

ZASTOSOWANIE WYSOKOROZDZIELCZYCH ZOBRAZOWAŃ
SATELITARNYCH TERRA ASTER
W BADANIACH TERMIKI POWIERZCHNI ZIEMI

Jakub Wojkowski

Katedra Meteorologii i Klimatologii Rolniczej, Wydział Inżynierii Środowiska, Akademia Rolnicza
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail: rmwojkow@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania w badaniach klimatologicznych satelitarnych obrazów termalnych. Badania przestrzennego zróżnicowania warunków termicznych wykonano na przykładzie obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego (OPN) położonego w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. W pracy zwrócono uwagę na integrację teledetekcji satelitarnej z Geograficznymi Systemami Informacyjnymi (GIS), która dostarcza aktualnej i bardzo precyzyjnej informacji tematycznej pozyskiwanej zdalnymi metodami oraz stwarza możliwość przeprowadzania wielu analiz przestrzennych dzięki wykorzystaniu nowoczesnego specjalistycznego oprogramowania. Analizy spektralne oraz przestrzenne wykonano w oparciu o wielospektralne zdjęcia satelity środowiskowego Terra ASTER. Na ich podstawie, dla testowego obszaru badań, sporządzono mapy temperatury radiacyjnej powierzchni Ziemi z rozdzielczością przestrzenną 90 m·piksel⁻¹. Zdjęcia satelitarne posłużyły ponadto do stworzenia mapy użytkowania i pokrycia terenu. Obliczono również znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI, który wykorzystano do zbadania zależności pomiędzy temperaturą radiacyjną a rodzajem pokrycia i użytkowania terenu. Analiza satelitarnych obrazów termalnych wykazała istotne związki pomiędzy typem użytkowania i pokryciem terenu a temperaturą radiacyjną powierzchni Ziemi.

Słowa kluczowe: temperatura radiacyjna, teledetekcja satelitarna, NDVI, Terra ASTER, Geograficzne Systemy Informacyjne (GIS), Ojcowski Park Narodowy (OPN)

WSTĘP

W ostatnich latach, wśród badaczy reprezentujących różne dyscypliny naukowe, obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania teledetekcją satelitarną, jako źródła informacji o środowisku przyrodniczym. Zdjęcia satelitarne współcześnie stanowią podstawowe źródło danych dla większości projektów naukowych, a poważne badania klimatologiczne często bazują wyłącznie na obserwacjach satelitar-

nych. Wzrostowi zainteresowania teledetekcją sprzyja coraz łatwiejsza dostępność zdjęć satelitarnych wynikająca ze wzrostu liczby satelitów środowiskowych. Zwiększona rozdzielczość radiometrów instalowanych na nowych satelitach oraz większa liczba dostawców i dystrybutorów zdjęć wpłynęła na obniżenie ich cen. Duże znaczenie ma również rozwój technologii informatycznych i sieci Internet, za pośrednictwem której odbywa się obecnie dystrybucja zdjęć oraz istnieje możliwość ich przeglądania i dokonania wstępnej oceny.

Doskonałym narzędziem do gromadzenia oraz analizy danych przestrzennych są Geograficzne Systemy Informacyjne (GIS). Pod pojęciem GIS należy rozumieć odpowiednio skonfigurowaną bazę danych przestrzennych oraz procedury, czyli oprogramowanie umożliwiające przeprowadzenie analiz przestrzennych. Systemy te pozwalają nie tylko na wizualizację zgromadzonych zdjęć satelitarnych w postaci map, ale umożliwiają również wykonanie analiz zarówno spektralnych jak i przestrzennych.

Głównym celem niniejszej pracy było przedstawienie rozkładu przestrzennego zróżnicowania temperatury radiacyjnej powierzchni Ziemi oraz ocena wpływu typu zabudowy i użytkowania terenu na kształtowanie się warunków termicznych badanego obszaru. Zwrócono również uwagę na przydatność zdjęć satelitów środowiskowych oraz narzędzi GIS w badaniach topoklimatycznych. Badania przestrzennego zróżnicowania warunków termicznych wykonano na przykładzie obszaru Ojcowskiego Parku Narodowego (OPN) położonego w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej.

MATERIAŁY I METODY

W polskiej literaturze klimatologicznej z zakresu termiki powierzchni Ziemi niewiele jest prac opartych na badaniach wykorzystujących metody teledetekcji satelitarnej (Błażejczyk 2002, Osinska-Skotak, Madany 1998, Struzik 1999). Większość dotychczasowych prac powstała głównie na podstawie analizy zdjęć wykonanych przez radiometr AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) satelitów meteorologicznych serii NOAA o rozdzielczości przestrzennej około $1100 \text{ m} \cdot \text{piksel}^{-1}$. W niniejszej pracy wykorzystano wielospektralne zdjęcia wykonane przez czternastokanałowy radiometr ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) umieszczony na pokładzie satelity środowiskowego Terra.

Satelita Terra został wystrzelony przez NASA 18 grudnia 1999 roku i ma za zadanie monitorować zmiany zachodzące na powierzchni naszej planety. Satelita ten jest jednym z elementów międzynarodowego Systemu Obserwacji Ziemi (EOS). Okrążając Ziemię na wysokości około 705 km, satelita Terra przelatuje nad tym samym obszarem co 16 dni. Na jego pokładzie znajdują się sensory

CERES, MISR, MODIS, MOPITT oraz ASTER. Ten ostatni obrazuje Ziemię w zakresie podczerwieni, w 14 kanałach pogrupowanych w trzy zakresy: bliska podczerwień, krótkofalowa podczerwień i podczerwień termalna. Rozdzielczość przestrzenna obrazów zarejestrowanych przez radiometr ASTER jest nieporównywalnie większa od skanerów zainstalowanych na satelitach meteorologicznych i zmienia się od 15 m·piksel⁻¹ w kanałach obejmujących promieniowanie widzialne, przez 30 m·piksel⁻¹ w kanałach podczerwonych do 90 m·piksel⁻¹ w kanałach termalnych (tab. 1).

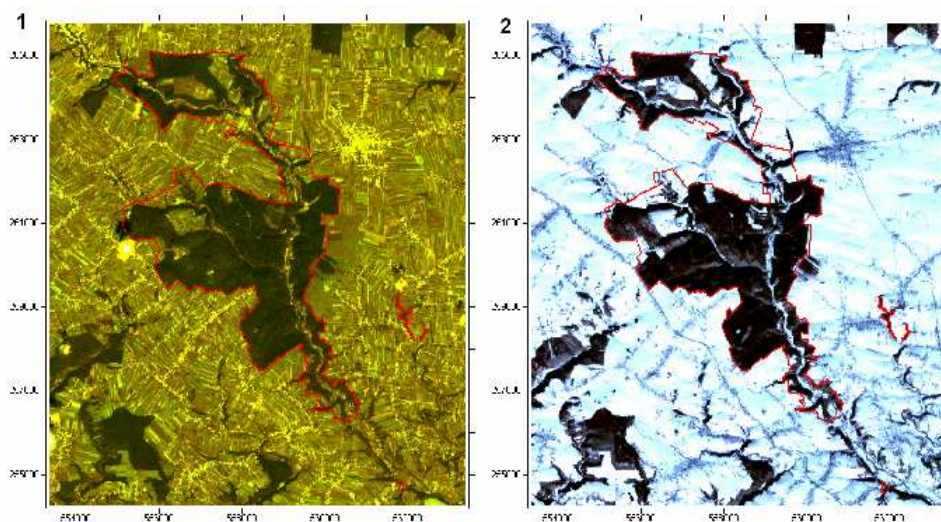
Tabela 1. Kanały spektralne radiometru ASTER
Table 1. Spectral bands of ASTER radiometer

Pasmo Subsystem	Kanał Band	Zakres promieniowania Spectral range (μm)	Rozdzielczość przestrzenna Spatial resolution (m·piksel ⁻¹)
VNIR	1	0,520-0,600	15
	2	0,630-0,690	
	3N	0,780-0,860	
SWIR	4	1,600-1,700	30
	5	2,145-2,185	
	6	2,185-2,225	
	7	2,235-2,285	
	8	2,295-2,365	
	9	2,360-2,430	
TIR	10	8,125-8,475	90
	11	8,475-8,825	
	12	8,925-9,275	
	13	10,25-10,95	
	14	10,95-11,65	

Do badań przestrzennego zróżnicowania warunków termicznych powierzchni Ziemi wykorzystano dwa zdjęcia satelitarne, które zostały zarejestrowane przez radiometr ASTER w różnych porach roku (rys. 1). Oba zdjęcia wykonane zostały około godziny 10⁰⁰ czasu UTM. Pierwsze zdjęcie pochodzi z okresu lata i wykonane zostało 6 lipca 2001 roku. W chwili rejestracji zdjęcia zachmurzenie nieba wynosiło 4%. Polska południowa znajdowała się wówczas w zasięgu obszaru

wysokiego ciśnienia (klin antycyklonalny), w ciepłym powietrzu polarno-kontynentalnym (PPk). Masa tego powietrza napłynęła z umiarkowanych szerokości Eurazji i uformowała pogodę suchą i słoneczną. Drugie zdjęcie pochodzi z okresu zimy i wykonane zostało 6 marca 2004 roku. Zachmurzenie nieba wynosiło w tym dniu 0%. Polska południowa znajdowała się wówczas w centrum obszaru wysokiego ciśnienia (sytuacja centralna antycyklonalna), w bardzo chłodnym i czystym powietrzu polarno-kontynentalnym (PPk). Masa tego powietrza uformowała pogodę bezchmurną i bardzo mroźną.

Ze względu na brak na zdjęciach informacji spektralnej z zakresu promieniowania widzialnego niebieskiego, obszar badań pokazany na rysunku 1 przedstawiony został w kolorach fałszywych. Dzięki komputerowemu przetworzeniu obrazu, barwy te są zbliżone do naturalnych. Wykorzystane w niniejszej pracy zdjęcia satelitarne udostępnione zostały Autorowi przez NASA Earth Observing System.



Rys. 1. Obszar badań na zdjęciach satelitarnych Terra ASTER: (1) – obraz z okresu lata 6.07.2001, (2) – obraz z okresu zimy 6.03.2004

Fig. 1. Area of interest in Terra ASTER satellite images: (1) – summer time 6.07.2001. (2) – winter time 6.03.2004

Po wykonaniu korekcji zniekształceń geometrycznych i radiometrycznych surowych zdjęć satelitarnych, z całego zdjęcia wycięto fragment dotyczący obszaru badań. Następnie wybierając odpowiednie kanały spektralne, wygenerowano mapy temperatury radiacyjnej, mapy znormalizowanego współczynnika wegetacji NDVI oraz mapę pokrycia i użytkowania terenu.

Mapa temperatury radiacyjnej

Do wyznaczenia temperatury radiacyjnej powierzchni Ziemi posłużono się kanałami termalnymi TIR o rozdzielczości przestrzennej $90 \text{ m} \cdot \text{piksel}^{-1}$ obejmującymi zakres promieniowania podczerwieni termalnej ($8,1\text{-}11,6 \mu\text{m}$). W tym celu przeprowadzono konwersję zarejestrowanych przez detektor satelity 16-bitowych wartości liczbowych DN na promieniowanie podczerwieni termalnej R_{TIR} zgodnie z poniższym równaniem (Abrams, Hook 2001):

$$R_{\text{TIR}} = (DN - 1) \cdot UCC$$

gdzie: R_{TIR} – promieniowanie TIR zarejestrowane przez sensor satelity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), DN – 16-bitowa wartość liczbową zapisaną na zdjęciu, UCC – współczynnik przeliczeniowy dla danego kanału spektralnego.

Następnie stosując prawo Plancka przeliczono zarejestrowane przez detektor satelity promieniowanie podczerwieni termalnej R_{TIR} na wartości temperatury radiacyjnej T . Obliczenia wykonano zgodnie z poniższym równaniem (Alley, Jentoft-Nilsen 1999):

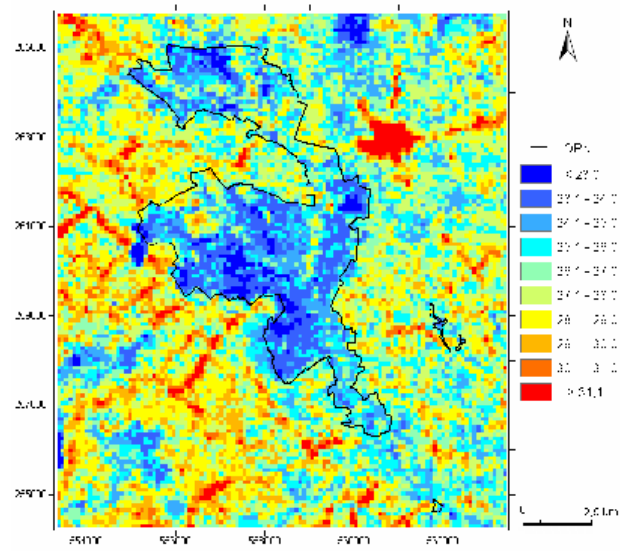
$$T = K_2 / \ln(K_1 / R_{\text{TIR}} + 1)$$

gdzie: R_{TIR} – promieniowanie zarejestrowane przez sensor satelity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),
 K_1 – stała kalibracyjna $K_1 = 2\pi \cdot c^2 \cdot h / \lambda^5$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),
 K_2 – stała kalibracyjna $K_2 = h \cdot c / k \cdot \lambda$ (K),
 k – stała Boltzmanna $1,380 \cdot 10^{-23}$ ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$),
 h – stała Plancka $6,626 \cdot 10^{-34}$ (J·s),
 c – prędkość światła $2,998 \cdot 10^8$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 λ – długość fali (m).

Wynik obliczeń w postaci map zróżnicowania przestrzennego temperatury radiacyjnej powierzchni badanego obszaru przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Na mapach tych każdemu pikselowi reprezentującemu powierzchnię $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ (8100 m^2) odpowiada konkretna wartość temperatury radiacyjnej wyrażona w °C.

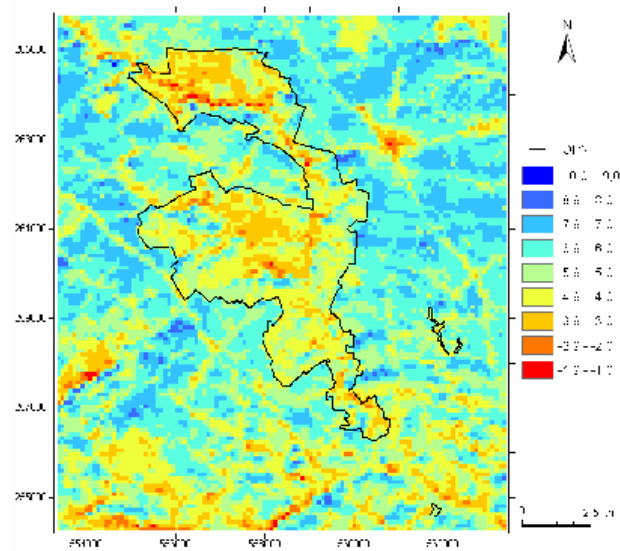
Mapa użytkowania i pokrycia terenu

Do określenia wpływu użytkowania i pokrycia terenu na kształtowanie się warunków termicznych badanego obszaru zaistniała potrzeba sporządzenia odpowiedniej mapy tematycznej. W tym celu skorzystano z obrazów zarejestrowanych w kanałach bliskiej podczerwieni VNIR o rozdzielczości przestrzennej $15 \text{ m} \cdot \text{piksel}^{-1}$. Obrazy te poddano klasyfikacji nadzorowanej (ERDAS Field Guide 1998) i wydzielono 6 klas użytkowania i pokrycia terenu (rys. 4).



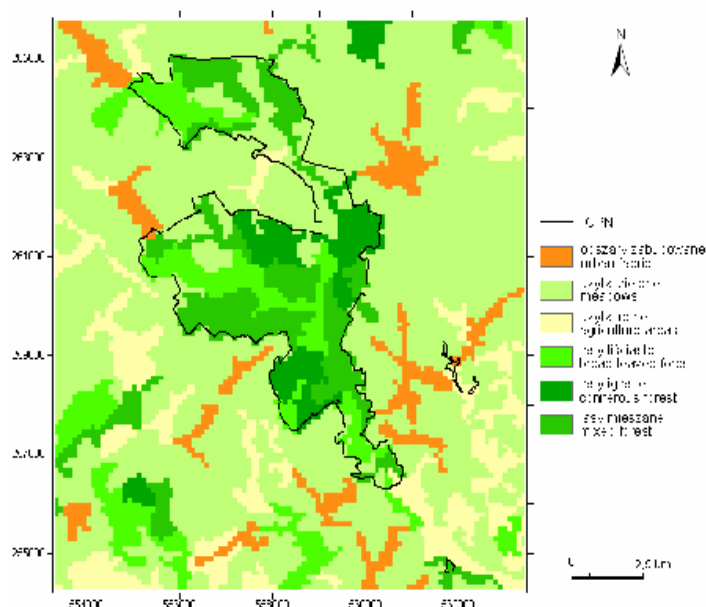
Rys. 2. Temperatura radiacyjna powierzchni Ziemi (°C) w lecie w dniu 6.07.2001

Fig. 2. Brightness surface temperature (°C) in summer 6.07.2001



Rys. 3. Temperatura radiacyjna powierzchni Ziemi (°C) w zimie w dniu 6.03.2004

Fig. 3. Brightness surface temperature (°C) in winter 6.03.2004



Rys. 4. Użytkowanie i pokrycie obszaru badań
Fig. 4. Land use and land cover in area of interest

Mapa znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji NDVI

W analizie zróżnicowania pola temperatury radiacyjnej bardzo przydatną informacją jest znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Wskaźnik NDVI jest wielkością bezwymiarową informującą o stanie wegetacji i stopniu pokrycia terenu przez roślinność. Pośrednio związany jest również z ewapotranspiracją oraz wilgotnością powierzchni Ziemi. Jego wartości zawierają się w przedziale od $-1,0$ (obszary pozbawione roślinności) do $1,0$ (obszary z roślinnością zieloną fotosyntetycznie czynną).

Chlorofil zawarty w roślinach silnie absorbuje promieniowanie fotosyntetycznie czynne z zakresu bliskiej podczerwieni, które jest rejestrowane przez radiometr ASTER w kanale 2 ($0,63-0,69 \mu\text{m}$). Słabo natomiast pochłania promieniowanie słoneczne z zakresu widzialnego czerwonego, które rejestrowane jest w kanale 3N ($0,78-0,86 \mu\text{m}$). W związku z powyższym wskaźnik NDVI obliczono zgodnie z poniższym równaniem (Chrysoulakis 2002):

$$NDVI_{ASTER} = (3N - 2) / (3N + 2)$$

gdzie: $NDVI_{ASTER}$ – znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji,

2 – kanał drugi radiometru ASTER (0,63-0,69 μm),

3N – kanał trzeci radiometru ASTER (0,78-0,86 μm),

Konwersję zarejestrowanych przez detektor satelity 8-bitowych wartości liczbowych DN na promieniowanie bliskiej podczerwieni VNIR R_{VNIR} przeprowadzono podobnie jak w przypadku kanałów termalnych TIR zgodnie z poniższym równaniem (Abrams, Hook 2001):

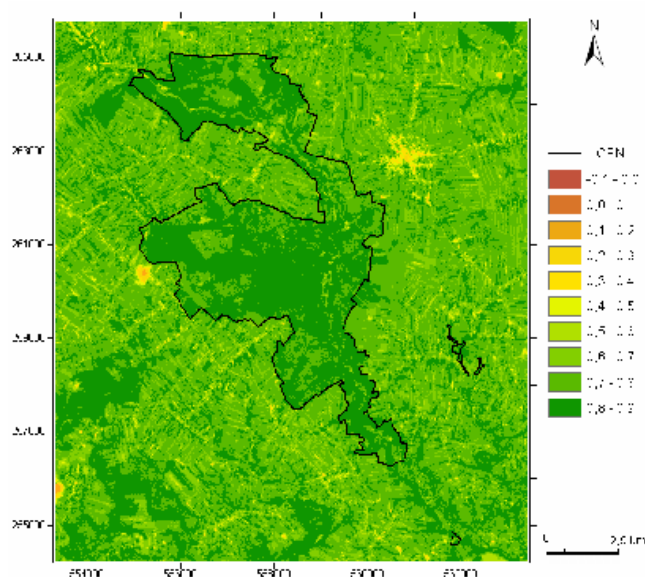
$$R_{VNIR} = (DN - 1) \cdot UCC$$

gdzie: R_{VNIR} – promieniowanie VNIR zarejestrowane przez satelitę ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),

DN – 8-bitowa wartość liczbową zapisana na zdjęciu

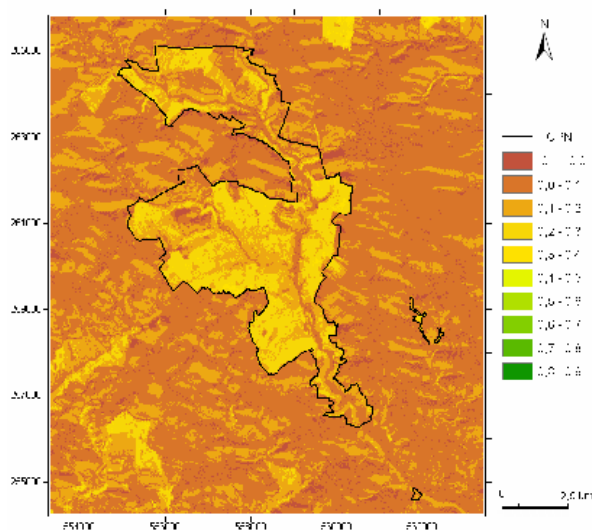
UCC – współczynnik przeliczeniowy dla danego kanału spektralnego

Wynik obliczeń w postaci map zróżnicowania wskaźnika NDVI na badanym obszarze przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Na mapach tych każdemu pikselowi reprezentującemu powierzchnię 15 m x 15 m (225 m²) odpowiada konkretna wartość wskaźnika NDVI.



Rys. 5. Wskaźnik wegetacji NDVI na obszarze badań w lecie w dniu 6.07.2001

Fig. 5. NDVI index in area of interest in summer, 6.07.2001



Rys. 6. Wskaźnik wegetacji NDVI na obszarze badań w zimie w dniu 6.03.2004
Fig. 6. NDVI index in area of interest in winter, 6.03.2004

WYNIKI

Sporządzone mapy temperatury radiacyjnej powierzchni Ziemi (rys. 2 i 3) świadczą o jej dużym zróżnicowaniu przestrzennym. W lecie, różnica pomiędzy najcieplejszym a najchłodniejszym miejscem badanego obszaru wyniosła $21,0^{\circ}\text{C}$, a średnia obszarowa $27,0^{\circ}\text{C}$. W zimie różnica ta była już znacznie mniejsza i wynosiła $7,7^{\circ}\text{C}$, a średnia obszarowa $-5,7^{\circ}\text{C}$. Duże kontrasty termiczne na stosunkowo małym obszarze badań ($10,3\text{ km} \times 11,7\text{ km}$) wynikają przede wszystkim ze sposobu użytkowania i rodzaju pokrycia terenu (rys. 4).

Wykazane na podstawie zdjęć satelitarnych zróżnicowanie warunków termicznych tego obszaru jest potwierdzeniem wcześniejszych wyników badań na podstawie pomiarów naziemnych (Olechnowicz-Bobrowska, Wojkowski 2006, Wojkowski 2004, Wojkowski, Olechnowicz-Bobrowska 2004, Wojkowski, Skowera 2004).

W celu określenia wpływu użytkowania i pokrycia terenu na kształtowanie się warunków termicznych badanego obszaru wykonano maskowanie mapy temperatury radiacyjnej za pomocą wydzielonych klas użytkowania i pokrycia terenu. Następnie odszukano najniższą i najwyższą temperaturę w każdej analizowanej klasie oraz policzono ich wartości średnie (tab. 2).

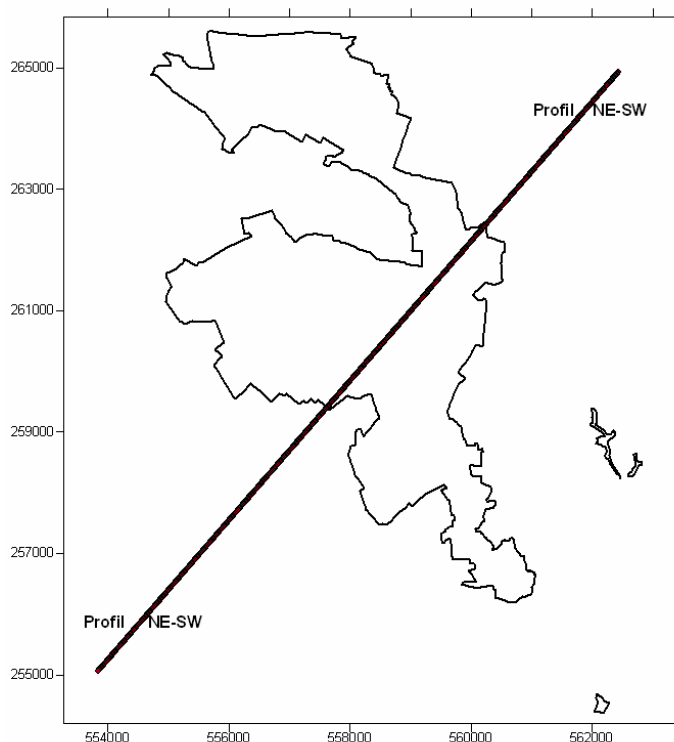
Tabela 2. Średnie i skrajne wartości temperatury radiacyjnej w klasach użytkowania terenu
Table 2. Mean and extreme brightness temperature values in land use classes

Użytkowanie terenu Land use and land cover	Temperatura radiacyjna – Brightness temperature (°C)					
	Lato – Summer 6.07.2001			Zima – Winter 6.03.2004		
	min	max	średnia – mean	min	max	średnia – mean
Tereny zabudowane Urban fabric	24,6	42,1	31,6	-8,3	-1,9	-4,9
Użytki zielone Meadows	22,5	37,1	26,7	-8,6	-1,7	-6,2
Użytki rolne Agriculture areas	23,7	32,6	27,6	-7,2	-3,6	-5,5
Lasy liściaste Broad-leaved forest	22,2	29,3	24,9	-8,3	-1,2	-4,2
Lasy iglaste Coniferous forest	22,2	31,2	24,5	-8,1	-2,9	-4,8
Lasy mieszane Mixed forest	21,1	30,2	24,6	-8,9	-2,0	-4,8

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 2, w lecie najwyższe temperatury radiacyjne związane były z terenami zabudowanymi i wynosiły średnio 31,6°C. W porównaniu do terenów zabudowanych na użytkach rolnych temperatury były niższe średnio o 4,0°C, a na użytkach zielonych o prawie 5,0°C. Najniższe temperatury radiacyjne dotyczyły zbiorowisk leśnych i wynosiły średnio 24,7°C.

W okresie zimy różnice temperatur między poszczególnymi klasami użytkowania terenu nie były już tak duże. Teren zabudowany w zimie podobnie jak w lecie odznaczał się stosunkowo wysokimi temperaturami ze średnią wynoszącą -4,9°C. Jeszcze cieplejszym obszarem w zimie okazały się zbiorowiska leśne ze średnią temperaturą -4,6°C. Najniższe temperatury w zimie zarejestrowane zostały na użytkach zielonych ze średnią -6,2°C.

Różnice w rozkładzie przestrzennym temperatury radiacyjnej widoczne są bardzo wyraźnie na profilu termicznym. Profil poprowadzono w taki sposób, aby przechodził przez różne typy użytkowania i pokrycia terenu oraz przecinał charakterystyczne miejsca obszaru badań (rys. 7). Na profilu zaznaczono również wartości wskaźnika wegetacji NDVI, który wyraźnie koreluje z temperaturą radiacyjną. Analizowany profil SW-NE przebiega od północo-wschodu w kierunku południo-zachodu (NE-SW).



Rys. 7. Lokalizacja profilu termicznego SW-NE na obszarze badań
Fig. 7. Location of the SW-NE thermal profile in the studied area

Na profilach temperatury radiacyjnej oraz wskaźnika NDVI zauważyć można bardzo wyraźne zmiany ich wartości spowodowane różnym sposobem użytkowania i pokryciem terenu. W okresie lata podwyższoną temperaturą charakteryzowały się obszary z luźną zabudową wiejską (Bębło, Czajowice i Ojców) oraz obszar zwartej zabudowy miasta Skały (rys. 8).

W przypadku obszarów o luźnej zabudowie wzrost temperatury radiacyjnej w stosunku do terenów otaczających wynosił około $5,0^{\circ}\text{C}$, natomiast szczególnie wysoki był na obszarze zwartej zabudowy miasta. Temperatura radiacyjna w centrum miasta Skały była aż o $15,0^{\circ}\text{C}$ wyższa niż na obszarze pozamiejskim. Najniższe temperatury radiacyjne na profilu z okresu lata dotyczyły zbiorowisk leśnych OPN. Jak widać na rysunku 8, temperatury były tam niższe średnio o $4,0^{\circ}\text{C}$ w stosunku do terenów otaczających.

W okresie zimy, obszar zabudowany cechował się podobnie jak w lecie podwyższoną temperaturą radiacyjną jednak kontrasty termiczne nie były już tak duże jak w lecie.

Jak wynika z rysunku 8, różnica temperatury pomiędzy centrum miasta Skały a terenem pozamiejskim wynosiła w zimie około $8,0^{\circ}\text{C}$. Równie wysokimi temperaturami jak w mieście charakteryzowały się obszary leśne natomiast najniższymi temperaturami na profilu w okresie zimy cechowały się użytki zielone.

Na mapach temperatury radiacyjnej (rys. 2 i 3) oraz na profilach termicznych (rys. 8) bardzo wyraźnie widać obszar podwyższonej temperatury nad miastem Skała. Miejska wyspa ciepła jest typowym zjawiskiem dla obszarów zurbanizowanych, szczególnie dla dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych. Zjawisko to charakteryzuje się tym, że temperatura wewnątrz miasta jest wyższa niż na terenach pozamiejskich. Wyniki niniejszych analiz dowodzą jednak, że możemy ją również zaobserwować na obszarze niewielkiego miasta, jakim jest Skała (około 3700 mieszkańców, 3 km^2 powierzchni zabudowy). Obszary zabudowane poprzecinane siecią dróg i betonowych powierzchni sprzyjają gromadzeniu się ciepła i podnoszeniu temperatury w ich otoczeniu. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiony został zasięg miejskiej wyspy ciepła podczas dnia letniego i zimowego. Jak z nich wynika, zarówno w lecie jak i w zimie rozkład izoterm opisujących przestrzenne zróżnicowanie temperatury powierzchni miasta nawiązuje do kształtu powierzchni zabudowanej oraz do struktury przestrzennego zagospodarowania miasta. Izotermy te przybierają układ zamkniętych linii, których wartości maleją w miarę oddalania się od centrum miasta.

Duża rozdzielczość satelitarnych zdjęć termalnych Terra-ASTER pozwoliła na zlokalizowanie, nawet jeszcze mniejszych obszarów o podwyższonej temperaturze, takich jak mikrowyspy ciepła nad zabudowaniami wsi Bębła (około 1000 mieszkańców), Czajowic (około 560 mieszkańców), a nawet Ojcowa (około 220 mieszkańców) co szczególnie widoczne jest na zdjęciu z okresu lata (rys. 2 i 8).

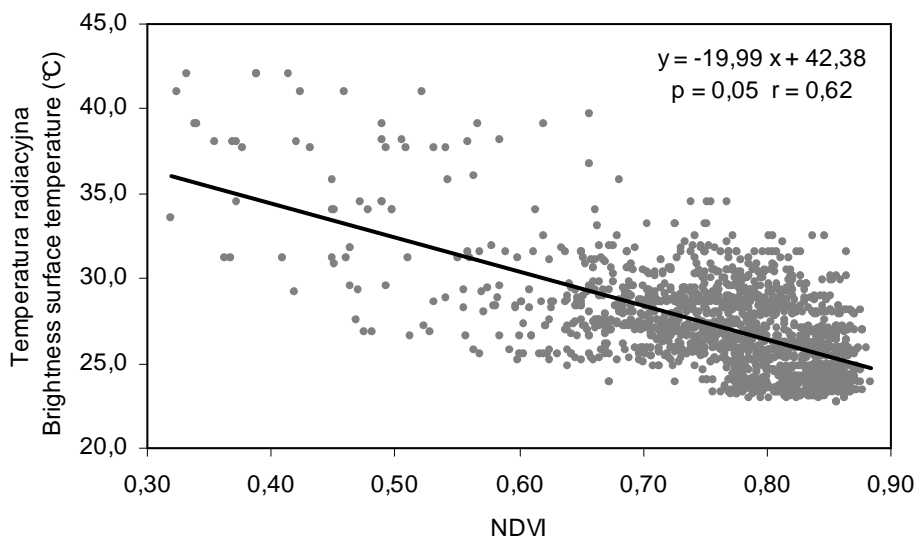
Jak już wcześniej wspomniano, wymierną informacją jakościową na temat powierzchni Ziemi może być znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI. Porównując mapy temperatury radiacyjnej (rys. 2 i 3) z mapami wskaźnika NDVI (rys. 5 i 6) można zauważyć pewne zależności. Zarówno w lecie jak i w zimie obszary zabudowane charakteryzowały się niskimi wartościami NDVI i względnie wysokimi temperaturami radiacyjnymi. W przypadku użytków zielonych i zbiorowisk leśnych w okresie lata wysokim wartościom NDVI odpowiadały relatywnie niższe temperatury. W zimie natomiast zbiorowiska leśne charakteryzowały się zarówno stosunkowo wysokimi wartościami NDVI jak i wyższymi temperaturami. Opisane powyżej zależności są wyraźnie widoczne na profilu temperatury radiacyjnej i wskaźnika NDVI (rys. 8).



Rys. 9. Zjawisko miejskiej wyspy ciepła na obszarze Skały podczas dnia letniego (6.07.2001)
Fig. 9. Phenomena of urban heat island in Skala on a summer day (6.07.2001)

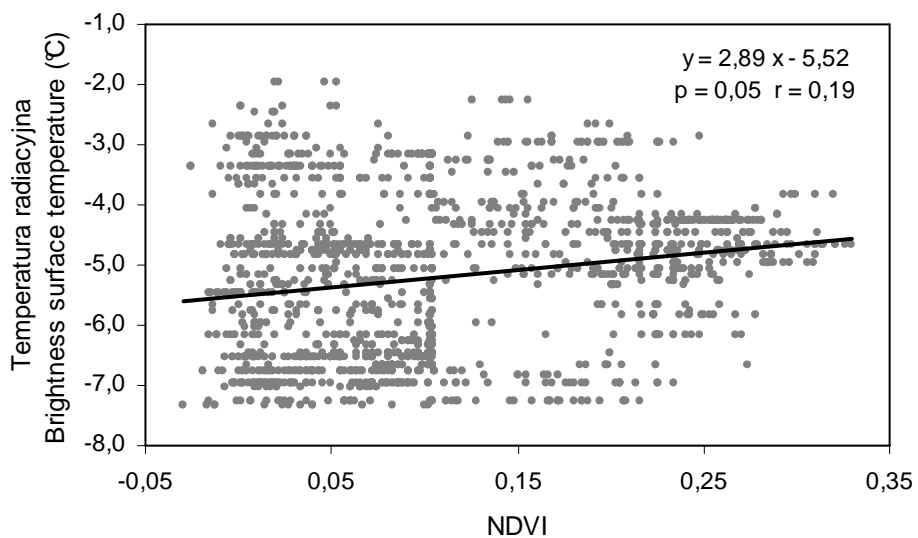


Rys. 10. Zjawisko miejskiej wyspy ciepła na obszarze Skały podczas dnia zimowego (6.03.2004)
Fig. 10. Phenomena of urban heat island in Skala on a winter day (6.03.2004)



Rys. 11. Zależność pomiędzy wskaźnikiem wegetacji NDVI, a temperatura radiacyjną powierzchni Ziemi podczas dnia letniego (6.07.2001)

Fig. 11. Relation between NDVI and brightness surface temperature on a summer day (6.07.2001)



Rys. 12. Zależność pomiędzy wskaźnikiem wegetacji NDVI, a temperatura radiacyjną powierzchni Ziemi podczas dnia zimowego (6.03.2004)

Fig. 12. Relation between NDVI and brightness surface temperature on a winter day (6.03.2004)

W celu określenia statystycznej zależności pomiędzy współczynnikiem NDVI, a temperaturą radiacyjną wykonano analizę regresji liniowej. Obliczenia wykonano na wartościach liczbowych odczytanych z profilu SW-NE.

Zarówno w lecie jak i zimie zależność pomiędzy NDVI, a temperaturą radiacyjną była statystycznie istotna na poziomie $\alpha = 0,05$. Dla dnia letniego korelacja była ujemna i najsilniejsza, a współczynnik korelacji wyniósł 0,62 (rys. 11).

W przypadku dnia zimowego korelacja była dużo słabsza i dodatnia, a współczynnik korelacji wyniósł 0,19 (rys. 12).

WNIOSKI

1. Stosunkowo duże przestrzenne zróżnicowanie temperatury radiacyjnej na badanym obszarze związane było z różnorodnością typów pokrycia i użytkowania terenu.

2. Na podstawie wykonanej mapy temperatury radiacyjnej stwierdzono występowanie obszaru o wyraźnie podwyższonej temperaturze, a mianowicie miejskiej wyspy ciepła tworzącej się w zwartej zabudowie miasta Skały.

3. Analizy termalnych zdjęć satelitarnych dowiodły, że zjawisko termicznej wyspy ciepła nie jest związane wyłącznie z dużymi aglomeracjami miejsko-przemysłowymi, ale może być również obserwowane na obszarze bardzo niewielkiej miejscowości.

4. Jak wykazano w pracy teledetekcja satelitarna jest wartą uwagi metodą pomiarową i źródłem różnorodnych informacji o środowisku przyrodniczym. Bardzo dużą zaletą zdjęć satelitarnych w porównaniu do punktowych pomiarów naziemnych jest możliwość obliczenia przestrzennego rozkładu pola temperatury w sposób ciągły w przestrzeni.

5. Satelitarne obrazy termalne są szczególnie cenne tam, gdzie prowadząc badania nie dysponujemy materiałem pochodzącym z bezpośrednich pomiarów. Dotyczy to przede wszystkim obszarów trudnodostępnych lub takich, na których nie wykonuje się stałych obserwacji meteorologicznych. Większa rozdzielczość radiometrów satelitów środowiskowych od satelitów meteorologicznych pozwala wykonać bardziej precyzyjną analizę stosunków termicznych określonego miejsca.

6. Wyniki analiz termiki powierzchni Ziemi na podstawie zdjęć satelitarnych mogą być bardzo przydatne w modelowaniu bilansu radiacyjnego powierzchni Ziemi, modelowaniu dyspersji zanieczyszczeń powietrza oraz w planowaniu przestrzennym.

PIŚMIENNICTWO

Abrams, M., Hook, S., 2001. ASTER User Handbook. The Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Los Angeles, USA.

- Alley, R. E. and Jentoft-Nilsen, M., 1999. Algorithm Theoretical Basis Document for Brightness Temperature. The Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Los Angeles. USA.
- Błazejczyk K., 2002. Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu Aglomeracji Warszawskiej, Dok. Geogr. Nr 26, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Chrysoulakis, N., 2002. Energy in the Urban Environment: Use of Terra/ASTER imagery as a tool in Urban Planning. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 30, 245 – 254.
- ERDAS Field Guide, 1998. Przewodnik Geoinformatyczny. Geosystems Polska, Warszawa.
- Olechnowicz-Bobrowska B., Wojkowski J., 2006. Okresy termiczne w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (1991-2000). [w:] Trepińska J., Olecki Z. Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego IGiP UJ Kraków, 51-60.
- Osinska-Skotak K., Madany A., 1998. Wykorzystanie danych satelitarnych LANDSAT TM do określenia warszawskiej wyspy ciepła. *Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska*, z. 26, 6-33.
- Struzik P., 1999. Zastosowanie informacji satelitarnej AVHRR/NOA do badania zjawiska miejskiej wyspy ciepła. *Acta Univer. Lodz., Folia Geogr. Phys.* 3, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Wojkowski J., 2004. Zróżnicowanie topoklimatyczne w charakterystycznych typach środowiska Ojcowskiego Parku Narodowego. [W:] *Zróżnicowanie i przemiany środowiska przyrodniczo-kulturowego Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej*, t. 1: Przyroda, OPN, Ojców, 139-142.
- Wojkowski J., Olechnowicz-Bobrowska B., 2004. Topoclimatic division in the characteristic types of the environment of Ojców National Park. *Geografia fizyczna i geomorfologia*, wydanie 46, tom 1, Kiev, 171-176.
- Wojkowski J., Skowera B., 2004. Termiczne pory roku w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. *Zeszyty Naukowe AR w Krakowie* nr 412, Kraków, 337-345.

USAGE OF MULTISPECTRAL TERRA ASTER SATELLITE IMAGES IN RESEARCH OF LAND SURFACE TEMPERATURE

Jakub Wojkowski

Department of Meteorology and Agricultural Climatology
Faculty of Environmental Engineering and Land Surveying, Agricultural University
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
e-mail: rmwojkow@cyf-kr.edu.pl

Abstract. The research shows how to use satellite images in climatology investigations. The research of spatial differentiation of thermal conditions was carried in the Ojcowski National Park (OPN) situated in the south part of the Krakowsko-Częstochowska Upland. The work was focused on the integration of satellite detection with Geographical Information System (GIS), which provides up-to-date and very precise information and gives a chance to make spatial analysis with the use of modern technical software. Spectral and spatial analysis was carried on the basis of multispectral Terra ASTER satellite images. On the basis of those images the maps of brightness surface temperature were prepared with the spatial resolution of 90 m pixels⁻¹. The satellite images were also used to create maps of land use. Normalised difference vegetation index NDVI was calculated which was used to research the relation between brightness surface temperature and land use. The analysis of satellite thermal images showed a significant dependence between land use and brightness surface temperature.

Keywords: brightness surface temperature, remote sensing, NDVI, Terra ASTER, Geographical Information System (GIS), Ojców National Park (OPN)