

Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych systemu LANDSAT (ETM+)

Stanisław Mularz

Słowa kluczowe: Teledetekcja satelitarna, monitoring środowiska, detekcja anomalii termicznych, wysady solne.

Streszczenie

Ocena przydatności multispektralnych danych satelitarnych systemu LANDSAT 7 (ETM+) dla potrzeb termalnego monitoringu rejonu wysadu solnego „Góra” k. Inowrocławia była głównym celem prezentowanych badań. W pierwszym etapie badań dokonano kompleksowej oceny pojemności informacyjnej pełnego zestawu wielospektralnych danych satelitarnych, w oparciu o różne procedury statystyczne. Dokonano również integracji kanałów termalnych i optycznych metodą IHS oraz wygenerowano mapę użytkowania i pokrycia terenu metodą klasyfikacji nadzorowanej danych wielospektralnych. Drugi etap obejmował próbę detekcji przejawów termicznych w rejonie wysadu. Wykorzystano tutaj koncepcję koncentrycznych stref buforowych o modułach 50 i 25- metrowych, których granice przebiegały równolegle do konturu wysadu wyznaczonego na głębokości 150 m. Analiza uzyskanych wyników wykazała, że zmiany poziomu i rozkład temperatury w otoczeniu wysadu cechuje wyraźna tendencja spadkowa wraz z oddalaniem się od granic wysadu w kierunku jego przedpoła, przy czym różnice temperatury są rzędu 2-3° C. Natomiast, na dalekim przedpołu, w odległości około 700 m od granic wysadu obserwuje się ponownie wyraźny wzrost temperatury w granicach 2° C. Fakt ten, ma przypuszczalnie związek z tektoniką około wysadową. W odniesieniu do wydzielonych na podstawie klasyfikacji nadzorowanej, odrębnych kategorii rolniczego użytkowania stwierdzono, że zwarte kompleksy gruntów ornych o odkrytej powierzchni gleb stanowią najlepsze obszary dla zdalnego wykrywania anomalii termicznych w rejonie wysadu. Rezultaty badań pozwalają na stwierdzenie, że satelitarne zobrazowania systemu Landsat 7 (ETM+) mogą być z powodzeniem wykorzystywane do detekcji anomalii termicznych towarzyszących wysadowym strukturom solnym. Niezbędne jest jednak dalsze doskonalenie metodyki, w zakresie przetwarzania i interpretacji tego rodzaju danych teledetekcyjnych.

Environmental remote sensing monitoring over the salt domes using satellite LANDSAT (ETM+) imageries

Stanisław Mularz

Keywords : Satellite Remote Sensing, Environmental Monitoring, Thermal Anomalies
Detection, Salt Domes

Summary

The main subject of the study presented was usability evaluation of multispectral satellite LANDSAT 7 (ETM+) data, for thermal monitoring purposes, over the salt dome "Góra", near town of Inowrocław, Poland. On the first stage, the complex analysis was performed to assess an information content of the full set of satellite data using different statistic procedures and indices (PCA, OIF, DET, MOIK and IC). Merging of thermal and optical channels using IHS formula was also tested. Finally, land-use/land-cover map was generated using supervised classification method. Detection and analysis of the thermal phenomena on the test area was the subject of the second stage of this investigations. To analyse temperature level and distribution over the salt dome and its surroundings, the buffer zone concept was applied. A consecutive buffer zones of 50 m and 25 meters module were parallel to the salt dome contour line, which was specified of 150 m in depth, below the ground surface. Interpretation results indicated decreasing tendency of the temperature level of about 2-3° C, going from the salt dome to the forefield direction. Temperature increased again of about 2° C at the distance of about 700 meters from salt dome border. This was probably connected with the salt tectonic features. In the course of this research have been also stated that among different agricultural categories, a large barren soils surface was the best for the thermal anomaly detection. As a conclusion one can say that satellite LANDSAT 7 (ETM+) multispectral imageries provide very useful information for thermal anomaly detection over the salt dome areas. But methodology improvement is still necessary, especially for processing and thematic interpretation of such remote sensing data.

Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych systemu LANDSAT (ETM+) ¹

Stanisław Mularz²

Wprowadzenie

W badaniach środowiska przyrodniczego, w tym również środowiska geologicznego wykorzystuje się zazwyczaj satelitarne i/lub lotnicze obrazy wielospektralne, przy czym z reguły są one ograniczone do rejestracji w tzw. kanałach optycznych spektrum elektromagnetycznego, obejmujących region widzialny i/lub pasma bliskiej oraz krótkofalowej podczerwieni (Hunt, G. R., R. P. Ashley 1979, Prost, G. 1980, Goetz, A. F. H., L. C. Rowan 1981, Campos-Marquetti, R., Jr., B. Rockwell 1989). Wykorzystanie dla potrzeb monitoringu środowiska zakresu długofalowej podczerwieni termalnej jest jeszcze nadal stosunkowo skromne, chociaż w ostatnich latach wraz z rozwojem, zwłaszcza technologii satelitarnej oraz doskonaleniem metodyki przetwarzania i interpretacji obrazów poszerzył się wydatnie obszar zastosowań teledetekcji termalnej. Dotyczy to możliwości detekcji w skali globalnej, tak ewidentnych zjawisk termicznych jak erupcje wulkaniczne czy wpływy wód geotermalnych, jak również wielu innych aspektów termalnego monitoringu środowiska. Dla przykładu można tu przywołać takie aplikacje jak: badania mikroklimatu, (np. dużych aglomeracji miejsko-przemysłowych), ocena poziomu i określenie rozkładu przestrzennego wilgotności gleb, (np. w oparciu o numeryczne modelowanie inercji termalnej podłoża), badania termiki wód powierzchniowych i gruntowych, (np. kontrola stopnia termalnego skażenia środowiska wodnego), czy choćby ocena degradacji różnych komponentów środowiska (np. z tytułu prowadzenia eksploatacji górniczej, składowania odpadów przemysłowych i komunalnych, itp.)

Prezentowane poniżej wyniki badań dotyczą próby zastosowania teledetekcji satelitarnej głównie dla potrzeb termalnego monitoringu środowiska w rejonie wysadowych struktur solnych. Podjęcie tej problematyki nastąpiło w ramach projektu badawczego Komitetu Badań Naukowych realizowanego przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie (Bujakowski red. 2003, Mularz S. 2003). Prace nad doskonaleniem metodyki przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych dla potrzeb monitoringu środowiska w rejonie wysadów solnych były również prowadzone w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie jako badania własne autora (Mularz 2002).

1. Cel badań oraz wykorzystane dane

Zasadniczym celem prowadzonych badań była ocena przydatności zobrazowań satelitarnych nowej generacji do prowadzenia termalnego monitoringu środowiska w rejonie wysadów solnych. Inaczej mówiąc, cel badań sprowadzał się do znalezienia odpowiedzi na pytanie: czy i w jakim zakresie anomalie termiczne towarzyszące solnym strukturom wysadowym ujawniają się na powierzchni terenu i mogą być wykrywane za pomocą teledetekcji satelitarnej. Realizacja tak postawionego zadania wymagała, m.in. opracowania i wdrożenia specjalnej metodyki przetwarzania i interpretacji danych satelitarnych. Było to w Polsce, w

¹ Artykuł był prezentowany pod auspicjami Komisji Geoinformatyki PAU na Ogólnopolskim Sympozjum Geoinformacji pn. "Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych", Wrocław-Polanica Zdrój, 15-17.09.2003.

² Akademia Górniczo-Hutnicza im S. Staszica w Krakowie, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej.

pewnym sensie, przedsięwzięcie pionierskie, zwłaszcza w odniesieniu do warunków teledetekcyjnego monitorowania rejonów solnych złóż wysadowych. Dotychczasowe bowiem rozpoznanie anomalii pola cieplnego nad wysadami w Polsce dokonywane było przy użyciu bezpośrednich i geofizycznych metod pomiarowych. Wykorzystanie do tego celu technik teledetekcyjnych a zwłaszcza teledetekcji satelitarnej jest dotychczas sporadyczne, także w świecie, i ogranicza się z reguły do stref wysadowych o bardzo dużym kontraście termalnym, który charakteryzuje np. wysady położone na terytorium Stanów Zjednoczonych AP w otoczeniu Zatoki Meksykańskiej, gdzie strumień ciepły nad wysadami jest 5-8-krotnie wyższy niż w ich otoczeniu (Jacoby i Dillip 1974).

Podstawowy materiał analityczny dla omawianych badań stanowiły archiwalne, satelitarne dane systemu LANDSAT 7 (ETM+). Po dokonaniu wstępnej analizy dostępnych materiałów satelitarnych (dwie sceny) do szczegółowych badań wybrano rejestrację wykonaną w okresie wczesnej wiosny, w dniu 3 kwietnia 2000 roku. Wybór powyższy uzasadnia fakt, iż w tym właśnie okresie zarówno warunki gruntowo-wodne jak i pokrycie powierzchni terenu, zwłaszcza w obrębie upraw są w miarę stabilne i nie powodują nadmiernego zakłócenia rejestracji termalnej (wychłodzenie w okresie zimowym podłoża gruntowego, zredukowanie wpływu retencji wodnej w przypowierzchniowej warstwie gleb uprawnych, zredukowanie wpływu roślinności, optymalna ekspozycja odkrytych gleb). Natomiast, druga dostępna archiwalna scena systemu LANDSAT 7 (ETM+), zarejestrowana w dniu 8 maja 2001 roku, okazała się mało przydatna dla tych potrzeb, ze względu na zaawansowaną już o tej porze wegetację.

Dysponowano również barwnymi zdjęciami lotniczymi w postaci cyfrowej tworzących dwa stereogramy). Zdjęcia te, w skali 1 : 26 000 wykonane zostały w ramach programu PHARE w 1995 roku. Stanowiły one najbardziej aktualny materiał fotolotniczy, dokumentujący rejon wysadu „Góra”. Zdjęcia powyższe posłużyły do sporządzenia uproszczonej fotomapy rejonu wysadu „Góra”. Natomiast pełny zakres wykorzystania materiałów fotolotniczych obejmował przede wszystkim szczegółową interpretację elementów topograficznych - cech użytkowania terenu a także analizę mezoreliefu w bezpośrednim otoczeniu wysadu solnego „Góra”.

Charakterystyka obszaru testowego

Rejon wysadu solnego „Góra” znajduje się w odległości około 9 km na południowy wschód od Inowrocławia. Kontur wysadu geometryzuje w rzucie poziomym nieregularna elipsa o wymiarach w przybliżeniu 1000x900 m. Na tle, ogólnie mało urozmaiconej morfologii tego obszaru, charakterystycznej dla terenów równinnych, obecność struktury wysadowej zaznacza się wyraźnym wyniesieniem powierzchni terenu, którego wysokość w stosunku do otoczenia sięga nawet kilkunastu metrów. W jego części środkowej oraz południowo-wschodniej znajdują się dwa niewielkie jeziora, które wraz z otaczającymi je mokradłami wypełniają lokalne, nieckowate zagłębienia terenowe. Eksploatację wysadowego złoża solnego „Góra” rozpoczęto w 1968 roku metodą podziemnego ługowania otworami o głębokości przeciętnie 1200 m, wierconymi z powierzchni terenu.

Budowa geologiczna rejonu wysadu, rozpoznana na podstawie danych z licznych wierceń (poszukiwawczych i eksploatacyjnych) oraz wyników badań geofizycznych przedstawia się w uproszczeniu następująco (Szybist, 2003). Bezpośrednie otoczenie struktury solnej budują utwory górnej jury, w przewodze węglanowe, wykształcone w postaci wapieni, margli i dolomitów. Wyżej zalegają osady trzeciorzędowe (mioceńskie), które pod względem litologicznym stanowią serię piaszczysto-mułkową o zmiennej miąższości, od kilku do

kilkudziesięciu metrów. Ostatnie ogniwo profilu geologicznego stanowią najmłodsze osady czwartorzędowe reprezentowane głównie przez gliny zwałowe, piaski, mułki oraz ropy. Zarówno w strefie wysadu, jak i w jego otoczeniu utwory czwartorzędowe tworzą ciągłą pokrywę, o łącznej miąższości od 15 m do około 70 m.

Strukturę wysadową budują w przewodzie sole kamienne wieku cechsztyńskiego. Zwierciadło solne występuje na głębokości od 101 m do 172 m od powierzchni terenu, z wyraźną depresją w centralnej części wysadu, która jak się wydaje znajduje swoje odbicie w morfologii powierzchni terenu. Wysad przykrywa czapa gipsowa z przerostami ropy. Urozmaicony morfologicznie strop czapy zalega na głębokości od 19 m do 70 m a jej miąższość waha się w przedziale 34-116 m. Tektonika wewnętrzna wysadu, o fałdowym charakterze zaburzeń jest bardzo skomplikowana (Garlicki red., 1988, Szybist, 1993).

Z punktu widzenia halotektoniki wysad solny „Góra” należy do nielicznych struktur solnych regionu kujawskiego, które całkowicie przebijają utwory mezozoiku aż do powierzchni podkenozoicznej. Stwarza to, potencjalnie korzystne warunki propagacji strumienia energii geotermalnej przez słup solny z głębi górotworu ku powierzchni terenu i ujawniania się tam efektów tej propagacji w postaci anomalii termicznych. Pomiędzy utworami solnymi i warstwami otaczającymi istnieje bowiem duża różnica przewodności cieplnej, która powoduje, że diapiry solne stanowią dogodne drogi przewodzenia ciepła z głębi Ziemi, przy okazji stając się swoistymi „akumulatorami” energii cieplnej (Selig i Wallick, 1966; Jensen 1990; Petersen i Lerche, 1995; Jarzyna, 2003). W tym kontekście, wybór wysadu „Góra” jako pola testowego do przeprowadzenia kompleksowych badań nad termiką górotworu w rejonie wysadowych struktur solnych, z wykorzystaniem także metod teledetekcji satelitarnej był w pełni uzasadniony.

2. Metodyka badań

Program badań, związany z wykorzystaniem archiwalnych satelitarnych materiałów teledetekcyjnych obejmował następujący zakres prac:

A. Wstępne przetwarzanie obrazów satelitarnych systemu LANDSAT (ETM+), na które składały się następujące operacje :

- transformacja geometryczna pełnego zestawu danych satelitarnych (2 x 8 kanałów spektralnych) do jednolitego układu 1992, przyjmując odwzorowanie G-K//TM, elipsoide GRS80 i południk centralny 19⁰.
- usunięcie zniekształceń radiometrycznych typu „stripping”,
- kalibracja danych wielospektralnych (usunięcie wpływu atmosfery, kalibracja poziomu temperatury radiacyjnej),
- wycięcie odpowiednich fragmentów scen zobrazowania LANDSAT 7 (ETM+) dla rejonu analizowanego wysadu „Góra”.

B. Operacje wzmacniania obrazu, polegające na uwydatnieniu cech, ważnych z punktu widzenia potrzeb interpretacji przy wykorzystaniu procedur wzmacniania kontrastu, progowania oraz technik filtracyjnych. Dokonano również testowania różnych metod wzmacniania informacji spektralnej, poprzez integrację zwłaszcza kanałów termalnych o rozdzielczości przestrzennej 60 m z kanałem panchromatycznym o rozdzielczości 15 m.

C. Ekstrakcja informacji tematycznej polegającej na wydobyciu z cyfrowych obrazów multispektralnych pożądanej porcji informacji poprzez równoczesną analizę dwóch lub więcej kanałów spektralnych. Zgodnie z metodyką geologicznej interpretacji wielospektralnych obrazów cyfrowych wykorzystano następujące metody:

- wagowanie obrazów,
- generowanie pełnego zestawu kompozycji barwnych wraz z ich analizą statystyczną,
- dokonanie klasyfikacji danych wielospektralnych metodami: nadzorowaną i nienadzorowaną.

Metodyka wspomaganego komputerowo interpretacji satelitarnych zobrażeń systemu LANDSAT (ETM+) nie ograniczała się jedynie do wykorzystania kanałów termalnych ale zakładała również poszerzony udział informacji spektralnej, którą zawierają tzw. kanały optyczne obejmujące zakres widzialny oraz bliską i środkową podczerwień widma elektromagnetycznego. Takie podejście wynikało z faktu, iż potencjalne anomalie termiczne związane ze strukturą wysadu mogłyby nie ujawniać się samoistnie, ze względu na porę rejestracji (około godz. 11 czasu lokalnego) i wynikający stąd poziom zakłóceń emisji promieniowania cieplnego przy bezpośredniej „dostawie” energii słonecznej. W tej sytuacji nieodzownym okazało się scalenie efektów emisji długofalowej podczerwieni termalnej z rejestracją w kanałach odbijalnych, zwłaszcza w zakresie pozawidzialnym spektrum elektromagnetycznego a mianowicie, w bliskiej i krótkofalowej podczerwieni.

3. Wyniki badań i ich interpretacja

3.1. Analizy tematyczne

Analizy tematyczne wykonano na fragmencie sceny (30x30 km) systemu LANDSAT 7 (ETM+), skalibrowanym dla poszczególnych kanałów wg następującego schematu:

- 1000x1000 pikseli - kanały optyczne: [1, 2, 3, 4, 5, 7] (piksel 30 m);
- 2000x2000 pikseli - kanał panchromatyczny (piksel 15m);
- 1000x1000 pikseli - kanały termalne [6] i [9] (piksel 60 m skalibrowany do rozdzielczości kanałów optycznych: 30x30 m).

Wpasowanie przeprowadzono przy użyciu programu PCI OrthoEngine, który posiada odpowiednie algorytmy do kalibracji geometrycznej danych satelitarnych, w tym moduł do rektyfikacji danych z satelity Landsat 7 (ETM+) wykorzystujący w obliczeniach parametry orbity. Uzyskaną dokładność wpasowania przedstawia poniższy raport:

a) dla kanałów spektralnych i termalnych (piksel 30 m):

- RMS na punktach dostosowania (kontrolowanych): 0,45 piksela tj. $0,45 \times 30 \text{ m} = 13,4 \text{ m}$;
- RMS na punktach kontrolujących: 0,43 piksela tj. $0,43 \times 30 \text{ m} = 12,9 \text{ m}$.

b) dla kanału panchromatycznego (piksel 15 m):

- RMS na punktach dostosowania (kontrolowanych): 0,62 piksela tj. $0,62 \times 15 \text{ m} = 9,2 \text{ m}$;
- RMS na punktach kontrolujących: 0,59 piksela tj. $0,59 \times 15 \text{ m} = 8,9 \text{ m}$.

Zestaw analiz tematycznych otwiera macierz korelacji (Tab.1). Dla obszaru testowego 30x30 km, w którego centrum znajduje się wysad „Góra” stwierdzono bardzo wysoką korelację ($r=0,92 - 0,98$) odpowiednio pomiędzy kanałami widzialnymi (1, 2, 3), następnie kanałami środkowej podczerwieni [5] i [7] oraz pomiędzy kanałami termalnymi [6] i [9]. Natomiast

pasmo bliskiej podczerwieni, kanał [4] zawiera wyraźnie odmienną informację od kanałów pozostałych i koreluje najwyżej z kanałem [2] ($r = 0,51$). Kanały termalne wykazują praktycznie brak korelacji z kanałami widzialnymi i bliską podczerwienią, natomiast stosunkowo znacząco korelują z kanałami [5] ($r = 0,43$) i [7] ($r = 0,48$).

Różnica pomiędzy danymi z kanałów 6 i 9 wynika, nie z zastosowania innego okna poboru informacji, lecz z innego skalibrowania sensorów, co uzasadnia tak wysoką wzajemną korelację pomiędzy kanałami [6] i [9]. W toku dalszej analizy wykazano, że lepiej skalibrowany dla terenu badań jest kanał 9. Analiza regresji wielokrotnej wykazała bowiem dla tego kanału korelację rzędu $r = 0,59$ i $R^2 = 35\%$ z pozostałymi kanałami widzialnymi oraz bliskiej i środkowej podczerwieni:

$$TM9 = 114.8716 + 0.3756*TM1 - 0.2841*TM2 - 0.1163*TM3 - 0.0336*TM4 + 0.1281*TM5 + 0.0459*TM7$$

3.2. Pojemność informacyjna kompozycji barwnych

Generowanie kompozycji barwnych ma na celu scalenie informacji z trzech dowolnie wybranych kanałów spektralnych poprzez ich barwną wizualizację jako składowe RGB (Red, Green, Blue). Dla potrzeb omawianej analizy wygenerowano pełny zestaw 56 kompozycji barwnych obejmujący wszystkie możliwe kombinacje trzech dowolnych kanałów spektralnych z pełnego zestawu obrazowania skanera (ETM+).

Dla statystycznej oceny zawartości informacji tematycznej danych wielospektralnych systemu LANDSAT (ETM+) wykorzystano 4 niezależne wskaźniki, a mianowicie: wskaźnik OIF, DET, MOIK oraz INDEX CRIPPENA.

Wskaźnik OIF – „Optimum Index Factor” (Chavez i in. 84) wyraża normalizację sumy odchyłeń standardowych trypletu kanałów i sumy modułów korelacji kanałów spektralnych tworzących daną kompozycję barwną. Wysokie wartości wskaźnika OIF oznaczają zatem, z formalnego punktu widzenia, dużą objętość i różnorodność informacji, podczas gdy niskie wartości OIF wskazują na podobieństwo i powielanie informacji w tworzących daną kompozycję kanałach spektralnych (Ryc.1).

Wskaźnik DET – „Determinant” definiuje wyznacznik macierzy wariancyjno/kowariancyjnej trypletu kanałów. Ze względu na zakres wartości wskaźnika DET wyniki przedstawiono jako pierwiastek 3-go stopnia (Ryc. 2).

Wskaźnik MOIK jest to suma modułów korelacji trzech kanałów spektralnych tworzących kompozycję barwną (Ryc. 3), zaś INDEX CRIPPENA (IC) definiuje wyznacznik macierzy korelacji trypletu kanałów (Ryc. 4).

Porównując wyniki obliczeń wg wszystkich wykorzystanych formuł statystycznych można powiedzieć, że największe znaczenie kanałom termalnym przypisuje ranking MOIK a następnie Index Crippena (IC) i OIF, natomiast bardzo niskie rezultaty uzyskują kanały termalne wg rankingu DET. Rankingi, które przywiązują wagę przede wszystkim do stopnia korelacji między kanałami (MOIK, IC), wskazują na kompozycje barwne, w których biorą udział różne, nie skorelowane ze sobą informacje, bez względu na ich jakość i różnorodność. W takim przypadku obecność kanału [6] lub [9] jest pożądana, ponieważ ich korelacja z pozostałymi kanałami jest bardzo niska. Dochodzi nawet do tak paradoksalnej sytuacji, że już

na 12-stym miejscu pojawia się KB [269], gdzie oba termalne kanały biorą udział – ich niska korelacja z kanałem [2] rekompensuje wzajemne bardzo wysokie podobieństwo.

DET, który preferuje różnorodność informacji w obrębie pojedynczego kanału, odrzuca kompozycje barwne z kanałami termalnymi a wyraźnie wskazuje na pozostałe kanały, jako cenne ze względu na ich dużą zmienność. Wyraźnie też rozgranicza kanał [6] i [9], wskazując na kanał [9] jako bogatszy w informacje.

OIF jest parametrem równoważącym oba podejścia: uwzględnia zarówno zmienność informacji jak i ich skorelowanie, w tym przypadku KB z kanałami termalnymi uzyskują przewagę, ale nie jest ona tak dominująca jak w przypadku formuł MOIK i IC. Analizując wyniki rankingu dla pełnego zestawu kompozycji barwnych wg wskaźnika OIF (Ryc. 1) łatwo zauważyć, iż kompozycje złożone z kombinacji kanałów termalnych [6], [9] oraz bliskiej [4] i środkowej podczerwieni [5], [7] charakteryzują najwyższe wartości tego wskaźnika, a co za tym idzie największy zasób i różnorodność informacji tematycznej.

Podsumowując powyższe uwagi można stwierdzić, że kanały termalne posiadają odmienną ale mało różnorodną informację w stosunku do kanałów optycznych. Analizując w tym kontekście macierz korelacji (Tab.1) można przypuszczać, że optymalnym nośnikiem informacji tematycznej będą kompozycje barwne zawierające po jednym kanale z czterech głównych grup kanałów cechujących się bardzo dużym wewnętrznym podobieństwem. Warunek powyższy spełniają wszystkie wskaźniki (Tab. 2). Wśród pierwszych 20-tu wg rankingu kompozycji barwnych, klasyfikacja dokonana na podstawie różnych wskaźników przedstawia się następująco:

- ▶ OIF: 18/20 KB, najlepszy układ: kanały bliskiej i średniej podczerwieni oraz kanał termalny (NIR+SWIR+TIR);
- ▶ DET: 16/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne oraz bliskiej i średniej podczerwieni (VIS+NIR+SWIR);
- ▶ MOIK: 17/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne, średniej podczerwieni oraz podczerwieni termalnej (VIS+NIR+TIR);
- ▶ IC: 20/20 KB, najlepszy układ: kanały widzialne, średniej podczerwieni oraz podczerwieni termalnej (VIS+NIR+TIR).

Można przy tym zauważyć, że DET, oraz w mniejszym stopniu OIF, wskazują na zasadność równoczesnego używania w KB kanałów [5] i [7], które - choć wzajemnie ze sobą skorelowane - niosą dużą różnorodność informacji. Takiego sygnału nie dają pozostałe dwa wskaźniki (MOIK i IC), które zdecydowanie preferują używanie kanałów termalnych, nawet podwojonych (MOIK) lub dwóch kanałów widzialnych (MOIK).

3.3. Analiza składowych głównych (PCA)

Analiza składowych głównych (PCA) stanowi technikę liniowej transformacji danych obrazowych, w wyniku której z oryginalnych kanałów spektralnych uzyskuje się nowy zestaw obrazów tzw. składowych (Chavez, Kwateng, 1989). Dla typowego zestawu satelitarnych danych multispektralnych pierwsze dwie lub trzy składowe (C1, C2, C3) zawierają niemal kompletną informację spektralną, podczas gdy w kolejnych składowych (C4, C5, C6, C7, C8)

dominują różnego rodzaju zakłócenia radiometryczne oraz szczątkowa informacja tematyczna. Stąd też, analiza PCA wykorzystywana jest w teledetekcji m.in. do kompresji danych spektralnych.

W przedmiotowych badaniach podejście PCA wykorzystano do oceny zawartości spektralnej danych systemu LANDSAT 7 (ETM+), w tym również do próby separacji poszczególnych zakresów spektralnych a zwłaszcza zakresu podczerwieni termalnej.

Analizując wyniki transformacji PCA w postaci macierzy ładowania (Tab. 3) łatwo zauważyć, że pierwsza składowa (C1) zawiera niemal kompletną informację przestrzenną pochodzącą z kanałów widzialnych [1, 2, 3] oraz średniej podczerwieni [5, 7]. Natomiast, druga składowa (C2) zawiera prawie wyłącznie informację z kanałów termalnych [6, 9], co jest najbardziej istotne, z punktu widzenia prowadzonych badań. Następne dwie składowe (C3, C4) prowadzą informację odpowiednio, z kanałów bliskiej [4] i średniej podczerwieni [5, 7]. W pozostałych składowych (C5, C6, C7, C8) dominują różnego rodzaju szумы radiometryczne, związane głównie z pracą skanera.

3.4. Integracja kanałów termalnych i optycznych

W toku analiz tematycznych podjęto również próbę integracji kanałów o różnej rozdzielczości przestrzennej. Zabieg ten miał na celu sprawdzenie czy i w jakim zakresie można podnieść walory interpretacyjne kanałów termalnych, o rozdzielczości 60 m, poprzez wzmocnienie ich odwzorowania dwukrotnie wyższą rozdzielczością przestrzenną kanałów optycznych (30 m). Spośród znanych z literatury i najczęściej stosowanych metod integracyjnych (Carper i in., 1990, Rigol, Chica-Olmo, 1997, Waldi i in., 1997) testowaniu poddano następujące procedury:

- ▶ IHS (Intensity, Hue, Saturation),
- ▶ PCA (Principal Component Analysis),
- ▶ HPF (High Pass Filter) oraz formuły
- ▶ Jaakkola i Mroza (IHS + Jaakkola).

Analiza porównawcza uzyskanych wyników integracji dokonanych ww. metodami pozwoliła stwierdzić, iż najlepsze rezultaty dała fuzja kanałów termalnych z optycznymi metodą IHS (Ryc. 7a i b).

3.5. Mapa użytkowania i pokrycia terenu

Wielospektralne dane z kanałów optycznych Landsata 7 (ETM+) posłużyły również do opracowania mapy użytkowania i pokrycia terenu dla obszaru testowego. Tego rodzaju mapa była niezbędna w kolejnym etapie badań dla analizy zmian termalnych w rejonie wysadu i jego najbliższym otoczeniu. Informacja bowiem, o przestrzennej lokalizacji różnych kategorii użytkowania, a zwłaszcza pokrycia terenu pozwala na właściwą interpretację oraz ilościową ocenę poziomu i rozkładu radiacji termalnej, rejestrowanej przez sensor satelity.

Mapę opracowano w oparciu o metodę klasyfikacji nadzorowanej danych wielospektralnych systemu LANDSAT 7 (ETM+). Wydzielono ogółem 10 kategorii użytkowania terenu, w tym

cztery rodzaje gruntów ornych (Ryc. 6, Ryc. 5). Takie podejście miało na celu sprawdzenie, czy i w jakim zakresie zachodzi korelacja pomiędzy emisją termalną a różniącymi się spektralnie strefami, w obrębie tej samej kategorii rolniczego użytkowania, jaką stanowią grunty orne (Tab. 4). Analizując mapę użytkowania terenu łatwo zauważyć, że w bezpośrednim, a nawet dalszym otoczeniu wysadu dominują grunty orne, przy czym w części północnej strefy okalającej wysad zwiększa się wyraźnie udział trwałych użytków zielonych.

4. Analiza zmian termalnych

Analizę poziomą i rozkład przestrzenny temperatury radiacyjnej w rejonie wysadu solnego „Góra” oparto na koncepcji koncentrycznych stref buforowych, których granice poprowadzono równoległe do konturu wysadu wyznaczonego na głębokości 150 m od powierzchni terenu. W oparciu o wyniki wstępnej analizy dla różnych wariantów bufora od 25 m do 500 m (Ryc. 8). Do szczegółowych studiów wybrano moduły o szerokości 50 i 25 metrów (Ryc. 9 i Ryc.10). Następnie przetestowano zmiany odpowiedzi spektralnych (dla wszystkich możliwych kombinacji kanałów optycznych i termalnych) wraz z odległością, przyjmując różne zasięgi przestrzenne i kierunki prowadzonej analizy, w stosunku do granicy wysadu na głębokości 150 m, a mianowicie:

- na zewnątrz od granicy wysadu z pominięciem strefy nad samym wysadem,
- wyłącznie w obrębie strefy nad wysadem,
- jednocześnie na zewnątrz i do centrum wysadu idąc od jego granicy,
- od umownego środka wysadu poza jego granicę na odległość 395 m.

Uzyskane rezultaty wskazują na podobną tendencję zmian odpowiedzi spektralnych wraz z odległością od granic wysadu lub jego umownego środka (Ryc. 11). Kanały termalne są przy tym istotnym elementem wzmacniającym łączną ilość informacji i co ważniejsze jest to w niewielkim stopniu uzależnione od wybranego sposobu i obszaru analizy. Fakt ten świadczy o poprawności przyjętych założeń metodycznych.

Dla kompleksowej oceny zmian termalnych w rejonie badanego wysadu „Góra”, co do poziomu i rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni terenu dokonano kalibracji kanałów termalnych systemu LANDSAT 7 (ETM+), uzyskując tym samym zamianę temperatury radiacyjnej na temperaturę kinetyczną wyrażoną w °C.

Graficzną syntezę wyników analizy termalnych danych satelitarnych przedstawiają Ryc.12 oraz Ryc.13. Analizując zmiany poziomu temperatury w rejonie badanego wysadu łatwo zauważyć wyraźną tendencję spadkową w rozkładzie temperatury wraz z oddalaniem od granic wysadu, przy czym zależność ta jest ewidentna dla obu przyjętych modułów bufora, zarówno 25 jak i 50-metrowego. Stwierdzona przy tym różnica poziomu temperatury radiacyjnej odpowiada zakresowi temperatury rzeczywistej w granicach 2 – 3 °C.

Ponadto należy podkreślić, że na dalekim przedpolu, w odległości około 700 m od granicy wysadu obserwuje się ponownie wyraźny wzrost temperatury, rzędu 2°C. Fakt ten należy przypuszczalnie wiązać z tektoniką okołowysadową. Bowiernieciągłości, w postaci uskoków, a zwłaszcza większych dyslokacji mogą stanowić dogodne strefy migracji ciepła z głębi górotworu ku powierzchni, dając tam lokalne anomalie termalne.

Dodać należy, że analiza buforowych stref 50 i 25- metrowych wskazuje również na wyraźną tendencję spadku poziomu temperatury idąc od granicy wysadu w stronę jego centrum na dystansie od około 50-150m, przy czym przyjęcie stref 25-metrowych daje możliwość

dokładniejszego próbkowania, przy zachowaniu podobnej tendencji zmian, jak w przypadku stosowania bufora 50-metrowej szerokości.

Istotne uzupełnienie omówionych dotychczas wyników badań stanowią analizy porównawcze dla buforów 50 m i 25 m, na wyodrębnionych kategoriach terenu o rolniczym profilu użytkowania, z pominięciem obszarów leśnych, stref zabudowy oraz wód powierzchniowych (Ryc.14)

Takie podejście pozwala na częściowe wyeliminowanie problemu przypadkowego wpływu udziału poszczególnych form użytkowania terenu (szczególnie antropogenicznych), ale niesie inne trudności, szczególnie przy buforach 25-metrowych, gdyż rozkład pikseli w poszczególnych strefach może być wówczas bardzo nierównomierny.

Analogicznie jak to miało miejsce w przypadku analizy całego obrazu (bez wydzielonych kategorii użytkowania i pokrycia terenu), tak i w tym przypadku obserwuje się podobną, jak poprzednio, tendencję do obniżania się temperatury wraz z oddalaniem się od granicy wysadu. Szczególnie wysoką korelację uzyskano dla kategorii „grunty orne 4” lub, z pewnymi ograniczeniami, „grunty orne 2”, które w czasie rejestracji sceny satelitarnej stanowiły w większości gleby odkryte o prawdopodobnie już przesuszonej powierzchni, po okresie zimowym. Okoliczności powyższe należy uznać za nader korzystne dla prowadzenia tego rodzaju analiz. Natomiast dla obszarów łąk i trwałych użytków zielonych nie uzyskano wyraźnego związku zmian temperatury z odległością, co można uznać jako wskazanie metodyczne uzasadniające możliwość wyłączenia z analizy tego rodzaju kategorii użytkowania. Analizy na wydzielonych obszarach potwierdzają regułę, że najlepsze obszary do detekcji zmian temperatury w obrębie wysadu i na jego przedpolu stanowią zwarte kompleksy użytków ornich, zwłaszcza te, które w momencie zdalnego obrazowania termalnego mają odkrytą i przesuszoną powierzchnię gleby.

Podsumowanie

W toku przeprowadzonych badań dokonano kompleksowej oceny możliwości wykorzystania danych satelitarnych systemu LANDSAT 7 (ETM+) dla potrzeb termalnego monitorowania środowiska w rejonie wysadów solnych, na przykładzie obszaru testowego jaki stanowił wysad „Góra” k. Inowrocławia. Ocena statystyczna pełnego zestawu wielospektralnych danych obrazowych wykazała, że największym zasobem i różnorodnością informacji tematycznej charakteryzują się kompozycje barwne będące kombinacją kanałów termalnych z pasmami: bliskiej i środkowej podczerwieni.

W wyniku analizy rozkładu temperatury radiacyjnej wokół wysadu, w kolejnych strefach buforowych o szerokości 25m i 50 m, stwierdzono wyraźny spadek temperatury od centrum wysadu w kierunku jego bezpośredniego przedpola, przy czym różnice temperatury rzeczywistej są rzędu 2-3 ° C. Analiza zmian poziomu temperatury, w obrębie różnych kategorii rolniczego użytkowania pozwoliła stwierdzić, że najlepsze warunki dla detekcji niewielkich różnic temperatury radiacyjnej istnieją na odkrytych powierzchniach, przesuszonych powierzchniowo gleb.

Badania wykazały, że satelitarne dane obrazowe nowej generacji, systemu LANDSAT 7 (ETM+), stanowią niezwykle obiecujące narzędzie dla wykrywania i geometryzacji przestrzennej anomalii termicznych towarzyszących wysadom solnym. Konieczne jest jednakże, dalsze doskonalenie metodyki przetwarzania i interpretacji tego rodzaju danych teledetekcyjnych

BIBLIOGRAFIA

Abrams, M. J., R. P. Ashley, I. C. Rowan, A. F. H. Goetz, and A. B. Kahle, 1977: Mapping of Hydrothermal Alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, Using Aircraft Scanner Images for the Spectral Region 460 to 2360 nm. *Geology*, Vol. 5, s. 713-718.

Bujakowski W. red., 2003. Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, s. 136.

Campos-Marquetti, R., Jr., and B. Rockwell, 1989. Quantitative Lithologic Mapping in Spectral Ratio Feature Space: Volcanic, Sedimentary and Metamorphic Terrains. *Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Alberta, s. 471-484.

Carper, W. J., T. M. Lillesand, and R. W. Kiefer, 1990. The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 56, No. 4, s. 459-467.

Chavez, P. S., Jr., and A. Y. Kwarteng, 1989. Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 55, No. 3, s. 339-348.

Chavez, P. S., Jr., S. C. Gupatil, and J. Howell, 1984. Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. *Proceedings: 50th Annual ASP-ACMS Symposium*, American Society of Photogrammetry, Washington, D.C., s. 728-743

Goetz, A. F. H., B. N. Rock, and L. C. Rowan, 1983. Remote Sensing for Exploration. An Overview. *Economic Geology*, Vol. 78, No. 4, s. 573-590.

Goetz, A. F. H., and L. C. Rowan, 1981. Geologic Remote Sensing. *Science*, Vol. 211, s. 781-791.

Hunt, G. R., and R. P. Ashley, 1979. Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. *Economic Geology*, Vol. 74, s. 1613-1629.

Jacoby Ch. D., Dillip P.K., 1974. Salt domes as a source of geothermal energy. *Mining Engineering* 26/5, p.34-39.

Jarzyna J, 2003. Własności cieplne skał wokół wysadów solnych. [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych. Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego. Wyd IGSMiE PAN, Kraków, s. 61-72.

Jensen P.K., 1990. Analysis of the temperature field around diapirs. *Geothermics*, vol.19. p.273-283

Mularz S.,2002: Teledetekcyjny monitoring środowiska w rejonie wysadów solnych z wykorzystaniem obrazowań satelitarnych nowej generacji. Raport z prac badawczych Nr 10.10.150.597. Arch. ZFIT AGH.

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. Wyd IGSMiE PAN, Kraków s.37-48..

Petersen K., Lerche I, 1995. Quantification of thermal anomalies in sediments around salt structures. Geothermics, vol. 24, No 2, p.253-268.

Prost, G., 1980. Alteration Mapping with Airborne Multispectral Scanners. Economic Geology, Vol. 75, s. 894-906.

Rigol J.P., M. Chica-Olmo, 1997. Merging remote-sensing images for geological-environmental mapping: application to the Cabo de Gata-Nijar Natural Park, Spain. Environmental Geology 34 (2/3), pp. 194-202.

Selig F., Wallick G., 1966. Temperature distribution in salt domes and surrounding sediments. Geophysics, XXXI/2, p. 346-361.

Szybist A., 2003. Struktury solne regionu kujawskiego [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych. Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego. Wyd IGSMiE PAN, Kraków s.15-35.

Szybist A., Garlicki A., 2003. Geologiczna charakterystyka regionu kujawskiego. [w:] Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych. Praca zbiorowa pod red. W. Bujakowskiego. Wyd IGSMiE PAN, Kraków s.7-13.

Wald, L., T. Ranchin, and M. Mangolini, 1997. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 6, pp. 691-699.

Tabela 2. Wskaźniki statystyczne (OIF, DET, MOIK, IC)

OIF		DET3		MOIK		CRIPPEN	
479	66.0	347	231.4	346	0.64	346	0.901
467	63.8	345	212.5	349	0.65	349	0.900
469	63.8	247	171.6	146	0.65	146	0.899
349	56.2	457	163.3	149	0.66	149	0.898
346	53.5	245	156.7	467	0.66	467	0.865
347	47.7	147	151.2	479	0.67	479	0.862
459	46.0	357	144.9	246	0.71	246	0.840
457	45.3	145	138.4	249	0.71	249	0.839
456	44.0	479	135.4	456	0.90	456	0.804
149	43.8	459	118.0	459	0.90	459	0.801
147	43.5	257	112.7	147	1.07	145	0.692
249	43.2	349	104.0	269	1.11	147	0.692
247	41.6	379	95.4	267	1.14	267	0.670
146	41.0	157	94.7	347	1.14	279	0.667
246	40.6	467	91.7	279	1.14	156	0.664
345	35.8	359	87.0	126	1.16	159	0.663
279	32.1	579	81.5	129	1.16	167	0.660
145	32.1	456	79.9	239	1.16	179	0.658
379	31.8	279	75.6	236	1.16	247	0.640
367	30.3	249	72.5	256	1.17	245	0.638

Tabela 3. Analiza składowych głównych [PCA]: macierz ładowania

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
1	0.89	-0.29	-0.12	-0.27	-0.17	-0.03	-0.04	-0.01
2	0.89	-0.40	-0.01	-0.20	0.04	0.01	0.12	0.02
3	0.92	-0.28	-0.15	-0.14	0.15	0.01	-0.08	-0.01
4	0.39	-0.51	0.75	0.12	-0.01	0.04	-0.02	0.00
5	0.90	0.13	0.01	0.39	0.01	-0.13	0.01	0.00
6	0.42	0.86	0.22	-0.16	0.01	0.00	0.02	-0.10
7	0.86	0.25	-0.26	0.33	-0.04	0.13	0.00	0.00
9	0.42	0.86	0.21	-0.16	0.01	0.00	-0.01	0.10
	widz+IR.	term.	NIR	IR				

Tabela 4. Charakterystyka wydzielonych 10 kategorii użytkowania i pokrycia terenu

		pole pow	tm9		ndvi		kor.-Tm9 z:	
		w %	śr	odch	śr	odch.	Tm7	ndvi
1	zabudowa	1.2	125.52	5.63	0.37	0.09	0.25	-0.41
2	przemysl	6.8	122.09	3.90	0.40	0.15	0.19	0.16
3	przem_woda	0.1	124.97	9.32	0.15	0.14	0.27	-0.38
4	woda	0.7	100.42	3.72	0.64	0.14	0.29	-0.22
5	lasy	1.7	116.02	2.17	0.77	0.05	0.30	-0.29
6	laki	19.2	126.10	3.88	0.38	0.07	0.43	-0.22
7	gr_orne1	3.7	119.30	2.45	0.73	0.06	0.22	-0.09
8	gr_orne2	4.1	120.96	3.44	0.14	0.04	0.43	-0.26
9	gr_orne3	5.4	124.68	3.36	0.39	0.07	0.22	-0.05
10	gr_orne4	10.2	122.30	3.13	0.55	0.09	0.25	-0.12
	gr1-4	23.4	122.14	3.59	0.47	0.20	0.16	-0.17
	gr1-4,laki	42.6	123.92	4.21	0.43	0.16	0.39	-0.27
	niesklas.	46.9						