnością). Pierwsza kolumna to procentowe pokrycie terenu, druga to mediana wartości NDVI, trzecia pokazuje, ile razy wystąpił piksel o takim pokryciu (tab. 1). Używając metody najmniejszych kwadratów została wyznaczona funkcja opisująca zależność między NDVI zdjęcia MODIS a pokrywą roślinną, której zwartość określona jest w procentach.

Wyniki

Otrzymano zależność opisującą stopień pokrycia terenu roślinnością (zmienna zależna PR) w funkcji wartości NDVI [1]. Współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,8512$. (ryc.8)

$$PR = 297,48 NDVI^2 - 139,81 NDVI + 26,194 [1]$$

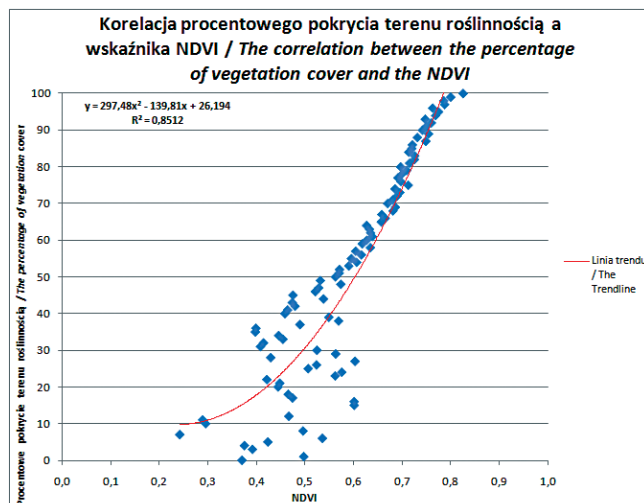
Wysoki współczynnik determinacji funkcji świadczy o dużej zależności zachodzącej pomiędzy NDVI obliczonym na podstawie zdjęcia MODIS a procentowym pokryciem terenu. Najsilniejszą relację można zaobserwować dla terenów charakteryzujących się dużym stopniem pokrycia roślinnością (powyżej 50%). Dla obszarów o małym udziale roślinności w pokryciu terenu korelacja ta jest niższa.

Niski stopień pokrycia roślinnością na badanym tere-

Tabela 1. Wartość procentowego pokrycia terenu roślinnością oraz odpowiadające im wartości NDVI zdjęcia MODIS.

Tab. 1. Percentage of vegetation cover and its corresponding values of MODIS-NDVI

% pokrycia roślinnością % vegetation cover	NDVI _{MODIS}	Częstość występowania Occurance frequency
51	0,5709	65
52	0,5716	51
53	0,5907	82
54	0,6068	59
55	0,596	62
56	0,6166	73
57	0,6049	59
58	0,6349	76
59	0,6182	68
60	0,6276	77
61	0,6389	65
62	0,6355	57
63	0,6331	53
64	0,6274	58
65	0,6575	51
66	0,6654	61
67	0,6586	54
68	0,6816	65
69	0,6864	58
70	0,6707	59
71	0,6812	68
72	0,6897	59
73	0,6955	57
74	0,6857	43
75	0,7129	56
76	0,698	48
77	0,6918	57
78	0,6998	56
79	0,7099	56
80	0,6973	50
81	0,7158	52
82	0,7256	56
83	0,7262	44
84	0,7141	55
85	0,7204	50
86	0,7215	55
87	0,7492	56
88	0,7318	49
89	0,7548	46
90	0,7423	46
91	0,7501	56
92	0,7604	53
93	0,748	41
94	0,7693	53
95	0,7753	55
96	0,7633	65
97	0,7878	61
98	0,7861	60
99	0,8002	115
100	0,8258	533



Ryc. 8. Wykres korelacji wskaźnikiem NDVI a procentowym pokryciem terenu roślinnością.

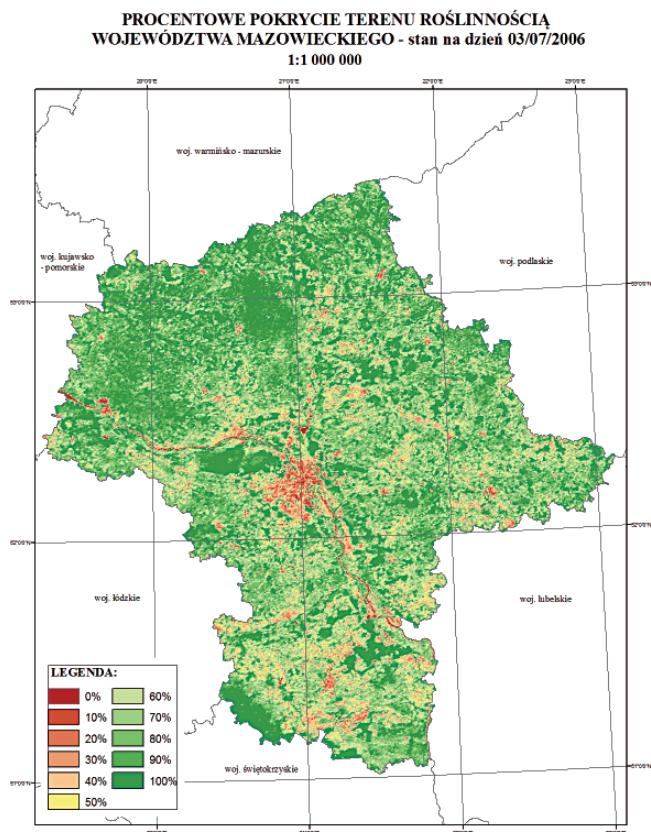
Fig. 8. The correlation function between the NDVI and the percentage of vegetation cover.

nie cechuje obszary antropogeniczne: miejskie, przemysłowe i węzły komunikacyjne oraz pola uprawne, gdzie przeprowadzono już zbiory płodów rolnych. Ze względu na specyfikę terenu badań tego typu powierzchnie występują rzadko (tab. 1) co miało wpływ na liczebność próby dla tych obszarów, jak i najprawdopodobniej na przebieg otrzymanej funkcji. Poza tym teren badań charakteryzuje się stosunkowo dużym rozdrobnieniem form pokrycia terenu. Dystrybucja poszczególnych typów powierzchni w obrębie jednego piksela MODIS jest zmienna. Może to powodować, że mimo takiego samego udziału procentowego roślinności, wartości NDVI będą zróżnicowane, ponieważ na danym obszarze będzie występował inny typ pokrycia powierzchni.

Uzyskane wyniki posłużyły do wykonania mapy stopnia pokrycia terenu roślinnością dla województwa mazowieckiego (ryc.9). Mapę opracowano poprzez re-klasyfikację warstwy NDVI obliczonej ze zdjęcia MODIS. Wartości NDVI dla poszczególnych klas stopnia pokrycia terenu są przedstawione w tabeli 2. Zostały one wyznaczone przy użyciu funkcji [1]. Mapę opracowano w skali 1:1 000 000.

Tabela 2. Wartości progowe NDVI dla poszczególnych klas stopnia pokrycia terenu obliczone według otrzymanej funkcji.
Tab. 2 Threshold values of NDVI for classes of percentage of vegetation cover according to the function.

% pokrycia terenu roślinnością % vegetation cover	NDVI
10	0,2637
20	0,4199
30	0,5077
40	0,5635
50	0,6112
60	0,6534
70	0,6918
80	0,7272
90	0,7602
100	0,7913



Ryc. 9. Mapa pokrycia terenu roślinnością. Województwo Mazowieckie. Stan na dzień 03/07/2006, wykonana na podstawie zdjęcia satelitarnego MODIS.

Fig. 9. The map of the percentage of vegetation cover elaborated on the base of MODIS image (03/07/2006). Masovian Voivodeship.

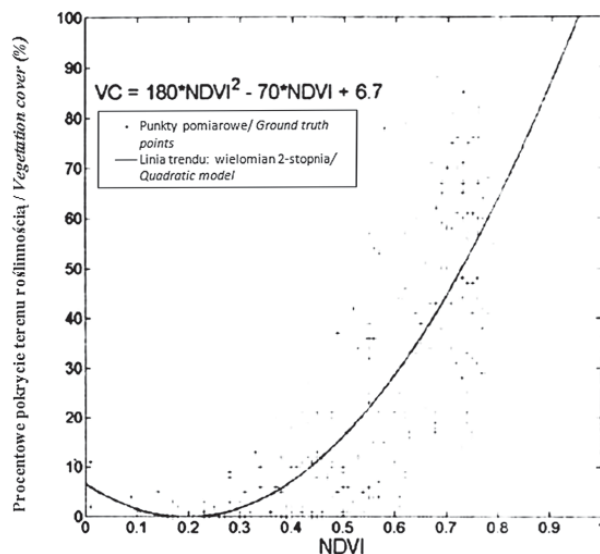
Podsumowanie

Inspiracją przeprowadzonych badań był artykuł Törmä (2006) z ośrodka naukowo-badawczego SYKE w Finlandii, poświęcony badaniom poziomu zależności pomiędzy wskaźnikiem NDVI a stopniem pokrycia terenu roślinnością. Prace wykonywane były z zastosowaniem wielu zdjęć o różnej rozdzielczości, w tym również zdjęć lotniczych oraz z wykorzystywaniem wyników szczegółowych badań terenowych.

Uzyskana funkcja zależności między NDVI i stopniem pokrycia terenu roślinnością przedstawiona jest na rysunku 10. Generalnie, mimo innych warunków środowiskowych i zastosowanych metod, jest ona zbliżona do naszych wyników uzyskanych wyłącznie na podstawie danych satelitarnych.

Przedstawione wyniki prac wykazały, że jest możliwe śledzenie stopnia pokrycia powierzchni Ziemi roślinnością za pomocą zdjęć niskiej rozdzielczości MODIS. Rozdzielczość czasowa tych zdjęć, wykonywanych codziennie, umożliwia nieustanną aktualizację danych czyli wykonywanie ciągłego monitoringu.

Zdjęcie Landsat TM spełniło rolę materiału referen-



Ryc. 10. Wykres korelacji uzyskany przez zespół badawczy z fińskiego Instytutu Środowiska SYKE (Törmä, 2006).

Fig. 10. The correlation function between the NDVI and the percentage of vegetation cover obtained by Finish SYKE (Törmä, 2006).

cyjnego. Można przyjąć, że jedno zdjęcie TM pozwala na opracowanie kilku zdjęć MODIS pokrywających cały kraj. W przypadku kontynuacji pracy należy rozważyć możliwość innej, bardziej szczegółowej reklasyfikacji zdjęcia pełniącego rolę materiału referencyjnego. Dodatkowo wskazane byłoby przeprowadzenie badania weryfikującego, w którym zdjęcie Landsat zostałoby zastąpione innym zdjęciem wysokorozdzielczym np. SPOT lub IRS.

Wykorzystane zdjęcia MODIS i Landsat zostały zarejestrowane tego samego dnia. Ze względu na warunki atmosferyczne oraz częstotliwość pozyskiwania zdjęć wysokiej rozdzielczości nie można zakładać, że zawsze uzyskamy taki zestaw danych. Jednak, różnica nawet dwóch tygodni między zobrazowaniami nie powinna stanowić przeszkody w uzyskaniu wiarygodnych wyników.

Zaproponowana metoda postępowania może być wykorzystana w monitoringu zmian zachodzących w środowisku będących skutkiem występowaniem susz, wylesiania oraz klęsk żywiołowych. Stopień pokrycia roślinnością jest również niezbędną informacją w badaniach cykli obiegu NO_2 i CO_2 .

Literatura

- Bański J., 2009. *Zmiany gospodarki rolnej i zabezpieczenia żywnościowego ludności w wyniku zmian klimatycznych*, [w:] M. Guty-Korycka, T. Markowski (red.), *Zrównoważone warunki życia w zmieniającym się systemie klimatycznym Ziemi*, Studia KPZK PAN, 74, 64-74, Warszawa.
- Będkowski K., Adamczyk J., 2007. *Metody cyfrowe w teledetekcji*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Burgheimer J., Wilske B., Maseyk K., Karnieli A., 2005. *Relationship between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and carbon fluxes of biologic soil crusts assessed*

- by ground measurements, *Journal of Arid Environments* 64, Holandia.
- Ciołkosz A., Białousz S., 2008. *Zastosowanie teledetekcji satelitarnej w badaniach środowiska w Polsce*, Nauka, 3, Warszawa.
- Gallo K., 2005. *Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data*, *Remote Sensing of Environment* 99, USA.
- Giannico C., 2007. *Remote sensing of vegetation in the Calabrian region*, *Acta Astronautica* 60, Włochy.
- Grenzdörffer G.J., 2004. *Land use change in Rostock, Germany since the reunification – a Combined approach with satellite data and high resolution aerial Images*, Rostock University, Niemcy.
- Hansen, M.C., DeFries, R.S., Townshend, J.R.G., Sohlberg, R., Dimiceli, C., Carroll, M. 2002. *Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: example using AVHRR and MODIS data*. *Remote Sensing of Environment* 83, s. 303-319.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008. *Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki*, *Teledetekcja Środowiska*, 40, Warszawa.
- Jóźwiak J., Podgórski J., 1998. *Statystyka od podstaw*, Polskie wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Katagis T.G., Gitas I.Z., 2007. *Developing MODIS time series for monitoring vegetation conditions: preliminary results*, *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Millpress, Rotterdam, Holandia.
- Kotarba A., 2010. *Pierwsze spotkanie z danymi sensora MODIS*, Zakład Systemów Informacji Geograficznej, Kartografii i Teledetekcji IGI GP Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Kowalski P., 2007. *Wskaźniki biometryczne roślinności oparte na danych teledetekcyjnych i możliwości ich praktycznego wykorzystania*, OKÓLNIK TD nr 129, Warszawa.
- Kuckenberg J., Tartachnyk I., Schmitz-Eiberger M., Noga G. 2007. *Early detection of leaf rust and powdery mildew infections on wheat leaves by PAM fluorescence imaging*. *Stafford J.V. (Edytor) Precision agriculture '07. Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture*, Skiathos, Greece, 3-6 June, 2007 2007 pp. 515-521
- Lewiński S., Poławski Z., 2003. *Możliwości zasilania systemów informacji przestrzennej danymi satelitarnymi*, *Człowiek i Środowisko* 27, Warszawa.
- Miller R.L., McKee B.A., 2004. *Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters*, *Remote Sensing of Environment* 93, USA.
- Nieróbca A., Pudielko R., Kozyra J., Smagacz J., 2007. *Wykorzystanie pomiarów zdalnych do oceny wiosennego porażenia roślin przez choroby*, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy.
- Oleđzki J.R., 2007. *Regiony geograficzne Polski*, *Teledetekcja Środowiska* 38, Klub Teledetekcji Środowiska PTG, Warszawa.
- Poławski Z., 2006. *Zmiany powierzchni i przestrzennego rozmieszczenia lasów w Polsce w II połowie XX wieku*, *Leśne Prace Badawcze* 3, Raszyn.
- Rurevdorj, T.S., Tatelishi, R., Ishiyama, T., Honda, Y. 1998. *Relationship between percent vegetation cover and vegetation indices*. *International Journal of Remote Sensing* 18, s. 3519-3535.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973. *Monitoring vegetation systems in the great plains with erts*, Texas A&M University, Texas, USA.
- Stani A., 2007. *Współczesne satelity do badań środowiska i ich wyposażenie w urządzenia obrazujące*, OKÓLNIK TD nr 129, Warszawa.
- Song D., 2008. *Spatial Distribution Pattern of MODIS-NDVI and Correlation between NDVI and Meteorology Factors in Shandong Province in China*, China University of Petroleum, Chiny.
- Törmä M., 2006. *Using Phenological Information Derived from MODIS- data to Aid Nutrient Modeling*, Finnish Environment Institute SYKE, Finlandia.
- Wesołowski T., 2008. *Klasyfikacja form pokrycia terenu na zdjęciach satelitarnych MODIS*, praca magisterska, WGiSR UW, Warszawa.
- Zhang X., 2003. *Monitoring vegetation phenology using MODIS*, *Remote Sensing of Environment*, USA.
- Zoran M., Stefan S., 2006. *Climatic changes effects on spectral vegetation indices for forested areas analysis from satellite data*, *Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference*, Aleksandria, Egipt.
- Zhou L., Tucker C.J, Kaufmann R., 2001. *Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999*, *Journal of Geophysical Research* 106, USA.
- www.greenpeace.org
<http://landsat.gsfc.nasa.gov>
<http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landsat/>
<http://glovis.usgs.gov/>
<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation>
www.hdfgroup.org
www.vb4all.pl
http://pl.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic



Mgr Monika Tomaszewska ukończyła w 2010 roku studia magisterskie w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Aktualnie jest uczestniczką studiów podyplomowych: System Informacji Przestrzennej na Politechnice Warszawskiej. W lutym 2011 rozpoczęła pracę w Instytucie Geodezji i Kartografii w Zakładzie Teledetekcji.

E-mail: monika.tomaszewska@igik.edu.pl, telefon: 606-996-992



Dr hab. inż. Stanisław Lewiński jest absolwentem Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. W latach 1984 – 2010 zatrudniony był w Instytucie Geodezji i Kartografii w Zakładzie Teledetekcji. Uczestniczył w różnorodnych projektach związanych z aplikacyjnym wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i systemów GIS, kierował również własnymi projektami naukowo-badawczymi. Specjalizuje się w klasyfikacji obiektowej zdjęć satelitarnych wysokiej i średniej rozdzielczości. Prowadzi zajęcia z cyfrowego przetwarzania zdjęć satelitarnych w Katedrze Geoinformatyki WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego. W marcu 2011 rozpoczął pracę w Centrum Badań Kosmicznych PAN.



Dr Edyta Woźniak jest absolwentką Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Ukończyła specjalizacje: Sedymentologia i Geoekologia. W latach 2000 – 2007 zatrudniona była w INDUROT (El Instituto de Recursos Naturales y Ordenacion del Territorio) na Uniwersytecie w Oviedo (Hiszpania). Uczestniczyła w różnorodnych projektach związanych z aplikacyjnym wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i systemów GIS, do modelowania zagrożeń naturalnych, określania zasobów ekosystemów lądowych i wodnych.

Email: edyta_wozniak@hotmail.com