

DETEKCJA WARUNKÓW OGRANICZONEJ WIDZIALNOŚCI Z WYKORZYSTANIEM DANYCH SATELITARNYCH I NAZIEMNYCH

DETECTION OF LOW VISIBILITY CONDITIONS WITH SATELLITE AND GROUND DATA

Michał Bobrowski

Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Jagielloński

SŁOWA KLUCZOWE: mgła, niski Stratus, widzialność, teledetekcja atmosfery, Meteosat

STRESZCZENIE: W pracy analizowano skuteczność metod detekcji mgieł, opartych na danych z satelity MSG 2. Porównano metody teledetekcyjne z obserwacjami stanu pogody na stacjach synoptycznych IMGW-PIB z obszaru Polski, obejmującymi okres od października 2010 r. do marca 2011 r. Stwierdzono, że dane satelitarne pozwalają z dużym prawdopodobieństwem wskazać obszary występowania mgieł i niskich chmur Stratus. Określenie, kiedy występuje mgła, a kiedy tylko niski Stratus jest jednak bardzo trudne, a często niemożliwe, bez wykorzystania dodatkowych danych naziemnych. W tym celu można wykorzystać temperaturę punktu rosy i temperaturę powietrza mierzona w klatce meteorologicznej. Rozróżnienie mgieł i chmur niskich jest bardzo cenne ze względów praktycznych, ponieważ mgła powoduje ograniczenie widzialności poniżej 1 km, natomiast chmura Stratus nie musi znacząco wpływać na możliwość obserwacji obiektów przy powierzchni ziemi. Metoda omówiona w pracy pozwoliła na wykrycie 50-64% zaobserwowanych mgieł. Około 25-35% sygnalizowanych przypadków wystąpienia mgły nie znalazło potwierdzenia w obserwacjach ze stacji synoptycznych (wystąpił tzw. fałszywy alarm).

1. WPROWADZENIE

Warunki pogodowe odgrywają ważną rolę w wielu gałęziach gospodarki. Przykładem może być transport, w którym jednym z czynników decydujących o bezpieczeństwie jest tzw. widzialność meteorologiczna. Definiowana jest ona, jako „odległość graniczna, przy której ciało o barwie czarnej o wymiarach kątowych nie mniejszych niż 0.3° zlewa się na horyzoncie z tłem nieba i staje się niewidoczne” (Niedźwiedz, 2003). W celu określenia tak rozumianej widzialności, obserwatorzy na stacjach posługują się wybranymi wcześniej obiektami terenowymi (reperami), położonymi w określonej odległości od stacji. Obecnie często wykorzystywane są urządzenia pozwalające na automatyczny pomiar tego parametru. Pojawienie się w latach 60. XX wieku pierwszych satelitów meteorologicznych umożliwiło zupełnie nowe podejście do badania atmosfery oraz prognozowania pogody. W 2002 roku umieszczony na orbicie został pierwszy satelita *Meteosat Second Generation* (MSG), który wraz z satelitą MSG 2 (od 2005 roku) jest podstawowym satelitą operacyjnym europejskich służb meteorologicznych. Wykorzystuje on 12 kanałowy radiometr SEVIRI, rejestrujący obrazy z rozdzielczością 15 (MSG 2) lub 5 minutową

(MSG 1 w trybie *rapid scan*) (www.eumetsat.int). Obrazy uzyskane ze wspomnianych satelitów wykorzystywane są m.in. do detekcji mgieł i niskiego zachmurzenia.

1.1. Cel pracy

Celem pracy jest ocena dokładności produktów satelitarnych, wykorzystywanych do identyfikacji wystąpienia mgły (sytuacji z widzialnością < 1 km). Pojęcie produktu satelitarnego rozumiane jest jako kombinacja kanałów spektralnych, dostępnych z radiometru SEVIRI satelity MSG 2. Zbadano także możliwość połączenia danych satelitarnych z pomiarami ze stacji naziemnych (temperaturą powietrza oraz niedosytem punktu rosy). Celem było ograniczenie liczby przypadków, kiedy metoda oparta wyłącznie na analizie obrazu satelitarnego wskazuje mgłę, która nie została zaobserwowana na stacji meteorologicznej (występuje tzw. fałszywy alarm).

1.2. Dane i metoda opracowania

Podstawą opracowania były obrazy zarejestrowane przez radiometr SEVIRI satelity MSG 2 w okresie od października 2010 r. do marca 2011 r. Dla wspomnianych danych przygotowano różnice kanałów oraz kompozycje barwne, wykorzystywane do diagnozowania sytuacji mgła/niski Stratus. Danymi referencyjnymi były depesze SYNOP z sieci 74 stacji synoptycznych i lotniskowych IMGW-PIB z obszaru Polski. Ze względu na rozdzielczość przestrzenną danych satelitarnych (na obszarze Polski około 2 km w kanale panchromatycznym i około 6 km w pozostałych kanałach spektralnych), lokalne mgły (np. radiacyjne w kotlinach górskich) mogłyby zostać „niezauważone” przez satelitę. Z dostępnej bazy depesz SYNOP wybrano więc dni, kiedy zanotowano wystąpienie mgły na kilku sąsiadujących stacjach. Ostatecznie w pracy wykorzystano 30 obrazów satelitarnych. O doborze przypadków decydowała potrzeba analizy skuteczności poszczególnych produktów w sytuacji różnego oświetlenia (dzień, noc, zmierzch/świt) oraz występowania pokrywy śnieżnej. Następnie dla wybranych przypadków przygotowano kompozycje barwne i produkty oparte na różnicy dwóch kanałów, które zdefiniowano zgodnie z zaleceniami EUMETSAT (Kerkmann, 2004a). Wstępnym etapem była jakościowa ocena poszczególnych produktów w określonych przypadkach. Dla wybranych 10 dni przeprowadzono szczegółową analizę sytuacji synoptycznej prowadzącej do pojawienia się mgły i zachowania określonych metod detekcji w danych warunkach. Następnie dla stacji, na których zaobserwowano w danym dniu mgłę zanotowano temperaturę (dla kanałów termalnych) i albedo (kanały w paśmie widzialnym) zmierzone z pułapu satelitarnego i na tej podstawie ustalono wartości progowe dla poszczególnych produktów. Ocenę dokładności takiego postępowania przeprowadzono dla wcześniej niewykorzystanych przypadków za pomocą wskaźników A, FAR, CSI i POD (omówionych w rozdziale 3). Dodatkowo, aby odróżnić mgłę od chmury Stratus konieczne było zdefiniowanie progu dla wysokości wierzchołków chmur i niedosytu punktu rosy.

1.3. Dotychczasowy stan badań

Problem ograniczonej widzialności ma wielkie znaczenie praktyczne, stąd jego bogate opracowanie w literaturze światowej. Temat satelitarnej detekcji mgieł podejmowali

w swoich pracach m.in. Bendix *et al.* (2004) oraz Choudhury *et al.* (2007). W wymienionych publikacjach wykorzystywano głównie dane z radiometru AVHRR lub MODIS. Wspomniani autorzy zajmowali się również zagadnieniem automatycznej klasyfikacji tego zjawiska na zdjęciach satelitarnych (Cermak, Bendix, 2007; 2008). Poza programami ustalonymi dla poszczególnych kanałów wykorzystali informacje o średnicy cząsteczek budujących mgłę i jej grubości optycznej. Zastosowano również metodę określania wysokości wierzchołków chmur na podstawie różnicy temperatury w kanale 10.8 μm , zmierzonej na powierzchni gruntu i wierzchołku chmury (Cermak, Bendix, 2007; 2008). W pracy Anthisa i Cracknella (1999) stwierdzono, że dane satelitarne mogą posłużyć także do prognozowania zanikania mgły, bezpośrednio z wartości albedo w kanałach widzialnych. Cermak *et al.* (2009) na podstawie danych z satelity MSG przeprowadzili analizę występowania mgieł w Europie w latach 2004-2008. Stwierdzono w niej wysoką zgodność wyników pracy uzyskanych na podstawie metod teledetekcyjnych z wnioskami wyciągniętymi z danych konwencjonalnych z okresu 1971-1996. Pojawiające się rozbieżności w terenach górskich autorzy przypisali występowaniu mgieł radiacyjnych o rozmiarach subpikselowych, których nie można było uwzględnić.

2. PRODUKTY SATELITARNE WYKORZYSTYWANE DO DETEKCJI MGIEŁ

Do detekcji mgieł/niskich Stratusów samodzielnie wykorzystuje się kanał HRV o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej (umożliwiającej detekcję także lokalnie występujących mgieł) oraz kanał 3.9 μm . Drugi ze wspomnianych rejestruje promieniowanie w zakresie obejmującym promieniowanie termalne (wielkość tego promieniowania jest funkcją temperatury obiektu) oraz średnią podczerwień (promieniowanie odbite). Cechą charakterystyczną mgieł jest wysokie albedo (duża wartość promieniowania odbitego) przy jednocześnie stosunkowo wysokiej (w porównaniu z chmurami położonymi w wyższych piętrach) temperaturze, decydującej o dużych wartościach promieniowania emitowanego w paśmie termalnym. Powoduje to, że nisko położone („cieple”) chmury o wysokim albedo są wyraźnie widoczne w tym kanale na tle gruntu i chmur wyższych pięter.

Różnica kanałów $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$

Współczynnik emisyjności dla małych kropli wody w zakresie promieniowania o długości fali 10.8 μm (kanał 9 radiometru SEVIRI) jest bliski 1, natomiast dla fal o długości 3.9 μm (kanał 4 SEVIRI) obniża się do 0.8-0.9 (Anthis, Cracknell, 1999). Mgły i niskie chmury Stratus emitują więc promieniowanie w zakresie fal o długości 3.9 μm znacznie słabiej niż o długości 10.8 μm . Dlatego różnicę temperatur radiacyjnych mierzonych w tych dwóch kanałach można wykorzystać w detekcji mgieł. Pewnym problemem jest częściowe pokrywanie się pasma absorpcji CO_2 z kanałem 3.9 μm . Stanowi to poważne utrudnienie, zwłaszcza w przypadku obszarów położonych w wysokich szerokościach geograficznych. Inną wadą jest duży szum kanału 3.9 μm dla obiektów o niskiej temperaturze (Kerkmann, 2004a). Cechą omawianego produktu z kanałów 4 i 9 jest zmieniający się znak różnicy temperatur w dzień (kiedy jest ona dodatnia na skutek znacznej składowej wynikającej z odbicia promieniowania w kanale 3.9) i w nocy (ujemna). Może to sprawiać pewne trudności w jego prawidłowej interpretacji wizualnej.

Mgła w tym produkcie jest stosunkowo łatwo odróżnialna od gruntu i chmur wyższych pięter. W toku analiz ustalono, że wartość różnicy temperatur radiacyjnych kanałów $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ dla mgły przekracza $+6.0^\circ\text{C}$ w dzień i od jest mniejsza od -6.0°C w nocy.

Różnica kanałów $K_{8.7 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$

Produkt ten opiera się, podobnie jak opisany powyżej, na różnicy w promieniowaniu emitowanym w różnych zakresach spektralnych przez kropelki wody. Różnica tych kanałów, w przeciwieństwie do opisanych wcześniej umożliwia detekcję w warunkach zmierzchu/świtu. Odnacza się także stałą wartością progową niezależnie od warunków oświetlenia. Pewną trudność może sprawiać mniej wyraźny kontrast pomiędzy mgłą a gruntem. Pierwsza z wymienionych ma wartości różnicy temperatur radiacyjnych (BTD - *Brightness Temperature Difference*) w granicach -3.0°C , a więc znacznie mniej niż w przypadku produktu omawianego powyżej. Dla gruntu BTD wynoszą około -1.0°C .

Różnica kanałów $K_{12.0 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$

Różnica ta służy do odróżniania chmur niskich od wysokich i pokrywy śnieżnej. Wykorzystuje się ją, jako składową czerwoną kompozycji mikrofizycznej całodobowej i nocnej mikrofizycznej, co powoduje czerwone zabarwienie grubych chmur wysokich, spowodowane niską temperaturą (niewielką składową niebieską) i małą różnicą w kanałach $K_{8.7 \mu\text{m}}$ (kanał 7 SEVIRI) – $K_{10.8 \mu\text{m}}$ (24M) i $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ (NM) (niewielką składową zieloną). Cienkie Cirrusy są raczej czarne, ze względu na niską wartość różnicy $K_{12.0 \mu\text{m}}$ (kanał 10 SEVIRI) – $K_{10.8 \mu\text{m}}$, przy niewielkich wartościach pozostałych składowych (www.eumetsat.int).

KOMPOZYCJE BARWNE

Ponieważ radiometr SEVIRI rejestruje obraz tylko w 2 widzialnych zakresach promieniowania (kanały 1 i 2), nie jest możliwe stworzenie za jego pomocą obrazu Ziemi w kolorach rzeczywistych. Wykorzystuje się jednak inne kanały lub ich różnice w celu przygotowania kompozycji barwnych. Umożliwiają one uzyskanie stosunkowo łatwej w analizie (głównie wizualnej) informacji o stanie atmosfery, niedostępnej przy wykorzystaniu pojedynczych obrazów.

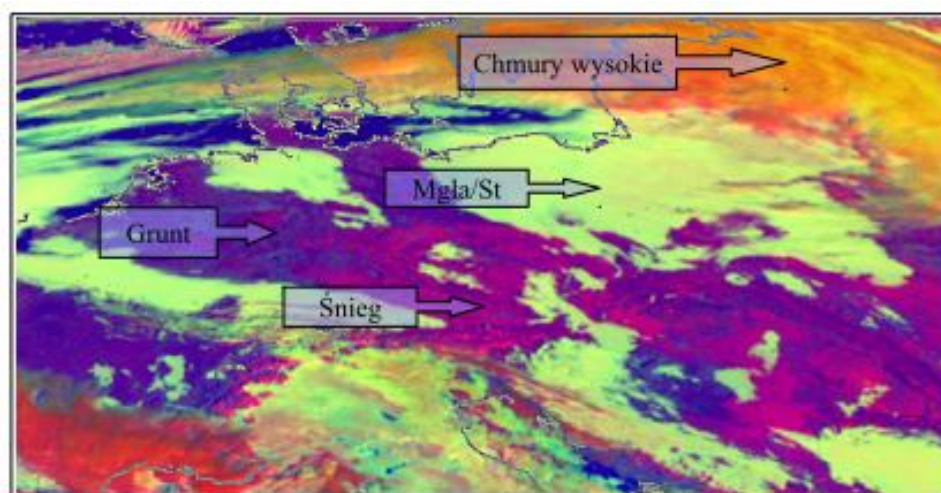
Kompozycja całodobowa mikrofizyczna $K_{12.0 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}} / K_{10.8 \mu\text{m}} - K_{8.7 \mu\text{m}} / K_{10.8 \mu\text{m}}$ (24h Microphysics) - 24M

Kompozycja całodobowa mikrofizyczna powstaje poprzez złożenie wcześniej opisanych BTD: $K_{12.0 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ (składowa czerwona), $K_{10.8 \mu\text{m}} - K_{8.7 \mu\text{m}}$ (zielona) i dodatkowo kanału termalnego $10.8 \mu\text{m}$ (składowa niebieska). Taki układ powoduje, że nisko położone (cieple) mgły (duża składowa niebieska), charakteryzujące się wysoką wartością różnicy $K_{10.8 \mu\text{m}} - K_{8.7 \mu\text{m}}$ (składowa zielona) mają kolory zbliżone do żółtego. Kompozycje mikrofizyczne w przeciwieństwie do opisanych wcześniej różnic dwóch kanałów pozwalają na rozróżnienie na obrazie np. chmur wysokich i pokrywy śnieżnej.

Produkt *24Microphysics* może być wykorzystywany do całodobowego monitoringu mgieł i chmur niskich.

**Kompozycja dzienna mikrofizyczna 0.8 / 3.9r / 10.8 μm
(*Day microphysics*) – DM**

W metodzie tej (poza kanałem widzialnym 0.8 μm i termalnym 10.8 μm) zastosowano tylko składową wynikającą z odbicia promieniowania w kanale 3.9 μm . Wykorzystano tutaj fakt, że jest ona zależna od stanu skupienia i wielkości cząstek budujących chmurę. Mniejsze kropelki odbijają więcej promieniowania, podobnie chmury zbudowane z kropelek wody mają wyższą wartość albedo w tym zakresie spektralnym niż chmury lodowe (www.eumetsat.int). Przeważające na tym produkcie mgły mają kolory zbliżone do zielonożółtego (rys. 1). Grunt pokryty śniegiem ma barwę jasnioletową, natomiast chmury wysokie pomarańczową.



Rys. 1. Kompozycja dzienna mikrofizyczna z dnia 29 stycznia 2011 r., godz. 10 UTC.

**Kompozycja nocna mikrofizyczna $K_{12.0 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ / $K_{10.8 \mu\text{m}}-K_{3.9 \mu\text{m}}$ / $K_{10.8 \mu\text{m}}$
(*Night microphysics*) – NM**

Na tym produkcie mgły będą miały kolory zbliżone do żółtego lub zielonożółtego. Kolory gruntu i chmur wysokich są zbliżone do tych występujących w kompozycji całodobowej mikrofizycznej, jednak w porównaniu z nią grunt przykryty śniegiem jest łatwiejszy do zaobserwowania. Ze względu na wspomniany wyżej problem szumu w kanale 3.9 μm , kompozycja ta nie jest zalecana w przypadku bardzo niskich temperatur (www.eumetsat.int).

3. WYNIKI

Ocenę dokładności produktów przeprowadzono przy użyciu prostych i często stosowanych następujących wskaźników: *Accuracy (A)*, *Probability of Detection (POD)*, *False Alarm Ratio (FAR)* i *Critical Success Index (CSI)*.

$$Accuracy (A) = \frac{\text{wykryta mgła} + \text{wykryty brak mgły}}{\text{wszystkie przypadki}}$$

$$Probability\ Of\ Detection (POD) = \frac{\text{wykryta mgła}}{\text{wykryta mgła} + \text{niewykryta mgła}}$$

$$False\ Alarm\ Ratio (FAR) = \frac{\text{falszywy alarm}}{\text{wykryta mgła} + \text{falszywy alarm}}$$

$$Critical\ Success\ Index (CSI) = \frac{\text{wykryta mgła}}{\text{wykryta mgła} + \text{falszywy alarm} + \text{niewykryta mgła}}$$

Aby wykluczyć sytuacje, kiedy mgły były przykryte chmurami wyższych pięter, z analizy wyłączono stacje, na których różnica temperatury zmierzonej na stacji i w kanale 10.8 μm przekraczała 10°C (podobne kryterium przyjęli Gultepe *et al.* 2007). Stwierdzono, że wyniki klasyfikacji oparte tylko na progowej wartości dla jednego produktu charakteryzują się wysokim wskaźnikiem FAR. Jest to spowodowane występowaniem nad stacją niskich chmur Stratus (często także zamglenia) rejestrowanych przez satelitę, które jednak nie są notowane przez obserwatora, jako wystąpienie mgły. Aby zmniejszyć wskaźnik FAR wykorzystano dodatkowe dane naziemne. Jeżeli wartości przyjęte dla danej kompozycji lub różnicy kanałów wskazywały na wystąpienie mgły, a różnica temperatury w klatce i kanale 10.8 μm przekraczała 3.9°C (lub -3.9°C w warunkach inwersji pionowego rozkładu temperatury) przyjmowano, że na stacji nie wystąpiła mgła. Wykazano (Tabela 1), że ta metoda daje dobre wyniki (np. dla różnicy $K_{3.9\ \mu\text{m}} - K_{10.8\ \mu\text{m}} \geq +6.0^\circ\text{C}$ wskaźnik FAR obniżono w warunkach dziennych z 0.751 do 0.296). Aby poprawić rezultaty dodatkowo ustalono próg dla niedosytu punktu rosy (różnica pomiędzy temperaturą powietrza i temperaturą punktu rosy). Jeżeli na danej stacji przekraczał on 1.0°C, wynik oznaczano, jako brak mgły nawet, jeżeli dany produkt i różnica temperatury wskazywały na jej wystąpienie. Ta charakterystyka w połączeniu z danymi o temperaturze pozwoliła znacznie poprawić wyniki (np. dla kanałów $K_{8.7\ \mu\text{m}} - K_{10.8\ \mu\text{m}}$ przy progu $\leq -3.0^\circ\text{C}$ w dzień, FAR zmniejszono z 0.482 do 0.323).

Tab. 1. Dokładności produktu $K_{3.9\ \mu\text{m}} - K_{10.8\ \mu\text{m}}$ (próg $\geq +6.0^\circ\text{C}$) w dzień, n = 563.

	A	POD	FAR	CSI
4-9	0.631	0.844	0.751	0.238
4-9 z temp.*	0.915	0.649	0.296	0.510
4-9 z TD**	0.918	0.636	0.269	0.516

* rozróżnienie mgły i chmur Stratus za pomocą kanału 10.8 μm i danych naziemnych

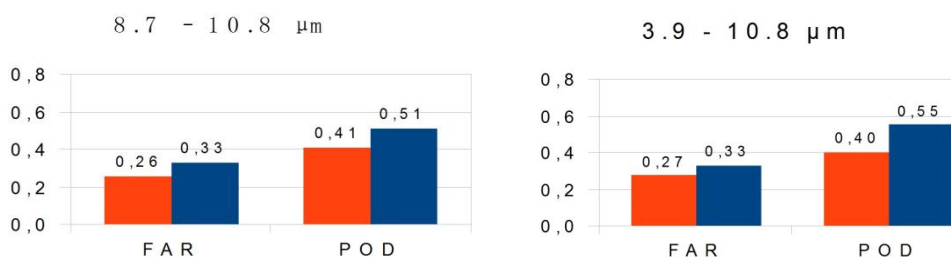
** rozróżnienie mgły i Stratusa z wykorzystaniem różnicy temperatury w klatce meteorologicznej i kanale 10.8 μm oraz z uwzględnieniem niedosytu punktu rosy

n – liczba uwzględnionych obserwacji

Tabela 2. Porównanie analizowanych produktów z uwzględnieniem danych o temperaturze i niedosycie punktu rosy.

	A	POD	FAR	CSI
Warunki dzienne (n = 563)				
4-9 $\geq +6.0^{\circ}\text{C}$	0.918	0.636	0.269	0.516
7-9 $\leq -3.0^{\circ}\text{C}$	0.904	0.571	0.323	0.449
Warunki nocne (n = 560)				
4-9 $\leq -6.0^{\circ}\text{C}$	0.839	0.400	0.273	0.348
7-9 $\leq -3.0^{\circ}\text{C}$	0.843	0.408	0.258	0.358

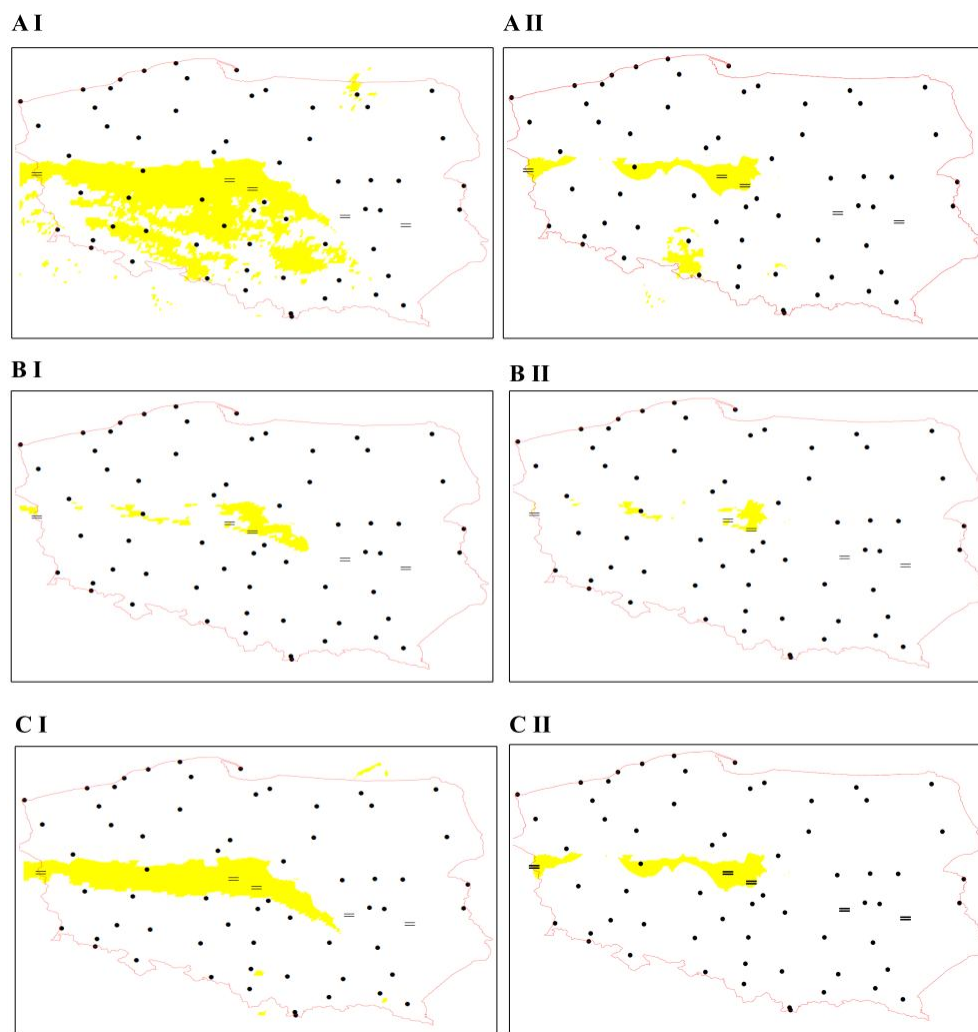
W dzień, najwyższym odsetkiem wykrytej mgły cechowała się różnica kanałów $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$: $\text{POD} = 0.636$, $\text{FAR} = 0.269$ (dla progu $\geq +6.0^{\circ}\text{C}$) (Tabela 2). Kompozycja dzienna (DM) dała wyniki niewiele gorsze: $\text{POD} = 0.620$, $\text{FAR} = 0.273$. Najgorsze rezultaty uzyskano dla produktu $K_{8.7 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$: $\text{POD} = 0.571$, $\text{FAR} = 0.323$. Po zdefiniowano dodatkowego progu dla BTD $K_{12.0 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ (produkt 24M), dla różnicy kanałów $K_{8.7 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ liczba fałszywych alarmów nie uległa zmianie, natomiast POD obniżono do 0.540. Warto wspomnieć, że bez stosowania progu dla TD różnica FAR pomiędzy tymi produktami ($K_{8.7 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ i 24M) była znaczna. Pokazuje to, że zdefiniowanie dodatkowego progu dla kanałów $K_{12.0 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ miało pozytywny wpływ na wyniki (podobna zależność wystąpiła dla opisanych niżej przypadków z pory nocnej). Wysoka wartość wskaźnika A (około 0,9 dla wszystkich produktów) w dużym stopniu spowodowana jest częstym brakiem zachmurzenia nad daną stacją, który został poprawnie wskazany jako brak mgły. Wskaźnik CSI nie uwzględnia przypadków braku mgły, dlatego przyjmuje znacznie niższe wartości. Potwierdza on jednak przewagę produktów $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ i DM nad pozostałymi.



Rys. 2. Porównanie wybranych wskaźników dla produktów $K_{3.9 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ i $K_{8.7 \mu\text{m}} - K_{10.8 \mu\text{m}}$ w warunkach nocnych przy wartości progowej odpowiednio $\leq -6.0^{\circ}\text{C}$ i $\leq -3.0^{\circ}\text{C}$ (kolor czerwony) oraz $\leq -5.0^{\circ}\text{C}$ i $\leq -2.8^{\circ}\text{C}$ (kolor niebieski).

Porównanie wybranych wskaźników przy dwóch różnych progach pokazuje, że w tym przypadku ich obniżenie nie wpłynęło znacząco na poprawę wyników (w przypadku różnicy $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ nie miały żadnego wpływu, a przy $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ POD wzrósł z 0.571 do 0.610). Podobna zależność analizowana dla przypadków nocnych (Rys. 2) charakteryzuje się znaczną poprawą wskaźników POD (zarówno dla $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ jak i $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$), kosztem jednak wzrostu wskaźnika FAR. Potencjalny użytkownik informacji musi więc zdecydować, czy godząc się na większe przeszacowanie zasięgu mgły poprawić wskaźniki „wykrywalności” produktów. Można zauważyć też, że różnice pomiędzy metodami detekcji (Rys. 3) dotyczą w mniejszym stopniu wykrywalności, a większym liczby stacji fałszywie oznaczonych jako mgła. Stwierdzono, że w warunkach dziennych najlepiej jest wykorzystywać różnicę kanałów $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ lub kompozycję DM. Należy jednak pamiętać, że produkty te bez wykorzystania danych o temperaturze cechuje bardzo wysoki odsetek fałszywych alarmów (FAR wynosi odpowiednio 0.751 i 0.681). W pracy operacyjnej ich zastosowanie będzie także ograniczać bezużyteczność w porze zmierzchu/świtu, a więc w czasie, kiedy mgły tworzą się szczególnie często. Zróżnicowanie pomiędzy poszczególnymi produktami było mniej wyraźne w warunkach nocnych. Zaobserwowano także znacznie niższy odsetek wykrytych mgieł. Wskaźnik POD dla produktów $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ i $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ przy progach odpowiednio $\leq -6.0^\circ\text{C}$ i $\leq -3.0^\circ\text{C}$ wyniósł 0.400 i 0.408, co oznacza że mniej niż połowa wszystkich przypadków została poprawnie wykryta (Tabela 2). Znaczna poprawa w tym zakresie nastąpiła dopiero po obniżeniu wartości progowych do $\leq -5.0^\circ\text{C}$ i $\leq -2.8^\circ\text{C}$, co pozwoliło wykryć odpowiednio 55 i 51 % przypadków (Rys. 2). Obniżenie wskaźnika FAR po zdefiniowaniu progów dla TD nie było tak znaczne jak w poprzednio analizowanych sytuacjach. W warunkach nocnych minimalnie lepsza okazała się kompozycja 24M. Po obniżeniu wartości progowych (do $\leq -5.0^\circ\text{C}$) skuteczniejsza była różnica $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ (FAR = 0.330, POD = 0.550), która przy identycznym jak różnica $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ wskaźniku FAR miała znacznie wyższy odsetek wykrytych mgieł (POD dla $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ przy progów $\leq -2.8^\circ\text{C}$ wyniósł 0.508). Dodatkowe uwzględnienie różnicy $K_{12.0 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ (jak w NM) spowodowało obniżenie FAR do 0.305. W sytuacji zmierzchu/świtu można wykorzystać tylko produkty w całości oparte o zakres podczerwieni termalnej, a więc $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ i 24M. Dla różnicy kanałów $K_{8.7 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ dla progów -2.8°C uzyskano wyniki: POD = 0.573, FAR = 0.343. Kolejnym etapem pracy była analiza rozkładu widzialności na stacjach synoptycznych, które zostały błędnie zaklasyfikowane, jako objęte mgłą (wystąpił fałszywy alarm). Dla produktu 24M, po wykorzystaniu dodatkowych danych naziemnych 50 % fałszywych alarmów dotyczyło stacji, na których widzialność nie przekroczyła 2.5 km (na 80 % było to mniej niż 4 km). Tylko 3 razy (na 62 obserwacje) widzialność przekroczyła 10 km, a więc nie wystąpiło nawet zamglenie (najwyższa zanotowana widzialność to 15 km). W przypadku klasyfikacji samego produktu DM mediana wyniosła 4 km (80 % mniej niż 8 km), a maksymalne wartości osiągały nawet 45 km. Dowodzi to, że omawiany produkt, pomimo że nie zawsze sprawdza się w detekcji mgły (a więc sytuacji z widzialnością < 1 km), po wykorzystaniu danych naziemnych dobrze diagnozuje zasięg obszaru, na którym występuje znaczne ograniczenie widzialności. Na koniec warto przytoczyć wyniki prac, w których analizowano skuteczność metod omówionych w pracy do wykrycia niskich chmur (a nie tylko mgły). W pracy Ellroda (2002), w której połączono dane satelitarne z temperaturą z klatki meteorologicznej, uzyskano wskaźniki POD = 0.700

i FAR = 0.100. Z kolei Cermak i Bendix (2008) dla swojego schematu detekcji chmur Stratus, uzyskali wyniki POD = 0.764, FAR = 0.060 i CSI = 0.729. Świadczy to o znacznej przydatności danych satelitarnych w analizie tego typu zjawisk, pomimo trudności w detekcji ograniczenia widzialności poniżej 1 km (mgły), co w znacznym stopniu wykazano w niniejszej pracy.



Rys. 3. Mapa zasięgu mgły z 11 października 2010 r. z godz. 09 UTC, przygotowana przy pomocy: A – różnicy kanałów $K_{8.7\mu m} - K_{10.8\mu m}$ – próg $\leq -3^{\circ}C$ (o najwyższym współczynniku FAR) oraz B – kompozycji DM i C – różnicy $K_{3.9\mu m} - K_{10.8\mu m}$ – próg $\geq +6.0^{\circ}C$ (charakteryzujących się najwyższą dokładnością), produkty uzupełniono: I - różnicą temperatur w klatce i kanale 10.8 μm , II - różnicą temperatur w klatce i kanale 10.8 μm oraz deficytem punktu rosy, mgła zaznaczona na żółto.

4. WNIOSKI

Całkowita dokładność ocenianych produktów satelitarnych wskazuje, że pomimo swojej względnej prostoty, stanowią one dobre narzędzie do diagnozowania wystąpienia mgły i niskich chmur Stratus. Bardzo trudne jest jednak określenie, czy w danym przypadku wystąpiła mgła czy tylko niskie chmury, niepowodujące ograniczenia widzialności poniżej 1 km. Rozróżnianie takie jest możliwe przy wykorzystaniu różnicy temperatury na poziomie 2 m i zmierzonej w kanale 10.8 μm . Zdefiniowanie progu dla niedosytu punktu rosy spowodowało dodatkowe obniżenie wskaźnika FAR. Najskuteczniejszym produktem okazała się różnica kanałów $K_{3.9 \mu\text{m}}-K_{10.8 \mu\text{m}}$ przy progu ustalonym na $\leq -5.0^\circ\text{C}$ w nocy i $\geq +5.0^\circ\text{C}$ w dzień. Po zastosowaniu danych naziemnych udało się także uzyskać relatywnie niski wskaźnik FAR (0.290 w dzień i 0.330 w nocy). Na podstawie wszystkich przeanalizowanych obserwacji można stwierdzić, że po uwzględnieniu danych naziemnych poprawnie udaje się wykryć 50–64 % przypadków mgły, natomiast 25–35 % pikseli zaklasyfikowanych przez algorytm, jako mgła, nie znalazło potwierdzenia w obserwacjach naziemnych. Zmiany w metodach detekcji mgieł/niskich Stratusów przyniesie zapewne dostęp do danych z systemu *Meteosat Third Generation* (z 16 kanałowym radiometrem) od 2020 roku (www.eumetsat.int). Poprawa ich skuteczności oraz możliwość rozróżniania chmur niskich i mgły, będzie jednak w większym stopniu zależeć od umiejętnej integracji danych naziemnych i satelitarnych niż od rosnącej rozdzielczości przestrzennej lub spektralnej radiometrów. Dowodzą tego zarówno wnioski z analizy przeprowadzonej w niniejszej pracy, jak i wyniki innych, wspomnianych wcześniej publikacji o podobnej tematyce.

LITERATURA

Anthis A. I., Cracknell A. P., 1999. Use of satellite images for fog detection (AVHRR) and forecast of fog dissipation (METEOSAT) over lowland Thessalia, Hellas, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, 6, 1107 – 1124.

Bendix J., Thies B., Cermak J., 2004. Fog detection with TERRA-MODIS and MSG-SEVIRI, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference.

Cermak J., Bendix J., 2007. Dynamical Nighttime Fog/Low Stratus Detection Based on Meteosat SEVIRI Data: A Feasibility Study, *Pure and applied Geophysics* 164, 1179–1192.

Cermak J., Bendix J., 2008. A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data, *Atmospheric Research* 87, 279–292.

Cermak J., Eastman R., Bendix J., Warren S., 2009. European climatology of fog and low stratus based on geostationary satellite observations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 135, 2125–2130.

Choudhury S., Rajpal H., Saraf A. K., Panda S., 2007. Mapping and forecasting of North Indian winter fog: an application of spatial technologies, *International Journal of Remote Sensing*, 28, 16.

Ellrod G.P., 2002. Estimation of low cloud base heights at night from satellite infrared and surface temperature data, National Weather Digest, 26, 39-44.

EUMETSAT, 2012. <http://www.eumetsat.int/>

Gultepe I., Pagowski M., Reid J., 2007. A Satellite-Based Fog Detection Scheme Using Screen Air Temperature, Weather and Forecasting 22, 3.

Niedźwiedz T. (red.), 2003, Słownik meteorologiczny, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW, Warszawa.

DETECTION OF LOW VISIBILITY CONDITIONS WITH SATELLITE AND GROUND DATA

KEY WORDS: fog, low Stratus, visibility, atmospheric remote sensing, Meteosat.

Summary

The study analyzed the effectiveness of mists detection methods, based on MSG satellite data. Remote sensing methods were compared with observations from synoptic stations IMGW-PIB from Poland, covering the period from October 2010 to March 2011. Satellite data allow identify areas likely occurrence of fog and low stratus clouds. Term when there is fog and low stratus soon but it is very difficult, if not impossible, without the use of additional ground-based data. For this purpose, can be use the dew point temperature and air temperature measured in meteorological cage. The distinction between fog and low clouds is very important for practical reasons, because fog reduces visibility less than 1 km, while the Stratus cloud doesn't have a significant impact on the ability to observe objects close to the ground. The method discussed in the paper made it possible to detect 50-64% of observed fog. Approximately 25-35% of cases of fog signaled not confirmed in observations from synoptic stations (it was false alarm).

Dane autora:

Mgr Michał Bobrowski

E-mail: michal.bobrowski@uj.edu.pl

Telefon: +48 12-664-5278

Praca została wykonana przy udziale autora w realizacji zadania 5, projektu Klimat - „Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo”
Nr POIG.01.03.01-14-011/08, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej, realizowanego w IMGW-PIB.