

MONITORING PRZYRODNICZY BAGIEN BIEBRZAŃSKICH Z ZASTOSOWANIEM TELEDETEKCJI

**Maria BUDZYŃSKA, Katarzyna DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA,
Konrad TURLEJ, Iwona MAŁEK, Maciej BARTOLD**

Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

Słowa kluczowe: bilans cieplny, biomasa, ewapotranspiracja, LAI, teledetekcja, wilgotność gleby

Streszczenie

Wobec wzrastającego zagrożenia naturalnego środowiska ekosystemu Bagien Biebrzańskich oraz konieczności jego ochrony dużego znaczenia nabiera monitoring przyrodniczy aktualnego stanu pokrycia roślinnego oraz uwilgotnienia terenu. Metody teledetekcji są w takim przypadku bardziej dokładne i szybsze od metod polowych, pozwalają rozpoznać oraz określić aktualną strukturę przestrzenną roślinności i wyznaczyć granice jej poszczególnych elementów, jak również oszacować uwilgotnienie danego siedliska. Współczesna technika satelitarna umożliwia prowadzenie kompleksowych badań jednocześnie na dużych obszarach, często trudno dostępnych. Wykorzystuje się informacje pozyskiwane w różnych zakresach widma elektromagnetycznego i w różnym czasie. Autorzy proponują wykorzystanie zdjęć pozyskiwanych przez satelity środowiskowe, pracujące w widmie optycznym i mikrofalowym. Zdjęcia zarejestrowane w widmie optycznym wykorzystano do klasyfikacji zbiorowisk roślinnych, obliczenia wskaźników roślinnych oraz gęstości strumieni ciepła. Zdjęcia zarejestrowane w zakresie mikrofalowym wykorzystano do obliczenia wskaźnika *LAI* (ang. „Leaf Area Index”) i wilgotności gleby. Algorytmy szacowania różnych parametrów biofizycznych opracowane na podstawie danych naziemnych i satelitarnych dla poszczególnych zbiorowisk roślinnych, występujących na obszarze Bagien Biebrzańskich, pozwalają na wykonywanie map tematycznych tych siedlisk z dużą rozdzielczością czasową i przestrzenną. Porównywanie kolejnych sekwencji czasowych takich map umożliwia monitoring przyrodniczy ekosystemu bagiennego, wychwycenie zmian ilościowych i jakościowych oraz ich kierunku. Z uwagi na dynamizm siedlisk bagiennych i ich różnorodności biologicznej informacje te mogą być wykorzystane w planowaniu działań, zmierzających do ochrony tego ekosystemu przed degradacją.

WSTĘP

Monitoring przyrodniczy obszarów bagiennych jest możliwy poprzez ciągłe kontrolowanie aktualnego stanu pokrycia roślinnego oraz warunków wilgotnościowych. Metody teledetekcji są w takim przypadku bardziej dokładne i szybsze od metod polowych, gdyż – dzięki wykorzystywaniu informacji pozyskiwanych w różnych zakresach widma elektromagnetycznego – umożliwiają prowadzenie częstych i kompleksowych badań jednocześnie na dużych obszarach, nie zawsze dostępnych do bezpośredniej eksploracji. Obecnie na orbitach wokółziemskich znajduje się kilka satelitów, które rejestrują powierzchnię terenu z różną rozdzielczością spektralną, przestrzenną, radiometryczną i czasową. Zależność między rozdzielczością przestrzenną i czasową zdjęć satelitarnych jest odwrotnie proporcjonalna. Zdjęcia o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (<30 m, np. Landsat TM, TERRA.ASTER, ALOS.AVNIR-2, ALOS.PALSAR, ENVISAT.ASAR) są pozyskiwane dla tego samego obszaru co 2–4 tygodnie, natomiast o średniej i niskiej rozdzielczości przestrzennej co 1–2 dni (250–300 m, 1 km, np. ENVISAT.MERIS, TERRA.MODIS, NOAA.AVHRR, SPOT.VEGETATION, ENVISAT.AATSR). W przypadku zdjęć rejestrowanych w paśmie optycznym ma to duże znaczenie, zwłaszcza w warunkach Polski, której obszar jest często zachmurzony. W warunkach zachmurzenia można wykorzystać zdjęcia wykonane w zakresie mikrofalowym. Mikrofałe przenikają również przez niższą roślinność, wnikając w głąb gleby – im dłuższa fala, tym większa głębokość penetracji, co ma znaczenie podczas szacowania uwilgotnienia danego terenu [ULABY 1982; 1998].

W badaniach Bagien Biebrzańskich [OKRUSZKO i in. 1996] wykorzystano zdjęcia pozyskiwane przez satelity w widmie optycznym (Landsat ETM+, TERRA.ASTER, TERRA.MODIS, ALOS.AVNIR-2, ALOS.PRISM, ENVISAT.MERIS, NOAA.AVHRR) i mikrofalowym (ENVISAT.ASAR, ALOS.PALSAR). Na podstawie tych zdjęć przeprowadzono klasyfikację zbiorowisk roślinnych i obliczono różne wskaźniki roślinne, tj. *LAI* (ang. „Leaf Area Index”) i odzwierciedlające biomasę. Dzięki rejestracji w zakresie podczerwieni termalnej obliczono gęstość strumieni ciepła, a następnie wartość ewapotranspiracji, natomiast rejestracja w zakresie mikrofalowym umożliwiła obliczenie wskaźnika *LAI* i wilgotności gleby. Na terenie badawczym od 2000 r. były wykonywane szczegółowe badania terenowe z wykorzystaniem instrumentów do teledetekcji naziemnej, jak również badania metodami tradycyjnymi, zsynchronizowane z terminami rejestracji satelitarnych. Wyniki pomiarów terenowych *LAI*, biomasy, wilgotności gleby i in. oraz dane satelitarne były wykorzystane do analiz statystycznych w celu opracowania algorytmów do szacowania różnych parametrów glebowo-roślinnych. Wyprowadzone równania posłużyły do wykonania map tematycznych przedstawiających przestrzennie aktualny stan różnych parametrów biofizycznych ekosystemu bagiennego. Porównanie informacji zawartych na tych mapach umożliwiło m.in. uchwycenie zmian pokrywy roślinnej, biomasy i uwilgotnienia siedlisk w ciągu

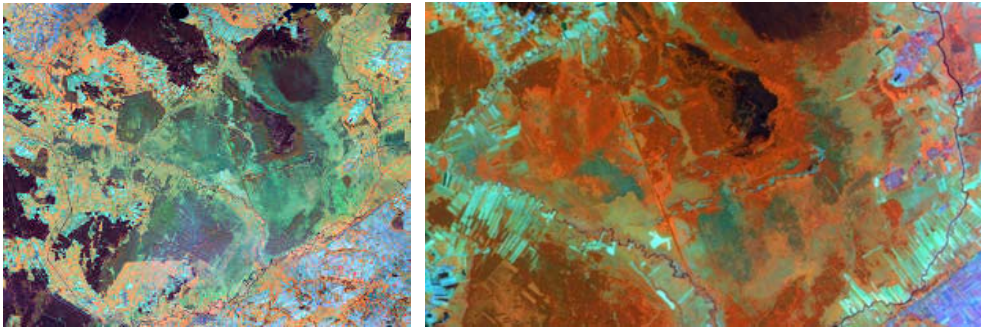
sezonu wegetacyjnego, jak również w poszczególnych latach, co może być wykorzystane w planowaniu działań, zmierzających do ochrony ekosystemu przed degradacją. Na uwagę zasługują niewielkie koszty uzyskania tych informacji, jak również często słabej dostępności niektórych terenów, uniemożliwiającej zastosowanie tradycyjnych metod. Poza tym otrzymane ze zdjęć satelitarnych dane przedstawiają poszczególne parametry w sposób obiektywny i przestrzenny bez konieczności zastosowania metod interpolacji czy ekstrapolacji, co jest konieczne w przypadku punktowych danych naziemnych.

ZASTOSOWANIE ZDJĘĆ WYKONYWANYCH W OPTYCZNYM ZAKRESIE WIDMA

Zdjęcia wykonywane w optycznym zakresie widma elektromagnetycznego wykorzystano do klasyfikacji zbiorowisk roślinnych, obliczenia różnych wskaźników roślinnych oraz do szacowania strumieni ciepła, a następnie ewapotranspiracji.

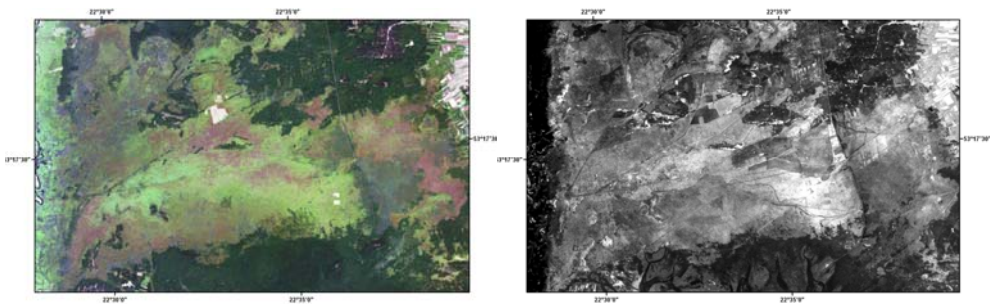
Klasyfikacja zbiorowisk roślinnych Bagien Biebrzańskich. Klasyfikacja zbiorowisk roślinnych jest potrzebna do wyprowadzenia równań, służących do szacowania parametrów roślinnych i wilgotności gleby na podstawie zdjęć satelitarnych [DABROWSKA-ZIELINSKA i in. 2009a, b; 2010]. Rozpoznanie tych form pokrycia terenu z poziomu satelitarnego jest uzależnione od spektralnej i przestrzennej zdolności rozdzielczej sensora. Na rysunku 1. przedstawiono fragmenty zdjęć satelitarnych o dużej rozdzielczości przestrzennej: Landsat ETM+ i TERRA. ASTER fragmentu obszaru Basenu Środkowego Biebrzy, na rysunku 2. – fragmenty zdjęć ALOS.AVNIR-2 i ALOS.PRISM, obejmujące Bagno Ławki w Basenie Dolnym Biebrzy, a na rysunku 3. – fragmenty zdjęć satelitarnych o małej rozdzielczości przestrzennej: NOAA.AVHRR, ENVISAT.MERIS, TERRA.MODIS, przedstawiające prawie cały obszar Bagien Biebrzańskich. Wybrane charakterystyki, wykorzystane w badaniach zdjęć satelitarnych, zamieszczono w tabeli 1.

Klasyfikację zbiorowisk roślinnych Bagien Biebrzańskich wykonano na podstawie zdjęć satelitarnych Landsat ETM+ (z 16.05.2000 r.), TERRA.ASTER (z 15.07.2001 r.) i ALOS.AVNIR-2 (z 17.07.2007 r.) o dużej rozdzielczości przestrzennej (odpowiednio 30, 15, 10 m) oraz zdjęć satelitarnych ENVISAT.MERIS (z 21.04.2003 i 01.05.2009 r.) o średniej rozdzielczości przestrzennej (300 m). Do opracowywania legendy wydzielanych zbiorowisk roślinnych wykorzystano różne źródła, dotyczące roślinności Bagien Biebrzańskich [BANASZUK i in. 2000; BARTOSZUK 2005; DEMBEK 2005; MATUSZKIEWICZ 1990; OKRUSZKO i in. 1996; OŚWIT 1991], jak również wyniki obserwacji terenowych, w czasie których notowano główne grupy roślin: zarośla, trzciny, mozga trzcinowata, tatarak, manna mielęc, turzyce, trawy, rośliny zielne, mchy i torfowce, jak również łąki skoszone i pastwiska. Szczególnie brano pod uwagę obraz płatu roślinności, który może być widoczny z poziomu satelitarnego (z wysokości 600–800 km nad powierzchnią Ziemi).



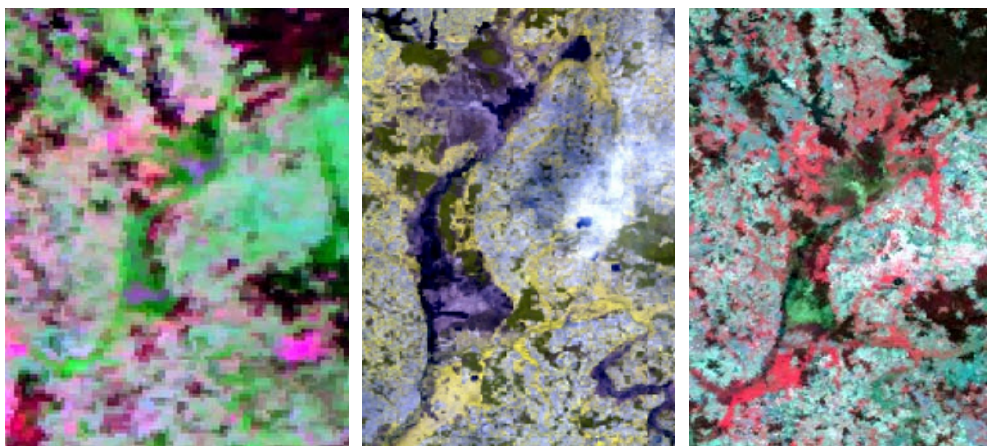
Rys. 1. Kompozycje barwne wykonane ze zdjęć Landsat ETM+ (z lewej) i TERRA.ASTER (z prawej), przedstawiające fragment Basenu Środkowego Biebrzy; źródło: zbiory IGIK

Fig. 1. Colour composition of Landsat ETM+ (left) and TERRA.ASTER (right) images showing part of the Middle Biebrza Basin; source: IGIK



Rys. 2. Kompozycja barwna wykonana ze zdjęcia ALOS.AVNIR-2 (z lewej) i fragment zdjęcia ALOS.PRISM (z prawej) – Bagno Ławki w Basenie Dolnym Biebrzy; źródło: zbiory IGIK

Fig. 2. Colour composition of ALOS.AVNIR-2 image (left) and part of ALOS.PRISM image (right); source: IGIK



Rys. 3. Kompozycje barwne wykonane z fragmentów zdjęć satelitarnych NOAA.AVHRR, ENVISAT.MERIS, TERRA.MODIS (kolejno od lewej); źródło: zbiory IGIK

Fig. 3. Colour compositions made of the fragments of NOAA.AVHRR, ENVISAT.MERIS, and TERRA.MODIS images (respectively from left); source: IGIK

Tabela 1. Wybrane charakterystyki wykorzystanych w badaniach zdjęć satelitarnych**Table 1.** Selected characteristics used in the analysis of satellite images

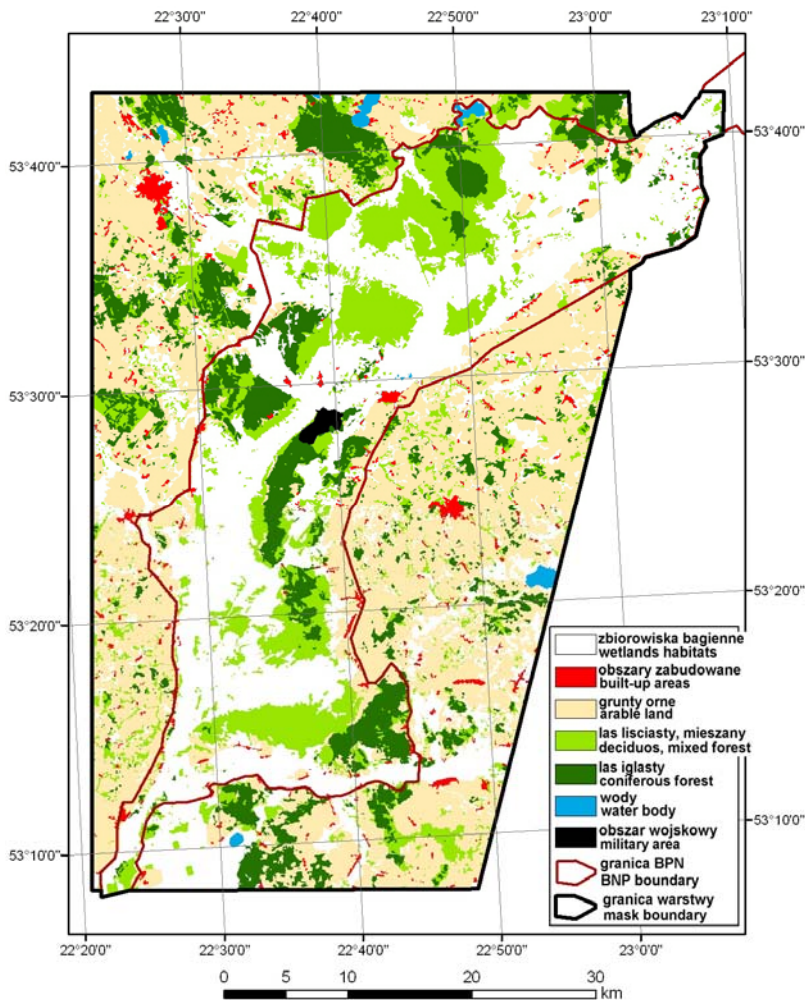
Satelita Satellite	Instrument	Kanał/Zakres/Tryb pracy/Kąt padania/Polaryzacja Canal/Range/Mode/Angle/Polarization		Wielkość piksela, m Pixel size, m
ALOS	PALSAR	L (1,27 GHz) Fine FBD 38,7° HH + HV		12,5
	AVNIR-2	numer kanału no. of canal	zakres, μm range, μm	10
		1	0,42–0,50	
2		0,61–0,69		
3		0,76–0,89		
4	0,52–0,60			
	PRISM	1 kanał panchromatyczny 0,52–0,77 μm 1 panchromatic canal 0.52–0.77 μm		2,5
ENVISAT	MERIS	numer kanału no. of canal	środek zakresu, nm middle of the range, nm	300
		1	412,5	
		2	442,5	
		3	490,0	
		4	510,0	
		5	560,0	
		6	620,0	
		7	665,0	
		8	681,25	
		9	708,75	
		10	753,75	
		11	760,625	
		12	778,75	
		13	865,0	
		14	885,0	
	15	900,0		
	ASAR	C (5,331 GHz) IS2 19,2–26,7° HH/VV C (5,331 GHz) IS6 39.1–42.8° HH/VV		12,5
TERRA	ASTER	14 kanałów 0,52–11,65 μm 14 canals 0.52–11.65 μm		15–90
	MODIS	36 kanałów 0,4–14,4 μm 36 canals 0.4–14.4 μm		250–1000
Landsat	ETM+	7 kanałów 0,45–12,5 μm 7 canals 0.45–12.5 μm		30–120
NOAA	AVHRR	5 kanałów 0,58–12,5 μm 5 canals 0.45–12.5 μm		1000

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Obserwacje terenowe (wykonane przez autorów w latach 2000–2010 na obszarze Basenu Środkowego i Dolnego Biebrzy) posłużyły do wyboru pól treningowych, niezbędnych do przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej na zdjęciu satelitarnym. Klasyfikacja została przeprowadzona metodą opartą na analizie poszczególnych pikseli, polegającej na ich grupowaniu na podstawie wartości, będących charakterystykami spektralnymi wydzielanych zbiorowisk roślinnych. Wcześniejsze klasyfikacje (2000–2003) wykonano dla warstwy trwałych użytków zielonych i obszarów bagiennych pobranej z bazy CORINE Land Cover 2006, natomiast nowsze (2007–2009) wykonano dla specjalnie przygotowanej warstwy obszarów bagiennych utworzonej z wykorzystaniem zdjęć ASTER, AVNIR-2 i PRISM.

Do przygotowania warstwy ograniczającej obszar klasyfikowany na zdjęciach satelitarnych do zbiorowisk roślinnych Bagien Biebrzańskich wykorzystano następujące zdjęcia satelitarne: Landsat +ETM, TERRA.ASTER, ALOS.AVNIR-2 oraz zdjęcie panchromatyczne ALOS.PRISM (z 21.04.2009 r.). Zdjęcia AVNIR-2 i PRISM zastosowano głównie do wydzielenia obszarów zabudowanych i leśnych, a zdjęcia Landsat ETM+ i ASTER głównie do wydzielenia obszarów rolniczych. Klasyfikowano następujące formy pokrycia terenu: obszary zabudowane, grunty orne, lasy liściaste i mieszane, lasy iglaste, wody, obszar wojskowy. Pozostałe obszary tworzyły warstwę zbiorowisk bagiennych. Ostateczna wersja klasyfikacji została wykonana z zastosowaniem oprogramowania ARC GIS, w którym przeprowadzono weryfikację i modyfikację przebiegu granic. Wykonana mapa (rys. 4) została wykorzystana do klasyfikacji zdjęć satelitarnych AVNIR-2 i MERIS. Po nałożeniu jej na zdjęcie satelitarne klasyfikowano tylko te jego fragmenty, na których znajdowały się zbiorowiska roślinne Bagien Biebrzańskich, oznaczone na rysunku 4. kolorem białym. Zdjęcia satelitarne Landsat ETM+ i ASTER klasyfikowano z wykorzystaniem bazy CORINE Land Cover 2006.

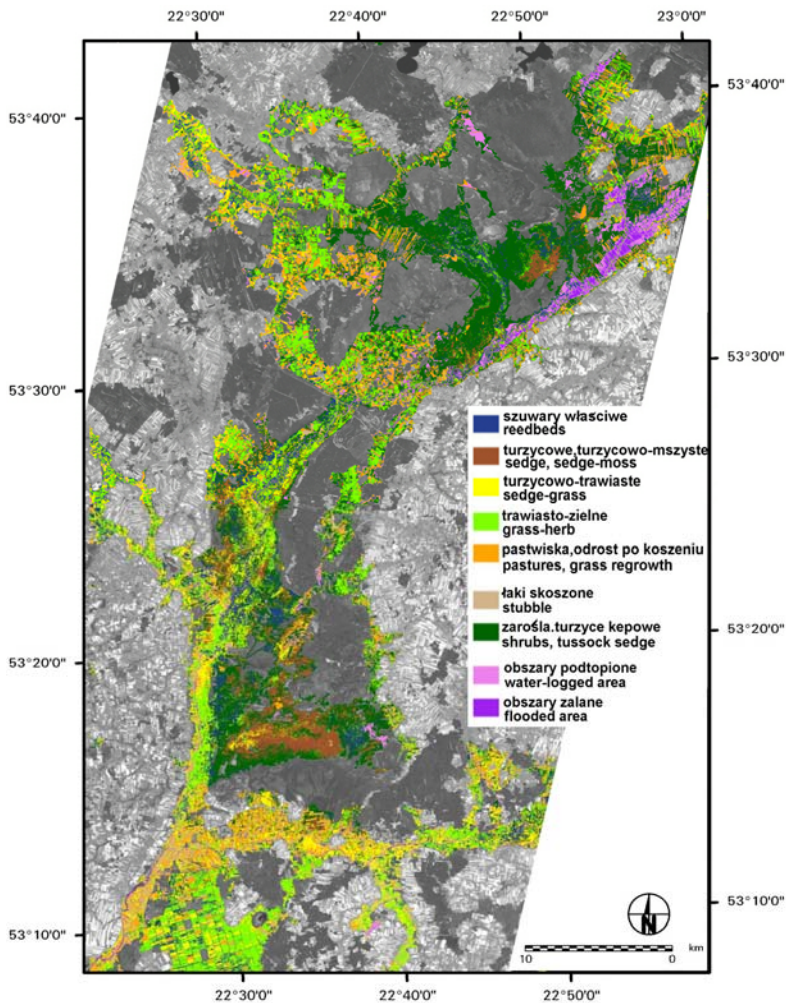
Klasyfikację nadzorowaną zdjęcia satelitarnego AVNIR-2, zarejestrowanego 17.07.2007 r., wykonano dla warstwy zbiorowisk bagiennych, wykorzystując wszystkie cztery zakresy spektralne. Niektóre fragmenty obszaru w Basenie Środkowym Biebrzy, zwłaszcza wzdłuż głównych cieków (Biebrzy, Brzozówki, Netty i Kanału Augustowskiego), były w czasie rejestracji satelitarnej zalane lub silnie podtopione, co zmniejszyło możliwość wyboru odpowiedniej do danego typu zbiorowiska liczby pól treningowych. Tereny te, z racji odmiennych wartości charakterystyk spektralnych, zostały wydzielone jako dwie oddzielne klasy – obszary podtopione i obszary zalane. Poza tym, z powodu trwającego w tym czasie zbioru drugiego pokosu siana, konieczne stało się włączenie do pastwisk łąk z krótką roślinnością – skoszonych wcześniej, ale z niewielkim odrostem runi. Ostatecznie otrzymano następujące wydzielenia zbiorowisk roślinnych (razem 6): szuwały właściwe, zbiorowiska turzycowe i turzycowo-mszyste, zbiorowiska turzycowo-trawiaiste, zbiorowiska trawiasto-zielne (ekstensywnie użytkowane, nazwane na mapie antropogenicznymi), pastwiska i łąki z niewielkim odrostem runi, zarośla i turzycy kępowe oraz dodatkowo klasę łąk skoszonych (na mapie zaznaczona jako ścierniska) – rysunek 5.



Rys. 4. Warstwa zbiorowisk bagiennych z zaznaczoną granicą Biebrzańskiego Parku Narodowego; źródło: zbiory IGiK

Fig. 4. Layer of wetland habitats with the boundary of Biebrza National Park (BNP); source: IGiK

Mapę zbiorowisk roślinnych, opracowaną na podstawie klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarne ASTER zarejestrowanego 15.07.2001 r., wykonano dla następujących warstw mapy Corine Land Cover 2006: torfowiska, bagna śródłądowe, łąki naturalne, zakrzaczenia. Zdjęcie posiada 14 zakresów spektralnych – od widzialnego do podczerwieni termalnej (4 zakresy widzialne, 5 zakresów średniej podczerwieni i 5 podczerwieni termalnej). Do klasyfikacji wykorzystano zakresy widzialne i średniej podczerwieni. Choć termin rejestracji, tak jak w przypadku zdjęcia AVNIR-2, jest również lipcowy, wyróżniono tu 10 klas zbiorowisk roślin-



Rys. 5. Wyniki klasyfikacji zbiorowisk roślinnych na podstawie zdjęcia satelitarne AVNIR-2 na tle zdjęcia PRISM; źródło: zbiory IGiK

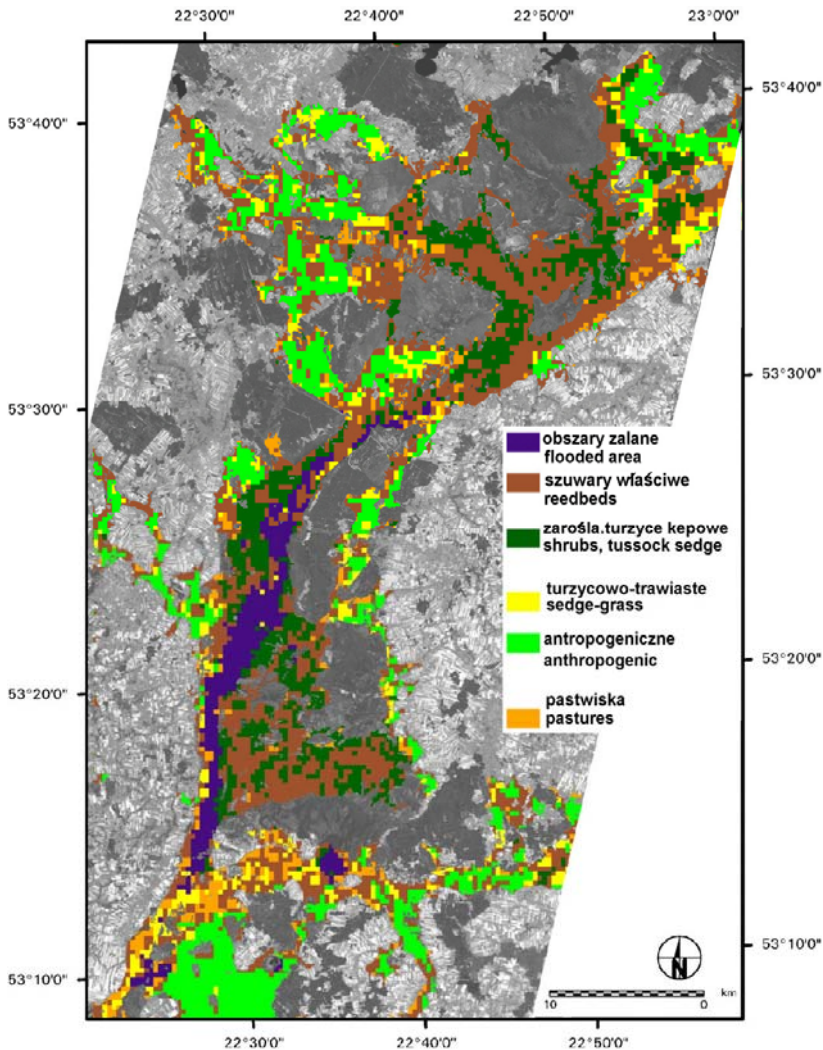
Fig. 5. Results of the classification of plant communities based on AVNIR-2 image shown against the background of PRISM image; source: IGiK

nych oraz klasę łąk skoszonych, a więc o 4 klasy więcej niż na podstawie zdjęcia AVNIR-2. Było to możliwe głównie z powodu większej liczby zakresów spektralnych zdjęcia ASTER i znacznie mniejszego uwilgotnienia w lipcu 2001 r. Zdjęcie wielospektralne, jakim jest zdjęcie ASTER, umożliwiło odróżnienie zbiorowisk turzycowych od turzycowo-mszystych, zarośli od turzyc kępowych, zbiorowisk trawiastych od trawiasto-zielnych, tych zaś od turzycowo-trawiasto-zielnych. Ostatecznie wyróżniono następujące klasy: pastwiska, łąki trawiaste, łąki trawiasto-zielne, łąki trawiasto-zielno-turzycowe, łąki śmiałkowo-mozgowe, łąki turzycowe,

łąki turzycowo-mszyste (wraz z mechowiskami), zbiorowiska szuwarowo-turzycowe, zarośla, szuwały właściwe oraz łąki skoszone. Dla porównania, na podstawie zdjęcia satelitarnego Landsat ETM+, zarejestrowanego 16.05.2000 r., wyróżniono następujące klasy (razem 8): łąki trawiasto-zielne, pastwiska, łąki trawiasto-zielno-turzycowe, łąki turzycowo-mszyste, łąki śmiałkowo-mozgowe, zbiorowiska szuwarowo-turzycowe, szuwały trzcinowe, zarośla. W odróżnieniu od poprzednich klasyfikacji, na podstawie zdjęcia Landsat ETM+ nie wydzielono łąk turzycowych (zostały włączone do innych klas), łąki trawiaste i trawiasto-zielne połączono w jedną klasę, natomiast łąk skoszonych nie było ze względu na wcześniejszy termin rejestracji.

Klasyfikacje nadzorowane średniorozdzielczych zdjęć satelitarnych MERIS, zarejestrowanych 21.04.2003 r. i 01.05.2009 r. wykonano taką samą metodą (pikselową), co klasyfikacje zdjęć AVNIR-2, ASTER i Landsat ETM+. Po wcześniejszej analizie spektralnej wykorzystano tylko niektóre jego zakresy: 1, 2, 3, 7, 10 i 13. W wyniku klasyfikacji zdjęcia, zarejestrowanego 01.05.2009 r., wydzielono następujące zbiorowiska roślinne (razem 5): szuwały właściwe; zarośla i turzycy kępowe; zbiorowiska turzycowo-trawiaste; zbiorowiska trawiaste, trawiasto-zielne i trawiasto-zielno-mszyste (nazwane na mapie antropogenicznymi); pastwiska; dodatkowo wydzielono klasę obszarów zalanych. Wyniki klasyfikacji przedstawiono na rysunku 6. W III dekadzie kwietnia 2003 r. panowała ciepła i słoneczna pogoda, która spowodowała, że zalew powierzchniowy zajmował niewielką powierzchnię w porównaniu z rejestracją w 2009 r., i na tych terenach można było oddzielić zbiorowiska szuwarowo-turzycowe od trzcinowych. Pozostałe zbiorowiska, wydzielone na podstawie zdjęcia MERIS z 2003 r. i z 2009 r., są takie same i wykazują dużą zgodność pod względem rozmieszczenia.

Wyniki przeprowadzonych prac upoważniają autorów do stwierdzenia, że zarówno zdjęcia wysokorozdzielcze, jak i średniorozdzielcze można stosować do klasyfikacji zbiorowisk roślinnych, która jest konieczna do szacowania różnych wielkości biofizycznych obszarów bagiennych. Wyniki klasyfikacji zdjęć satelitarnych zostały wykorzystane do przeprowadzenia analiz statystycznych danych naziemnych i satelitarnych w celu opracowania algorytmów do szacowania różnych parametrów glebowo-roślinnych dla poszczególnych klas zbiorowisk roślinnych. Klasyfikacje zbiorowisk roślinnych, wykonywane na podstawie zdjęć średniorozdzielczych mogą być stosowane do obliczania parametrów biofizycznych roślin na podstawie zdjęć ENVISAT.MERIS, TERRA.MODIS, AVHRR.NOAA, ALOS.Scan SAR i in. średnio- i niskorozdzielczych, natomiast klasyfikacje zbiorowisk roślinnych, przeprowadzane na podstawie zdjęć wysokorozdzielczych – do obliczania tych parametrów na podstawie zdjęć Landsat +ETM, TERRA.ASTER, ALOS.AVNIR-2 i in. wysokorozdzielczych, w tym zdjęć mikrofalowych ENVISAT.ASAR, ALOS.PALSAR.



Rys. 6. Wyniki klasyfikacji zbiorowisk roślinnych na podstawie zdjęcia satelitarne go MERIS na tle zdjęcia PRISM; źródło: zbiory IGiK

Fig. 6. Results of the classification of plant communities based on MERIS image shown against the background of PRISM image; source: IGiK

Wskaźniki roślinne. Wskaźniki roślinne, obliczane na podstawie danych z zdjęć satelitarnych, odzwierciedlają biomase, *LAI*, gęstość i kondycję (wigor) pokrycia roślinnego. W związku z tym, jak również ze względu na łatwość ich obliczania bez konieczności stosowania danych z innych źródeł, znalazły one zastosowanie w wielu dziedzinach nauki (rolnictwo, ochrona środowiska, hydrologia, ekologia itd.). Do obliczania wskaźników charakteryzujących szatę roślinną wykorzy-

stuje się dane zarejestrowane w zakresie promieniowania niebieskiego, czerwonego i podczerwonego. Należą do nich m.in. wskaźniki: *NDVI* (ang. „Normalized Difference Vegetation Index”) [TUCKER, SELLERS 1981], *ARVI* (ang. „Atmospherically Resistant Vegetation Index”) [KAUFMAN, TANRE 1992] i *EVI* (ang. „Enhanced Vegetation Index”) [LIU, HUETE 1995]. Poniżej przedstawiono sposób ich obliczania:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$ARVI = \frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE} \quad (2)$$

$$EVI = 2 \frac{NIR - RED}{1 + NIR + 6RED - 7,5BLUE} \quad (3)$$

gdzie:

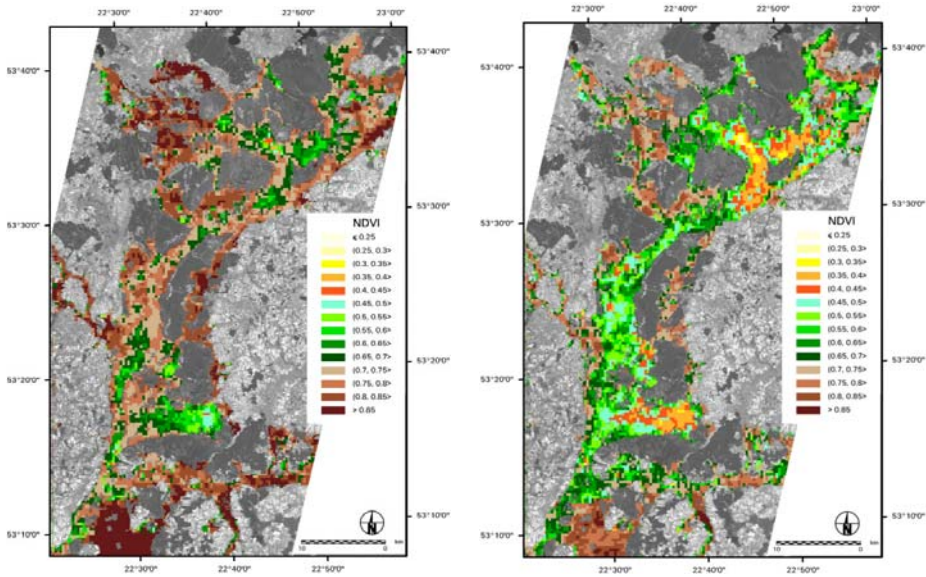
NIR – wartości odbicia spektralnego w zakresie podczerwonym, bez miana;

RED – wartości odbicia spektralnego w zakresie czerwonym, bez miana;

BLUE – wartości odbicia spektralnego w zakresie niebieskim, bez miana.

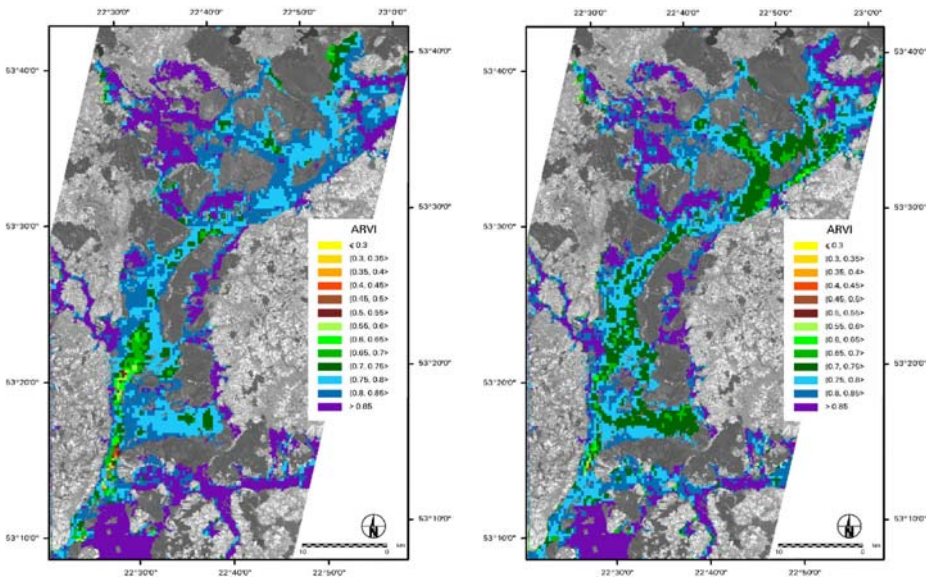
Znormalizowany wskaźnik zieleni *NDVI* określa wigor roślin oraz stan ich rozwoju. Do jego obliczenia wykorzystuje się własności spektralne chlorofilu, występującego w zielonych częściach roślin. Barwnik ten maksymalnie absorbuje promieniowanie w zakresie czerwonym (małe wartości odbicia spektralnego), a minimalnie w zakresie podczerwonym (duże wartości odbicia spektralnego) [DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA 1995]). Jest jednak czuły na wpływ atmosfery. Wskaźnik *ARVI* to przekształcony wskaźnik *NDVI* – odbicie w zakresie czerwonym zostało zamienione na odbicie w zakresie niebieskim. Wskaźnik ten nie jest czuły na wpływ atmosfery, ale za to wzmacnia wpływ gleby. Do obliczania wskaźnika *EVI* wykorzystuje się, oprócz wartości odbicia spektralnego zarejestrowanych w zakresie podczerwonym i czerwonym, również wartości zarejestrowane w zakresie niebieskim. Promieniowanie niebieskie jest silnie pochłaniane przez rośliny, a jednocześnie rozpraszane przez aerozole. Zarejestrowane odbicie spektralne w tym zakresie jest mniej czułe na wpływ atmosfery.

Opracowano mapy wskaźników roślinnych *NDVI*, *ARVI* i *EVI*, obliczonych na podstawie zdjęć satelitarnych ENVISAT.MERIS, zarejestrowanych w dwóch terminach (06.05.2008 r. i 01.05.2009 r.) – rysunki 7.–9. Terminy rozpoczęcia wegetacji na wiosnę w tych latach były różne – w 2008 r. wegetacja ruszyła o miesiąc wcześniej niż w 2009 r., co wpłynęło na szybszy rozwój roślinności [GUS 2008; 2009]. Porównując mapy wskaźników roślinnych, można stwierdzić, że obliczone na podstawie zdjęcia zarejestrowanego 06.05.2008 r. wartości ww. wskaźników



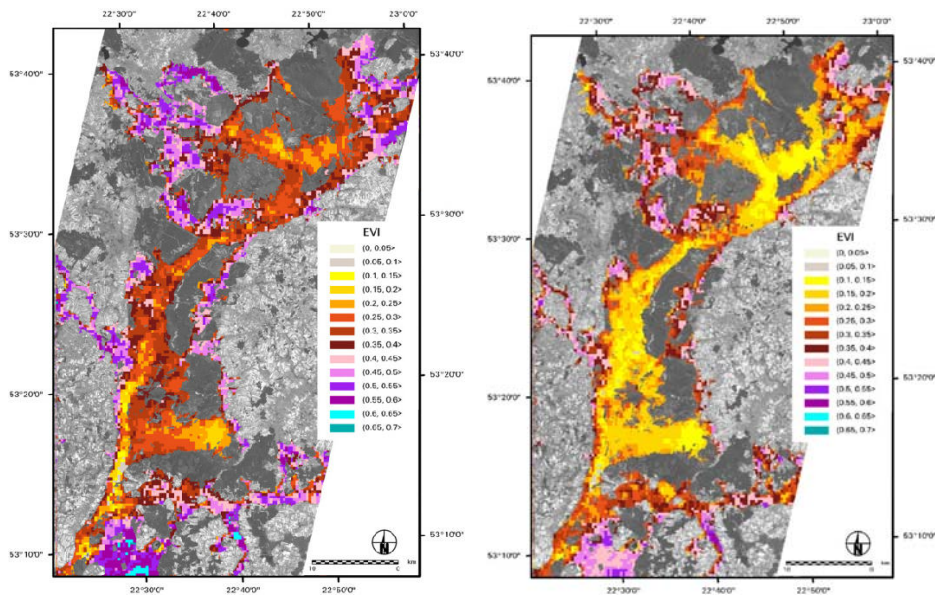
Rys. 7. Mapy wskaźnika *NDVI*, obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych MERIS, zarejestrowanych 06.05.2008 r. (z lewej) i 01.05.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGIK

Fig. 7. Maps of the *NDVI* derived from MERIS images acquired on 06.05.2008 (left) and 01.05.2009 (right); source: IGIK



Rys. 8. Mapy wskaźnika *ARVI*, obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych MERIS, zarejestrowanych 06.05.2008 r. (z lewej) i 01.05.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGIK

Fig. 8. Maps of the *ARVI* derived from MERIS images acquired on 06.05.2008 (left) and 01.05.2009 (right); source: IGIK

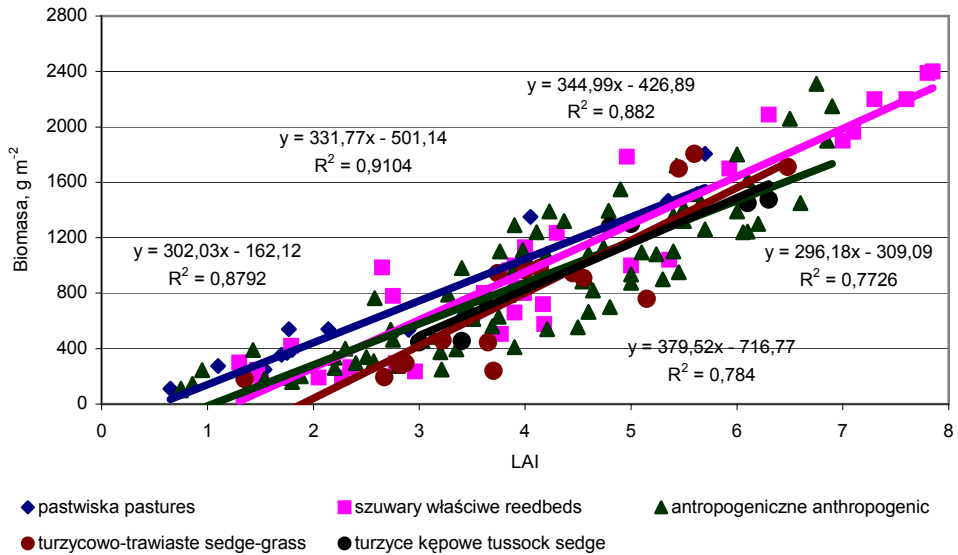


Rys. 9. Mapy wskaźnika *EVI*, obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych MERIS, zarejestrowanych 06.05.2008 r. (z lewej) i 01.05.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

Fig. 9. Maps of the *EVI* derived from MERIS images acquired on 06.05.2008 (left) and 01.05.2009 (right); source: IGiK

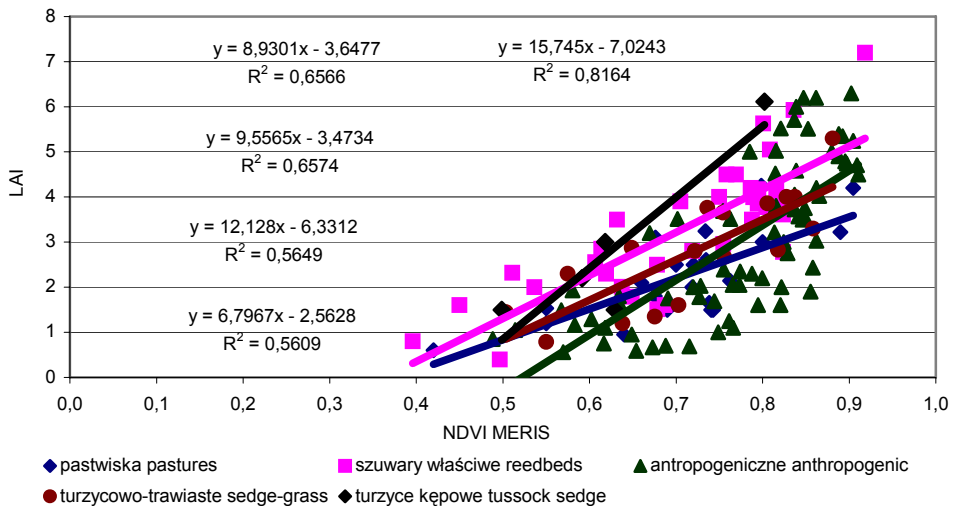
roślinnych są dużo większe od wartości obliczonych na podstawie zdjęcia zarejestrowanego w bardzo zbliżonym terminie, ale rok później, tj. 01.05.2009 r. Wszystkie wskaźniki wykazały różnicę w rozwoju roślinności, ale wskaźnik *ARVI* (rys. 8) najslabiej. Wskaźnik ten, oprócz biomasy, odzwierciedla również warunki wilgotności gleby, które – choć były różne w obu terminach (maj roku 2008 był bardziej mokry od maja roku 2009) – to jednak w obu bardzo mokre.

Analiza treści map wskaźników roślinnych pozwala na monitorowanie stanu wzrostu i rozwoju szaty roślinnej – im większe są wartości wskaźników, tym większa biomasa, gęstość, a więc i wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści – *LAI*, który je odzwierciedla [DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA 2002]. Wykorzystując wyniki pomiarów naziemnych biomasy i *LAI* w różnych zbiorowiskach roślinnych, ustalono ten związek dla poszczególnych zbiorowisk roślinnych, wydzielonych na zdjęciach satelitarnych MERIS (rys. 10). Otrzymano ściśle korelacje między biomasa a wskaźnikiem *LAI*, co potwierdza silny związek między tymi parametrami roślinnymi. Stwarza to możliwość szacowania ilości biomasy i wykonywania map tego parametru z zastosowaniem wskaźnika *LAI*, który, może być obliczany na podstawie zdjęć satelitarnych. Najsilniejsze korelacje *LAI* otrzymano ze wskaźnikiem *NDVI*. Zależności między nimi przedstawiono graficznie dla zbiorowisk roślinnych sklasyfikowanych wg zdjęcia satelitarnego MERIS (rys. 11). Opracowane algorytmy posłużyły do wykonania map rozkładu wskaźnika *LAI* na obszarze badawczym



Rys. 10. Zależności między biomasa a wskaźnikiem *LAI* dla zbiorowisk roślinnych wydzielonych na podstawie zdjęcia satelitarne MERIS; źródło: zbiory IGIK

Fig. 10. Relationships between biomass and *LAI* for plant communities distinguished from MERIS image; source: IGIK



Rys. 11. Zależność między wskaźnikiem *LAI*, zmierzonym w terenie a wskaźnikiem *NDVI* obliczonym na podstawie zdjęć satelitarne MERIS dla klas wydzielonych wg zdjęcia MERIS; źródło: zbiory IGIK

Fig. 11. Relationship between *LAI* measured at the test site and *NDVI* calculated from MERIS images for plant communities distinguished from MERIS image; source: IGIK

(rys. 12). Mapy te obrazują rozkład wskaźnika *LAI*, otrzymany z wykorzystaniem zależności z rysunku 11. do dwóch rejestracji satelitarnych MERIS – 06.05.2008 r. i 01.05.2009 r. Wartości *LAI* są większe średnio o ok. 3 dla zbiorowisk szuwarowych i zaroślowych, a dla pozostałych o 1–2 (wg rys. 6) w terminie z 2008 r. od tych z 2009 r. Mapy te posłużyły również do wykonania map ilości biomasy (rys. 13) z wykorzystaniem zależności zamieszczonych na rysunku 10. Jak wynika z ww. rysunku, w czasie rejestracji w maju 2009 r. zbiorowiska szuwarowe i zaroślowe charakteryzowały się średnią biomasa poniżej $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, pozostałe rzadko przekraczały $600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, natomiast na podstawie rejestracji z maja 2008 r. otrzymano wartości większe średnio o $600\text{--}900 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Wynika to z różnicy terminu rozpoczęcia wegetacji na wiosnę w obu latach.

Mapy *LAI* czy biomasy w granicach wydzielonych ze zdjęć satelitarnych klas zbiorowisk roślinnych można porównywać ze sobą w zbliżonych terminach w różnych latach, jak również w ciągu jednego okresu wegetacyjnego. Zatem monitorowanie ekosystemu obszarów bagiennych poprzez ciągłe kontrolowanie aktualnego stanu pokrycia roślinnego (w ramach możliwych do wydzielenia ze zdjęć satelitarnych klas roślinności), wyrażonego przez *LAI* czy biomasę, jest możliwe na podstawie nie tylko wysokorozdzielczych, ale również średniorozdzielczych (300 m) zdjęć satelitarnych. Ich niewątpliwa zaleta to niski koszt i częsta możliwość pozyskania – co 1–2 dni. Ma to istotne znaczenie w monitoringu przyrodniczym w warunkach Polski, której niebo jest często zachmurzone.

Gęstość strumieni ciepła i ewapotranspiracja. Zakresy podczerwieni termalnej, dostępne na podstawie zdjęć satelitarnych AVHRR.NOAA i TERRA.MODIS, były wykorzystane do obliczania temperatury radiacyjnej powierzchni czynnej. Jej wartości, po dodaniu danych meteorologicznych, takich jak: temperatura powietrza i prędkość wiatru, posłużyły do obliczenia gęstości strumienia ciepła jawnego *H*. Wyniki obliczeń gęstości strumienia ciepła jawnego zostały z kolei zastosowane do obliczenia wartości gęstości strumienia ciepła utajonego *LE*. Do tego celu zastosowano uproszczone równanie bilansu cieplnego, opisujące wymianę energii między roślinami a otoczeniem [DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA 1995]:

$$RN = LE + H + G \quad (4)$$

gdzie:

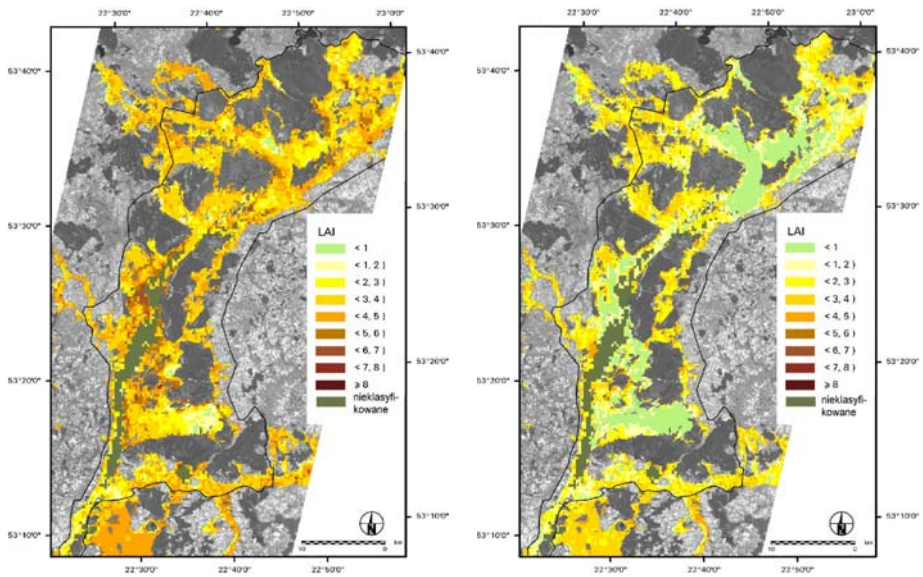
RN – strumień różnicowy promieniowania, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$;

LE – gęstość strumienia ciepła utajonego, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$;

H – gęstość strumienia ciepła jawnego, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$;

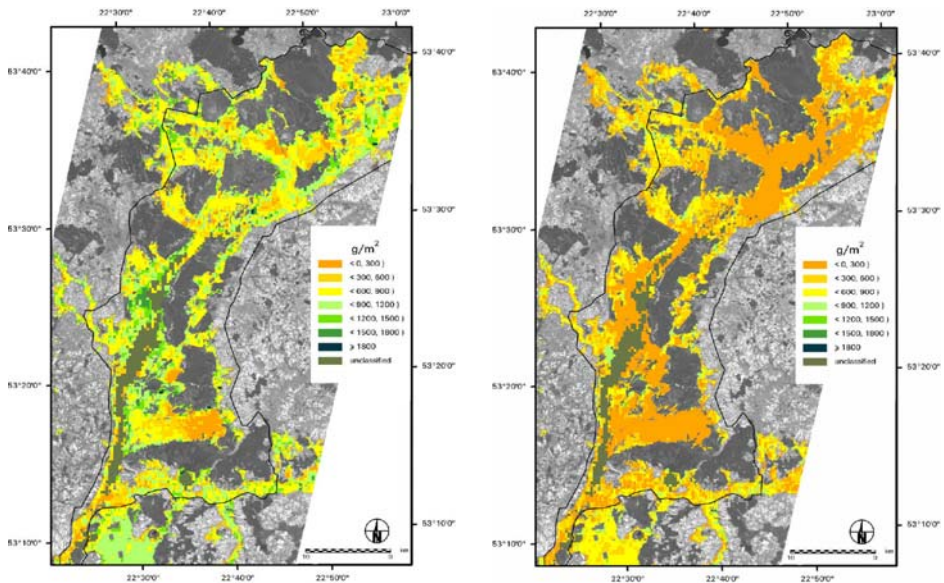
G – gęstość strumienia ciepła wymianianego między powierzchnią czynną a podłożem, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Strumień różnicowy promieniowania *RN* jest mierzony w kilku stacjach w Polsce. Strumień ten mierzono również na obszarze testowym za pomocą własnej stacji przenośnej. W równaniu bilansu cieplnego ilość energii dostarczonej roślinom



Rys. 12. Mapy rozkładu wskaźnika LAI na obszarze badawczym w czasie rejestracji satelitarnej MERIS w dniach: 06.05.2008 r. (z lewej) i 01.05.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

Fig. 12. Maps of LAI distribution at the test site for two MERIS acquisitions: 06.05.2008 (left) and 01.05.2009 (right); source: IGiK



Rys. 13. Mapy rozkładu biomasy na obszarze badawczym w dniach: 06.05.2008 r. (z lewej) i 01.05.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

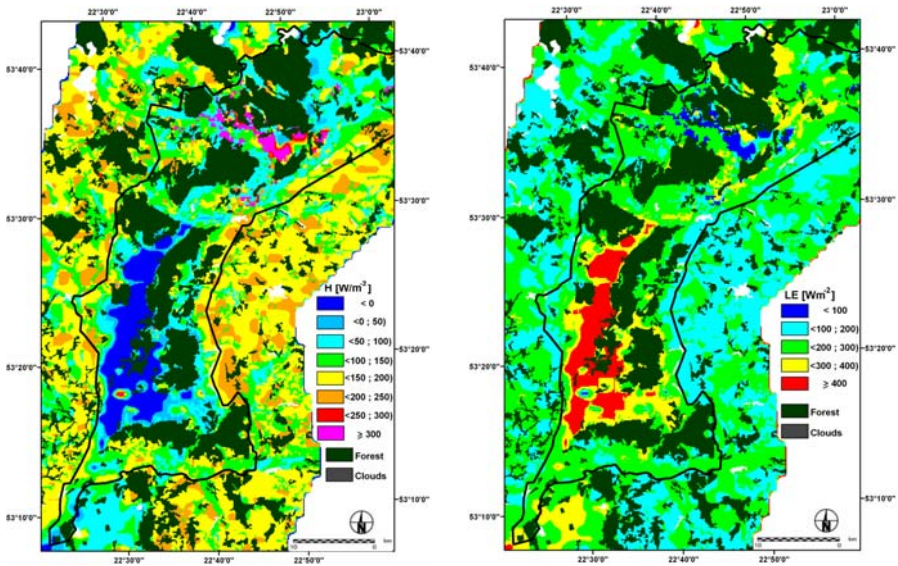
Fig. 13. Maps of biomass distribution at the test site on 06.05.2008 (left) and 01.05.2009 (right); source: IGiK

jest wykorzystywana głównie na zamianę wody w parę wodną, na wytworzenie ciepła jawnego (przepływającego między roślinami i atmosferą w obu kierunkach w zależności od znaku różnicy temperatury) oraz na przepływ ciepła w glebie [DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA 1995].

Opracowano mapy rozkładu obu strumieni z wykorzystaniem zdjęcia satelitarne AVHRR.NOAA, zarejestrowanego 28.04.2009 r. (rys. 14), oraz mapy rozkładu temperatury radiacyjnej i strumienia ciepła utajonego z wykorzystaniem zdjęcia satelitarne TERRA.MODIS, zarejestrowanego 03.06.2006 r. (wartości chwilowe) – rysunek 15. Na podstawie uzyskanych wartości gęstości ciepła utajonego można obliczyć ewapotranspirację w $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ z założeniem, że rejestrowana temperatura radiacyjna traw w chwili rejestracji satelitarnej reprezentuje temperaturę w danej godzinie, pozostałe wartości, tj. temperatura powietrza, strumień różnicowy promieniowania, prędkość wiatru, są wartościami uśrednionymi z godziny. Istnieje również możliwość obliczenia wartości ewapotranspiracji dobowej na podstawie obliczonej chwilowej wartości ewapotranspiracji [DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA 1995].

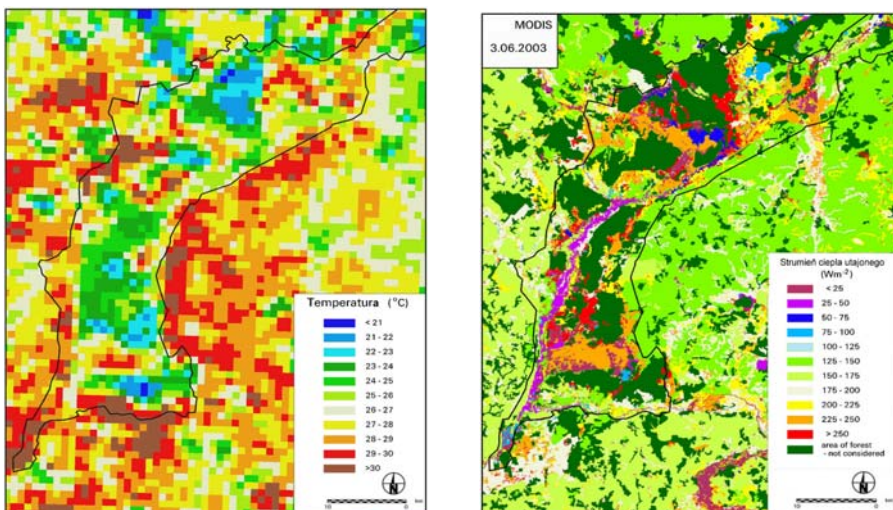
Zastosowanie zdjęć wykonywanych w mikrofalowym zakresie widma. Do badań wykorzystano mikrofalowe zdjęcia satelitarne ENVISAT/ASAR (zakres C) i ALOS.PALSAR (zakres L), zarejestrowane w różnych polaryzacjach fali i pod różnymi kątami jej padania [GRUSZCZYŃSKA 1999]. Przykłady takich zdjęć zamieszczono na rysunku 16.

Obrazy mikrofalowe, wykorzystane w badaniach, przedstawiają rozkład amplitudy sygnału odbitego od badanej powierzchni. Na wartość sygnału mikrofalowego odbitego od badanego obiektu mają wpływ czynniki, związane z konfiguracją systemu: częstotliwość generowanej fali elektromagnetycznej (zakres), typ polaryzacji fali (podłużna pionowa lub pozioma – VV, HH, poprzeczna – HV, VH), kąt padania emitowanej wiązki, mierzony od prostopadłej do badanej powierzchni, oraz czynniki związane z samym obiektem – szorstkość powierzchni i właściwości dielektryczne ściśle związane z zawartością wody. Czynniki związane z konfiguracją systemu radarowego dla danego zdjęcia są stałe, w związku z czym natężenie odbitego promieniowania mikrofalowego zależy od szorstkości i stałej dielektrycznej powierzchni odbijającej. Gdy powierzchnia jest szorstka, odbija padające na nią promieniowanie pod różnymi kątami, co powoduje, że większa jego część powraca do odbiornika. Obiekty o takich powierzchniach są jasne na zdjęciach radarowych. Powierzchnie gładkie odbijają promieniowanie padające w sposób lustrzany, co powoduje, że znikoma jego część wraca do odbiornika. Obiekty o takich powierzchniach są ciemne na zdjęciach radarowych. W praktyce bardzo rzadko spotyka się powierzchnie idealnie gładkie. Można do nich zaliczyć spokojną, niezafalowaną powierzchnię wody. Powierzchnia taka jest na zdjęciu mikrofalowym czarna. Najczęściej jednak mamy do czynienia z powierzchniami o różnym stopniu szorstkości, dlatego zdjęcia radarowe są w różnych odcieniach szarości. Na wielkość sygnału radarowego – oprócz szorstkości badanej powierzchni – ma również wpływ wartość stałej dielektrycznej. Stała ta określa zdolność danego ośrodka do



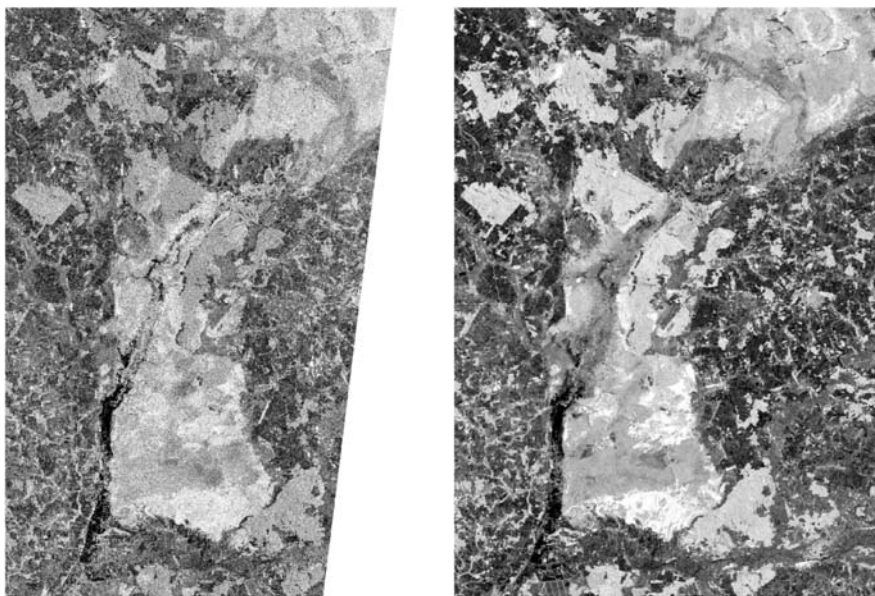
Rys. 14. Mapy rozkładu gęstości strumieni ciepła jawnego H (z lewej) i ciepła utajonego LE (z prawej), obliczonych na podstawie zdjęcia satelitarne AVHRR.NOAA i danych meteorologicznych; źródło: zbiory IGIK

Fig. 14. Maps of sensible heat flux (H , left) and latent heat flux (LE , right) calculated using AVHRR.NOAA image and meteorological data; source: IGIK



Rys. 15. Mapa rozkładu temperatury radiacyjnej, obliczonej na podstawie zdjęcia TERRA.MODIS (z lewej), i rozkładu gęstości strumienia ciepła utajonego LE , obliczonego na podstawie ww. zdjęcia i danych meteorologicznych (z prawej); źródło: zbiory IGIK

Fig. 15. Map of surface temperature distribution calculated from TERRA.MODIS image (left) and map of latent heat flux LE distribution calculated using these data and meteorological data (right); source: IGIK

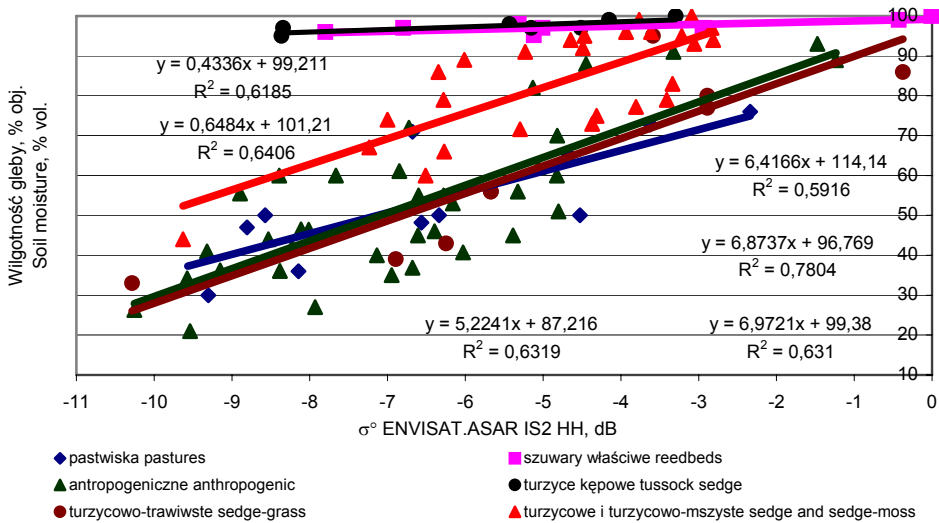


Rys. 16. Zdjęcia mikrofalowe ENVISAT.ASAR IS6 VV, zarejestrowane 26.04.2009 r. (z lewej), i ALOS.PALSAR.FBD HH, zarejestrowane 12.05.2008 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

Fig. 16. Microwave ENVISAT.ASAR IS6 VV image acquired on 26.04.2009 (left) and ALOS.PALSAR.FBD HH image acquired on 12.05.2008 (right); source: IGiK

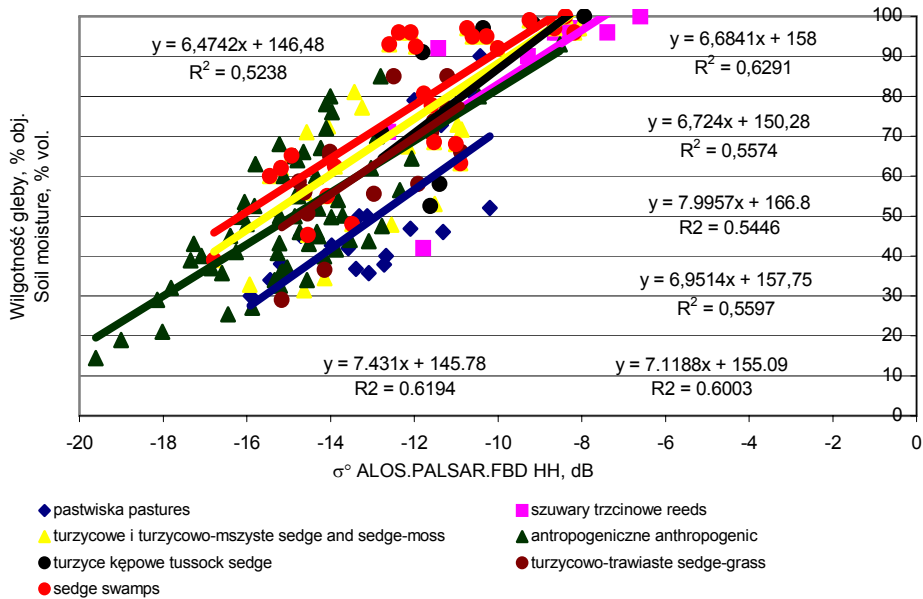
przewodzenia prądu elektrycznego. Dla powietrza wynosi ona ok. 1, dla gleby suchej – 3–5, dla gleby mokrej – 15–30, dla wody – 80. Stała dielektryczna gleby zależy silnie od zawartości w niej wody i w niewielkim stopniu od tekstury gleby – im większa jest wilgotność gleby, tym większa jej stała dielektryczna i w efekcie duże natężenie promieniowania powracającego do anteny odbiornika. Duża jest wtedy również wartość współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (jasny ton na zdjęciu), obliczona na podstawie zarejestrowanego na zdjęciu sygnału mikrofalowego. Mała wartość stałej dielektrycznej oznacza małą wilgotność ośrodka i małe natężenie promieniowania powracającego do anteny odbiornika. Mała jest wtedy również wartość współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (ciemny ton na zdjęciu).

Szacowanie wilgotności gleby. W celu szacowania uwilgotnienia siedlisk bagiennych na podstawie zdjęć satelitarnych, wykonanych w mikrofalowym zakresie promieniowania elektromagnetycznego, niezbędne jest nałożenie na siebie informacji, pochodzących z mapy klasyfikacji siedlisk bagiennych i z mapy współczynnika wstecznego rozpraszania σ° , a następnie zastosowanie algorytmów, opracowanych na podstawie analiz statystycznych wartości wilgotności gleby zmierzonych w terenie i odpowiadających im wartości σ° [GRUSZCZYŃSKA 1998]. Zależności te przedstawiono graficznie (rys. 17–18). Otrzymane korelacje są dość ścisłe, jak na tego typu próby statystyczne (satelitarne z naziemnymi).



Rys. 17. Zależność między wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ^o , obliczonym na podstawie zdjęć mikrofalowych ENVISAT.ASAR IS2 HH; źródło: zbiory IGiK

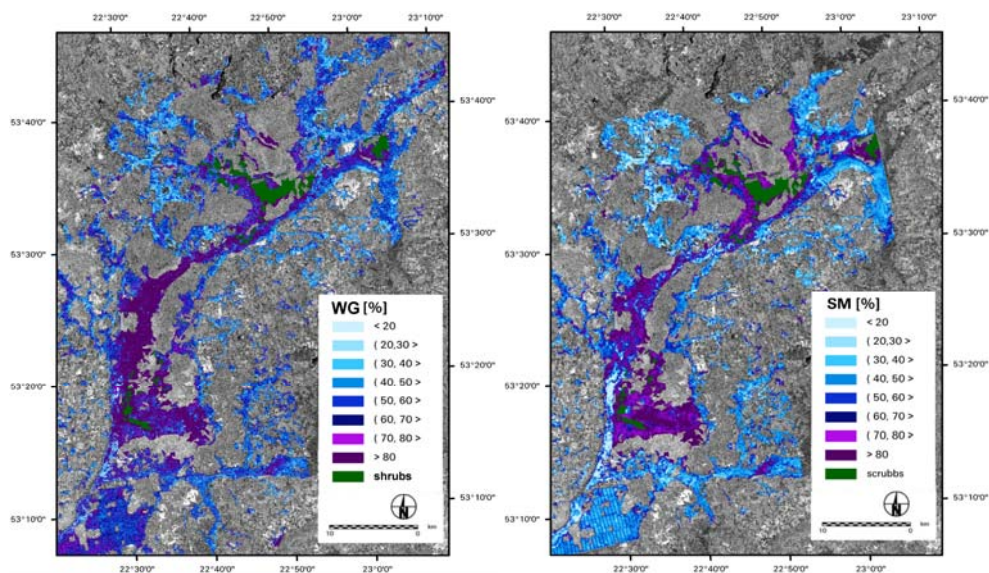
Fig. 17. Relationship between soil moisture and backscattering coefficient σ^o calculated from ENVISAT.ASAR IS2 HH microwave images; source: IGiK



Rys. 18. Zależność między wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ^o , obliczonym na podstawie zdjęć mikrofalowych ALOS.PALSAR.FBD HH; źródło: zbiory IGiK

Fig. 18. Relationship between soil moisture and backscattering coefficient σ^o calculated from ALOS.PALSAR.FBD HH microwave images; source: IGiK

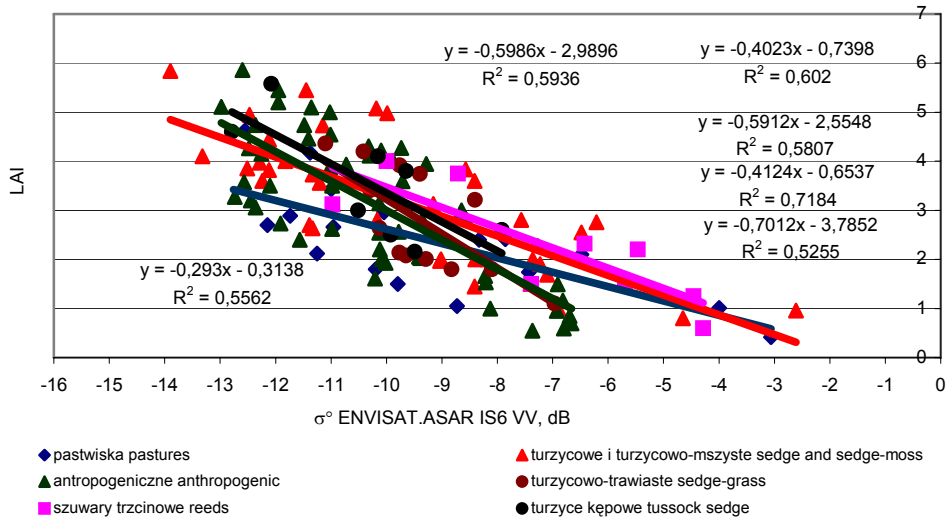
Dla porównania zamieszczono mapy wilgotności gleby z 8 i 12 maja 2008 r., wykonane na podstawie zdjęć ENVISAT.ASAR IS2 HH i ALOS.PALSAR.FBD HH dla zbiorowisk roślinnych, wydzielonych na podstawie zdjęcia ENVISAT.MERIS (rys. 19). Większe o ok. 10% wartości wystąpiły na mapie z wcześniejszego terminu. Porównanie z danymi terenowymi wykazało, że równania wyprowadzone dla takich zdjęć nieznacznie zawyżają wartości wilgotności gleby. Zdjęcia mikrofalowe o dłuższej fali, czyli ALOS.PALSAR, są dokładniejsze do szacowania uwilgotnienia obszarów bagiennych niż zdjęcia o krótszej fali – ENVISAT.ASAR. Analiza treści map wilgotności gleby bagiennych zbiorowisk roślinnych, wykonanych na podstawie zdjęć satelitarnych, pozyskanych w zakresie mikrofalowym, umożliwia wychwycenie zmian uwilgotnienia siedlisk zarówno w ciągu sezonu wegetacyjnego, jak i różnic między poszczególnymi latami.



Rys. 19. Mapy rozkładu wilgotności gleby, opracowane na podstawie zdjęć satelitarnych ENVISAT/ASAR IS2 HH (z lewej) i ALOS.PALSAR.FBD HH (z prawej); źródło: zbiory IGiK

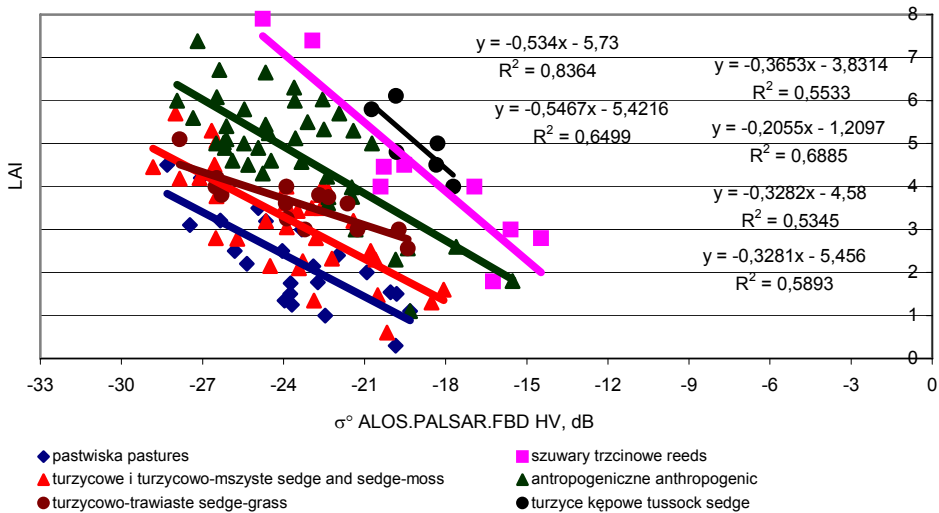
Fig. 19. Maps of soil moisture distribution calculated using ENVISAT/ASAR IS2 HH (left) and ALOS.PALSAR.FBD HH (right) images; source: IGiK

Szacowanie LAI i biomasy. Zdjęcia mikrofalowe zostały również zbadane pod kątem możliwości ich wykorzystania do szacowania wskaźnika *LAI*. Najsilniejsze korelacje otrzymano dla *LAI* ze współczynnikiem σ° , obliczanym na podstawie zdjęć ENVISAT.ASAR IS6, zarejestrowanych w polaryzacji pionowej VV, oraz zdjęć ALOS.PALSAR.FBD, zarejestrowanych w polaryzacji krzyżowej HV. Zależności te przedstawiono graficznie (rys. 20–21).



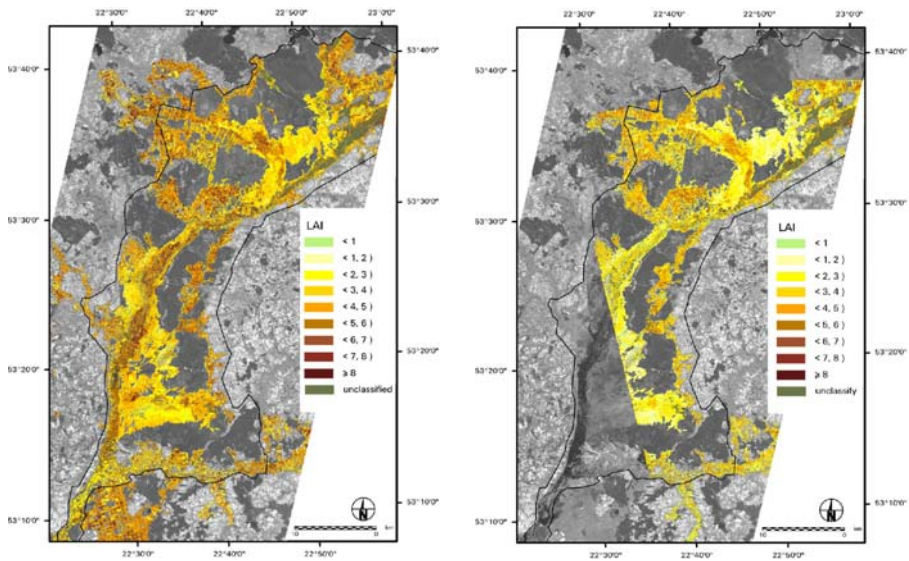
Rys. 20. Zależność między wskaźnikiem LAI , zmierzonym w terenie, a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ^0 obliczonym na podstawie zdjęć mikrofalowych ENVISAT.ASAR. IS6 VV; źródło: IGIK

Fig. 20. Relationship between LAI measured at the test site and backscattering coefficient σ^0 calculated from ENVISAT.ASAR IS6 VV microwave images; source: IGIK



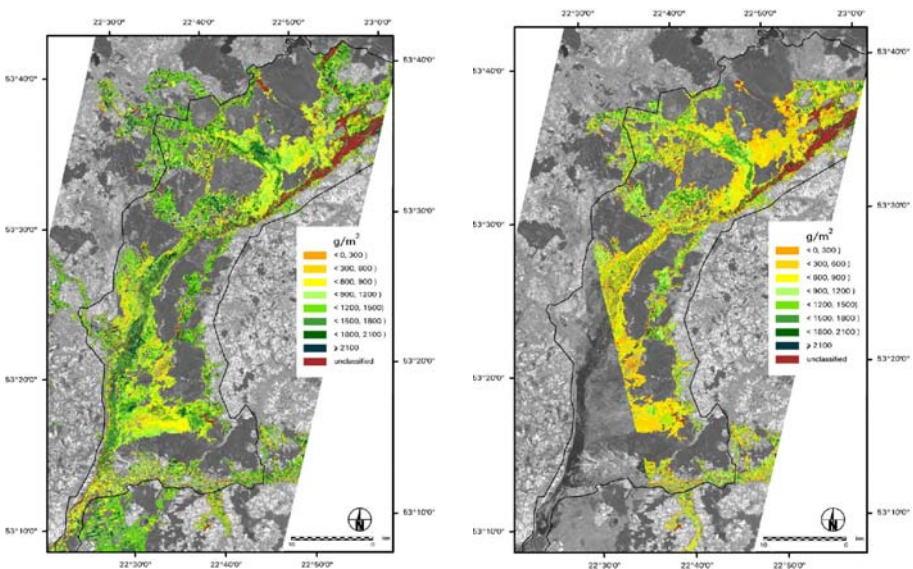
Rys. 21. Zależność między wskaźnikiem LAI , zmierzonym w terenie a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ^0 obliczonym na podstawie zdjęć mikrofalowych ALOS.PALSAR HV; źródło: zbiory IGIK

Fig. 21. Relationship between LAI measured at the test site and backscattering coefficient σ^0 calculated from ALOS.PALSAR HV microwave images; source: IGIK



Rys. 22. Mapy rozkładu wskaźnika LAI na obszarze badawczym, opracowane na podstawie zdjęć satelitarnych ALOS.PALSAR.FBD, zarejestrowanych 12.05.2008 r. (z lewej) i 13.06.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

Fig. 22. Maps of LAI distribution at the test site derived from ALOS.PALSAR.FBD images acquired on 12.05.2008 (left) and 13.06.2009 (right); source: IGiK



Rys. 23. Mapy rozkładu biomasy na obszarze badawczym, w dniach 12.05.2008 r. (z lewej) i 13.06.2009 r. (z prawej); źródło: zbiory IGiK

Fig. 23. Maps of biomass distribution at the test site on 12.05.2008 (left) and 13.06.2009 (right); source: IGiK

Otrzymane zależności zostały zastosowane do wykonania map rozkładu wskaźnika *LAI*. Przedstawiono mapy rozkładu wskaźnika *LAI* w klasach AVNIR-2 na obszarze badawczym dla dwóch rejestracji satelitarnych ALOS.PALSAR. FBD: 12.05.2008 r. i 13.06.2009 r. (rys. 22). Mapy te były podstawą do wykonania map biomasy (rys. 23) z wykorzystaniem zależności z rysunku 10. Zarówno wartości wskaźnika *LAI*, jak i biomasy, oszacowanej z ich zastosowaniem, były większe w maju 2008 r. niż w czerwcu 2009 r. Było to spowodowane miesięczną różnicą początku wegetacji w obu latach [GUS 2008; 2009]. Porównanie map wskaźnika *LAI*, oszacowanego na podstawie zdjęć satelitarnych ENVISAT.MERIS (rys. 12) i ALOS.PALSAR.FBD HV (rys. 22), wykazało różnicę jego wartości, wynoszącą ok. 1, zwłaszcza w zbiorowiskach antropogenicznych. Większe wartości uzyskano w pierwszym przypadku. Było to spowodowane tygodniową różnicą rejestracji satelitarnej, a więc i wegetacji roślin, która przebiegała w niezwykle korzystnych w tym czasie warunkach agrometeorologicznych [GUS 2008]. Analiza treści map biomasy (czy *LAI*) umożliwia monitorowanie obszarów bagiennych pod kątem bilansu węgla i przyrostu biomasy.

PODSUMOWANIE

Obecnie istnieje potrzeba monitorowania Bagien Biebrzańskich w celu ochrony unikalnych walorów przyrodniczych i ekologicznych tego ekosystemu. W badaniach należy wykorzystywać nowe metody, oferowane przez współczesną technikę satelitarną, umożliwiającą kompleksowe, powtarzalne pomiary, wykonywane jednocześnie na dużych obszarach, często trudno dostępnych. Proponowana metoda monitorowania obszarów bagiennych poprzez szacowanie biomasy i uwilgotnienia różnych zbiorowisk roślinnych na podstawie zdjęć satelitarnych, wykonywanych w mikrofalowym i optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego, pozwala na wychwycenie zmian ilościowych i jakościowych w ekosystemie bagiennym. Z uwagi na niezwykle dynamizm siedlisk bagiennych i ich różnorodność biologiczną informacje te mogą być wykorzystane do planowania działań, zmierzających do ochrony ekosystemu przed degradacją. Proponowane metody teledetekcyjne monitorowania siedlisk bagiennych mogą być stosowane nie tylko w odniesieniu do obszaru Kotliny Biebrzańskiej, ale również innych europejskich ekosystemów bagiennych.

LITERATURA

- BANASZUK H, SZUNIEWICZ J., BIENIEK B., CHRZANOWSKI S., JAROS H. 2000. Plan ochrony. Operat: Ochrona zasobów i walorów przyrody nieożywionej i gleb. Maszynopis. BNP.
- BARTOSZUK H. 2005. Zbiorowiska roślinne Biebrzańskiego Parku Narodowego. W: Przyroda Biebrzańskiego Parku Narodowego. Pr. zbior. Red. A. Dyrz, C. Werpachowski. Osowiec Twierdza. BPN s. 133–148.

- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K. 1995. Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA. *Prace Geograficzne IGIiPZ PAN*. Nr 165 ss. 82.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., GRUSZCZYŃSKA M., STANKIEWICZ K., HOŚCIŁO A. 2002. Dane satelitarne pozyskiwane w widmie optycznym i mikrofalowym jako źródło informacji o bilansie wodnym dla basenu rzeki Biebrzy. W: *Fotogrametria i teledetekcja w społeczeństwie informacyjnym. Materiały Ogólnopolskiego Sympozjum Naukowego*. Białobrzegi k/W-wy. Warszawa. PW Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji. Vol. 12a s. 85–95.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., BUDZYŃSKA M., LEWINSKI St., HOŚCIŁO A., BOJANOWSKI J. 2009a. Application of remote and in situ information to the management of wetlands in Poland. *Journal of Environmental Management*. No. 90 s. 2261–2269.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., BUDZYŃSKA M., KOWALIK W., MALEK I., TURLEJ K., BOCHENEK Z. 2009b. Soil moisture and evapotranspiration of wetlands vegetation habitats retrieved from satellite images. W: *Earth observation and water cycle science, towards a water cycle multi-mission Observation Strategy*. Proc. ESA Conference. Frascati (Rome), Italy. ESA SP-674, January 2010. P7 s. 1–8.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., BUDZYŃSKA M., KOWALIK W., MALEK I., TURLEJ K. 2010. Characterizing status of selected ecosystems using optical and microwave remote sensing data. Proc. ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway. ESA SP-686, December 2010. Wetlands s. 1–8
- DEMBEK W., OŚWIT J., RYCHARSKI M. 2005. Torfowiska i torfy w Pradolinie Biebrzy. W: *Przyroda Biebrzańskiego Parku Narodowego*. Pr. zbior. Red. A. Dyrzcz, C. Werpachowski. Osowiec Twierdza. BPN s. 33–58.
- GRUSZCZYŃSKA M., DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K. 1998. Application of microwave images from European Remote Sensing Satellites (ERS-1/2) for soil moisture estimates. *Journal of Water and Land Development*. No. 2 s. 7–18.
- GRUSZCZYŃSKA M. 1999. Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych. *Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji*. Nr 29 s. 23–33.
- GUS 2008. Wynikowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich. *Informacja sygnalna*. Warszawa ss. 31.
- GUS 2009. Wynikowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich. *Informacja sygnalna*. Warszawa ss. 32.
- KAUFMAN Y.J., TANRE D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 30 no. 2 s. 261–270.
- LIU H.Q., HUETE A.R. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 33 ss. 457–465.
- MATUSZKIEWICZ A. 1990. Biebrzański Park Krajobrazowy. Atlas. Osowiec Twierdza. BPN.
- OKRUSZKO H., SZUNIEWICZ J., KAMIŃSKI J., CHRZANOWSKI S. 1996. Charakterystyka środowiska oraz zakres potrzeb jego renaturyzacji w Basenie Środkowym Biebrzy. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 432 s. 9–32.
- OŚWIT J. 1991. Łąkowe zbiorowiska roślinne Bagien Biebrzańskich na tle warunków siedliskowych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 372 s. 297–333.
- TUCKER C.J., SELLERS P.J. 1981. Satellite remote sensing of primary productivity. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 7 s. 1395–1416.
- ULABY F.T. 1982. Radar signatures of terrain: Useful monitors of renewable resources. *Proc. of the IEEE*. Vol. 70 no. 12 s. 1410–1428.
- ULABY F.T. 1998. SAR biophysical retrievals: lesson learned and challenges to overcome. *Proc. of Second International Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications*. ESTEC. Norwijk, The Netherlands s. 19–25.

Maria BUDZYŃSKA, Katarzyna DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA,
Konrad TURLEJ, Iwona MAŁEK, Maciej BARTOLD

MONITORING OF THE BIEBRZA WETLANDS USING REMOTE SENSING METHODS

Key words: biomass, evapotranspiration, heat budget equation, LAI, remote sensing, soil moisture

S u m m a r y

This study was carried out in the Biebrza Valley, a NATURA 2000 and Ramsar Convention site situated in Northeast Poland. This paper presents monitoring and mapping of various soil-vegetation variables using optical and microwave satellite data. Satellite data used in the study included: ENVISAT ASAR and MERIS; ALOS PALSAR, AVNIR-2, and PRISM; NOAA.AVHRR; Terra ASTER and MODIS; Landsat ETM+. Optical images were used for classification of wetland communities and calculation of vegetation indices. Latent Heat Flux (*LE*) was estimated from NOAA. AVHRR and meteorological data and soil moisture index was calculated as the ratio of Sensible Heat Flux (*H*) to *LE*. Parallel to satellite observations the soil-vegetation variables were measured at the test site. Data from optical and microwave satellite images and soil-vegetation field measurements were analysed to develop methods for the Leaf Area Index (*LAI*), biomass, and soil moisture assessment over wetlands. Monitoring and mapping of various soil-vegetation variables is very important part of better management and protection of wetland areas. Presented results allow for monitoring and mapping soil-vegetation parameters of wetlands and their changes over time. The methodology developed is suitable for applications in the system of wetland monitoring in Europe. The studied areas can be perceived as a reference for other wetlands.

Recenzenci:

prof. dr hab. Henryk Banaszuk
dr Hubert Piórkowski

Praca wpłynęła do Redakcji 28.02.2011 r.