



## Pozyskiwanie i wstępna analiza wielospektralnych danych satelitarnych do celów rozpoznawania hydrometeorów

JANUSZ JASIŃSKI, KRZYSZTOF KROSCZYŃSKI,  
SŁAWOMIR PIETREK, IRENEUSZ WINNICKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
janusz.jasinski@wat.edu.pl, kkroszczyński@wat.edu.pl,  
spietrek@wat.edu.pl, ireneusz.winnicki@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej działa system odbioru cyfrowych meteorologicznych danych satelitarnych, które wykorzystywane są do prowadzenia wielospektralnych analiz dla potrzeb określenia właściwości hydrometeorów. Artykuł przedstawia wyniki wstępnych analiz zobrażeń satelitarnych pozyskiwanych w kilku kanałach spektralnych w powiązaniu z opracowanym przez autorów oprogramowaniem do łącznego przetwarzania danych satelitarnych i danych z mezoskalowych numerycznych modeli prognoz pogody.

**Słowa kluczowe:** meteorologia, wielospektralne dane satelitarne, hydrometeory

### 1. Wstęp

Obserwacje hydrometeorów i chmur są jednym z istotnych elementów składowych analizy synoptycznej, na podstawie której oceniany jest stan atmosfery i rozwijających się w niej procesów. Dla rozpoznania tych procesów i stadium ich przebiegu zasadnicze znaczenie ma pozyskiwanie informacji zarówno w skali synoptycznej, jak i mniejszych skalach bezpośrednio odpowiadających rozmiarom rejonów występowania chmur i hydrometeorów — np. mgieł, stref opadów atmosferycznych. Obserwacje synoptyczne wykonywane na stacjach meteorologicznych dają lokalny obraz sytuacji z wieloma szczegółami obejmującymi m.in. wielkość zachmurzenia, rodzaj, gatunek i odmianę chmur, wysokość ich podstawy, kierunek przemieszczania

się, intensywność występujących opadów, widzialność meteorologiczną (zależną również od hydrometeorów). Niestety, ze względu na znaczne odległości pomiędzy stacjami meteorologicznymi, analiza wyników obserwacji z wielu stacji nie prowadzi do uzyskania wiedzy synoptycznej o skali zachmurzenia. Informacje w dużej skali, ale bez szczegółów charakterystycznych dla obserwacji naziemnych, pozyskuje się m.in. za pomocą techniki satelitarnej. Współczesne meteorologiczne systemy satelitarne dostarczają dane w wielu kanałach spektralnych z rozdzielczościami dochodzącymi do 1 km w punkcie podsatelitarnym. Specjalizowana interpretacja obrazów rozpraszanego i emitowanego przez Ziemię i atmosferę promieniowania elektromagnetycznego umożliwia pozyskiwanie różnorodnych informacji o stanie atmosfery i dynamice procesów w niej przebiegających.

Satelitarne dane o stanie atmosfery wprowadzane do numerycznych modeli prognoz pogody umożliwiają poprawę jakości wyników procesu asymilacji danych, tzn. określenia warunków początkowych prognozy. Ośiem kanałów z zakresu podczerwieni dostarcza między innymi dane o temperaturze wierzchołków chmur, powierzchni lądu i oceanów, a kanały odpowiadające silnemu oddziaływaniu promieniowania elektromagnetycznego z ozonem, parą wodną i dwutlenkiem węgla pozwalają ponadto analizować charakterystyki masowe atmosfery, umożliwiając rekonstrukcję jej trójwymiarowej struktury.

## 2. System odbioru danych z satelitów meteorologicznych

Pierwsze systemy do odbioru meteorologicznych danych satelitarnych działały w Wojskowej Akademii Technicznej już na początku lat 80. Wraz z rozwojem technologii zmieniał się sposób ich zapisywania, od zwykłych zdjęć w technice fotograficznej do zapisu na różnorodnych nośnikach danych. Na przełomie 2009 i 2010 roku w Zakładzie Systemów Informacji Geograficznej Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji przeprowadzono modernizację systemu odbiorczego, wyposażając go w nowej generacji odbiornik DSR II z zestawem oprogramowania 2Met!<sup>®</sup> firmy VCS Engineering, co umożliwia pozyskiwanie obrazów z wszystkich meteorologicznych satelitów geostacjonarnych (odbior bezpośredni lub retransmisja).

Obecnie w trybie całodobowym prowadzony jest odbiór obrazów satelitarnych z satelity MSG (*Meteosat Second Generation*) umieszczonego na orbicie geostacjonarnej 35 800 km nad powierzchnią Ziemi nad punktem przecięcia równika z południkiem Greenwich. Zainstalowany na satelicie skaner SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) generuje obrazy atmosfery w 12 różnych kanałach spektralnych, tzw. widzialnych, bliskiej podczerwieni oraz podczerwonych (tab. 1).

TABELA 1

Kanały spektralne skanera SEVIRI

Oznaczenie kanału spektralnego	Pasma ( $\mu\text{m}$ )
VIS 0.6	0,56-0,70
VIS 0.8	0,74-0,88
HRV	0,6-0,9
IR 1.6 (NIR)	1,50-1,78
IR 3.9	3,48-4,36
IR 8.7	8,30-9,10
IR 10.8	9,80-11,80
IR 12.0	11,00-13,00
IR 6.2 (H <sub>2</sub> O)	5,35-7,15
IR 7.3 (H <sub>2</sub> O)	6,85-7,85
IR 9.7 (O <sub>3</sub> )	9,38-9,94
IR 13.4 (CO <sub>2</sub> )	12,40-14,40

Zobrazowania odbierane z satelity MSG są wynikiem przetwarzania danych pomiarowych (poziomu 1.0) otrzymanych przez skaner poruszający się razem z satelitą ruchem obrotowym (100 obr/min) wokół osi równoległej do osi obrotu Ziemi. Skanowanie kolejnych linii realizowane jest skokowym ruchem luster skanera w kierunku południe — północ z krokiem 125,8  $\mu\text{rad}$  na każdy obrót satelity. Zarejestrowane dane o poziomie natężenia promieniowania w poszczególnych kanałach są transmitowane do stacji naziemnej, gdzie po korekcy radiometrycznej i geometrycznej oraz standardowym dowiązaniu geograficznym (przetworzenie poziomu 1.5) są dostarczane użytkownikom. Zobrazowaniom z kanału HRV odpowiadają macierze o 11 136 liniach i 5568 kolumnach. Rozdzielczość liniowa tych zobrazowań w punkcie podsatelitarnym wynosi 1 km. Zobrazowania z pozostałych kanałów mają 3712 wierszy i 3712 kolumn, a odpowiadająca im rozdzielczość w punkcie podsatelitarnym wynosi 3 km.

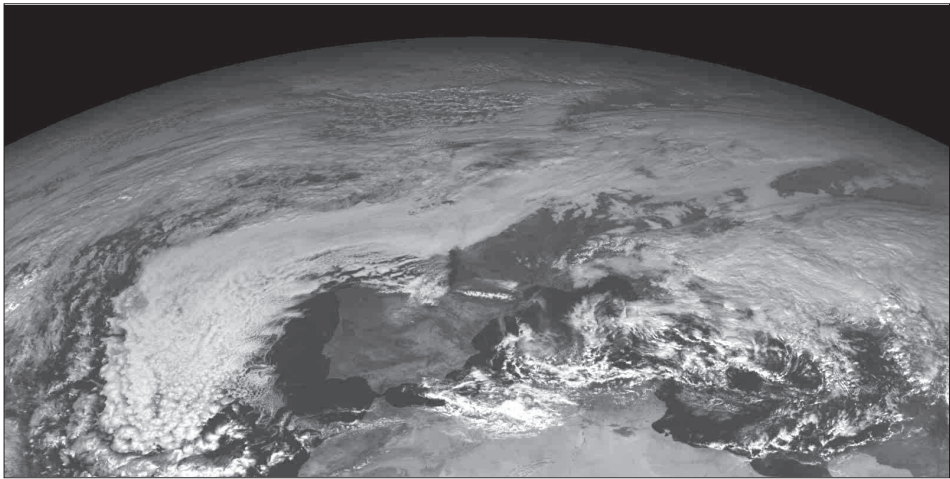
Oprogramowanie 2Met!<sup>®</sup> zapewnia pełną kontrolę odbioru zobrazowań satelitarnych w formacie transmitowanym przez satelitę, archiwizowanie ich w tej postaci oraz wyświetlenie na ekranach i wydrukowanie. Zobrazowania ekranowe umożliwiają bezpośrednie odczytywanie wartości elementów meteorologicznych, np. temperatury wierzchołków chmur, które są wynikiem przetwarzania danych zarejestrowanych przez skaner. Zobrazowania można też poddać podstawowemu przetwarzaniu na inne formaty graficzne do wykorzystania w praktyce synoptycznej.

### 3. Podstawy analizy zobrazowań satelitarnych

#### 3.1. Zobrazowania satelitarne pozyskiwane w zakresie widzialnym

Podstawowa analiza, oparta na doświadczeniach opublikowanych w [1, 2], zobrazowań satelitarnych z satelity MSG wykonanych w paśmie widzialnym (rys. 1), umożliwia identyfikację obszarów wodnych, lądowych i pokrywy chmurowej:

- obszary wodne mają mniejsze albedo, w związku z tym są przedstawiane jako ciemniejsze (z wyjątkiem odbłasków na wodzie),
- na ogół lądy są jaśniejsze niż obszary wodne i ciemniejsze niż obszary zachmurzone (albedo terenów lądowych może się znacząco zmieniać, np. obszary pustynne mają duże albedo, podczas gdy obszary lasów wyraźnie mniejsze),
- kontrast pomiędzy lądem i morzem jest większy dla widzialnych fal dłuższych (w różnych pasmach widzialnych).



Rys. 1. Zobrazowanie satelitarne pozyskiwane w kanale widzialnym (VIS 0.6, 15 lutego 2010, godz. 12.00 UTC)

Jasność obrazu na zobrazowaniach pozyskiwanych w kanale widzialnym jest funkcją natężenia promieniowania elektromagnetycznego rozproszonego od obserwowanych obiektów, np. chmur. Pozwala to dokonywać rozróżnienia pomiędzy obszarami:

- o dużym albedo (jasny obraz) charakterystycznym dla grubych chmur o dużej wodności i małej wartości średniego rozmiaru kropeł,

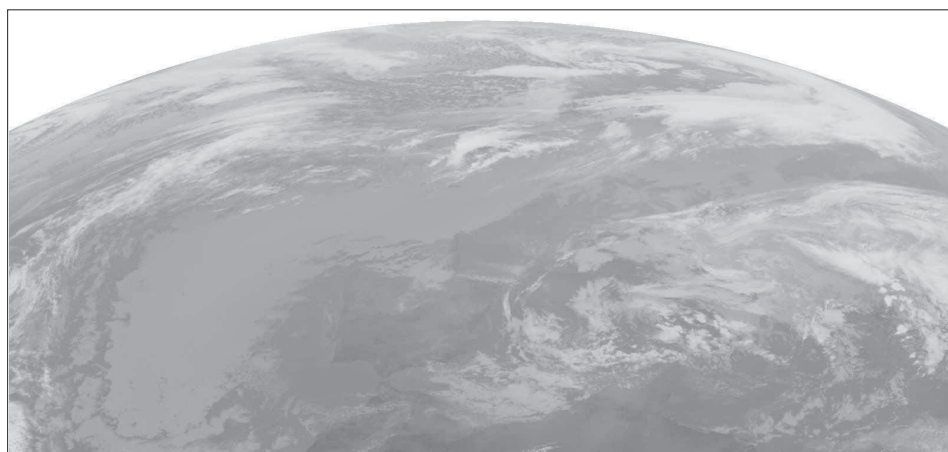
- o małym albedo (ciemniejsze obszary na obrazie) odpowiadającym chmurom o małej rozciągłości pionowej, małej wodności i dużej wartości średniego rozmiaru kropeł,
- cieniów i obszarów rozjaśnionych umożliwiających identyfikację struktury przestrzennej chmur, odróżnienie chmur *Cirrus* na podstawie cienia rzucającego na niższe chmury, rozpoznanie cienkich chmur *Cirrus* na podstawie struktury przypominającej smugi, odróżnienie chmur *Stratocumulus* od *Stratus* na podstawie komórkowej struktury obrazu.

Podczas interpretacji zobrażeń w kanałach widzialnych występują zasadnicze problemy w zakresie rozpoznawania:

- obszarów zaśnieżonych (zamarzniętych) od pokrytych przez chmury piętra niskiego, ponieważ chmury zasłaniają charakterystyczną rzeźbę terenu. Ruch chmur widoczny na animacji serii zobrażeń satelitarnych ułatwia to rozróżnienie,
- chmur o niewielkiej rozciągłości poziomej, mniejszej niż rozdzielczość zobrazowania (brak możliwości wydzielenia chmur *Cumulus*),
- chmur o niewielkiej rozciągłości pionowej występujących ponad innymi chmurami, ponieważ promieniowanie od chmur występujących poniżej nich lub promieniowanie łądu zwiększa jasność obrazu, co prowadzi do błędnej oceny grubości tych chmur.

### 3.2. Zobrazowania satelitarne pozyskiwane w zakresie podczerwonym

Promieniowanie w zakresie podczerwonym rejestrowane przez satelity jest głównie promieniowaniem emitowanym przez Ziemię i atmosferę, zatem zobrażenia



Rys. 2. Zobrazowanie satelitarne pozyskiwane w kanale podczerwonym (IR 10.8, 15 lutego 2010, godz. 12.00 UTC)

satelitarne w tych kanałach (rys. 2) są źródłem danych o temperaturze górnych powierzchni obiektów promieniujących. Jeśli zobrazowania w kanałach z zakresu podczerwieni przedstawi się zgodnie z konwencją przyjętą dla zobrazowań w kanałach z zakresu widzialnego (jasne elementy obrazu odpowiadają obszarom zachmurzonym), to wyższa temperatura powierzchni obiektów promieniujących jest przedstawiana jako ciemniejszy obraz.

Na podstawie analizy zobrazowań pozyskiwanych w kanałach z zakresu podczerwieni możliwe jest:

- rozróżnienie wysokości występowania górnych powierzchni (wierzchołków) chmur,
- rozpoznawanie linii brzegowej dzięki wyraźnemu kontrastowi pomiędzy temperaturami lądów i mórz, przy czym w ciągu dnia ląd może być ciemniejszy na obrazie niż obszary wodne, a w nocy odwrotnie (najwyraźniej latem i zimą),
- rozpoznanie chmur *Cirrus* wyraźnie widocznych na zobrazowaniach w kanale z zakresu podczerwieni, np. na tle ciepłych obszarów, a często w ogóle niewidocznych na zobrazowaniach w kanale z zakresu widzialnego.

Dla celów oceny temperatury i wysokości wierzchołków chmur zakłada się, że chmury zachowują się jak ciało doskonale czarne, co jest prawdziwe tylko dla chmur piętra niskiego o grubości kilkuset metrów i bardzo grubych chmur piętra wysokiego. Promieniowanie z niższych warstw przedostające się przez przerwy w chmurach powoduje wzrost natężenia promieniowania odbieranego przez skaner na satelicie i w efekcie daje pozorny wzrost temperatury i obniżenie wysokości chmur. Konieczne jest też wprowadzenie poprawek uwzględniających absorpcję i emisję promieniowania przez parę wodną (największe błędy powstają przy dużej wodności chmur występującej w dolnej warstwie atmosfery, szczególnie w obszarach tropikalnych). Należy przy tym pamiętać, że wartość temperatury ocenianej na podstawie zobrazowań satelitarnych odpowiada „temperaturze skorupy ziemskiej” i może się różnić od mierzonej metodami bezpośrednimi (w klatkach meteorologicznych i sondami aerologicznymi) nawet o kilka stopni.

Stosunkowo mała rozdzielczość termalna skanera zobrazowującego w kanale z zakresu podczerwonego powoduje, że chmury piętra niskiego i mgły zazwyczaj nie są odróżnialne na tle podłoża o bardzo zbliżonej temperaturze. Natomiast małe możliwości oceny tekstury chmur są wynikiem rejestracji promieniowania emitowanego przez chmury, a nie rozpraszanego przez nie.

Jednoczesna analiza zobrazowań satelitarnych z kanałów w zakresie widzialnym i podczerwonym umożliwi rozpoznawanie własności systemów zachmurzenia, które na każdym z zobrazowań z osobna nie mogą być jednoznacznie zinterpretowane (tab. 2).



TABELA 2

Interpretacja zobrażeń satelitarnych z kanałów w zakresie widzialnym i podczerwonym

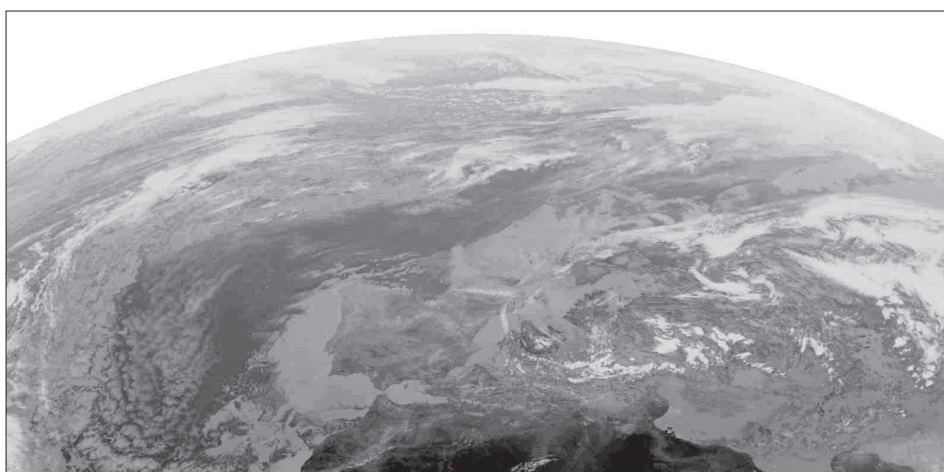
		Kanał w zakresie widzialnym VIS	
		obszary ciemne	obszary jasne
Kanał w zakresie podczerwonym IR	obszary jasne (chłodne)	chmury <i>Cirrus</i> o małej rozciągłości pionowej	rozbudowane chmury konwekcyjne
	obszary ciemne (ciepłe)	obszary bezchmurne	chmury piętra niskiego

### 3.3. Zobrażenia satelitarne pozyskiwane w zakresie podczerwonym IR 3.9

Szczególne właściwości zobrażeń w kanale IR 3.9 z zakresu podczerwonego (rys. 3) wynikają z faktu, że skaner rejestruje promieniowanie z dwóch źródeł:

- w ciągu dnia odbierane jest promieniowanie słoneczne rozproszone od chmur i powierzchni Ziemi oraz promieniowanie emitowane przez Ziemię i chmury,
- w nocy odbierane jest tylko promieniowanie Ziemi i chmur.

Natężenie promieniowania słonecznego rozproszonego od chmur i Ziemi w tym zakresie jest w ciągu dnia wyraźnie większe niż natężenie promieniowania Ziemi i chmur. W związku z tym na zobrażeniach wykonanych w dzień (negatywowych:  $3,9 \mu\text{m} -$ ) jasnym obszarom obrazu odpowiada największa odbiciowość, podczas gdy na zobrażeniach nocnych (pozytywowych:  $3,9 \mu\text{m} +$ ) jasnym obszarom obrazu



Rys. 3. Zobrażenie satelitarne pozyskiwane w kanale podczerwonym (IR 3.9, 15 lutego 2010, godz. 12.00 UTC)

odpowiada najniższa temperatura [3]. Prowadząc analizę zobrażeń w kanale z zakresu podczerwieni 3,9  $\mu\text{m}$ , zobrażenia nocne interpretuje się podobnie jak inne zobrażenia w kanale z zakresu podczerwieni. Jednakże różna emisyjność obiektów oraz specjalne skalowanie radiometru, takie jak dla ciała doskonale czarnego, umożliwia rozróżnienie łądu i wody od chmur o takiej samej temperaturze. Zobrażenia dzienne analizuje się podobnie jak zobrażenia w kanale z zakresu widzialnego (tab. 3), mając dodatkowo na uwadze, że jasność obrazu chmur może zmieniać się od białego do czarnego ze względu na silną absorpcję promieniowania przez krople wody i kryształki lodu o średnicach większych od 10  $\mu\text{m}$ , co powoduje, że śnieg, morza i chmury *Cirrus* są na obrazie czarne (przeciwnie niż na zobrażeniach w kanale z zakresu widzialnego). Obrazy łądów są zwykle jaśniejsze od obrazów mórz, a na obrazach mórz częściej obserwuje się odbłaski od powierzchni wody.

TABELA 3

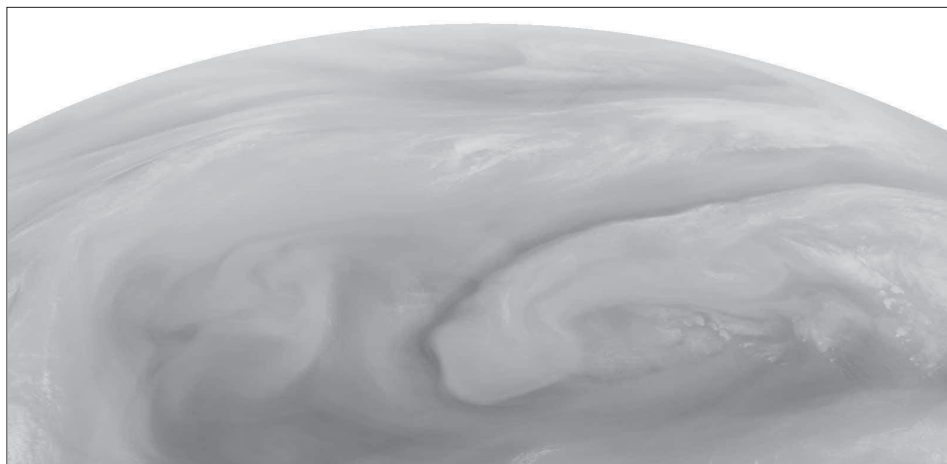
Interpretacja zobrażeń satelitarnych z kanałów z zakresu widzialnego VIS 0.6 i podczerwonego IR 3.9

Kanał w zakresie widzialnym VIS 0.6	Kanał w zakresie podczerwonym IR 3.9
Obrazy chmur: szare lub białe	Obrazy chmur: od białych do czarnych
Cienie chmur rozjaśnione przez rozproszone światło i promieniowanie nieboskłonu	Cienie chmur czarne — brak rozproszonego promieniowania i promieniowania nieboskłonu
Albedo chmur zależne od grubości i wodności	Albedo chmur zależne od wielkości kropeł
Chmury występujące niżej mogą być widoczne poprzez cienie chmury występujące wyżej	Chmury występujące niżej nie mogą być widoczne poprzez chmury występujące wyżej

### 3.4. Zobrażenia satelitarne pozyskiwane w zakresie podczerwonym IR 6.2 i mikrofalowym

Zobrażenia satelitarne pozyskiwane w zakresach podczerwonych IR 6.2 (rys. 4) oraz IR 7.3, odpowiadających najbardziej intensywnemu oddziaływaniu promieniowania z parą wodną (tzw. kanałach pary wodnej), przedstawiają wilgotność warstwy atmosfery pomiędzy powierzchniami izobarycznymi 600 i 300 hPa (ok. 4-9 km). Przy zastosowaniu konwencji zobrażenia jak dla zobrażeń w kanale widzialnym, wyższej wilgotności odpowiada jaśniejszy obraz. Przy interpretacji zobrażeń w zakresie IR 6.2 należy mieć na uwadze, że wzrostowi wilgotności odpowiada wzrost wysokości, z której pochodzi odbierane promieniowanie, a dla małych wartości wilgotności promieniowanie odbierane jest nawet z warstwy atmosfery od poziomu 800 hPa (ok. 2 km). Zobrażenia w zakresie IR 6.2 nie są źródłem danych o wilgotności w dolnych warstwach atmosfery.





Rys. 4. Zobrazowanie satelitarne pozyskiwane w kanale pary wodnej (IR 6.2, 15 lutego 2010, godz. 12.00 UTC)

Zobrazowania satelitarne wykonywane w kilku zakresach mikrofalowych w paśmie częstotliwości 19-85 GHz (1,57-0,35 cm) wskazują obszary występowania opadów, kropeł wody w chmurach i pary wodnej. Na podstawie tych zobrazowań można oceniać wilgotność gleby, temperaturę podłoża i powietrza oraz wyznaczać prędkość wiatru przy powierzchni oceanów.

#### 4. Moduł analizy danych satelitarnych i modeli mezoskalowych

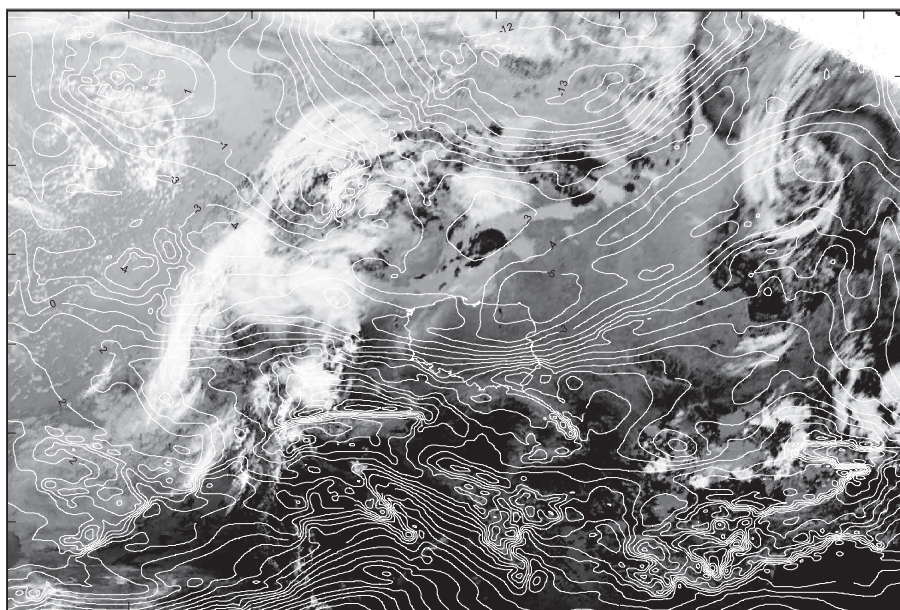
System odbioru danych z satelity MSG i model COAMPS (*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) zostały uruchomione w trybie operacyjnym, a model WRF (*The Weather Research and Forecasting*) w trybie testowym, w pracowniach Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT.

Prowadzone są prace badawcze nad umożliwieniem kompleksowej analizy danych pochodzących z różnych źródeł, tzn. interpretacji satelitarnych obrazów zachmurzenia i danych modeli mezoskalowych. Skonstruowany został moduł łącznej analizy danych satelitarnych MSG oraz modeli mezoskalowych — COAMPS (rys. 5) i WRF.

Opracowane oprogramowanie do konwersji zobrazowań satelitarnych do projekcji kartograficznych stosowanych w modelach numerycznych COAMPS i WRF umożliwia jednocześnie przedstawienie map elementów meteorologicznych i zobrazowań dla prowadzenia kompleksowej analizy synoptycznej na danych pochodzących z różnych źródeł. Wyniki analizy zobrazowań z różnych kanałów spektralnych, zwłaszcza analiza kombinacyjna, którą realizuje skonstruowany moduł, umożliwiają m.in. wykrywanie zjawisk atmosferycznych związanych z przepływami atmosferycznymi,

położeniem i rodzajem chmur oraz hydrometeorów. W skład modułu wchodzi programy realizujące: pobieranie danych — zobrażeń satelitarnych z MSG oraz pól meteorologicznych z modeli NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*), COAMPS i WRF, wybór projekcji (odwzorowania: walcowe Mercatora, stożkowe Lamberta, standardowe geograficzne itp.) oraz związanych z nimi elipsoid, nakładanie pól prognostycznych z modeli mezoskalowych na zobrażenia satelitarne oraz zmianę parametrów uzyskiwanych zobrażeń [4].

Podstawowe zadanie realizuje program umożliwiający przekształcenia zobrażeń satelitarnych z MSG do projekcji danych modelu COAMPS (projekcja stożkowa konforemna Lamberta) i WRF (geograficzna —  $\lambda$ ,  $\varphi$ ). Program ten wykorzystuje algorytmy realizujące skanowanie atmosfery, tzn. określające obszary, z których zbierane są informacje o jej promieniowaniu oraz realizujące przedstawienie ich w postaci użytecznego obrazu.



Rys. 5. Pole temperatury powietrza na powierzchni izobarycznej 850 hPa nałożone na zobrazenie satelitarne przetworzone do 39 km siatki modelu COAMPS

## Podsumowanie

W pracy operacyjnej komórek wojskowej służby hydrometeorologicznej do analizy i prognozy pogody coraz szerzej wykorzystywane są dostępne produkty modeli mezoskalowych COAMPS i WRF. Zrozumiałe jest, że zarówno prognozy numeryczne, jak i prognozy analogowe (opracowane na podstawie materiału synoptycznego) obarczone

są pewnymi błędami rosnącymi wraz z wydłużeniem okresu prognozy. Jednym ze sposobów poprawy skuteczności prognoz pogody jest prowadzenie kompleksowej analizy stanu atmosfery, w której korzysta się także z danych dostarczonych przez pracujące w trybie quasi-rzeczywistym systemy satelitarne. W tym celu wykorzystuje się wielospektralne zobrazowania z satelitów geostacjonarnych i okołobiegunowych. Na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji prowadzone są prace mające na celu ułatwienie kompleksowej analizy dostępnych danych meteorologicznych, m.in. poprzez przedstawienie ich we wspólnej projekcji kartograficznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] J. BADER, G. S. FORBES, J. R. GRANT, R. B. E. LILLEY, A. J. WATERS, *Images in weather forecasting*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [2] S. O. KIDDER, T. H. VONDER HAAR, *Satellite meteorology*, Academic Press, San Diego, 1995.
- [3] J. KERKMANN, *Applications of Meteosat Second Generation (MSG) — Meteorological use of the SEVIRI IR 3.9 channel*, EUMETSAT, 2004.
- [4] I. WINNICKI, J. JASIŃSKI, K. KROSZCZYŃSKI, S. PIETREK, *Wykorzystanie danych niehydrostatycznych modeli mezoskalowych w procesie meteorologicznego zabezpieczenia działań lotnictwa wojskowego*, Sprawozdanie z pracy badawczej własnej Nr O N306 0033 33/PBG, WAT, Warszawa, 2010.

J. JASIŃSKI, K. KROSZCZYŃSKI, S. PIETREK, I. WINNICKI

#### **Acquisition and initial analysis of multispectral satellite data for recognition of hydrometeors**

**Abstract.** Meteorological satellite data reception system run at the Faculty of Civil Engineering and Geodesy of the Military University of Technology provides digital data that enables multispectral analyses for determining the properties of hydrometeors. The paper presents initial elements of analyses of satellite imagery received in a few spectral channels in relation with software developed at the Faculty for combined processing of satellite data and data of mesoscale numerical weather forecasting models.

**Keywords:** meteorology, multispectral satellite data, hydrometeors

