

Krzysztof Kroszczyński
Centrum Geomatyki Stosowanej, Wydział Inżynierii i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna
kkroszczyński@wat.edu.pl , rwkk@op.pl

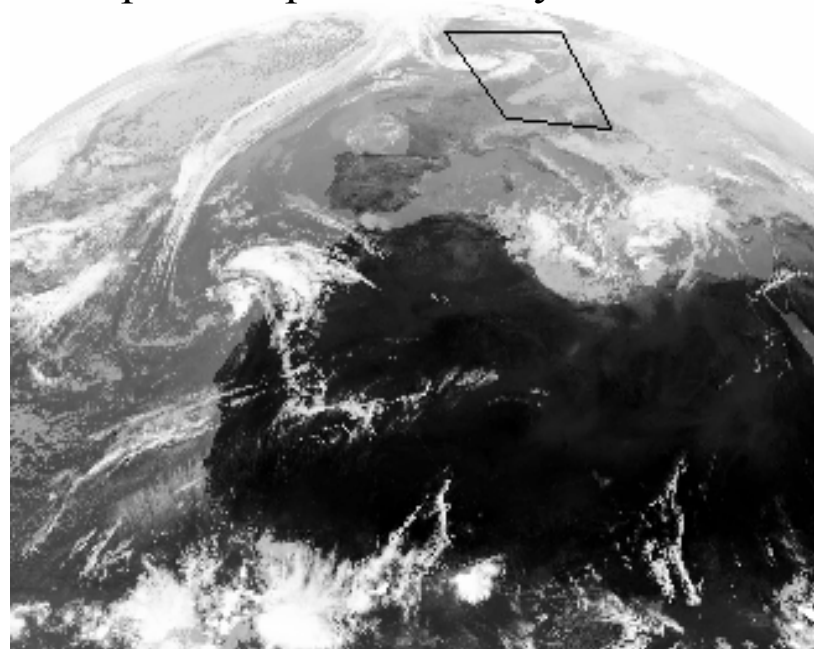
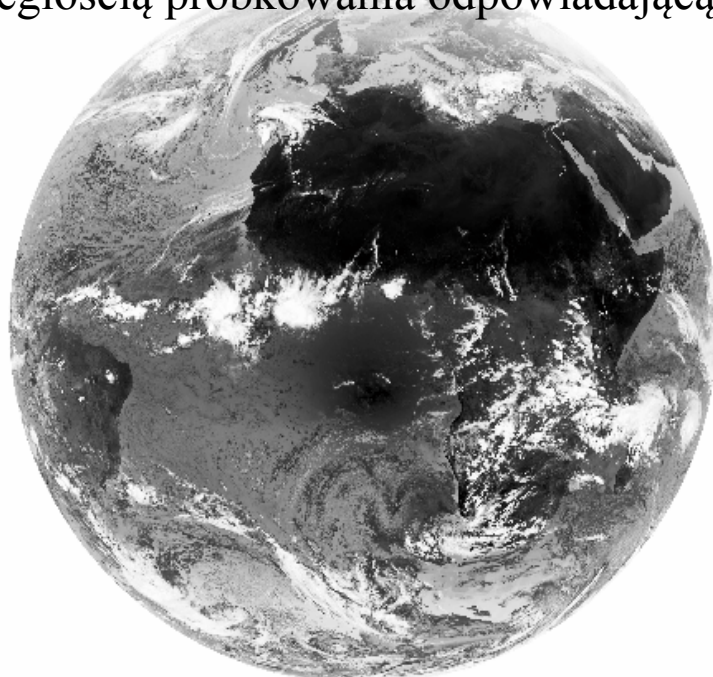
Przekształcenia zdjęć satelitarnych Meteosat do projekcji modelu COAMPS

W pracy przedstawiono konstrukcję algorytmów odwzorowań zdjęć satelitarnych MSG (Meteosat Second Generation) zgodnych z projekcjami niehydrostycznych modeli mezoskalowych typu COAMPS™ (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System) Naval Research Laboratory (NRL) lub WRF (Weather Research and Forecasting). Systemy odbioru zdjęć MSG i model COAMPS™ działają operacyjnie na Wydziale Inżynierii i Geodezji, WAT.

- Prognozy pogody dostarczane przez modele mezoskalowe mają duże znaczenie praktyczne i teoretyczne. Ogólnie wiadomo, że skuteczność prognoz związana jest z odpowiednim procesem konstrukcji pól warunków początkowych dla modelu meteorologicznego – asymilacji danych. Dane te pozyskiwane są również z pracujących w trybie quasi-rzeczywistym systemów satelitarnych. W tym celu wykorzystuje się zdjęcia z różnych zakresów spektralnych satelitów geostacjonarnych MSG (Meteosat Second Generation) i okołobiegunowych np. NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration).
- **Celem pracy jest ujednoczenie odwzorowań zdjęć satelitarnych i modeli mezoskalowych, pozwalające na dowiązanie zdjęć do siatek obliczeniowych modeli.**

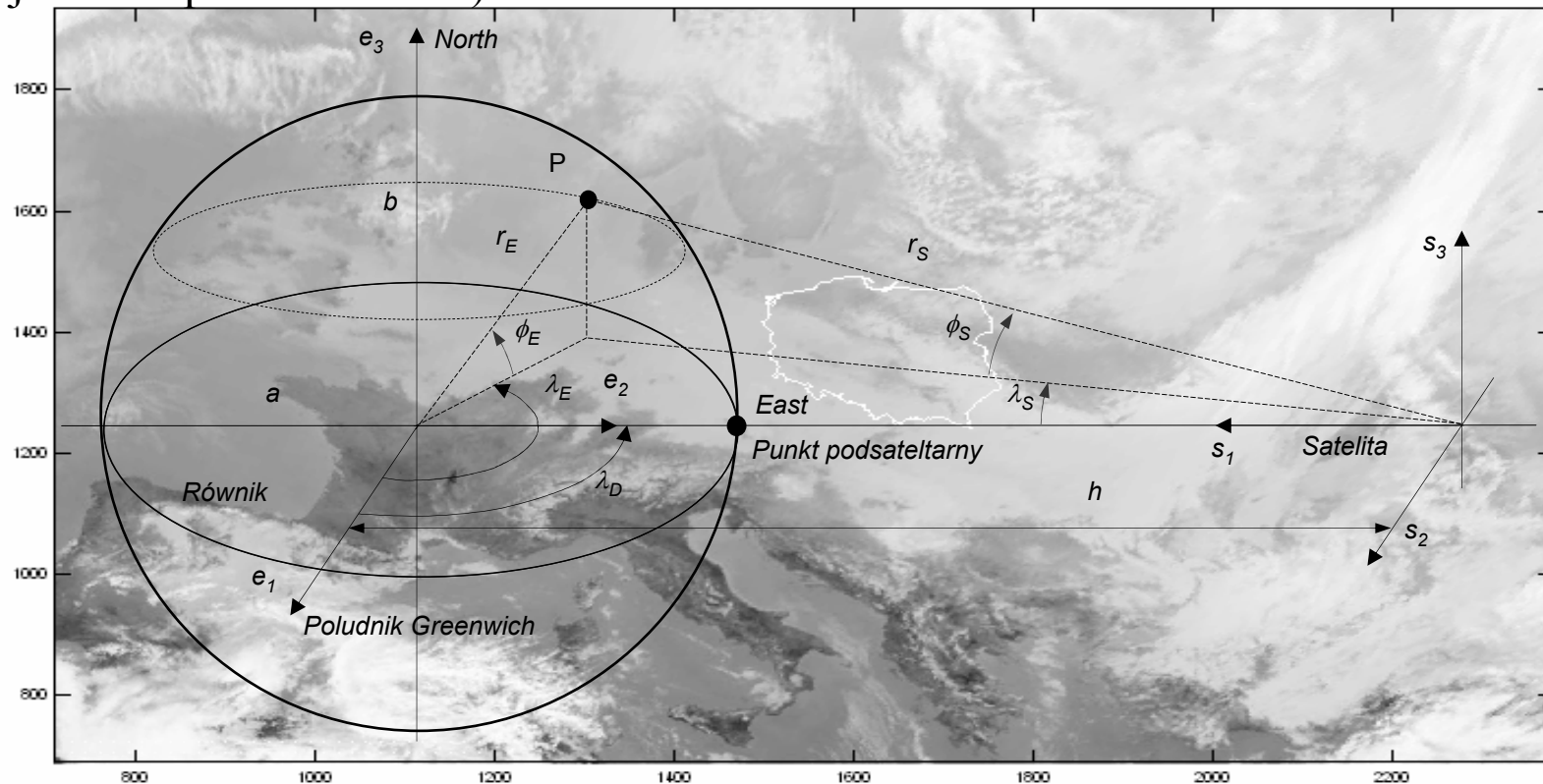
Rozważane w pracy zdjęcia MSG przedstawiają obraz atmosfery widziany z pokładu satelity. To naturalne odwzorowanie rzutowe (punkt rzutowania znajduje się na zewnątrz elipsoidy) nazywane jest projekcją geostacjonarną. W przypadku modelu COAMPS mamy natomiast do czynienia z możliwością wyboru różnych odwzorowań kartograficznych dodatkowo związanych ze sferą a nie elipsoidą. Z tego powodu zaistniała potrzeba opracowania algorytmów umożliwiających przedstawianie obrazów satelitarnych w dowolnych projekcjach kartograficznych. W CGS obliczenia modelu wykonywane są rutynowo na siatkach w odwzorowaniu stożkowym, konforemnym Lamberta.

Pozyskiwanie obrazów MSG. Widziany z satelity geostacjonarnego MSG obraz dysku ziemskiego jest wynikiem pracy skanera SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager). W tym celu wykorzystuje się obrót satelity i krokowy ruch płaskiego zwierciadła skanera w kierunku północ-południe. Skaner generuje obrazy atmosfery ziemi w 12 różnych kanałach spektralnych, tzw. podczerwonych (IR3.9, IR6.2, IR7.3, IR8.7, IR9.7, IR10.8, IR12.0, IR13.4 μm) i widzialnych: kanał HRV (High Resolution Visible), VIS0.6, VIS0.8, NIR1.6 μm . Dla kanału HRV wymiar macierzy obrazu to 11136 linii i 5568 kolumn. Rozdzielczość liniowa tych zdjęć w punkcie podsatelitarnym to 1 km. Obrazy pozostałych kanałów mają 3712 wierszy i kolumn, z odległością próbkowania odpowiadającą 3 km w punkcie podsatelitarnym.



Zdjęcia kanału podczerwieni IR8.7. Obszar ograniczony czarnym konturem odpowiada podobzarowi obliczeniowemu modelu mezoskalowego COAMPS

- **Znormalizowana projekcja geostacjonarna.** Projekcja ta związana jest z obrazem ziemi widzianym z satelity geostacjonarnego. Satelita geostacjonarny jest umiejscowiony w płaszczyźnie równika ziemskiego. Odpowiada mu punkt podsatelitarny $\lambda = 0^\circ$. Odległość między satelitą i środkiem ziemi to $h = 42164$ km. Modelem powierzchni ziemi jest elipsoida o promieniu równikowym $a = 6378.1690$ km i biegunowym $b = 6356.5838$ km. (Coordination Group for Meteorological Satellites. LRPT/AHRPT Global Specification http://www.wmo.ch/pages/prog/sat/documents/CGMS-04-LRPT-HRPT_v1.pdf).
- (Nie jest to elipsoida WGS84).



Geometria znormalizowanej projekcji geostacjonarnej.
Współrzędne elipsoidalne (e_1, e_2, e_3) i satelitarne (s_1, s_2, s_3).

Definicja. Przekształcenie geostacjonarne

$$(\lambda_S, \phi_S) \rightarrow (\lambda_E, \phi_E)$$

może być zdefiniowane przez wprowadzenie dwóch kartezjańskich układów współrzędnych. Układ (e_1, e_2, e_3) i (s_1, s_2, s_3) mają swoje początki w środku ziemi i w punkcie zawieszenia satelity. Wersory \vec{e}_3, \vec{s}_3 skierowane są na północ, \vec{e}_1, \vec{s}_2 w kierunku południka Greenwich, \vec{s}_1 wskazuje środek ziemi. Odniesione do elipsoidy współrzędne geocentryczne punktu P można uzyskać wyznaczając współrzędne kartezjańskie wektora wskazującego punkt P w satelitarnym (s_1, s_2, s_3) i elipsoidalnym układzie współrzędnych (e_1, e_2, e_3) :

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h - r_E \cos(\phi_E) \cos(\lambda_E - \lambda_D) \\ -r_E \cos(\phi_E) \sin(\lambda_E - \lambda_D) \\ r_E \sin(\phi_E) \end{pmatrix}, \quad \vec{r}_S = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h - r_S \cos(\phi_S) \cos(\lambda_S) \\ r_S \cos(\phi_S) \sin(\lambda_S) \\ r_S \sin(\phi_S) \end{pmatrix}, (*)$$

gdzie: (λ, ϕ) , (λ_E, ϕ_E) - geograficzne i geocentryczne współrzędne punktu P.

P należy do elipsoidy

$$\frac{e_1^2}{a^2} + \frac{e_2^2}{a^2} + \frac{e_3^2}{b^2} = \frac{(h - r_S \cos(\phi_S) \cos(\lambda_S))^2}{a^2} + \frac{r_S^2 \cos^2(\phi_S) \sin^2(\lambda_S)}{a^2} + \frac{r_S^2 \sin^2(\phi_S)}{b^2} = 1$$

stąd dla znanych (h, ϕ_S, λ_S) równanie elipsoidy jest równaniem kwadratowym względem r_S którego rozwiązania są określone przecięciem prostej wyznaczonej przez wektor \vec{r}_S z elipsoidą. Mając (*) współrzędne (e_1, e_2, e_3) wyznaczamy r_S a następnie kąty: (λ_E, ϕ_E) i (λ, ϕ) .

$$\lambda_E = \arctg(e_2 / e_1) + \lambda_D, \quad \phi_E = \arctg(e_3 / (e_1^2 + e_2^2)) = \arctan[b^2 / a^2 \tan(\phi)], \quad \lambda_E = \lambda. \quad 5$$

Przedstawione zależności nie pozwalają bezpośrednio zobrazować zdjęcia satelitarnego w wybranym odwzorowaniu kartograficznym. Potrzebne jest w tym przypadku przynajmniej jedno dodatkowe założenie. Dotyczy ono kształtu apertury zwierciadła skanującego. W najprostszym przypadku można założyć, że kształt ten odpowiada kwadratowi, a w bardziej złożonym, że jest on np. sześciokątem. To założenie pozwala skonstruować algorytmy przekształcania zdjęć w oparciu o parametry geometryczne procesu skanowania atmosfery. Podstawowymi z nich są współrzędne położenia osi skanera i kąt obrotu płaskiego zwierciadła radiometru satelity α . Wartość α można oszacować znając szerokość kątową i liczbę linii (pikseli) N obrazu atmosfery widzianego z satelity. Dla zdjęć MSG kanałów podczerwieni

$$\alpha = \gamma / N \approx 0.0048^\circ \approx 8.38 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Wobec stałości kąta α i założenia kształtu zwierciadła, można określić współrzędne geograficzne (λ, ϕ) wierzchołków rozważanych obszarów, które tworzą siatkę :

$$(\lambda_{m,n}, \phi_{m,n})$$

węzłów związanych z punktami przecięcia elipsoidy i prostej (osi skanera) obracanej o kąty $(n\alpha, m\alpha)$ - n, m liczby naturalne. W ten sposób skonstruowana siatka (odtworząca w sposób naturalny proces skanowania) umożliwia zobrazowanie zdjęć satelity geostacjonarnej MSG w dowolnej projekcji kartograficznej. Wykorzystując zależności między współrzędnymi geograficznymi elipsoidy i współrzędnymi wybranego odwzorowania kartograficznego f mamy

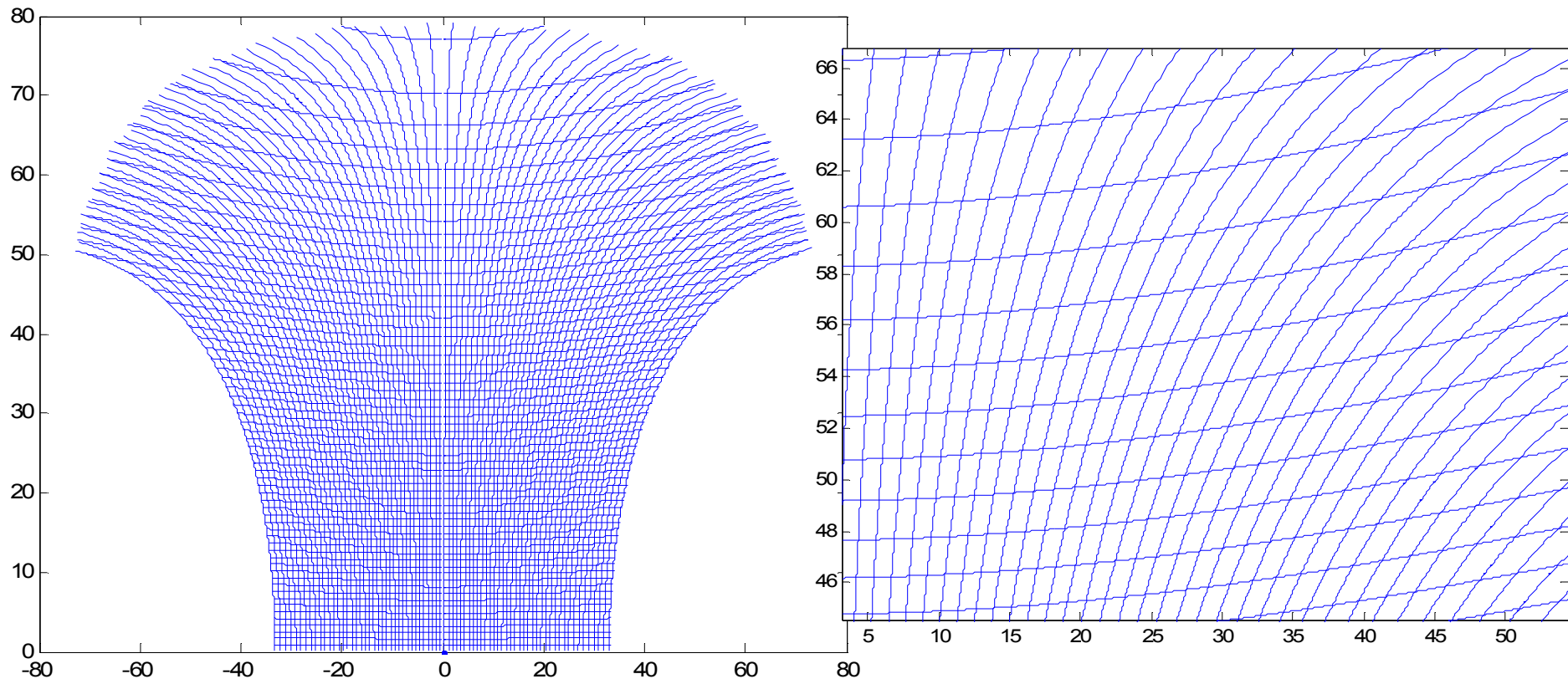
$$(x_{n,m}, y_{n,m}) = f(\lambda_{n,m} = n\alpha, \phi_{n,m} = m\alpha), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M$$

$(x_{n,m}, y_{n,m})$ współrzędne węzłów siatki obrazu satelitarnego w projekcji kartograficznej f_6 modelu mezoskalowego.

Ze względu na stosowaną w CGS projekcję modelu COAMPS zdjęcia satelitarne wykorzystywane w badaniach pól zachmurzenia przedstawiane są w konforemnym, stożkowym odwzorowaniu Lamberta. Jest ono zdefiniowane przez następujące wartości parametrów:

$$\lambda_0 = 20.0^0, \varphi_0 = 50.0^0, \varphi_{60} = 60.0^0, \varphi_{20} = 20.0^0$$

λ_0, φ_0 - długości i szerokość geograficzna początku układu współrzędnych obszaru modelu mezoskalowego COAMPS $\varphi_{60}, \varphi_{20}$ – szerokości geograficzne równoleżników tj. śladów cięć sfery przez stożek dla odwzorowania konforemnego Lamberta.



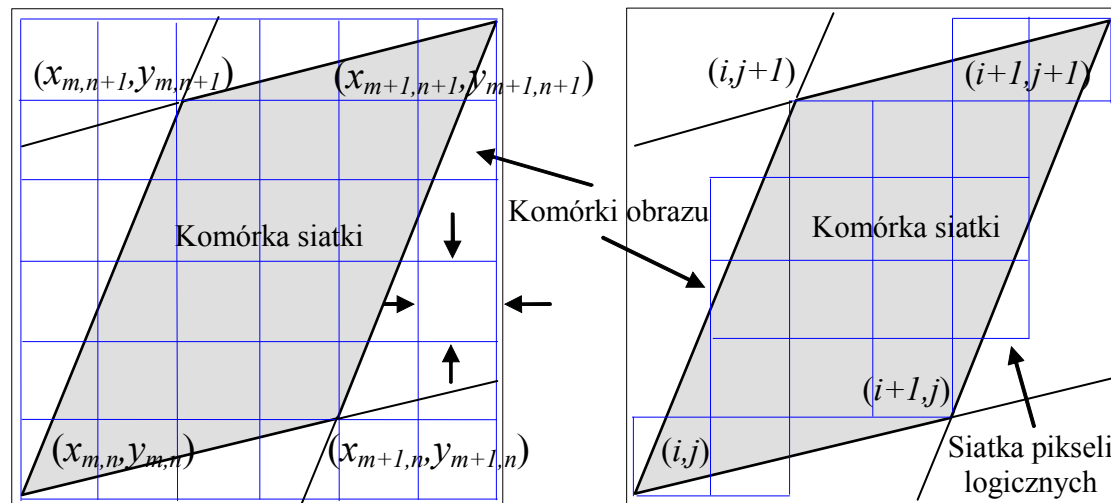
Nienilowa siatka $(\lambda_{m,n}, \phi_{m,n})$ konforemnego, stożkowego odwzorowania Lamberta. 7

Algorytmy zobrazowania. Ponieważ współrzędne wierzchołków komórek siatki obrazu są liczbami rzeczywistymi w celu zobrazowania przekształca się je na liczby całkowite

$$g(x_{n,m}, y_{n,m}) = (\text{int}(x_{n,m} \cdot c) + k, \text{int}(y_{n,m} \cdot q) + l) = (i, j), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M$$

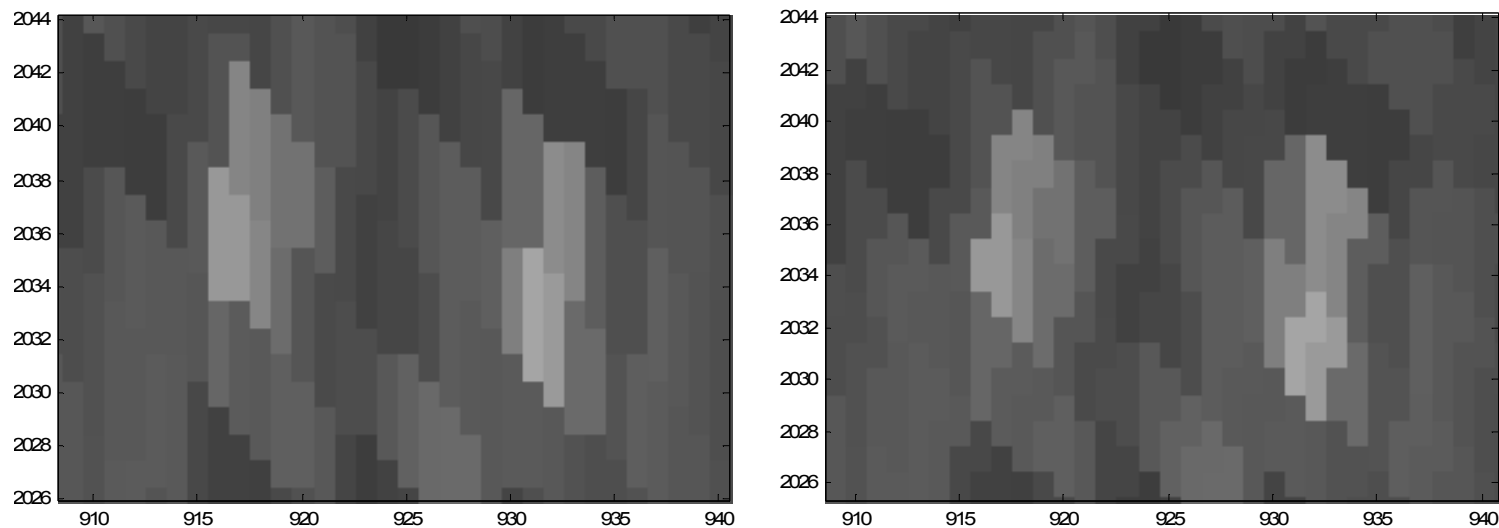
gdzie c, q współczynniki skalowe i przesunięcia k, l , int – operator zaokrąglenia.

Ponieważ komórki siatki przekształconego zdjęcia satelitarnego nie są prostokątne ich zobrazowanie wymaga wprowadzenia prostokątnej siatki pomocniczej. To komórki tej siatki (tzw. piksele logiczne) są ostatecznie związane z fizycznymi pikselami tworzonego obrazu.



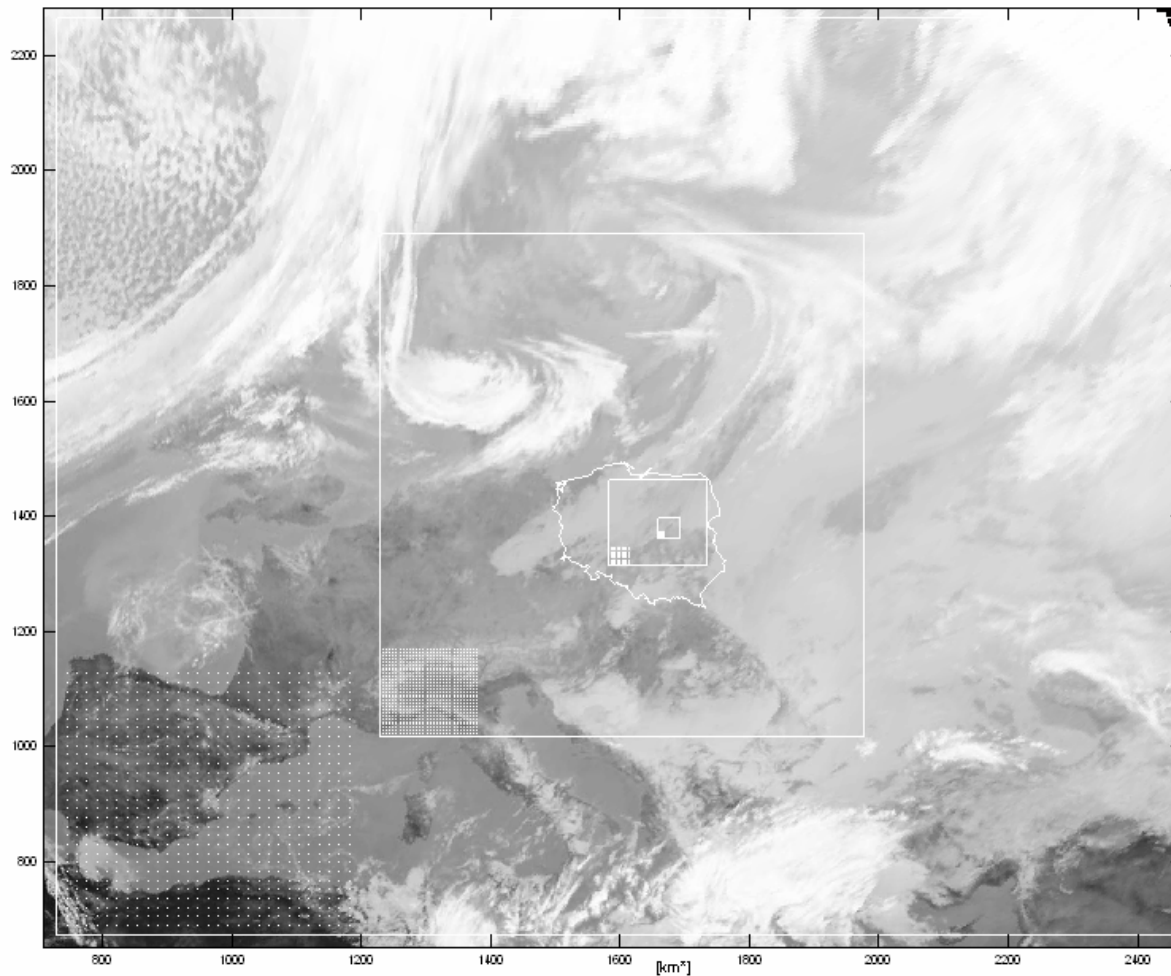
Przekształcenie komórek siatki kartograficznej zdjęcia satelitarnego na piksele logiczne.

Z rysunku wynika, że dokładność aproksymacji kształtu komórek obrazu zależy od rozmiarów pikseli logicznych. Zmniejszanie rozmiarów tych pikseli prowadzi do dokładniejszych zobrazowań, ale wzrasta wówczas rozmiar tworzonego obrazu. Dlatego wzięto pod uwagę różne możliwości aproksymacji. W najprostszym przypadku komórka obrazu zamieniana jest prostokątem wyznaczonym warunkiem minimalnych i maksymalnych wartości współrzędnych (i, j) . Bardziej złożonym jest algorytm wybierający tylko te piksele logiczne, których środki należą do komórki obrazu. Efekt działania tych algorytmów przedstawiono na rysunku. Można zauważyć, że drugi z nich jest bardziej wrażliwy na niejednorodności przestrzenne pola zachmurzenia.



Aproksymacja kształtu komórek przekształconego zdjęcia satelitarnego.

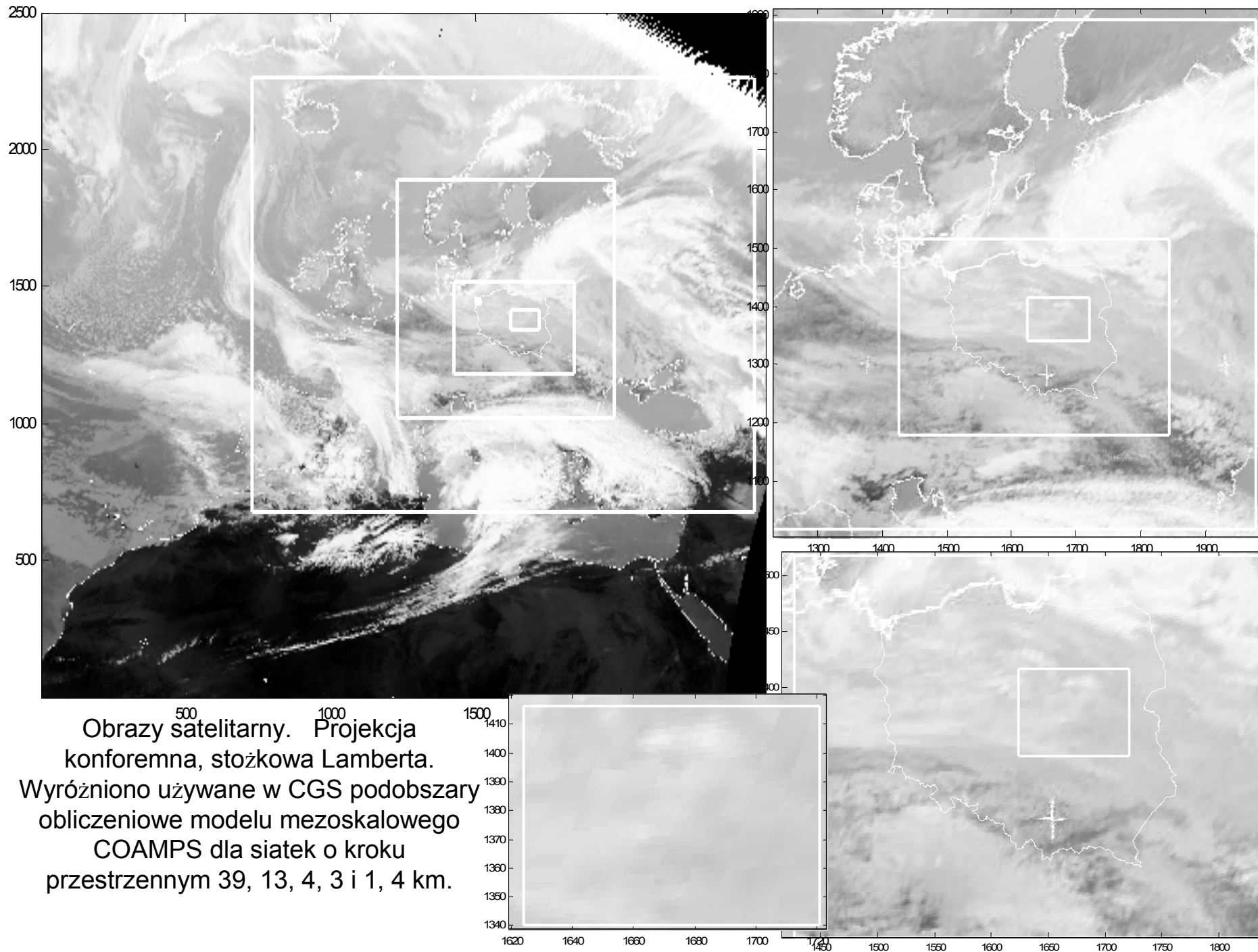
Ostatnim etapem zobrazowania jest nadanie wybranym dla danej komórki pikselom logicznym koloru odpowiadającego kolorowi piksela oryginalnego zdjęcia satelitarnego. Na przykład, gdy środek piksela logicznego należy do rozpatrywanej komórki wówczas dziedziczy on jej kolor, przeciwnie przyjmuje on kolor komórki bezpośrednio z nią sąsiadującej.



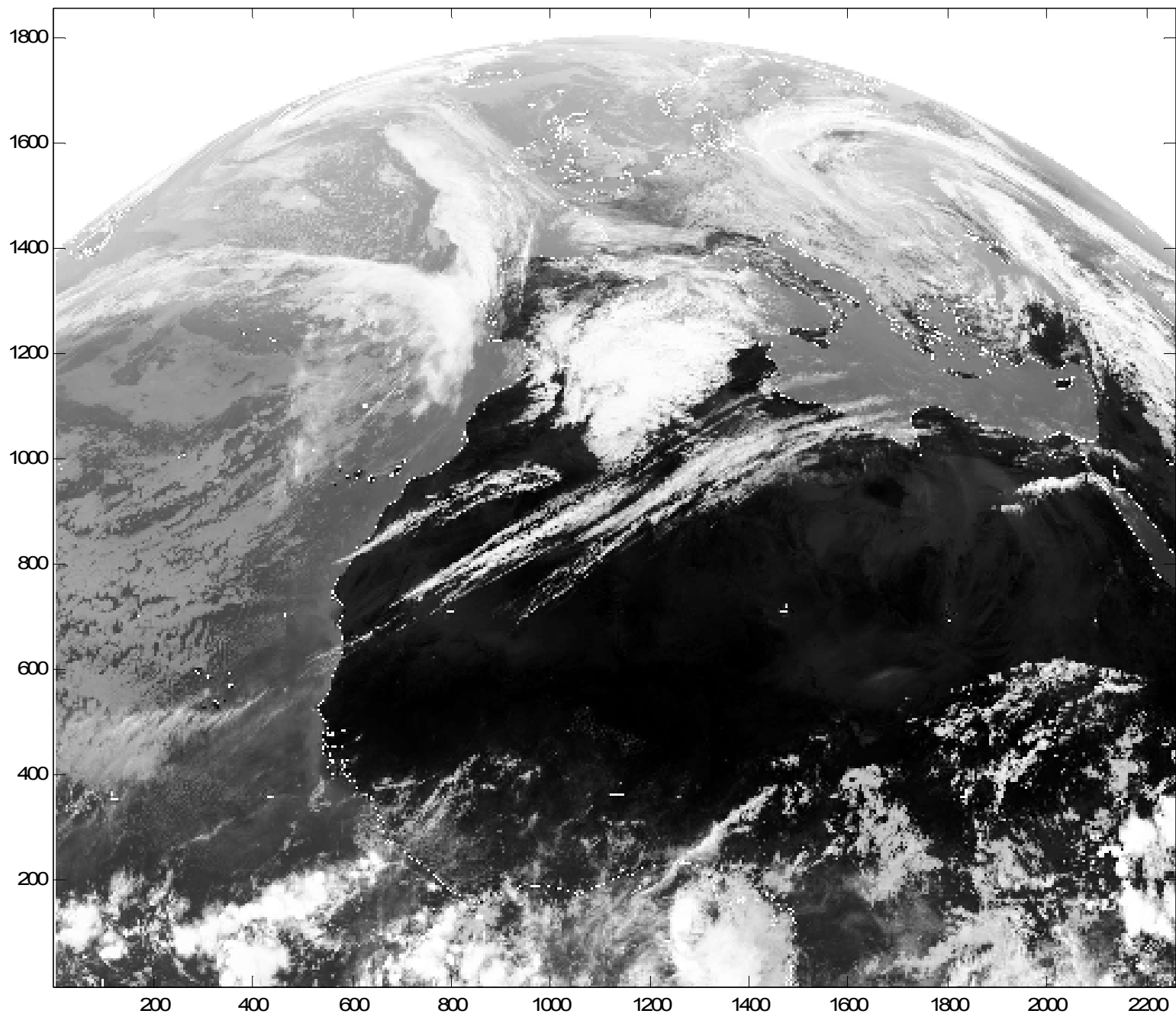
Zastosowanie algorytmów złożonych ma szczególne uzasadnienie w przypadku pracy z małymi obszarami lub dużymi powiększeniami transformowanych zdjęć tj. dla dużych wartości parametrów skalowania c , q .

Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku analizy pól zachmurzenia obszaru Polski. Rozmiary liniowe komórek przekształconego obrazu są wówczas ~ 2.7 krotnie większe (już dla $c=1$, $q=1$) od rozmiarów komórki w punkcie podsatelitarnym.

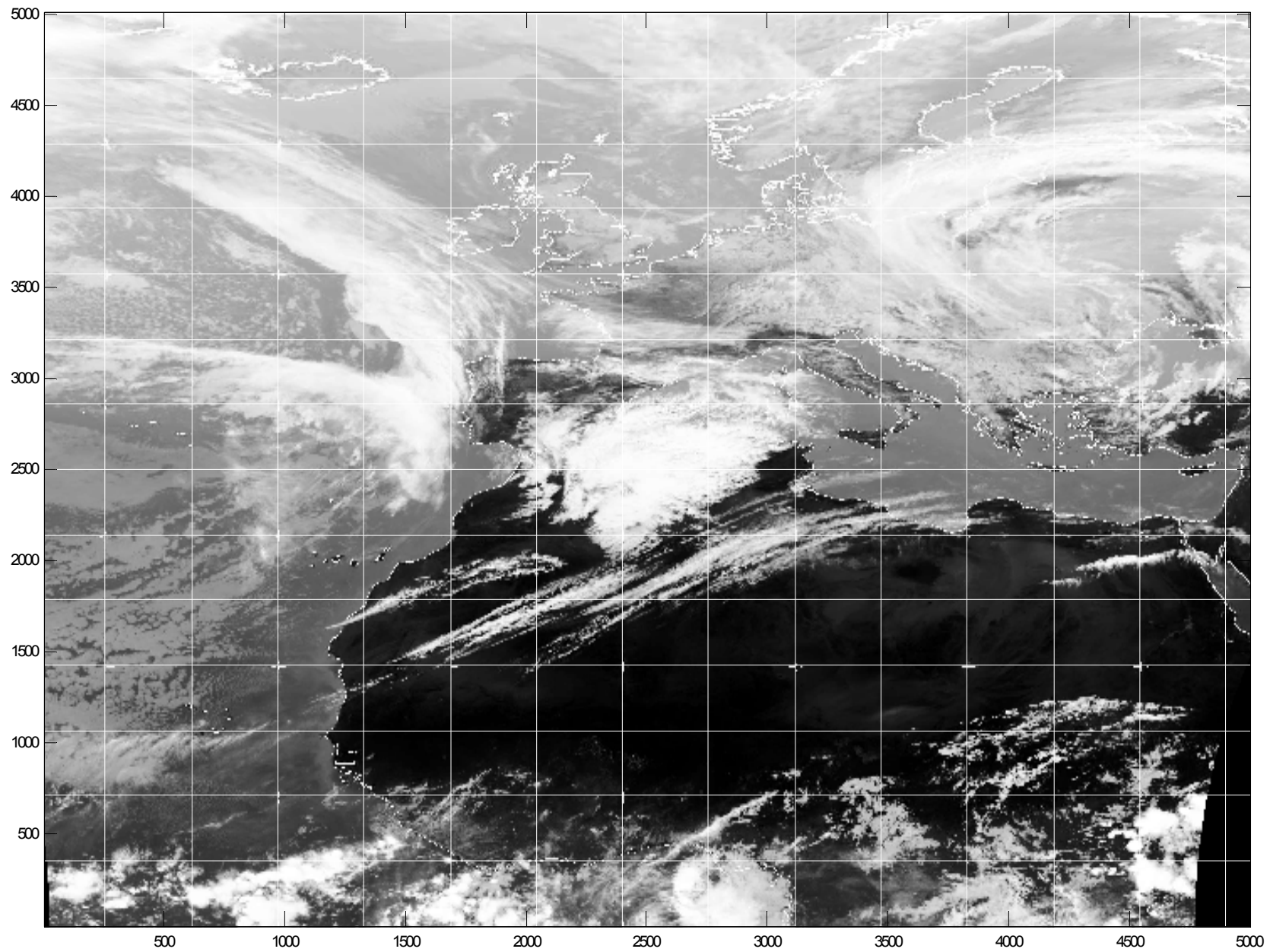
Obrazy satelitarne w projekcji konforemnej, stożkowej Lamberta. Wyróżniono używane w CGS podobszary obliczeniowe modelu mezoskalowego COAMPS oraz związane z nimi fragmenty siatek o kroku przestrzennym 39, 13, 4, 3 i 1, 4 km.



Obrazy satelitarne. Projektja
 konforemna, stożkowa Lamberta.
 Wyróżniono używane w CGS podobszary
 obliczeniowe modelu mezoskalowego
 COAMPS dla siatek o kroku
 przestrzennym 39, 13, 4, 3 i 1, 4 km.



Obrazy satelitarny. Naturalna projekcja geostacionarna.



Obrazy satelitarne. Projekcja – (λ, ϕ) .

- Możliwość odpowiedniej aproksymacji kształtu komórki obrazu jest istotna w procesie asymilacji danych modeli mezoskalowych. Zwłaszcza, że krok przestrzenny teleskopizowanych siatek obliczeniowych tych modeli jest rzędu 1 km. Pracujący w CGS niehydrostacyjny mezoskalowy model COAMPS wykorzystuje siatki o kroku 39, 13, 4,3 i 1,4 km.
- Praca ze zdjęciami z różnych kanałów spektralnych (analiza kombinacyjna polegająca na łączeniu informacji) umożliwia istotną dla pracy modelu mezoskalowego identyfikację położenia i rodzajów chmur, określenie przestrzennych profili prędkości wiatru czy wilgotności atmosfery, albedo, temperatur wierzchołków chmur itp. Poznanie tych pól jest istotne z punktu asymilacji danych pozwalającej uwzględnić informacje o stanie atmosfery w obliczeniach i ich odpowiedniej korekcji. Zdjęcia pozwalają również na lokalizację niebezpiecznych zjawisk pogody.