

http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/Teledetekcja_Srodowiska/czasopismo_pl.html

Detekcja zachmurzenia na podstawie danych satelitarnych MODIS

Cloud detection based on the MODIS data

Kamil LEZIAK, Sylwia NASIŁOWSKA

Słowa kluczowe: rodzaje chmur, maskowanie chmur, MODIS Key words: cloud types, cloud masking, MODIS

Otrzymano: 7 września 2012; Zaakceptowano: 17 marca 2013 Received: 7 September 2012; Accepted: 17 March 2013

Cloud detection is an important field in meteorology and remote sensing, due to clouds role in meso- and macroscale weather processes. Most of the dangerous weather events, such as hail fall, strong wind or severe storm can be forecasted or predicted using satellite imagery. MODIS data are very useful in nephological analysis as they cover vast majority of Earth surface and provide hiperspectral images with a short revisit time. Tests of RGB compositions of MODIS bands were performed, to look for model compositions for cloud detection.

Wstęp

Badania poświęcone wykrywaniu zachmurzenia metodami teledetekcyjnymi mają duże znaczenie dla nauki i działalności człowieka. Pozwalają na analizę mezoi makroskalowych procesów pogodowych i dynamiki atmosfery. Rozpoznanie rodzajów i pięter zachmurzenia na obrazach satelitarnych umożliwia określenie prawdopodobieństwa wystapienia istotnych badź niebezpiecznych zjawisk meteorologicznych, jak ulewne badź długotrwałe deszcze, opady gradu, intensywne opady śniegu. Zobrazowanie wysokości podstawy i stropu chmur w podziale genetycznym ma bardzo duże znaczenie dla lotnictwa, pozwala bowiem na wyznaczenie obszarów zagrożenia oblodzeniem, silnymi ruchami turbulentnymi powietrza, wyładowaniami międzychmurowymi. Badania teledetekcyjne mogą tym samym wspierać pracę biur prognostycznych i służb meteorologicznych, stanowiąc uzupełnienie naziemnych systemów synoptycznych, w tym systemów lotniskowych. Jednocześnie, jako ważne ogniwo kompleksowej osłony hydrometeorologicznej na poziomie krajowym lub kontynentalnym, umożliwiają wykrycie Three best compositions have been chosen: RGB 17/18-6-26, RGB 30-23-8, RGB 34-1-17. They allow to delimitate clouds and identify their family, type and (in some cases) specie. MODIS cloud masks accuracy has been checked, based on model RGB compositions. Results show that each mask detects different family or type of clouds, and accuracy and precision of this process depends on the mask parameters. For proper cloud delimitation an assistance of a qualified meteorologist is required.

i analizę potencjalnego zagrożenia – komórek i superkomórek burzowych, dynamicznych komórek konwekcyjnych, frontów nawalnych – oraz monitorowanie jego stanu we współpracy z systemami naziemnymi, w szczególności z radarami dopplerowskimi. Dane uzyskane w ten sposób mogą stanowić dodatkowe zmienne służące wsparciu lub weryfikacji modeli pogodowych i numerycznych prognoz pogody, zwiększając ich precyzję i dokładność. Samodzielnie nie są jednak wystarczające i wymagają uzupełnienia danymi naziemnymi.

Badania prezentowane w pracy mają na celu określenie przydatności obrazów satelitarnych MODIS do analizy zachmurzenia. Duży zakres spektralny, globalny zasięg oraz niewielki czas rewizyty, sprawiają, że te dane mają duży potencjał w takich badaniach. Przeanalizowano ich przydatność do rozróżniania typów oraz wyznaczania zasięgu chmur. W pierwszym etapie wybrano kompozycje RGB (Red, Green, Blue), które najlepiej oddają wielowarstwową strukturę zachmurzenia. Następnie przetestowano możliwości zastosowania automatycznych procedur do rozróżnienia i wyselekcjonowania poszczególnych rodzajów chmur

Zastosowanie danych satelitarnych MODIS do detekcji zachmurzenia

Dzięki szerokiemu zakresowi spektralnemu (0,46-14,39 µm), dużej liczbie kanałów, globalnemu zasięgowi oraz krótkiemu czasowi rewizyty, dane MODIS mają duże znaczenie w badaniach zachmurzenia. Obecnie na świecie wykorzystywanych jest kilka metod służących detekcji zachmurzenia na wyżej wymienionych zobrazowaniach.

Jedną z podstawowych metod służących określaniu właściwości chmur stanowi zbiór algorytmów pod nazwą *Cloud Retrieval Algorithms*, opracowany przez zespół M. D. Kinga i pozwalających na opracowanie produktu MOD6 (King i in., 1997). Jego funkcją jest pozyskanie z zapisu wielospektralnego odbitego promieniowania słonecznego oraz emitowanego promieniowania termalnego następujących danych:

- gęstości optycznej chmur;
- promienia cząstek chmurowych;
- fazy cząstek chmurowych.

Algorytmy te wykrywają zachmurzenie w oparciu o założenie, że reflektancja zachmurzenia w oknie atmosferycznym promieniowania widzialnego jest funkcją gęstości optycznej tych chmur, podczas gdy reflektancja w paśmie absorbcyjnym wody bądź lodu jest funkcją promienia cząstek chmurowych.

Zaletą stosowania wymienionych wyżej algorytmów jest ich kompleksowość oraz możliwość precyzyjnego określania parametrów fizycznych chmury, co ma duże znaczenie np. w modelowaniu procesów opadowych czy frontogenetycznych. Wadą jest jednakże możliwa niedokładność obliczeń modelowych, związana przede wszystkim z błędami połączeń filtrów interspektralnych w obrębie sąsiadujących kanałów. Jeżeli wartość gęstości optycznej zachmurzenia jest bardzo duża, może się także pojawić ułamkowy błąd algorytmu związany z szacowaniem efektywnego promienia cząsteczki chmurowej. Jak podaje King, błąd ten jest równy co do wartości, ale posiada przeciwny znak do stałego błedu ułamkowego wskaźnika absorpcji. Ponadto wszelkie zmiany właściwości fizycznych warstwy atmosfery leżącej powyżej pułapu chmur mają bezpośredni wpływ na wygląd i charakterystyki spektralne zachmurzenia widocznego na obrazie satelitarnym, a tym samym mogą wpływać na zmniejszoną skuteczność działania wspomnianych algorytmów.

Metodą uzupełniającą stosowaną w produkcie MOD6 jest metoda detekcji chmur wykorzystywana do separacji obszarów zachmurzonych na obrazach MODIS, dostępna jako produkt MOD35 (Ackerman i in., 2010). Polega ona na wygenerowaniu maski (o rozdzielczości 250 m lub 1 km) delimitującej obszary zachmurzone lub przesłonięte przez grubą warstwę aerozolu atmosferycznego. Maska wykorzystuje dowolne kanały z puli: 1-9, 17, 18, 20-22, 26-29, 31-33 i 35, przy czym w zależności od liczby i rodzaju wybranych kanałów, produkt końcowy może mieć różną dokładność i precyzję. Słabą stroną tego algorytmu jest ponadto podawanie zafałszowanych (zaniżonych) wyników zachmurzenia w wypadku, gdy któryś kanał z puli jest pusty, niekompletny lub błędny. Dodatkowymi danymi wejściowymi są m.in.: położenie Słońca, chorochromatyczna mapa lądów i wód, mapa wysokości bezwzględnej, temperatura powierzchniowa wód wszechoceanu. Na podstawie danych wejściowych algorytm przypisuje każdemu pikselowi wartość 1, jeśli uznaje go za zachmurzony i 0, jeśli uznaje go za wolny od chmur. Problemem wynikającym z takiego schematu postępowania jest dychotomiczność rozkładu: w wypadku, jeżeli piksel jest częściowo zachmurzony, bądź wydaje się zachmurzony w jednym i wolny od chmur w innym zakresie spektralnym, uzyskane wyniki mogą być nierozstrzygające i obarczone dość dużym błędem. Z tego też powodu na początkowym etapie analizy wprowadzono 4-bitową głębię oznaczeń, która następnie jest standaryzowana do wartości 0 bądź 1. Zaletą opisywanej maski chmur jest wykorzystywanie analizy wieloparametrycznej do eliminowania potencjalnych błędów związanych z odczytem wartości piksela w poszczególnych pasmach spektralnych, wprowadzanie automatycznej korekcji związanej z położeniem Słońca, występowaniem lodu bądź śniegu czy zadymieniem i zapyleniem atmosfery.

A.Z. Kotarba (2009, 2010) przeprowadził badania skuteczności rozróżniania przez maskę MODIS obszarów zachmurzonych nad lądami i oceanami. W tym celu porównał obrazy satelitarne wybranych akwenów oceanicznych, uzyskane z wysokorozdzielczego czujnika ASTER oraz z czujnika MODIS. Dane te były synchroniczne w czasie i przestrzeni, i przedstawiały dwa rodzaje chmur: Stratocumulus i Cumulus. Uzyskane przez niego wyniki wskazały, że, w wypadku wyżej wymienionych rodzajów chmur, maska MODIS zawyża liczbę pikseli zakwalifikowanych jako zachmurzone o około 9%. Badania nad obszarami lądowymi Kotarba prowadził w oparciu o dane nefologiczne z obserwacji naziemnych - porównując je z maskami chmurowymi dla obszaru Polski wykazał, że produkt MOD35 przedstawia zawyżoną wartość zachmurzenia – latem różnica wynosi około 4%, zima jest większa i wynosi około 8%. Skuteczność maski jest też różna w zależności od pory dnia, w której wykonywane było zobrazowanie - maski chmurowe opracowane na podstawie danych z pory nocnej mniej skutecznie rozróżniały zachmurzenie, niż maski opracowane na podstawie danych z pory dziennej.

Poza zaawansowanymi metodami algorytmicznymi wykorzystującymi dane spektralne z kilku bądź kilkunastu kanałów, podstawowa detekcja obszarów zachmurzonych może ograniczać się do prostych testów jednolub dwuparametrycznych. Wykorzystują one pojedyncze kanały spektralne lub wskaźniki oparte na różnicy lub ilorazie dwóch kanałów. Można je podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody oparte na porównaniu odbicia

spektralnego chmur i lądu/wody pod nimi, oraz metody oparte na porównywaniu emisyjności chmur z emisyjnością podłoża atmosfery. Grupa pierwsza obejmuje większą liczbę kanałów (m.in. ze względu na proporcje kanałów emisyjności i reflektancji w obrazach MODIS), jednakże może być stosowana tylko dla zobrazowań utworzonych w porze dziennej, nad ciemnymi powierzchniami lądów lub oceanów. Ponieważ uwzględniają jedynie czynnik reflektancji, prowadzą do nieprawidłowych wyników nad obszarami pokrytymi śniegiem, lodem, obszarami solnisk i pustyń, które cechuje wysoka reflektancja. Grupa druga może być stosowana w sytuacji, gdy charakterystykę termalną podłoża atmosfery i chmur cechuje wysoki kontrast, w szczególności zaś w porze nocnej oraz nad zbiornikami wodnymi. Podstawowa zaleta metod jedno- i dwuparametrycznych jest duża elastyczność i możliwość dostosowania parametrów delimitacji zachmurzenia do konkretnego obrazu satelitarnego, co zapewnia skuteczność wyższą niż metody ogólne, m.in. z uwagi na konieczność stosowania filtrów i algorytmów korygujących w tych ostatnich; w metodach prostych za dostosowanie i wybór parametrów jest odpowiedzialny człowiek, który jest w stanie lepiej dopasować metodę przetwarzania do danego obrazu niż algorytm, który musi uwzględnić zbiór wszystkich potencjalnych czynników zakłócających, nawet jeśli nie występują na tym zobrazowaniu. Ponadto można w łatwy sposób łączyć ze soba kilka metod jednoparametrycznych tworząc bardziej złożone kombinacje, które jednak dalej zachowują początkową elastyczność i wzajemną kompatybilność, z uwagi na jednolitą metodykę przetwarzania obrazu bez względu na wybrane parametry spektralne.

Oprócz czujników MODIS, do analizowania zachmurzenia wykorzystywane są również inne czujniki. Jednym z nich jest AVHRR, stosowany w wielu algorytmach, np. APOLLO, CLAVR-s, CASPR. APOLLO to pierwszy schemat, który bazując na danych AVHRR, wykorzystuje wszystkie 5 kanałów spektralnych w ciągu dnia oraz umożliwia podział wszystkich danych na 4 grupy – obszary bezchmurne, całkowicie zachmurzone, częściowo zachmurzone oraz tereny pokryte śniegiem lub lodem (Kriebel i in., 2004).

CLAVR-x to system operacyjny umieszczony na satelitach okołobiegunowych NOAA. Ponadto, CLAVR-x jest podstawa systemu NESDIS wykorzystywanego w układzie pozyskiwania obrazów GOES. CLAVR-x został wprowadzony w 2003 roku. Jest to unowocześniona wersja CLAVR-1. Do podziału pikseli na zachmurzone (od 88% do 100% obszaru pokrytego warstwa chmur) i bezchmurne (0% chmur na danym obszarze) wprowadzono dwie nowe grupy – częściowo zachmurzone (od 1% do 13% obszaru pokrytego warstwą chmur) i częściowo bezchmurne (od 14% do 87%). Za jego pomocą można uzyskać bardziej wiarygodne wyniki detekcji zachmurzenia nad obszarami pokrytymi śniegiem lub lodem (Thomas i in., 2004). CLAVR-x (Cload Advanced Very High Resolution Radiometer) składa się z czterech głównych algorytmów używanych do wykrywania chmur, oznaczania ich typów i wysokości oraz właściwości optycznych. Polega na wykorzystaniu testów wieloparametrycznych, opartych na parametrach takich, jak: kontrast (oddzielenie obszarów zachmurzonych od bezchmurnych), spektrum (wykorzystuje różnice w dwóch kanałach AVHRR, w efekcie czego wyrównuje zjawiska atmosferyczne mogące prowadzić do uzyskania złych wyników) oraz rodzaj oznaczenia przestrzennego.

CASPR – zestaw algorytmów umożliwiających m.in. wymaskowanie chmur, oznaczenie ich optycznej grubości, najwyższej temperatury i ciśnienia. Wykorzystuje wszystkie 5 kanałów sensora AVHRR. Aby możliwe było jego zastosowanie, należy znać długość oraz szerokość geograficzną zdjęć satelitarnych, a także posiadać maskę kontynentów. Ponadto, obrazy muszą pochodzić z satelitów NOAA, których sensor AVHRR posiada piąty kanał (są to m.in. NOAA 16,15,14,12) (Key, 2002).

Materiały

Badając dostępność oraz jakość danych źródłowych przyjęto założenia dotyczące wyboru konkretnych zdjęć do dalszej analizy. Musiały one przedstawiać możliwie najwięcej rodzajów oraz gatunków chmur, stąd poszukiwano przede wszystkim obrazów z umiarkowanych szerokości geograficznych. Wynika to z faktu, że w umiarkowanych szerokościach geograficznych, z uwagi na silny proces fronto- i cyklogenezy na stacjonarnym froncie polarnym, występuje największe zróżnicowanie frontów atmosferycznych oraz ośrodków niskiego ciśnienia, którym towarzyszą rozbudowane układy chmur. Cechą charakterystyczną tego obszaru jest tworzenie się kilku następujących po sobie niżów (tworzących jedną rodzinę); poruszają się one zgodnie z ogólną cyrkulacją zachodnią i są rozdzielone rozległymi powierzchniami frontowymi widocznymi na zdjęciach satelitarnych w postaci pasm chmur o różnej szerokości. Znając następstwo chmur na frontach różnego rodzaju można, dzięki wsparciu naziemnymi danymi obserwacyjnymi oraz odpowiednio dobranymi kompozycjami RGB, określić cechy spektralne poszczególnych rodzajów chmur, a tym samym zweryfikować poprawność działania masek chmurowych włączonych do produktów MODIS (MOD06, MOD35).

Do niniejszej analizy wykorzystano cztery zdjęcia wykonane w dniach 5. i 7. maja 2010 roku nad Europą Środkową i Zachodnią. Dane zostały pobrane z serwisu LAADS (http://ladsweb.nascom.nasa.gov/). Był to okres poprzedzający wielką powódź, która objęła obszar kilku państw, m.in. Polski, Austrii, Słowacji, Czech, Węgier, Niemiec i Ukrainy. Sytuację synoptyczną przedstawiają: rycina 1 i rycina 2.

5. maja przez Europę przechodził rozległy front ciepły oddzielający chłodne powietrze polarne morskie na zachodzie od ciepłego powietrza zwrotnikowego na wschodzie. Na południowym krańcu przechodził w front okluzji związany z dojrzałym niżem z centrum nad Morzem Śródziemnym, na północnym krańcu przechodził w aktywny front chłodny niżu znad wschodniej części Półwyspu Skandynawskiego. Dodatkowo, po jego za-



Ryc. 1. Sytuacja synoptyczna w Europie 05.05.2010 r., godz. 00 UTC (źródło: Wetterzentrtale/MetOffice). Fig. 1. Synoptic situation in Europe, 05.05.2010 00 UTC (source: Wetterzentrtale/MetOffice).



Ryc. 2. Sytuacja synoptyczna w Europie 07.05.2010 r., godz. 00 UTC (źródło: Wetterzentrale/MetOffice). Fig. 2. Synoptic situation in Europe, 07.02.2010 00 UTC (source: Wetterzentrale/MetOffice).



Ryc. 3. Europa Środkowa i Wschodnia, 5 maja 2010, godzina 9:35 UTC. Obraz satelitarny MODIS (Terra) 2010.125.935 w kompozycji RGB 3-2-1. Fig. 3. Central and eastern Europe, 5th May 2010, 9:35 UTC. Satellite image MODIS (Terra) 2010.125.935 composition RGB 3-2-1.



Ryc. 4. Europa Zachodnia, 5 maja 2010, godzina 11:55 UTC. Obraz satelitarny MODIS (Terra) 2010.125.1155 w kompozycji RGB 3-2-1. Fig. 4. Western Europe, 5th May 2010, 11:55 UTC. Satellite image MODIS (Terra) 2010.125.1155 composition RGB 3-2-1.

chodniej stronie umiejscowiły się trzy ośrodki niskiego ciśnienia z własnymi układami frontów – jeden z centrum nad Morzem Bałtyckim i dwa nad północnym Atlantykiem, pomiędzy Szetlandami, Półwyspem Skandynawskim a Islandia. Zdjęcie satelitarne z godziny 9:35 przedstawia front ciepły przechodzący przez Europę Środkową, fragment okluzji związanej z niżem znad Zatoki Lwiej oraz słabo widoczny układ zachmurzenia związanego z niżem znad Morza Bałtyckiego (Ryc. 3). Zdjęcie z godziny 11:15 przedstawia południową część wymienionego wyżej frontu ciepłego, ulokowaną nad Europa Zachodnia, front okluzji oraz niż znad Zatoki Lwiej, a także wir zachmurzenia konwekcyjnego nad Morzem Śródziemnym i struktury konwekcyjne nad Atlantykiem (zamknięte komórki konwekcyjne oraz grzędy chmur Cumulus). (Ryc. 4). Zdjęcie z godziny 12:55 przedstawia niż nad północnym Atlantykiem oraz rozbudowany system zachmurzenia frontowego związanego z frontem chłodnym (Ryc. 5).

Dwa dni później, 7. maja, nad Europą Środkową ulokował się stary, głęboki niż z równoleżnikowym frontem okluzji. Na południu Europy rodzina trzech niżów odpowiadała za intensywne opady deszczu oraz duże zachmurzenie, nad Wyspami Brytyjskimi znajdował się zanikający front okluzji związany z płytkim niżem, który wypełnił się, odsuwając drugi niż na południowy zachód. Ostatnie analizowane zdjęcie pokazuje rozległą strefę zachmurzenia pomiędzy dwoma frontami okluzji – znad Wielkiej Brytanii oraz Europy Środkowej, a także fragment strefy zachmurzenia konwekcyjnego znad wschodniego Atlantyku (**Ryc. 6**).

Metody

Schemat metodyki postępowania prezentuje Ryc. 7. W pierwszej kolejności pobrano dane wejściowe w postaci obrazów satelitarnych, następnie przystąpiono do drugiego etapu prac, mającego na celu wybór kompozycji RGB stanowiacych wzorzec do rozpoznawania typów zachmurzenia na podstawie produktów MODIS. Na początku wybrano kanały niosące istotna informację spektralna o zachmurzeniu na podstawie specyfikacji technicznej algorytmów zawartych w produkcie MOD06 – maska chmurowa (cloud mask). Następujące kanały zostały wykorzystane do określenia wybranych cech zachmurzenia: 1 – gęstość optyczna chmur nad ladami; 2 – gestość optyczna chmur nad oceanami; 5 – gęstość optyczna chmur nad lodem morskim oraz śniegiem; 6 - rozróżnienie między śniegiem i zachmurzeniem;



Ryc. 5. Północny Atlantyk, 5 maja 2010, godzina 12:55 UTC. Obraz satelitarny MODIS (Terra) 2010.125.1255 w kompozycji RGB 3-2-1. Fig. 5. North Atlantic, 5th May 2010, 12:55 UTC. Satellite image MODIS (Terra) 2010.125.1255 composition RGB 3-2-1.



Ryc. 6. Europa Północno-Zachodnia, 7 maja 2010, godzina 11:00 UTC. Obraz satelitarny MODIS (Terra) 2010.127.1100 w kompozycji RGB 3-2-1. Fig. 6. North-West Europe, 7th May 2010, 11:00 UTC. Satellite image MODIS (Terra) 2010.127.1100 composition RGB 3-2-1.

7 i 20 – efektywny promień cząsteczek chmurowych; 31 – korekcja termalna. Spośród 20 kanałów optycznych i 16 termalnych wyznaczono trzy próbne kompozycje:

- a) RGB 17/18-2-26
- b) RGB 21-28-8
- c) RGB 34-2-17/18.

Iloraz kanałów 17 i 18 (905 nm i 936 nm) informuje o zawartości wilgoci w atmosferze, przyjmuje najniższe wartości w przypadku obszarów zachmurzonych, wysokie - w przypadku obszarów niezachmurzonych. Kanał 2 (865 nm) wykorzystywany jest do wykrywania zachmurzenia piętra niskiego bądź zachmurzenia piętra wysokiego o dużej miąższości, nad obszarami wodnymi. Kanał 8 (412 nm) odpowiada bliskiej podczerwieni, maksymalna wartość piksela cechuje obszary wodne, wykorzystywany jest do ogólnej delimitacji zachmurzenia. Kanały 21 (3959 nm), 28 (7325 nm) oraz 34 (13635 nm) odpowiadają dalekiej podczerwieni, wykorzystywane są odpowiednio do: rozróżniania obszarów zadymionych od zachmurzonych (21), wykrywania chmur związanych z inwersją temperatury (28) oraz wykrywania wysokich chmur w oknie atmosferycznym (34).

Kompozycje próbne zostały poddane wizualnej ocenie poprawności reprezentacji wielowarstwowej struktury zachmurzenia. W połączeniu z danymi pochodzącymi z naziemnych stacji synoptycznych, na ich podstawie zostały wykreślone poligony testowe odpowiadające poszczególnym rodzajom chmur wysokich, średnich, pietru chmur niskich oraz chmurom o budowie pionowej. Informacje o wartościach pikseli w obrębie każdego poligonu testowego zostały skorelowane dla każdej pary z 36 dostępnych kanałów optycznych i termalnych. Uzyskano w ten sposób dwa parametry statystyczne: współczynnik korelacji Pearsona (tabela 1) oraz współczynnik determinacji (tabela 2). Wysokie wartości obydwu współczynników dla pary kanałów występujących w kompozycji oznaczały, że kanały te niosa podobna informację spektralna i jest ona niepotrzebnie duplikowana, zatem taka kompozycja nie jest w pełni funkcjonalna. Przyjęto, że dana para kanałów odznacza się dobra funkcjonalnością w kompozycji, jeżeli wartość bezwzględna współczynnika korelacji Pearsona wynosi mniej niż 0,3, oraz doskonałą funkcjonalnością, jeżeli wartość bezwzględna tego współczynnika wynosi mniej niż 0,1. Z uwagi na podobne charakterystyki spektralne, poligony testowe chmur Stratus, Nimbostratus oraz Stratocumulus zostały połaczone.

Dzięki wprowadzeniu kryterium korelacji wyeliminowano z kompozycji próbnych te



Ryc. 7. Metodyka projektu. Fig. 7. Project methodology.

Tabela 1. Wartości współczynnika korelacji Pearsona pomiędzy parami kanałów w kompozycjach wzorcowych. Podkreśleniem oznaczono wartość bezwzględną współczynnika korelacji Pearsona mniejszą niż 0,3. *Table 1. Values of a Pearson product-moment correlation coefficient between pairs of bands in model compositions. Absolute values of a PPMCC less than 0,3 are underlined.*

Rodzaj	Współczynnik korelacji Pearsona Pearson product-moment correlation coefficient								
chmur Cloud type	RGB 17/18-6-26			RGB 30-23-8			RGB 34-1-17		
	17/18-6	17/18-26	6-26	30-23	30-8	23-8	34-1	34-17	1-17
Ac	<u>-0,1462</u>	- <u>0,2246</u>	0,7956	<u>0,0429</u>	<u>-0,1658</u>	-0,5020	<u>0,0459</u>	<u>-0,2715</u>	<u>-0,0738</u>
As	<u>0,0364</u>	-0,7454	<u>-0,0622</u>	0,3646	<u>-0,1804</u>	<u>0,1287</u>	<u>-0,2617</u>	<u>-0,2870</u>	0,6882
Cb	<u>0,0632</u>	<u>-0,0050</u>	0,4957	<u>0,2634</u>	-	-	<u>-0,0916</u>	<u>0,0606</u>	<u>-0,2868</u>
Cc	-	-	<u>0,2889</u>	0,3126	<u>0,2751</u>	-	<u>-0,1269</u>	-0,7829	<u>-0,1657</u>
Ci	<u>0,1704</u>	-0,9337	<u>-0,1304</u>	0,7696	-0,6200	-0,7504	-0,6206	-0,6147	0,9984
Cs	-0,7984	-0,8784	0,8938	0,5490	-0,5014	-0,8495	-0,8283	-0,8367	0,9657
Cu	<u>-0,1529</u>	-0,3947	<u>0,1786</u>	0,7048	<u>-0,2303</u>	<u>-0,2290</u>	<u>0,2342</u>	<u>-0,1514</u>	<u>0,0273</u>
Ns, St, Sc	-0,5148	-0,6217	0,5789	-0,3066	<u>0,1226</u>	<u>-0,1875</u>	<u>-0,2045</u>	<u>-0,2907</u>	0,9676

kanały, które niosły podobne informacje spektralne. Dokonano korekty próbnych kompozycji RGB w taki sposób, aby uzyskane współczynniki: korelacji Pearsona oraz determinacji były jak najniższe. W rezultacie: a) kompozycja RGB 17/18-2-26 została zmieniona na

- 17/18-6-26
- b) kompozycja RGB 31-28-8 została zmieniona na 30-23-8
- c) kompozycja RGB 34-2-17/18 została zmieniona na 34-1-17.

Powyższe kompozycje zostały uznane jako wzorce do rozpoznawania rodzajów chmur na obrazach satelitarnych MODIS i na ich podstawie stworzono klucze fotointerpretacyjne zachmurzenia. Kompozycja RGB 17/18-6-26 odznacza się niską korelacją dla chmur piętra wysokiego i średniego, i może być wykorzystywana do wstępnej delimitacji pięter zachmurzenia oraz określania rodzajów chmur wysokich i średnich. Poza wymienionymi wcześniej kanałami 17, 18 i 26, wykorzystuje kanał 6 (1640 nm), w którym wartość piksela ściśle Tabela 2. Wartość współczynnika determinacji pomiędzy parami kanałów w kompozycjach wzorcowych. Podkreśleniem oznaczono wartość współczynnika determinacji mniejszą niż 0,3.

Table 2. Value of a coefficient of determination between pairs of bands in model compositions. Values of a coefficient of determination less than 0,3 are underlined.

Rodzaj chmur	Współczynnik determinacji coefficient of determination									
	R	RGB 30-23-8			RGB 34-1-17					
cioua iype	17/18-2	17/18-26	2-26	30-23	30-8	23-8	34-1	34-17	1-17	
Ac	<u>0,02</u>	<u>0,05</u>	0,63	<u>0,0</u>	<u>0,03</u>	0,25	<u>0,0</u>	<u>0,07</u>	<u>0,01</u>	
As	<u>0,0</u>	0,56	<u>0,0</u>	<u>0,13</u>	<u>0,03</u>	0,02	0,07	<u>0,08</u>	0,47	
Cb	<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>0,25</u>	<u>0,7</u>	-	-	<u>0,01</u>	<u>0,0</u>	<u>0,08</u>	
Cc	-	-	<u>0,08</u>	<u>0,1</u>	<u>0,08</u>	-	<u>0,02</u>	0,61	<u>0,03</u>	
Ci	<u>0,03</u>	0,87	<u>0,02</u>	0,59	0,38	0,56	0,39	0,38	1	
Cs	0,64	0,77	0,8	0,3	<u>0,25</u>	0,72	0,69	0,7	0,93	
Cu	<u>0,02</u>	<u>0,16</u>	<u>0,03</u>	0,5	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	<u>0,05</u>	<u>0,02</u>	<u>0,0</u>	
Ns, St, Sc	0,27	0,39	0,34	<u>0,9</u>	0,02	0,04	0,04	0,08	0,94	



Ryc. 8. Od lewej: kompozycja RGB 3-2-1 (A), RGB 17/18-6-26 (B), RGB 30-23-8 (C), RGB 34-1-17 (D). Fig. 8. From left: composition RGB 3-2-1 (A), RGB 17/18-6-26 (B), RGB 30-23-8 (C), RGB 34-1-17 (D).

Tabela 3. Klucz fotointerpretacyjny kompozycji RGB 17/18-6-26. *Table 3. Photointerpretation key of the composition RGB 17/18-6-26.*

Rodzaj chmury cloud type	Rodzaj chmury cloud type
Cirrocumulus (Cc)	 Cirrostratus (Cs)
Cirrus (Ci)	Altocumulus (Ac)
Altostratus (As)	Cumulus (Cu)
Cumulonimbus (Cb)	Stratocumulus (Sc)
Stratus (St)	Nimbostratus (Ns)

zależy od obecności wody w atmosferze. Kompozycja RGB 30-23-8 odznacza się niską korelacją dla chmur piętra niskiego oraz średniego i może być wykorzystywana do delimitacji pięter zachmurzenia oraz określania rodzajów chmur średnich, a także wykrywania komórek burzowych i konwekcyjnych. Wykorzystuje ona wymieniony wcześniej kanał 8, a także kanał 23 (4050 nm) i 30 (9730 nm) znajdujące się w paśmie częściowego okna atmosferycznego średniej i bliskiej podczerwieni. Kompozycja RGB 34-1-17 odznacza się niską korelacją dla chmur konwekcyjnych oraz chmur piętra średniego i niskiego, i może być wykorzystywana do delimitacji pięter zachmurzenia, komórek konwekcyjnych, burzowych oraz rodzajów chmur średnich i chmur o budowie pionowej. Kanał 2 został w niej zamieniony na 1 (659 nm) – odpowiada on barwie czerwonej, i przypada na drugie maksimum emisyjności wody. Porównanie kompozycji wzorcowych z kompozycją RGB 3-2-1 przedsta-



Ryc. 9. Wynik działania maski BT₂₁<270 K. Fig. 9. Result of mask BT₂₁<270 K.



Ryc. 10. Wynik działania maski $R_1>0,22$. Fig. 10. Result of mask $R_1>0,22$.

wia <mark>rycina 8</mark>, a klucz fotointerpretacyjny kompozycji RGB 17/18-6-26 przedstawia tabela 3.

Wyznaczenie kompozycji wzorcowych i stworzenie kluczy fotointerpretacyjnych umożliwiło dokładniejszą analizę struktur zachmurzenia obecnych na zobrazowaniach MODIS. W dalszym etapie sprawdzono poprawność delimitacji obszarów zachmurzonych w oparciu o testy stosowane w obecnych produktach MOD06 i MOD35. Wybrano sześć podstawowych masek delimitacyjnych i porównano wyniki uzyskane za pomocą masek z kompozycjami wzorcowymi w celu określenia skuteczności ich działania.

Maska BT_{21} <270 K działa według kryterium wartości progowej temperatury jasnościowej kanału 21. Wyniki delimitacji ilustruje Ryc. 9. Widać, że maska ta bardzo dobrze rozpoznaje chmury piętra wysokiego, w tym również szczególnie trudne do wykrycia chmury cirrostratus. Dodatkowo poprawnie wykryte są także chmury burzowe Cumulonimbus incus, z uwagi na obecność nad nimi kowadła chmur cirrus. Maska nie potrafi rozpoznać chmur piętra średniego ani niskiego, a także chmur o budowie pionowej innych niż Cumulonimbus incus (np. Cumulonibus calvus, Cumulus congestus, itp.)

Maska $R_1>0,22$ opiera się na wartości progowej reflektancji w kanale 1 (659 nm). Poprawnie rozróżnia wszystkie rodzaje oraz piętra zachmurzenia, włączając także cienkie chmury cirrostratus i stratus (Ryc. 10). Działa tam samo dobrze nad obszarami lądowymi, jak i wodnymi. Można zauważyć niewielkie rozszerzenie granic obszarów zachmurzonych w stosunku do kompozycji wzorcowych, jednak dokładność maski jest wystarczająca do wykorzystania w produktach MODIS.

Podobnie do powyższej działa maska $R_2>0,55$, wykorzystująca inny kanał reflektancji (865 nm). Poprawnie wykrywa zachmurzenie piętra niskiego oraz średniego, a także rozbudowane chmury o budowie pionowej (od Cumulus congestus wzwyż). Nie rozpoznaje natomiast zachmurzenia piętra wysokiego (**Ryc. 11**). Jej przeciwieństwem jest maska BT₃₅<222 K – wykrywa ona wierzchołki chmur Cumulonimbus oraz miąższe warstwy chmur piętra wysokiego, głównie cirrusów (**Ryc. 12**).

Dwie maski oparte na takiej samej wartości progowej różnych kanałów mogą dawać różne rezultaty w wykrywaniu zachmurzenia. Wymieniona wyżej maska BT_{21} <270 K delimituje granice chmur piętra wysokiego, podczas gdy maska BT_{31} <270 K delimituje granice zachmurzenia wszystkich pięter (Ryc. 13), przy czym cechuje się nieco mniejszą dokładnością niż maska R_1 >0,22.

Algorytmy produktów chmurowych MODIS

wykorzystują także maski oparte na testach dwukanałowych. Jedną z nich jest maska złożona z ilorazu wartości kanału 17 i 18 – R_{17}/R_{18} <1,5. Prawidłowo wyznacza ona granice zachmurzenia piętra wysokiego oraz średniego, wykrywa także wszystkie chmury



Ryc. 11. Wynik działania maski R_2 >0,55. Fig. 11. Result of mask R_2 >0,55.



Ryc. 12. Wynik działania maski ${\rm BT_{35}}{<}222$ K. Fig. 12. Result of mask ${\rm BT_{35}}{<}222$ K.



Ryc. 13. Wynik działania maski BT₃₁<270 K. Fig. 13. Result of mask BT₃₁<270 K.

o budowie pionowej (nawet cumulus humilis), nie wykrywa natomiast zachmurzenia piętra niskiego (ryc. 14).

Podsumowanie

Dane uzyskiwane za pomocą sensorów MODIS, dzięki globalnemu zasięgowi i dużemu zakresowi spektralnemu, stanowią istotne źródło informacji na temat procesów pogodowych zachodzących w atmosferze, których najwyraźniejszym skutkiem jest powstawanie



Ryc. 14. Wynik działania maski R_{17}/R_{18} <1,5. Fig. 14. Result of mask R_{17}/R_{18} <1,5.

różnorodnych form i struktur zachmurzenia – od drobnych chmur konwekcyjnych po rozległe makroskalowe systemy frontowe i cyklonalne. Algorytmy wykrywające zachmurzenie, stosowane w bieżących produktach MODIS-a, opierają się przede wszystkim na prostych testach jedno- i dwukanałowych. Stosowanie prostych kryteriów delimitacji zwiększa jednak ryzyko niedokładnego lub błędnego wyznaczenia obszarów zachmurzonych, ponadto produkty chmurowe MOD06 i MOD35 nie przekazują informacji o piętrach, rodzajach, gatunkach ani odmianach chmur, co znacząco ogranicza możliwości ich późniejszego wykorzystania do bardziej szczegółowych analiz nefologicznych. Dlatego konieczne jest określenie wzorcowych kompozycji barwnych umożliwiających rozpoznanie szczegółowej struktury zachmurzenia z podziałem morfologicznym na podstawie pojedynczego zobrazowania MODIS.

Na podstawie analizy statystycznej informacji spektralnych dot. chmur przenoszonej przez poszczególne kanały optyczne i termalne wybrano trzy wzorcowe kompozycje RGB umożliwiające rozróżnienie pięter, rodzajów, a niekiedy także gatunków i odmian chmur. Są to kompozycje RGB 17/18-6-26, RGB 30-23-8, RGB 34-1-17. Mając do dyspozycji wzorce do rozpoznawania chmur na obrazach satelitarnych dokonano oceny skuteczności działania sześciu masek wykorzystywanych w produktach MODIS-a do delimitacji zachmurzenia. Wszystkie maski poprawnie wyznaczają granice obszarów zachmurzonych, chociaż każda wykrywa tylko chmury określonych pięter. Połączenie informacji z kilku masek umożliwia bardzo dokładne wyznaczenie granic zachmurzenia wszystkich pięter. Warto jednak zauważyć, że maski stanowią bitową reprezentację dyskretną i mogą przekazać tylko informację o obecności lub braku zachmurzenia, nie przekazują natomiast informacji o cechach zachmurzenia, takich jak rodzaj chmur, gatunek, odmiana, miąższość warstwy, itp. Informacje tego typu nie mogą zostać określone za pomocą algorytmów komputerowych, niezbędne jest do tego działanie specjalisty, posiadającego zarówno wiedzę teledetekcyjną, jak i meteorologiczną, dla którego klucz fotointerpretacyjny będzie stanowił narzędzie wspomagające analizy nefologiczne. Wykorzystanie kluczy fotointerpretacyjnych oraz masek chmurowych w meteorologii jest zagadnieniem wartym głębszego zbadania i daje podstawę do prowadzenia dalszych prac w tym zakresie.

Podziękowania:

Projekt został zrealizowany w ramach działalności Koła Naukowego Geoinformatyki i Teledetekcji Uniwersytetu Warszawskiego. Dziękujemy Ewelinie Flis za pomoc okazaną we wstępnej fazie projektu.

Literatura

- Ackerman S., Frey R., Strabala K., Liu Y., Gumley L., Baum B., Menzel P., 2010, Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document. Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin – Madison, http:// sky.ccny.cuny.edu/ wc/atbd_mod06.pdf (dostęp 05.06.2011).
- Key J. R., 2002, The Cloud and Surface Parameter Retrieval (CASPR) System for Polar AVHRR User's guide. http://stratus.ssec.wisc.edu/caspr/userman.pdf (dostęp 05.06.2011).
- King M. D., Tsay S. C., Platnick S. E., Wang M., Liou K. N., 1997, Cloud Retrieval Algorithms for MODIS: Optical Thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod05. pdf (dostęp 05.06.2011).
- Kotarba A. Z., 2009, A comparison of MODIS-derived cloud amount with visual surface observations. *Atmospheric Re*search, 92 (4), s. 522-530.
- Kotarba A. Z., 2010, Estimation of fractional cloud cover for Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer/Terra cloud mask classes with high-resolution over ocean AS-TER observations. Journal of Geophysical Research., 115, D22210.
- Kriebel K. T., Gessel G., Kästner M., Mannstein H., 2004, The Cloud Analysis Tool APOLLO: Improvements and Validations, Institut für Physik der Atmosphäre Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum. http://www.mssl.ucl.ac.uk/ imaging/cloudmap/cloudmap/papers/DLR-IPA/Kriebel99. pdf (dostęp 05.06.2011).
- Thomas S. M., Heidinger A. K., Pavolonis M. J., 2004, Comparison of NOAA's Operational AVHRR-Derived Cloud Amount to Other Satellite-Derived Cloud Climatologies. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, 17, s. 4805-4822. http://ladsweb.nascom.nasa.gov/



Kamil Leziak – magistrant na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Prowadzi prace związane z wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej w terenowych badaniach meteorologicznych i klimatologicznych. Członek Zarządu Koła Naukowego Geoinformatyki i Teledetekcji, kieruje pracami klimatologicznej grupy roboczej. Interesuje się analizami przestrzennymi ekstremalnych zjawisk atmosferycznych oraz numerycznymi modelami pogodowymi. Adres do korespondencji: kamil.leziak@gmail.com



Mgr Sylwia Nasiłowska – pracownik Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. W 2008 absolwentka studiów magisterskich w macierzystej jednostce. W 2012 ukończyła Studium Doktoranckie.

Adres do korespondencji: sylwianasilowska@gmail.com, telefon: + 48 22 55 21 634, fax: + 48 22 5521521.