

Metodyka przetwarzania oraz ocena przydatności zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat w badaniach geologicznych

*Image enhancement within assessment of usefulness of Landsat thermal infrared images for
geological application*

Martyna STELMASZCZUK, Elżbieta WOŁK-MUSIAŁ

The main object of the research was to assess usefulness of Landsat TM thermal infrared images for geological application. Within the assessment special steps of enhancement of illegible image were implemented.

On the first step of the image processing, the analysis of the image histogram was performed to assess an information content of the thermal infrared image and the radiometric enhancement techniques were applied.

On the second step, the complex analysis of the full set of

the satellite data using different statistic procedures and indices (OIF, MOIK, IC) (P. S. Chavez i in., 1984, Moik, J.G., 1980 za S. Mularz, 2002b) was performed.

The last step was the visual interpretation and the comparison of the generated data and geologic maps. The conclusion was made that the thermal infrared images from Landsat-5 satellite provide useful information for geological application radiometric enhanced and in multispectral composition.

Wstęp

Interpretacja zdjęć satelitarnych jest jedną z metod stosowanych w badaniach geologicznych. Łatwość pozyskiwania zdjęć satelitarnych i stosunkowo niewielki koszt materiałów wykorzystywanych do celów naukowych spowodowały, że metody teledetekcyjne stały się jednym z podstawowych narzędzi prospekcji geologicznej. Liczne publikacje (Bażyński i in., 1981; Doktor i in., 1985, 1987, 1991, 1992; Graniczny, 1994) świadczą o szerokim wykorzystaniu materiałów teledetekcyjnych w wielu dziedzinach nauk geologicznych, a zwłaszcza przy:

1. identyfikacji typów skał i gruntów,
2. identyfikacji struktur geologicznych (fałdy, uskoki, spękania),
3. poszukiwaniu złóż surowców mineralnych i ropy naftowej,
4. poszukiwaniu wód geotermalnych,
5. monitoringu zjawisk geologicznych,
6. identyfikacji form rzeźby terenu.

Dotychczasowe doświadczenia wykazały, że podstawową korzyścią stosowania materiałów teledetekcyjnych w geologii jest możliwość uzyskania informacji

o charakterze tektonicznym (Bażyński, 1982, Bażyński, Doktor, Graniczny, 1984, Graniczny, 2002, Graniczny, Mizerski, 2003). Pierwsza próba zestawienia zdjęć satelitarnych w celu interpretacji lineamentów dla terenu całej Polski została zamieszczona na *Mapie fotogeologicznej Polski w skali 1:1 000 000* (Bażyński i in., 1984). Mapa ta składa się z dwóch plansz: A – fotomapy, B – interpretacji geologicznej. Mapa została wykonana na podstawie kilkudziesięciu zdjęć satelitarnych Landsat MSS oraz HCCM (Heat Capacity Mapping Mission). W 1986 roku wydano *Mapę fotogeologiczną Sudetów* w skali 1:200 000 (J. Bażyński i in., 1986).

Obecnie w Polsce, możliwością wykorzystania zdjęć termalnych w badaniach geologicznych zajmuje się W. Bujakowski (Bujakowski, 2003) oraz S. Mularz (Mularz, 2002a, b, 2003, 2005). W 2002 roku S. Mularz zakończył badania, których głównym celem było stwierdzenie w jakim stopniu anomalie termiczne towarzyszące solnym strukturom wysadowym ujawniają się na powierzchni terenu i mogą być wykrywane za pomocą zdalnych technik rejestracji. W publikacji M. Granicznego z 2002 roku „Kartowanie geologiczne z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych Landsat”, autor podkreśla znaczną użyteczność pasma 6 (podczerwień termalna),

„mało docenianego przy generowaniu kompozycji RGB”.

Najnowsze publikacje zagraniczne dotyczą wykorzystania różnych modeli w celu poprawy czytelności zdjęć termalnych – eliminacja wpływu promieni słonecznych, topografii (Gillespith i in., 1992; Warner i in., 2001) oraz zwiększenia zawartych na zdjęciu informacji poprzez m.in. rozciąganie kontrastu, dodanie szczegółów przestrzennych do obrazów termalnych (Guo i in., 1998), wzmacnianie informacji dotyczących emisyjności (Hook i in., 1992).

Obecnie zdjęcia termalne dużą rolę odgrywają w monitoringu wulkanów, miejsc aktywnych sejsmicznie na świecie oraz w badaniu planet i innych ciał niebieskich – geologia planetarna. W Polsce tematyką geologii planetarnej zajmują się Joanna Gurgurewicz (2005, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b), Krzysztof Skocki (2006b) oraz Natalia Zalewska (2006, 2007).

Wykorzystane materiały

Realizacja tematu „ocena przydatności zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat w badaniach geologicznych” zakładała wykorzystanie materiałów: teledetekcyjnych – obrazu satelitarnego wykonanego przez satelitę Landsat 5 TM (Tabela 1), oraz kartograficznych – odpowiednich map tematycznych. Pobrana scena satelitarna obejmowała teren Sudetów i Przedgórze Sudeckiego. Słaba jakość danych teledetekcyj-

nych, wynikająca z terminu wykonania zdjęcia (8.30 GMT), była głównym powodem opracowania specjalnej metodyki przetwarzania zdjęcia termalnego w celu uczynienia jego treści.

Przy interpretacji struktur geologicznych ze zdjęć satelitarnych posłużono się następującymi mapami tematycznymi:

- mapy geologiczne 1:500 000, atlas geologiczny 1:750 000 opracowane przez Państwowy Instytut Geologiczny (1997),
- Atlas tektoniczny Polski 1:500 000 opracowany przez Państwowy Instytut Geologiczny (1998).

Przetwarzanie zdjęcia termalnego

Zdarza się, że przy przetwarzaniu danych teledetekcyjnych dysponujemy tylko materiałami o jakości, która uniemożliwia ich interpretację. W celu uczynienia treści zdjęcia satelitarnego w ramach tematu ocena przydatności zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat w badaniach geologicznych przeprowadzono:

- 1) wstępne przetwarzanie zdjęcia termalnego – liniowe rozciągnięcie kontrastu
- 2) zmiana kontrastu
- 3) analiza pełnego zakresu informacji spektralnej – wskaźniki statystyczne
- 4) analiza wizualna treści geologicznych zdjęcia termalnego.

Wybrano powyższe metody na podstawie dokonanego przeglądu technik wzmacniania zobrazowania oraz ze względu na przydatność i możliwość uwydatnienia cech struktur geologicznych analizowanego terenu.

Samo zdjęcie termalne jest mało czytelne (ryc./fig. 1). Wynika to głównie ze słabego kontrastu, co potwierdza rozkład histogramu (ryc./fig. 1).

Wartości pikseli mieszczą się w przedziale od 95 do 164, zatem rozpiętość tonalna wynosi 69 poziomów szarości. Ma to swoje odwzorowanie w wyglądzie zdjęcia termalnego, które jako mało czytelny obraz nie nadawał się do interpretacji wizualnej. W zasadzie rozróżnialny jest tylko uskoc brzeżny oddzielający Sudety od Pogórza Sudeckiego. Widoczne są również jeziora: Otmuchowskie i Głębinowskie.

Wstępne przetwarzanie zdjęcia termalnego – liniowe rozciągnięcie kontrastu

W celu poprawienia kontrastu dokonano zmiany dotychczasowego zakresu wartości jasności pikseli zawartego pomiędzy 95 i 164 (średnia wartość 123) do zasięgu maksymalnego, tj. od 0 do 255 – ryc./fig. 2. Jaskrawość pikseli została zwiększona prawie 4-krotnie. Procedura ta wyraźnie poprawiła jakość zdjęcia.

Na przedstawionym rysunku zdecydowanie łatwiej można odróżnić tereny nizinne pokryte roślinnością (polami uprawnymi i kompleksami leśnymi – jasne fotony),

Tabela 1. Metadane zdjęcia satelitarnego.

Metadata of satellite image

Parametry <i>Parameters</i>	Charakterystyka <i>Characteristics</i>
Satelita <i>Satellite</i>	Landsat 5
Skaner <i>scanner</i>	TM
Scena <i>Scene</i>	190/025
Data wykonania obrazu <i>Date aquisition of image</i>	10.09.1991, 8:30 GMT
Układ <i>Reference system</i>	UTM/WGS84
Współrzędne sceny <i>Geographical coordinates of scene</i>	długości geograficzne (<i>longitude</i>): 51°22'46,0", 50°85'13,5", 49°30'74,2", 49°66'63,0" szerokości geograficzne (<i>latitude</i>): 15°85'34,7", 18°37'54,1", 17°67'52,8", 15°22'59,6"
Azymut słońca <i>Azimuth of the Sun</i>	146°
Wysokość słońca <i>Solar elevation</i>	40°
Rozmiar piksela <i>Spatial resolution</i>	30 m
Liczba pikseli w linii <i>Number of pixels in rows (columns)</i>	6920
Liczba linii <i>Number of rows</i>	5960

od terenów górzystych (kompleksy leśne na terenach górzystych – czarne i prawie czarne fotony). Tak wstępnie przetworzone zdjęcie termalne (ryc./fig. 2) posłużyło do analizy wizualnej i stanowiło podstawę do oceny przydatności zdjęć termalnych do badań geologicznych.

Zmiana kontrastu

Kolejne etapy przetwarzania zdjęcia termalnego obejmowały dalsze zmiany kontrastu. Operacje te miały na celu wyeliminowanie roślinności, jako elementu maskującego ilość struktur tektonicznych mających swoje odzwierciedlenie w budowie geologicznej.

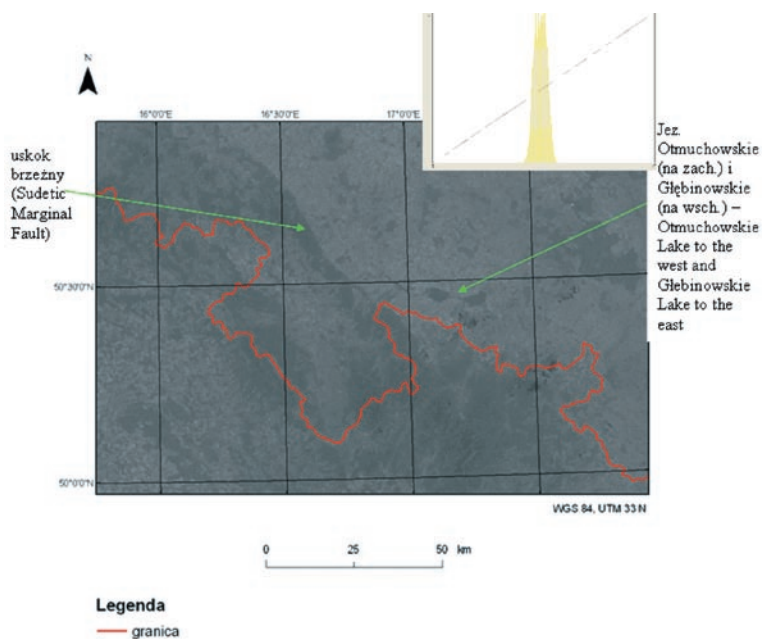
W rezultacie otrzymano obraz z progiem w wartościach 115 i 119 DN (ryc./fig. 3). Obraz ten powstał w wyniku wielokrotnych prób zmiany histogramu na monitorze. Użytkano pięć poziomów szarości, którymi odwzorowane zostały wszystkie rodzaje pokrycia terenu. Lasy występujące na obszarach górzystych przyjmują wartość jasności pikseli równą 0 na nowym histogramie (czarne wydzielenia). Tą samą wartość przyjmuje południowo-zachodnia część jeziora Otmuchowskiego. Pozostałe wartości jasności pikseli (64, 128, 191) przyjmują lasy i wody na obszarach nizinnych. Wartość 255 (białe wydzielenia) przyjmują tereny zabudowane, pola uprawne i łąki.

Dzięki zastosowanej metodzie można było optymalnie dobrać wartości progowe histogramu tak, aby podkreślić geologiczne struktury liniowe.

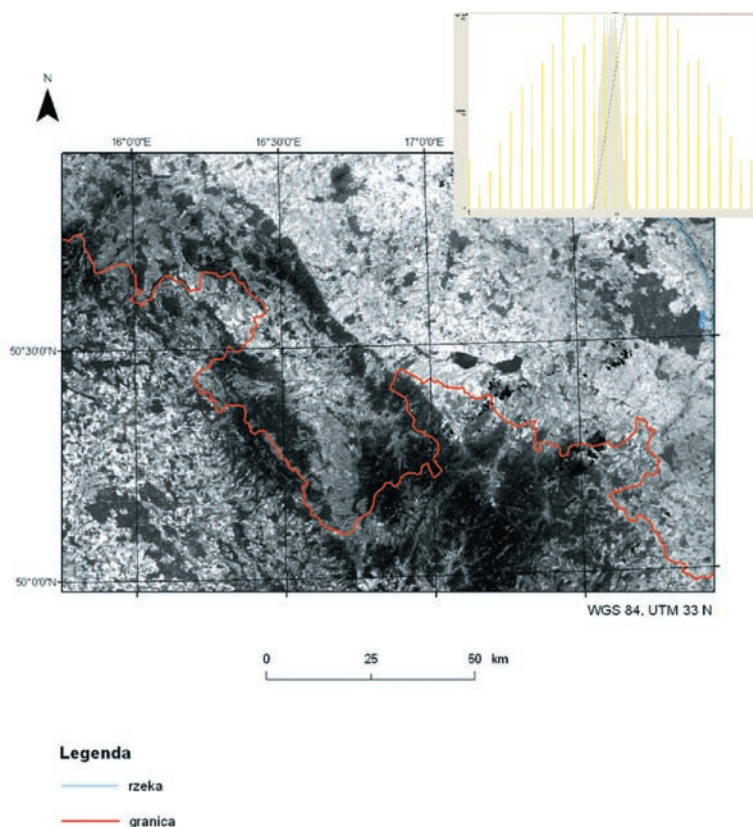
Analiza pełnego zakresu informacji spektralnej – wskaźniki statystyczne

Oceniając przydatność zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat do badań geologicznych, zdecydowano się również na analizę zdjęcia termalnego w kompozycji barwnej. Porównując wyniki analizy wizualnej treści geologicznej samego zdjęcia termalnego oraz w kompozycji barwnej spróbowano odpowiedzieć na pytanie, w jakim stopniu zdjęcie termalne uczytelnia obraz satelitarny pod względem interpretacji treści geologicznych.

Przy ocenie informacji wielospektralnych posłużono się wskaźnikami statystycznymi: wskaźnikiem OIF (OPTIMUM INDEX FACTOR), MOIK, IC (INDEX CRIPPENA). Za pomocą, których wybrano kanały tworzące optymalną kompozycję barwną ze zdjęciem w zakresie termalnym. Wy-

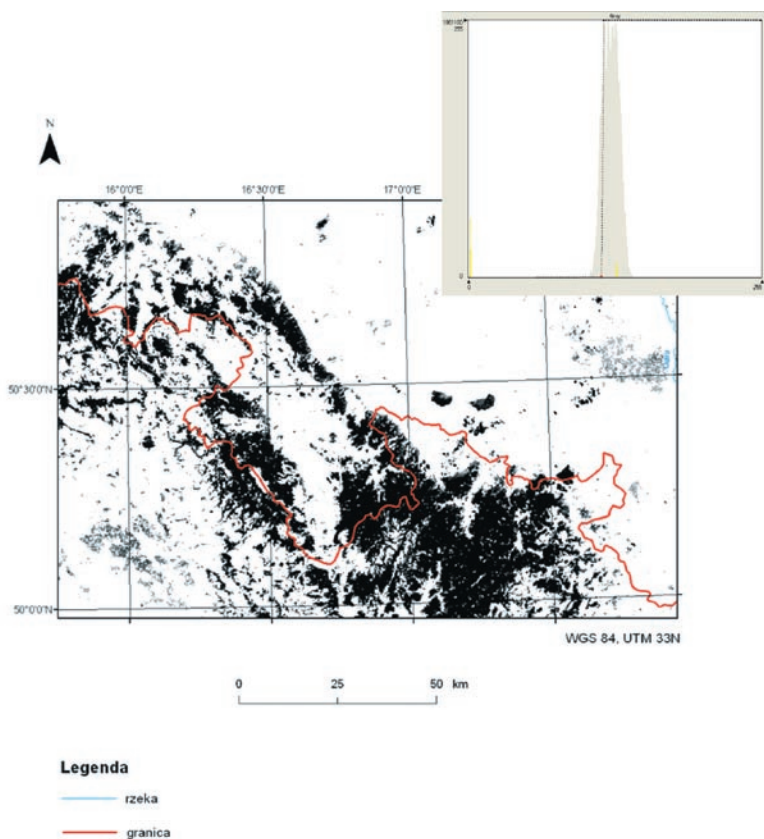


Ryc. 1. Oryginalne, nierozciągnięte zdjęcie termalne wraz z histogramem.
Fig. 1. Original, unstretched image of band 6 output of Landsat 5 and its histogram.



Ryc. 2. Zdjęcie termalne oraz jego histogram po liniowym rozciągnięciu.
Fig. 2. Thermal infrared imagery and its histogram after linear contrast stretch.

bór metod przetwarzania danych wielospektralnych oparto na literaturze dotyczącej przetwarzania obrazów satelitarnych ze szczególnym uwzględnieniem zdjęć



Ryc.3. Zdjęcie termalne z progami w wartościach 115 i 119 DN oraz jego histogram.

Fig. 3. Thermal imagery with threshold values 115 and 119 DN and its histogram.

termalnych (W. Bujakowski, 2003; P. S. Chavez i in., 1984; ERDAS Inc., 1997; S. J. Hook i in., 1992; J. G. Moik, 1980; S. Mularz, 2002a, 2002b, 2003, 2005). Podstawą wyznaczenia wskaźników statystycznych

było obliczenie macierzy kowariancji według wzoru:

$$V(X) = E[(X - X_{sr})(X - X_{sr})^T], \text{ gdzie:}$$

- X – wektor położenia piksela;
- X_{sr} – średni wektor położenia piksela;
- T – transpoza (wzajemna zmiana wierszy i kolumn w macierzy);
- E – symbol wartości oczekiwanej.

Wartości macierzy (tabela 2) określają stopień korelacji pomiędzy odpowiedziami spektralnymi w dwóch kanałach. Wysokie wartości wskazują na dużą korelację, a niskie, bliskie zero na jej brak. Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że największą korelację informacji spektralnej z kanałem termalnym mają kanały odpowiadające środkowej podczerwień: 7 MIR (2,08–2,35 μm) i 5 MIR (1,55–1,75 μm). Najniższa korelacja występuje z pasmem 4 NIR (0,76–0,90 μm) – bliska podczerwień. W tabeli zaznaczono kolorem wartości korelacji kanału 7 i 4 z pasmem termalnym, jako te, które charakteryzują się odpowiednio najbardziej zbliżoną i najbardziej odmienną informacją spektralną.

Pierwszą zastosowaną metodą ekstrakcji informacji tematycznej było określenie wskaźnika OIF (OPTIMUM INDEX FACTOR). P. S. Chavez (P. S. Chavez i in., 1984 za S. Mularz, 2002b) definiuje go jako normalizację sumy odchyłeń standardowych trypletu kanałów i sumy modułów korelacji kanałów spektralnych tworzących daną kompozycję barwną. OIF można zapisać wzorem:

Tabela 2. Wartości macierzy wariacyjno-kowariacyjnej.

Values of the variance-covariance matrix

Pasmo spektralne Spectral band	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,96	0,93	0,28	0,74	0,47	0,8
2	0,96	1	0,97	0,35	0,82	0,48	0,86
3	0,93	0,97	1	0,23	0,85	0,51	0,92
4	0,28	0,35	0,23	1	0,52	0,16	0,23
5	0,74	0,82	0,85	0,52	1	0,55	0,9
6	0,47	0,48	0,51	0,16	0,55	1	0,58
7	0,8	0,86	0,92	0,23	0,9	0,58	1

Tabela 3. Wartości pikseli w poszczególnych pasmach spektralnych.

Pixel values in the respective spectral bands.

	1	2	3	4	5	6	7
min	41	13	10	8	4	95	2
max	254	179	217	191	238	164	252
Średnia average	61,546	26,215	27,128	54,503	58,877	123,311	23,505
odchylenie standardowe standard deviation	12,387	7,96	12,487	17,127	25,889	6,82	16,707

$$OIF = \frac{\sum_{k=1}^3 S_k}{\sum_{j=1}^3 Abs_{(rj)}}, \text{ gdzie:}$$

S_k – odchylenie standardowe;

$Abs_{(rj)}$ – wartość macierzy kowariancji (korelacja).

Charakterystykę poszczególnych pasm spektralnych, wartości minimalne, maksymalne, średnie oraz odchylenie standardowe, zawarto w tabeli 3. Otrzymane wartości wskaźnika OIF przedstawiono w tabeli 4. Wysokie wartości OIF oznaczają dużą objętość i różno-

Tabela 4. Wartości wskaźnika OIF.

Results of the optimum index factor (OIF).

L.p.	Kombinacja kanałów spektralnych <i>Spectral band combination</i>	Wartość wskaźnika OIF <i>Values of the OIF index</i>
	z kanałem termalnym <i>with thermal infrared band</i>	
1	6,4,7	41,9
2	6,4,5	40,5
3	6,3,4	40,5
4	6,1,4	39,9
5	6,2,4	32,2
6	6,1,5	25,6
7	6,5,7	24,3
8	6,3,5	23,7
9	6,2,5	22,0
10	6,1,7	19,4
11	6,3,7	17,9
12	6,1,3	16,6
13	6,2,7	16,4
14	6,1,2	14,2
15	6,2,3	13,9
	pozostałe kanały <i>other bands</i>	
1	4,5,7	36,2
2	1,4,5	36,0
3	1,4,7	35,3
4	3,4,5	34,7
5	3,4,7	33,6
6	2,4,5	30,2
7	1,3,4	29,2
8	2,4,7	29,0
9	2,3,4	24,2
10	1,2,4	23,6
11	1,5,7	22,5
12	3,5,7	20,6
13	1,3,5	20,1
14	2,5,7	19,6
15	1,2,5	18,3
16	2,3,5	17,6
17	1,3,7	15,7
18	1,2,7	14,1
19	2,3,7	13,5
20	1,2,3	11,5

rodność informacji, podczas gdy niskie wskazują na podobieństwo i powielanie informacji w tworzących daną kompozycję kanałach. Stąd też optymalną kombinację tworzą kanały 6, 4 oraz 7, z którymi pasmo termalne kolejno ma najmniejszą i największą korelację.

Drugim zastosowanym wskaźnikiem statystycznym był wskaźnik MOIK. Wskaźnik ten definiuje się jako suma modułów korelacji trzech kanałów spektralnych tworzących kompozycję barwną. Można go zapisać wzorem:

$$MOIK = \sum |Abs|, \text{ gdzie}$$

Abs – wartość macierzy kowariancji (korelacja).

Tabela 5. Wartości wskaźnika MOIK.

Values of the MOIK index.

L.p.	Kombinacja kanałów spektralnych <i>Spectral band combination</i>	Wartości wskaźnika MOIK <i>Values of the MOIK index</i>
	1	6,3,4
2	6,1,4	0,91
3	6,4,7	0,97
4	6,2,4	0,99
5	6,4,5	1,23
6	6,1,5	1,76
7	6,1,7	1,85
8	6,2,5	1,85
9	6,1,2	1,91
10	6,1,3	1,91
11	6,3,5	1,91
12	6,2,7	1,92
13	6,2,3	1,96
14	6,3,7	2,01
15	6,5,7	2,03

W przypadku tego wskaźnika wartości najniższe wskazują na optymalną kombinację barwną. Według wartości wskaźnika MOIK (tabela 5) kanały 3 i 4 tworzą najlepszą kombinację z kanałem termalnym. Są to również pasma, które kolejno mają stosunkowo najwyższą i najniższą wartość macierzy kowariancji.

Kolejny obliczony wskaźnik to INDEX CRIPPENA (IC). Jego wartość stanowi wyznacznik macierzy korelacji trypletu kanałów.

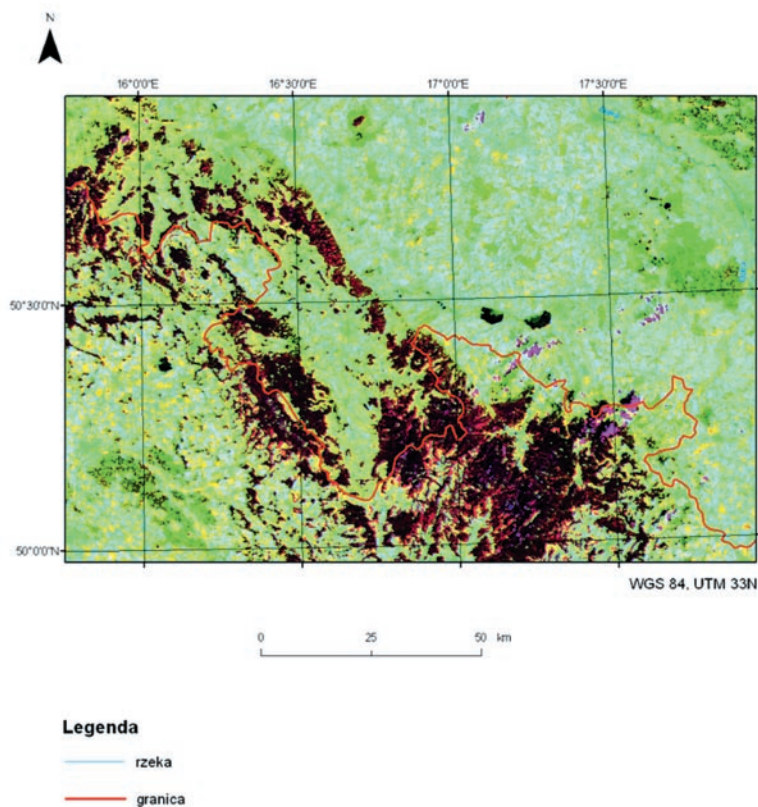
W przypadku wyliczeń tego wskaźnika (tabela 6) najwyższą wartość, a przez to optymalną kombinację barwną tworzą podobnie jak w przypadku wskaźnika OIF kanały 4 i 7 z pasmem termalnym. Czyli kanały, z którymi również pasmo termalne kolejno ma najmniejszą i największą korelację.

Na podstawie otrzymanych rezultatów stwierdzono, iż kompozycja złożona z kombinacji kanału termalnego – 6 oraz bliskiej – 4 i środkowej podczerwieni – 7, charakteryzują najwyższe wartości wskaźnika OIF i IC, a co za tym idzie, również największy zasób i różnorodność informacji tematycznej.

Tabela 6. Wartości wskaźnika IC
Values of the IC index

L.p. No	Kombinacja kanałów spektralnych <i>Spectral band combination</i>	Wartości wskaźnika IC <i>Values of the IC index</i>
1	4,6,7	0,946
2	4,6,3	0,945
3	4,1,6	0,921
4	4,2,6	0,877
5	6,1,4	0,778
6	6,2,4	0,770
7	6,1,2	0,769
8	6,1,3	0,740
9	6,4,3	0,738
10	6,2,3	0,736
11	1,6,4	0,736
12	3,4,6	0,717
13	4,6,5	0,707
14	6,2,5	0,695
15	2,6,4	0,693
16	6,3,5	0,691
17	6,1,5	0,689
18	6,4,5	0,676
19	6,1,7	0,664
20	6,4,7	0,663
21	6,2,7	0,662
22	6,3,7	0,660
23	6,5,7	0,659

L.p. No	Kombinacja kanałów spektralnych <i>Spectral band combination</i>	Wartości wskaźnika IC <i>Values of the IC index</i>
24	7,4,6	0,644
25	5,4,6	0,506
26	1,6,5	0,447
27	5,1,6	0,400
28	1,6,7	0,360
29	2,6,5	0,326
30	7,1,6	0,307
31	5,2,6	0,296
32	3,6,5	0,275
33	2,6,7	0,260
34	5,3,6	0,259
35	7,2,6	0,224
36	5,6,7	0,189
37	7,5,6	0,180
38	3,6,7	0,153
39	7,3,6	0,137
40	1,6,3	0,135
41	3,1,6	0,128
42	1,6,2	0,078
43	2,1,6	0,077
44	2,6,3	0,059
45	3,2,6	0,057



Ryc. 4. Zdjęcie termalne w kompozycji barwnej 4 6 po zmianie histogramu 7.
Fig. 4. Thermal infrared imagery in spectral combination 4 6 after histogram change 7.

Przedstawiony obraz (ryc./fig. 4) stanowi podstawę do analizy wizualnej oceny przydatności zdjęć termalnych w kompozycji barwnej.

Główną informacją wyróżniającą się na tej kompozycji, to podkreślenie obszarów górskich. Na uzyskanym obrazie tereny górzyste pokryte lasem odwzorowują się kolorem brązowym. Wody mają barwę czarną, natomiast pozostałe kompleksy leśne ciemno zieloną. Pola uprawne stanowią mozaikę kolorów zielonego, żółtego i niebieskiego. Widoczne jest także wyraźne sklasyfikowanie chmur – kolor różowy.

W celu porównania i oceny wyników interpretacji wizualnej kombinacji barwnej z kanałem termalnym, obliczono również wskaźnik OIF dla pozostałych kanałów z wyłączeniem pasma termalnego. Najwyższy wynik wskaźnika OIF, a co za tym idzie największą różnorodność informacji spektralnej, posiada zdjęcie termalne w kompozycji 4 5 7. Posłużyła ona jako obraz referencyjny przy interpretacji wizualnej kompozycji z kanałem termalnym.

Analiza wizualna treści geologicznych zdjęcia termalnego

Ostatnim etapem realizacji tematu ocena przydatności zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat w badaniach geologicznych była analiza wizualna z wykorzystaniem oprogramowania GIS przetworzonych danych satelitarnych. Obejmowała ona trzy etapy:

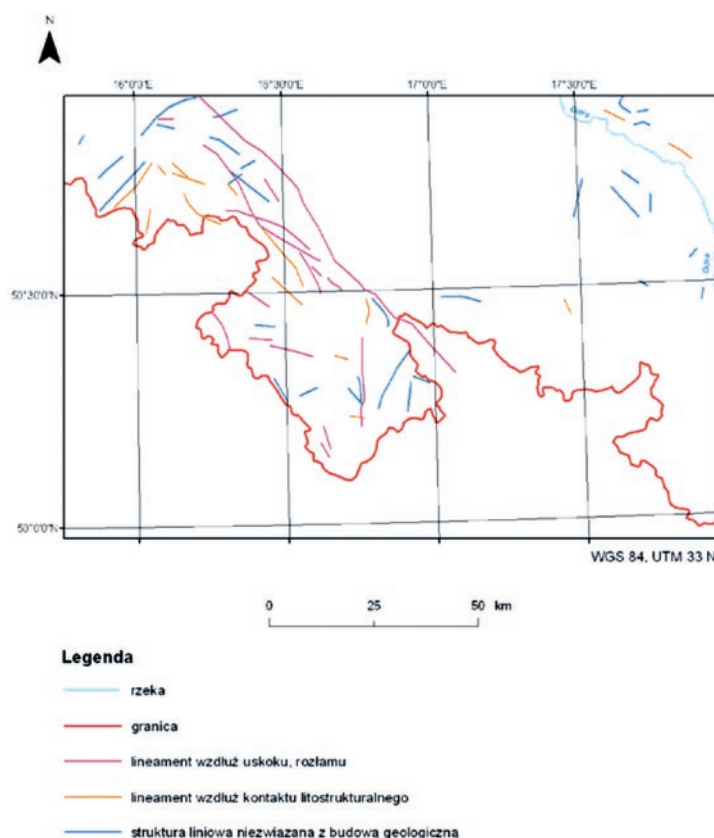
- 1) interpretacja wizualna treści geologicznych danych: zdjęcia termalnego (ryc./fig. 5); zdjęcia termalnego po zmianie kontrastu (ryc./fig. 6); zdjęcia termalnego w kompozycji barwnej 4 5 7 (ryc./fig. 7); zdjęcia termalnego w kompozycji barwnej 4 6 po zmianie histogramu 7 (ryc./fig. 8)
- 2) weryfikacja w środowisku GIS wydzielonych struktur geologicznych na podstawie map geologicznych w wersji cyfrowej (ryc./fig. 9) i analogowej
- 3) porównanie wyników interpretacji.

Interpretacja wizualna analizowanych danych teledetekcyjnych oparta była głównie na wydzieleniu liniowych struktur tektonicznych.

Bardziej szczegółowe analizy geologiczne były niemożliwe ze względu na pokrycie roślinnością terenów górskich oraz ograniczenie spowodowane rozdzielczością spektralną i terenową analizowanego zdjęcia satelitarnego.

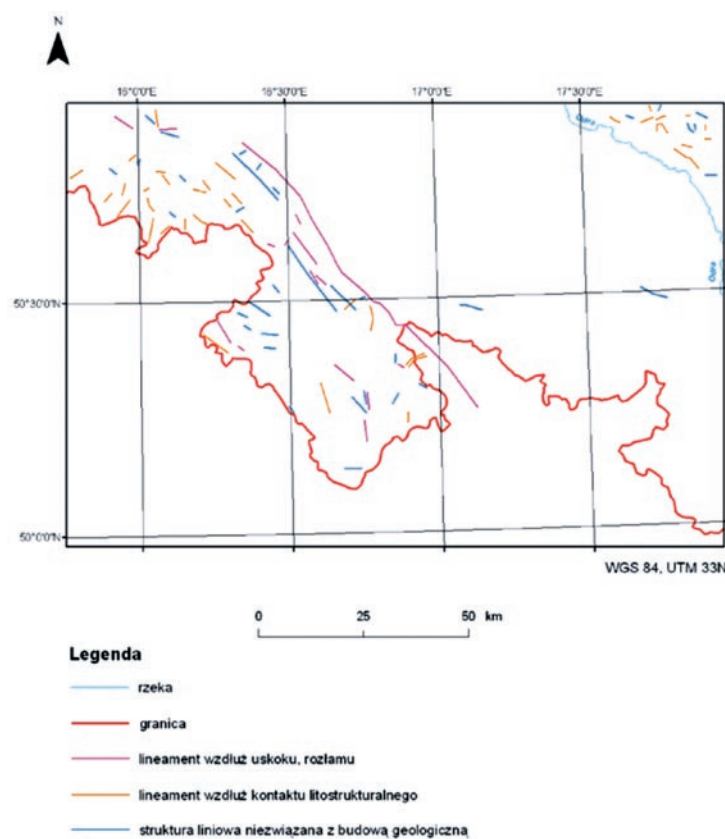
Tworząc legendę do map wynikowych wykorzystano publikację W. L. Smitha z 1977 roku. Wydzielono 3 rodzaje struktur liniowych:

- 1) lineament wzdłuż uskoku, rozłamu



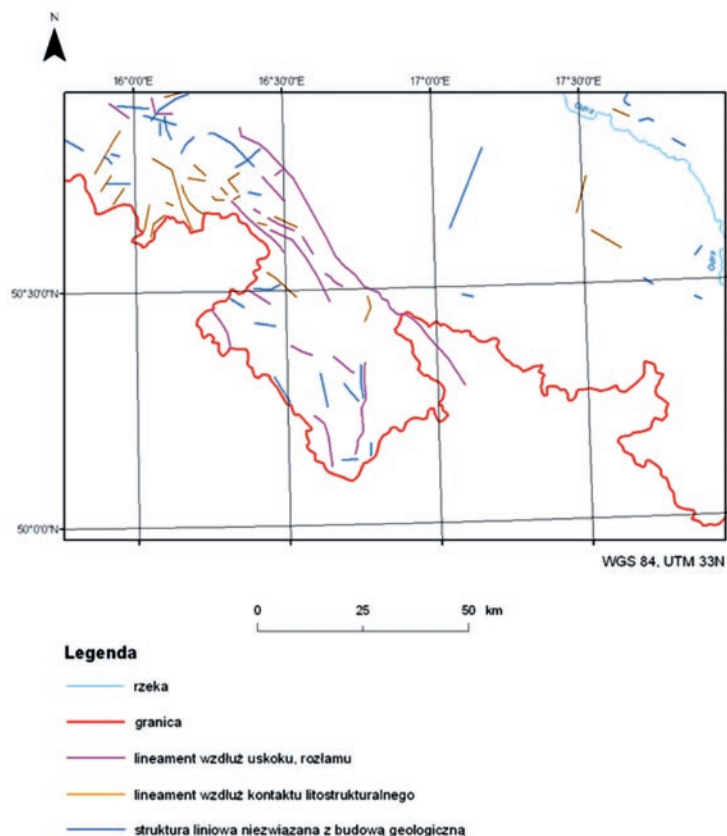
Ryc. 5. Mapa interpretacyjna zdjęcia termalnego po liniowym rozciągnięciu histogramu.

Fig. 5. Interpretation map of thermal imagery after linear contrast stretch.



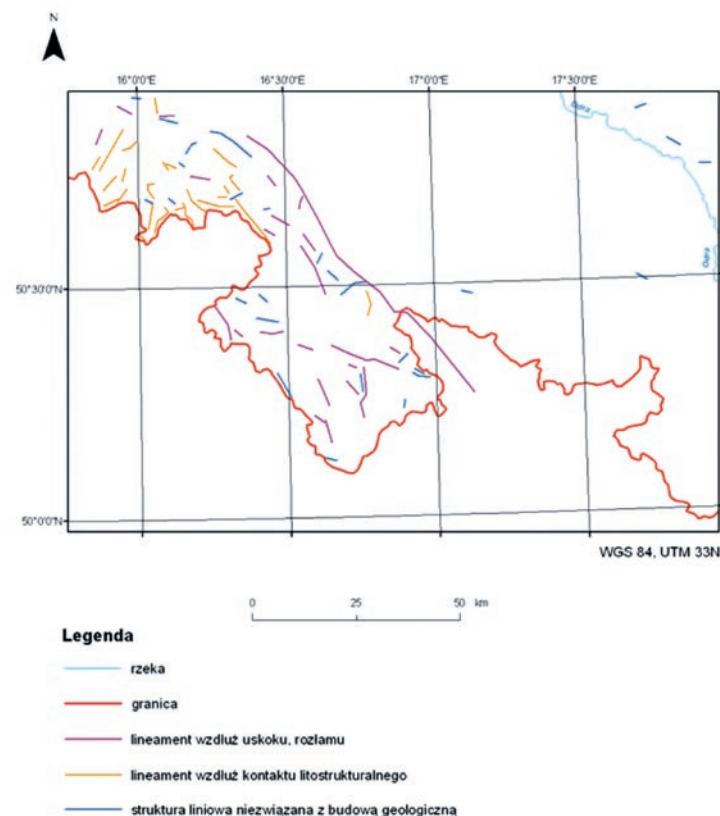
Ryc. 6. Mapa interpretacyjna zdjęcia termalnego po zmianie histogramu.

Fig. 6. Interpretation map of thermal imagery after histogram modification.



Ryc. 7. Mapa interpretacyjna zdjęcia satelitarnego w kompozycji barwnej 4 5 7.

Fig. 7. Interpretation map of satellite imagery in 4 5 7 band combination.



Ryc. 8. Mapa interpretacyjna zdjęcia termalnego w kompozycji barwnej 4 6 po zmianie histogramu 7.

Fig. 8. Interpretation map of satellite imagery in 4 6 after modification 7 band combination.

- 2) lineament wzdłuż kontaktu litostrukturalnego
- 3) struktura liniowa niezwiązana z budową geologiczną – brak korelacji wydzielenia z mapami geologicznymi

Struktury wyznaczano przy dwóch skalach: 1:150 000 i 1:500 000. Przy mniejszej skali wyznaczano struktury o dużej rozciągłości. Najmniejszy wydzielony lineament miał 1 500 m. Przyjęto, że za lineament związany z budową geologiczną będzie uznawana struktura pokrywająca się już w 50% z rzeczywiście występującą formą geologiczną. Wybrano powyższe wartości skali wykonywania interpretacji oraz wielkości wydzielanych struktur na podstawie własnych doświadczeń zdobywanych w trakcie wyznaczania struktur liniowych.

Kolejny etap to zweryfikowanie wydziałych struktur geologicznych z dostępnymi mapami geologicznymi. Na końcu porównano wyniki interpretacji treści geologicznych i dokonano oceny przydatności danych z pasma termalnego do badań geologicznych.

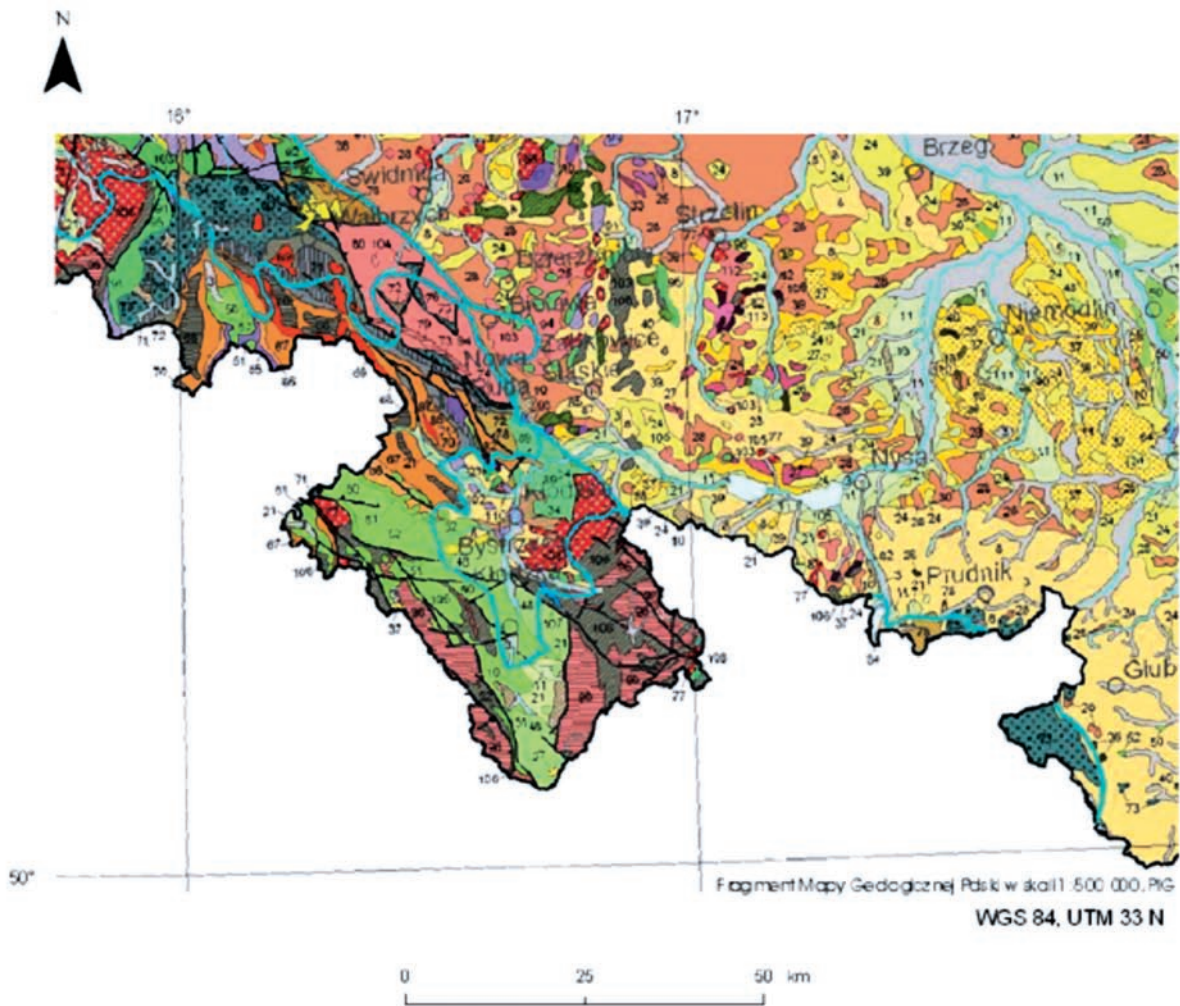
W wyniku interpretacji wizualnej zdjęcia termalnego wydzielono kilkadziesiąt struktur liniowych.

Analiza zdjęcia termalnego będącego składową kompozycji barwnej podlegała tym samym kryteriom co analiza zdjęcia termalnego.

Na podstawie analizy treści geologicznych wygenerowanych zdjęć termalnych wydzieleno struktury liniowe można podzielić na dwa główne typy :

- nieciągłości (rozłamy, dyslokacje, strefy spękań);
 - przebieg NW–SE (orogeneza waryscyjska);
 - przebieg NNE–SSW (głównie orogeneza alpejska);
- granice 4 głównych typów utworów:
 - Q i inne niewarstwowane;
 - skały osadowe warstwowe;
 - metamorfik;
 - krystelinik.

Różnica w wydzieleniu wyżej wymienionych struktur polegała przede wszystkim na ilości interpretowanych lineamentów w ogóle oraz, co ważniejsze, związanych z budową geologiczną. Wyinterpretowano około 1/3 lineamentów wspólnych dla wszystkich zdjęć. Do tej grupy lineamentów należą wyraźnie zaznaczone w terenie struktury geologiczne, np. sudecki uskoku brzeżny, rozłamy związane z uskokiem śródsudeckim oraz granice litologiczne głównie pomiędzy osadami o różnym stopniu wytrzymałości. Pozostały obszar charakteryzuje się jednorodną budową geologiczną, co odzwierciedla się w mniejszej liczbie wydziałych struktur liniowych wspólnych dla wszystkich



Legenda

— Ułoki, osłony		Jarz Dolny	Flisłowa, andezyt, ilce, siltoklasy i lityfik
Bolesław	Mułki, żwiry mułowe	Jarz Dobre	Flisłowa, margle, zlepki
	Łęzy	Jarz	Zlepki, piaskowce, węglane, wapniane
	Gliny, piaski i gliny z rucznami, odłogi cyno-dobrowie	Kuchnia/Pom	Zlepki, piaskowce, siltoklasy, andezyt
	Piaski, żwiry i mułki rucznane	Kuchnia	Zlepki, piaskowce, andezyt, ilce
Pogorzale	Piaski, żwiry i mułki rucznane	Dawa Górna	Wapienie, dolomity, margle, m. kornie, piaskowce, zlepki
	Ży. mułki i piaski nastalowe	Dawa Dolna i Świdnica	Wapienie, gips, kalcynowane, wapienie, gipsy
	Piaski i żwiry sandrowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Piaski, mułki i żwiry	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Żwiry, piaski, gliny i gipsy z m. kornymi	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Milicz	Gliny andezyt, siltoklasy oraz piaski i żwiry lodowcowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Piaski i żwiry sandrowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Milicz-Płoczn	Gliny andezyt, siltoklasy oraz piaski i żwiry lodowcowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Piaski, żwiry i mułki	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Milicz	Wapienie ogólnodostępne, siltoklasy, żwiry, piaskowce	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Ży. mułki, piaski, żwiry i węglane kruszcowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Żubów	Sandrowe	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Cynki, margle, andezyt, ilce i piaskowce	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Żubów	Wapienie, margle, piaskowce, opolizestum, fosforyty	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
	Margle i piaskowce	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki
Żubów	Piaskowce, margle i zlepki	Głubczyce	Łupki i łupki łupki i łupki

Ryc.9. Porównawcza mapa geologiczna analizowanego terenu Sudetów.
Fig. 9. Geologic Map of the study area.

zdjęć. W zależności od kontrastu zdjęcia termalnego podkreślane są różne struktury liniowe, często niezwiązane z budową geologiczną.

Z przeprowadzonej analizy wizualnej zdjęcia termalnego oraz kompozycji barwnej ze zdjęciem termalnym wy-

nika, że najwięcej struktur wyinterpretowano ze zdjęcia termalnego po wzmocnieniu zobrazowania – 89 struktur liniowych. W efekcie analizy wizualnej zdjęcia termalnego bez wzmocnieniu zobrazowania wydzielono najmniej, bo 60 struktur liniowych. W przypadku interpretacji

zdjęcia termalnego w kompozycji barwnej więcej struktur związanych z budową geologiczną można wydzielić na obrazie ze zmodyfikowanym zdjęciem termalnym.

Wnioski

W wyniku realizacji tematu „ocena przydatności zdjęć termalnych wykonanych przez satelitę Landsat w badaniach geologicznych” wykazano celowość stosowania technik wzmacniania zdjęcia satelitarnego w celu poprawy jego możliwości interpretacyjnych. Zaproponowana metodyka przetwarzania danych teledetekcyjnych wyraźnie wpłynęła na polepszenie ich czytelności. Dzięki sklasyfikowaniu obrazu satelitarnego poprzez dodanie kanału termalnego po wzmocnieniu zobrazowania zniwelowano ilość wydzielen niezwiązanych z budową geologiczną, jednocześnie podkreślając przebieg struktur tektonicznych. W efekcie otrzymano prawie jednolitą klasę roślinność bez widocznych struktur liniowych wynikających ze zmienności wegetacji. W wyniku interpretacji zdjęcia termalnego, po zmianie jego kontrastu, wydzielono granice litologiczne oraz przebieg uskoków i rozłamów geologicznych. Szczególnie cenne okazało się zredukowanie liczby wydzielen liniowych niezwiązanych z budową geologiczną. Możliwe to było właśnie dzięki zastosowaniu technik wzmacniania zobrazowania. W efekcie przetwarzania zdjęcia termalnego powstał obraz, na którym podkreślono strukturę budowy terenów górzystych analizowanego obszaru.

W wyniku przeprowadzonych badań metodycznych wykazano celowość stosowania technik wzmacniania zdjęć satelitarnych w badaniach geologicznych. Zarówno na danych jedno, jak i wielospektralnych, wydzielono znaczną liczbę struktur liniowych mających swoje źródła w budowie geologicznej analizowanego terenu.

Bibliografia

- Bażyński J., 1982, Metody interpretacji geologicznej zdjęć satelitarnych wybranych obszarów Polsk. *Instrukcje i Metody Badań Geologicznych*, 44, Państwowy Instytut Geologiczny
- Bażyński J., Fisteck J., Graniczny M., Sławiński A., Wilczyński M., 1981, Interpretacja zdjęć satelitarnych w świetle badań hydrogeologicznych południowo-zachodniej części Ziemi Kłodzkiej. *Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia*, 1:14–16
- Bażyński J., Doktor S., Graniczny M., 1984, *Mapa fotogeologiczna Polski w skali 1:1 000 000*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa
- Bażyński J., Graniczny M., Oberc J., Wilczyński M., 1986, *Mapa fotogeologiczna Sudetów 1:200 000*, Państwowy Instytut Geologiczny
- Bujakowski W. red., 2003, *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków
- Doktor S., Graniczny M., Wiśniewska M., 1985, *Wykorzystanie badań teledetekcyjnych do poszukiwań wód termalnych i mineralnych na przykładzie masywu granitowego Karkonoszy*, Przegląd Geologiczny, nr 11, 33: 454–458
- Doktor S., Graniczny M., Kucharski R., 1987, *Korelacja danych teledetekcyjnych i geofizycznych za pomocą technik cyfrowych*, Przegląd Geologiczny, 35: 453–461
- Doktor S., Graniczny M., Kanasiewicz J., Kucharski M., 1991, *The main tectonic features in the Sudeten Mts. (SW Poland) and their relationship with ore mineralization*, Geotectonica and Metallogenia, 15: 25–40
- Doktor S., Graniczny M., Łysenko V., 1992, *Kompleksowa analiza fotogeologiczna Sudetów Zachodnich na obszarze Polski i Czech*, Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia, 6: 53–60
- Gillespite A. R., Kahle A. N., 1992, *Construction and interpretation of digital thermal inertia image*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 83: 983–1000
- Graniczny M., 1994, *Strefy nieciągłości tektonicznych w świetle korelacji wielotematycznych danych geologicznych, na przykładzie Żarnowca i Ziemi Kłodzkiej*, Instrukcje i Metody Badań Geologicznych, 54, Państwowy Instytut Geologiczny
- Graniczny M., 2002, *Kartowanie geologiczne z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych Landsat*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 402: 27–50
- Graniczny M., Mizerski W., 2003, *Lineamenty na zdjęciach satelitarnych Polski – próba podsumowania*, Przegląd Geologiczny, nr 6, 51: 474–482
- Guo L. J., Moore J. M., 1998, *Pixel block intensity modulation: adding spatial detail to TM band 6 thermal imagery*, International Journal of Remote Sensing, 19: 2477–2491
- Gurgurewicz J., 2005, *Petrography and structures of Noctis Labyrinthus (Valles Marineris, Mars) – preliminary results*, Pol. Tow. Mineral. Prace Spec., 26, 169–172
- Gurgurewicz J., 2006a, *Erosional landforms and rock material in Noctis Labyrinthus (Valles Marineris, Mars)*, Bulletin of the Geological Society of Finland, Special Issue I, 43
- Gurgurewicz J., Skocki K., 2006b, *Mineralogy of Noctis Labyrinthus (Valles Marineris, Mars) on the basis of spectrometric and imaging data*, Mineralogia Polonica – Special Papers 29: 131–134
- Gurgurewicz J., 2007a, *Niepublikowana Praca Doktorska: Charakterystyka mineralogiczno-petrologiczna i strukturalna obszaru Noctis Labyrinthus (zachodnia część Valles Marineris, Mars) w świetle danych misji marsjańskich*, Centrum Badań Kosmicznych Państwowej Akademii Nauk
- Gurgurewicz J., Kostylew J., 2007b, *Basaltic Martian analogues from the Baikal Rift Zone and Mongolian terranes*, European Planetary Science Congress 2007, EPSC Abstracts 2: EPSC2007-A-00260
- Hook S. J., Gabell A. R., Green A. A., Kealy P. S., 1992, *A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies*, Remote Sensing of Environment, 42: 123–135
- Mularz S., 2002a, *Teledetekcyjny monitoring w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów nowej generacji. Raport z prac badawczych*, Archiwum ZFIT AGH
- Mularz S., 2002b, *Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych systemu Landsat*, materiały z sympozjum „Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych”, Wrocław–Polanica Zdrój, 15–17.09.2003
- Mularz S., 2003, *Analiza zdjęć lotniczych i satelitarnych w detekcji anomalii termicznych towarzyszących wysadom solnym w Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków: 37–48

- Mularz S., 2005, *Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych systemu Landsat ETM+*, *Geoinformatica Polonica*, nr 7: 111–130
- Smith W. L., 1977, *Remote-sensing applications for mineral exploration*, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, rozdział 12: 292–317
- Warner T. A., CHEN X., 2001, *Normalization of Landsat thermal imagery for effects of solar heating and topography*, *International Journal of Remote Sensing*, 22: 773–778
- Zalewska N., 2006, *Hellas Planitia as a potential site of sedimentary minerals*, *Mineralogia Polonica – Special Papers* 29: 224–227
- Zalewska N., 2006, *Mineralogical composition of the Martian surface on the basis of infrared spectroscopy*, *Mineralogia Polonica – Special Papers* 31: 311–314

Źródła kartograficzne

- Atlas Geologiczny Polski w skali 1:750 000, PIG, Warszawa, 1997.
- Atlas Tektoniczny Polski, PIG, Warszawa, 1998.
- Mapa Geologiczna Polski w skali 1:500 000, PIG (forma elektroniczna http://www.pgi.gov.pl/mapy/map500/MGP500_str1.html).



Mgr Martyna Stelmaszczuk, absolwentka Wydziału Geologii oraz Geografii i Studiów Regionalnych UW. Drugi kierunek studiów realizowany był w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zastosowań technik satelitarnych w monitoringu różnych zjawisk zachodzących na ziemi, w tym wykorzystanie teledetekcji w zarządzaniu kryzysowym. Obecnie pracownik Centrum Badań Kosmicznych PAN. E-mail: mstelmas@cbk.waw.pl



Dr Elżbieta Wołk-Musiał jest absolwentką Instytutu Geografii Uniwersytetu Warszawskiego. Stopień naukowy doktora uzyskała w 1975 roku. Przez cały czas trwania pracy zawodowej związana jest z początkowo z Pracownią Fotointerpretacji, potem z Zakładem Teledetekcji Środowiska, a obecnie Katedrą Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW. Zajmuje się wykorzystaniem zdjęć lotniczych i obrazów satelitarnych w geomorfologii (kartowanie wielkoskalowe z zastosowaniem GIS) i geografii fizycznej. E-mail: eiwołkmu@uw.edu.pl