

# **Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru Tarnobrzesckiego Zagłębia Siarkowego**

---

Projekt badawczy KBN nr 5T12E 005 25

**Kierownik:** Dr inż. Beata Hejmanowska

**Wykonawcy:** Dr hab. inż. Stanisław Mularz, prof. AGH

Dr inż. Tadeusz Gołda

Mgr inż. Tomasz Pirowski

Mgr inż. Ewa Głowienka

## Spis treści

---

<b>Spis treści</b>	<b>2</b>
<b>1. Zawartość raportu merytorycznego</b>	<b>4</b>
<b>2. Streszczenie</b>	<b>5</b>
<b>3. Wstęp</b>	<b>7</b>
<b>4. Opis obszaru badań</b>	<b>8</b>
<b>5. Metodyka</b>	<b>14</b>
5.1 Analiza promieniowania elektromagnetycznego w aspekcie przetwarzania zobrażeń hiperspektralnych	14
5.2 Pomiar spektrometryczny	16
5.3 Opis przedmiotu badań spektrometrycznych	18
5.3.1 Pomiar terenowy	19
5.3.2 Pomiar laboratoryjny	20
5.4 Zobrażenia teledetekcyjne	23
5.4.1 Charakterystyka zobrażenia ASTER	23
5.4.2 Charakterystyka zobrażenia DAIS	24
5.4.3 Zasięg przestrzenny wykorzystywanych w ramach projektu zobrażeń.	27
5.5 Metodyka analiz zobrażeń hiperspektralnych	29
5.5.1 Przetwarzanie zobrażeń hiperspektralnych za pomocą ENVI	30
5.5.2 Przetwarzanie obrazów hiperspektralnych za pomocą PCI Geomatics	36
<b>6. Założenia dotyczące przetwarzania danych teledetekcyjnych</b>	<b>40</b>
<b>7. Analiza charakterystyk spektralnych gruntu zanieczyszczonego siarką</b>	<b>42</b>
<b>8. Analizy krzywych spektralnych w kontekście wyboru przedziału/przedziałów spektralnych najkorzystniejszych dla monitoringu gleb zdegradowanych</b>	<b>49</b>
8.1 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni.	53
8.1.1 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni za pomocą PCI Geomatics.	53
8.1.2 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni za pomocą ENVI.	66
8.1.3 Wnioski z analizy danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni.	67
8.2 Analiza danych hiperspektralnych w podczerwieni średniej i termalnej.	68
<b>9. Optymalizacja metody przetwarzania obrazów hiperspektralnych w oparciu o naziemne pomiary spektrometryczne z uwzględnieniem problemu generalizacji występującej na obrazach o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej.</b>	<b>72</b>
9.1 Badanie efektywności wykorzystania pomiarów spektrometrycznych w celu kalibracji zobrażeń hiperspektralnych.	78
9.1.1 Analizy z wykorzystaniem procedur oprogramowania: ENVI	78
<b>10. Opracowania cyfrowej mapy zanieczyszczenia gruntów</b>	<b>86</b>
<b>11. Wnioski</b>	<b>91</b>
<b>12. Literatura</b>	<b>93</b>

---

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

---

# **1. Zawartość raportu merytorycznego**

---

Raport merytoryczny projektu stanowi niniejsze sprawozdanie w postaci papierowej i elektronicznej oraz prezentacje na CD traktowane jako załącznik, w którym znajdują się:

- Wersja elektroniczna sprawozdania
- Wyniki analiz naziemnych i laboratoryjnych pomiarów spektrometrycznych
- Referaty i publikacje:
  - "Hyperspectral remote sensing - a new tool in soil degradation monitoring ", Interdisciplinary International Journal Agribusiness landscape and environment management, Udine, Włochy, 2003
  - "Wstępne wyniki pomiarów spektrometrycznych i klasyfikacji obrazów hiperspektralnych rekultywowanego obszaru Tarnobrzeskiego Zagłębienia Siarkowego" Geoinformatica, Polonica, T.6, 2004
  - "Detection of soil contamination by sulphur using field and airborne hyperspectral data", 4th Workshop on Imaging Spectroscopy, Warsaw 2005, EARSeL, Warszawa. 26.04.2005
- Kolekcja zdjęć i filmów z prac terenowych w roku 2002 i wizji lokalnej w roku 2004.
- Mapy w wersji do druku:
  - Tarnobrzeskie zagłębienie siarkowe, układ 1992
    - Ortofotomapa satelitarna ASTER
    - Mapa użytkowania terenu
  - Pole testowe, kopalnia Jeziórko, przybliżone wpasowanie w układ 1992
    - Kompozycja barwna DAIS
    - Wynik klasyfikacji zobrazowania DAIS – stopień degradacji gruntów

## 2. Streszczenie

---

Celem niniejszego projektu KBN była analiza danych hiperspektralnych pozyskanych w ramach projektu UE<sup>1</sup>. Główny nacisk został położony na integrację naziemnych danych spektrometrycznych i obrazowań teledetekcyjnych. Szczególnie cenna była możliwość analizy danych w szerokim zakresie fali elektromagnetycznych: od przedziału widzialnego do podczerwieni termalnej. Było to możliwe dzięki wykorzystaniu dwóch spektrometrów: ASD i Micro Fourier Transform Interferometer. Obecnie w badaniach hiperspektralnych powszechnie wykorzystuje się zakres fal: 0.4  $\mu\text{m}$  -2.5  $\mu\text{m}$  i pomiar spektrometrem ASD. Zakres fal termalnych jest wykorzystywany w minimalny stopniu, a wspólnych analiz w zakresie: 0.4-14 $\mu\text{m}$  prawie nie ma.

W trakcie badań analizowano wyniki polowych i laboratoryjnych pomiarów spektrometrycznych w kontekście wyboru długości fal, potencjalnie odpowiednich dla detekcji zanieczyszczenia gruntów siarką. Następnie analizowano, dostępne w projekcie, dane satelitarne (ASTER) i lotnicze (DAIS) w aspekcie uśredniania odpowiedzi spektralnej do zakresów skanerów.

Analizę obrazowań hiperspektralnych przeprowadzono za pomocą oprogramowania ENVI i PCI. Przetwarzanie obrazów składało się z korekcji wstępnych, których celem było głównie usunięcie wpływu atmosfery oraz właściwego przetwarzania danych. Właściwe przetwarzanie danych przeprowadzono zarówno w oparciu o klasyczne metody teledetekcyjne (klasyfikacja nienadzorowana i nadzorowana) jak i specjalistyczne algorytmy wykorzystywane w analizie danych hiperspektralnych. Metodykę przetwarzania obrazowań hiperspektralnych testowano najpierw na obszarze

---

<sup>1</sup> HPRI-CT-1999-00075: „Hysens – DAIS/ROSIS Imaging Spectrometers at DLR”, podprojekt: HS2002-PL4, „Airborne spectrometry for abandoned mine site classification and environmental monitoring at the Machów sulphur mine district in Poland”

kalibracyjnym (Piaseczno, gdzie występuje niezanieczyszczony obszar piasku i wody), a następnie wykorzystywano ją na obszarze kopalni Jeziorko.

Streszczając wyniki badań można sformułować syntetycznie poniższe wnioski.

Przebieg krzywych spektralnych dla siarki i piasku w zakresie fal widzialnych i średniej podczerwieni jest jednorodny i nie występują w nim piki, których obecność jest warunkiem wykorzystania metodyki analiz hiperspektralnych opartych właśnie na analizie pików. Krzywe spektralne w zakresie termalnym znacznie się różnicują, występuje pik charakterystyczny dla krzemionki (8.7  $\mu\text{m}$ ) i piki siarki (11  $\mu\text{m}$ , 13  $\mu\text{m}$ ). Zanieczyszczenie gruntu siarką powoduje zmniejszanie piku od krzemionki, a zwiększanie się piku od siarki (13  $\mu\text{m}$ ).

Analiza obrazowań hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych wykazała niemożność wydzielenia gruntów zanieczyszczonych siarką za pomocą technik przetwarzania danych hiperspektralnych w oparciu o pomiary spektrometryczne. Wynika to prawdopodobnie z jednorodnego przebiegu krzywych spektralnych piasku, siarki i ogólnie gruntów zanieczyszczonych siarką.

Zakres fal termalnych wydaje się bardzo obiecujący z powodu występujących pików, zarówno w krzywej dla piasku jak i dla siarki. Jednakże w tym przypadku z kolei występuje znaczne uśrednienie odpowiedzi spektralnej w przypadku testowanego skanera DAIS i w związku z tym zawodzą algorytmy dające dobre efekty w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni. W związku z tym zaistniała potrzeba zaproponowania własnego sposobu przetworzenia, opartego o precyzyjnie wybrany kanał spektralny, w którym jest możliwość analizy zmiany głębokości piku od krzemionki dla gruntów w różnym stopniu zdegradowanych poprzez zanieczyszczenie siarką.

### 3. Wstęp

---

Zdalna rejestracja powierzchni Ziemi staje się coraz bardziej atrakcyjna ze względu na zwiększającą się rozdzielczość przestrzenną, spektralną, radiometryczną i temporalną. Wysokorozdzielcze, w sensie spektralnym, dane teledetekcyjne, nazywane hiperspektralnymi mogą być pozyskiwane za pomocą obrazujących i nieobrazujących spektrometrów. Spektrometry nieobrazujące (do badań zarówno polowych, jak i laboratoryjnych) produkowane przez różne firmy, najbardziej znane: Analytical Spectral Devices Inc. (ASD) i Geophysical & Environmental Research Corp. (GER), pozwalają na pomiar punktowy. Wyniki pomiarów mogą być prezentowane jako wykres zależności współczynnika odbicia lub emisyjności od długości fali. Zakres spektralny jest bardzo gęsto próbkowany z rozdzielczością 0.01-0.001 $\mu\text{m}$ . Jednokrotny pomiar zawiera więc od kilkuset do kilku tysięcy wartości. Drugą grupą są spektrometry obrazujące, w tym najbardziej znany amerykański spektrometr: 224 kanałowy AVIRIS - *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* pracujący w kanałach: widzialnym, bliskiej i średniej podczerwieni (VNIR – *Visible and Near Infrared*, SWIR *Short Wave Infrared*). Przykładem europejskiego obrazującego spektrometru hiperspektralnego jest DAIS *Digital Airborne Imaging Spectrometer 7915*, 79 kanałowy spektrometr lotniczy pracujący w zakresie: 0.4 -13  $\mu\text{m}$  (VNIR, SWIR i TIR - *Thermal Infrared*).

Spektralna rozdzielczość spektrometrów obrazujących jest kilkakrotnie mniejsza od rozdzielczości spektrometrów nieobrazujących.

Celem przeprowadzonych w ramach projektu badań było zbadanie potencjału informacyjnego danych hiperspektralnych oraz przetestowanie techniki ich przetwarzania. Badalnym obiektem był wybrany obszar testowy na terenie byłej kopalni siarki w Jeziórku.

## 4. Opis obszaru badań

---

Kopalnia Siarki „Jeziórko” położona w widłach Wisły i Sanu, administracyjnie należy do powiatu tarnobrzeskiego, głównie na terenie gminy Grębów. Pola górnicze przylegają z obu stron do drogi wojewódzkiej 871 relacji Tarnobrzeg – Stalowa Wola. Był to drugi zakład górniczy w Polsce wydobywający siarkę metodą podziemnego wytapiania nazywaną też metodą otworową. W okresie eksploatacji, od lipca 1967 do sierpnia 2001 roku, wydobyto ponad 74 mln Mg siarki. Dla uzyskania tej ilości siarki wtłoczono do złoża prawie 830 mln m<sup>3</sup> wód technologicznych o temperaturze około 160° C, włączono do eksploatacji 6048 otworów wydobywczych.

Dla potrzeb Kopalni wyłączono z pierwotnego użytkowania 2209,4 ha, z czego około 70 % zajętej powierzchni stanowiły użytki rolne, około 28 % obszary leśne i około 2 % tereny zabudowy mieszkalnej (likwidacja wsi Jeziórko). Większość gleb tego rejonu cechowała się niską żyznością wynikającą z zalegania na powierzchni czwartorzędowych piasków. Jedynie część trwałych użytków zielonych (szczególnie łąk) zaliczona była do średnich klas bonitacyjnych. W użytkach leśnych dominowały siedliska boru suchego z sosną jako gatunkiem dominującym.

Prowadzona eksploatacja spowodowała drastyczne przekształcenia wywołane nakładaniem się szeregu negatywnych czynników towarzyszących tej technologii. Do podstawowych przekształceń zaliczono:

- przekształcenia chemiczne wywołane przedostawaniem się siarki i silnie zmineralizowanych wód złożowych do gleb i wód powierzchniowych. W wyniku tlenowych przemian mikrobiologicznych z siarki i jej związków powstawał kwas siarkowy prowadzący do ujawnienia się ekstremalnie kwaśnego odczynu gleb. Ponadto kwas ten przyspieszał mineralizację związków organicznych niszcząc często cały poziom próchniczny (poziom A),
- przekształcenia geomechaniczne spowodowane osiadaniem powierzchni w wyniku zaciskania się pustek poeksploatacyjnych w górotworze a także wszelkimi pracami ziemnymi związanymi z technicznym uzbrojeniem pól górniczych. Dodatkowe



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrażeń lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

mechaniczne zniszczenie wierzchnich warstw glebowych następowało w etapie likwidacji kopalni a także w etapie porządkowania powierzchni dla potrzeb rekultywacji (zbieranie siarki z powierzchni, ukształtowanie zbiorników wodnych i sieci rowów melioracyjnych),

- przekształcenia hydrologiczne powstały w wyniku osiadań powierzchni i płytkiego zalegania zwierciadła wód gruntowych (swobodny czwartorzędowy poziom wodonośny). Łączna kubatura wytworzonych niecek poeksploatacyjnych wyniosła około 25 mln m<sup>3</sup>, przy osiadaniach maksymalnych dochodzących do około 6,5 metra, a osiadaniach średnich około 1,6 metra.

Łączne oddziaływanie wymienionych przekształceń spowodowały całkowite zniszczenie pokrywy glebowej w strefach najsilniejszych zmian a także możliwość ujawnienia się licznych zalewisk wodogruntowych w miejscach największych osiadań. Dla umożliwienia dostępu do otworów eksploatacyjnych od początku eksploatacji do chwili obecnej prowadzone jest sztuczne odwodnienie powierzchni, skutkujące obniżeniem zwierciadła wody o 2 do 4 metrów. Sztuczne obniżenie zalegania zwierciadła wód czwartorzędowych zmniejsza możliwość powstania rozległych zalewisk i ułatwia realizację prac likwidacyjno-porządkowych. Stan ten musi być utrzymany do zakończenia prac rekultywacyjnych a także do czasu podniesienia wymienionej drogi wojewódzkiej na odcinku około 2,5 km.

Dobre rozpoznanie skutków eksploatacji otworowej na powierzchnię pozwoliło na opracowanie docelowej prognozy zmian stanowiącej podstawę dla wyboru kierunków zagospodarowania terenów poeksploatacyjnych i opracowanie metod rekultywacyjnych. Skomplikowana sytuacja przestrzenna, duża zmienność poszczególnych czynników destruktywnych wpłynęła na wyznaczenie wielokierunkowego sposobu zagospodarowania dla terenów objętych rekultywacją. W celu uporządkowania stosunków wodnych, w obrębie pól górniczych zaprojektowano utworzenie 13 zbiorników wodnych o łącznej powierzchni lustra wody około 250 ha. Zbiorniki te mają za zadanie gromadzić wody z otaczających terenów z odprowadzeniem ich nadmiaru do cieku powierzchniowego. Dla zabezpieczenia przed wtórnym zanieczyszczeniem wód czasza każdego zbiornika została zaizolowana wapnem poflotacyjnym. Na terenach o leśnym czy rolnym kierunku zagospodarowania podstawowe czynności rekultywacyjne obejmowały:

zebranie i usunięcie większych skupisk siarki, uporządkowanie rzeźby terenu, wykonanie neutralizacji w dawkach od 50 do 500 Mg/ha lub blokady wapniowej warstwą o grubości od 1 do 10 cm, nawożenie podstawowe przefermentowanymi osadami z oczyszczalni komunalnych w dawce 200 Mg/ha suchej masy, siew roślinności testowej dla skontrolowania skuteczności neutralizacji, nasadzenia drzew i krzewów lub siew roślinności uprawowej, zabiegi pielęgnacyjne.

Wg danych na 30.07.2004 roku z 2209 ha terenów pogórnicznych:

- prace rekultywacyjne zakończono na 908 ha,
- prace rekultywacyjne realizowane są na 611 ha,
- oczekuje na rekultywację 690 ha.

Wg opracowanego harmonogramu prac naprawczych zakończenie prac likwidacyjnych i wykonanie wszystkich prac rekultywacyjnych przewidziane jest do 2010 roku.

Zrealizowanie zamierzeń rekultywacyjnych powinno pozwolić (na podstawie dotychczasowej oceny) na utworzenie wartościowego kompleksu leśnego z licznymi, zbiornikami wodnymi. Już aktualnie utworzone zbiorniki stanowią miejsca pobytowe licznych gatunków ptactwa wodnego wraz z gniazdowaniem gatunków prawnie chronionych. W przyszłości zbiorniki te mogą zostać objęte ochroną rezerwatową. Bezkonfliktowe przejmowanie terenów zalesionych przez Administrację Lasów Państwowych potwierdza skuteczność zaprojektowanych i wykonanych prac rekultywacyjnych. Jedynym czynnikiem opóźniającym czas zakończenia rekultywacji jest ograniczana systematycznie dotacja budżetowa

### **Przedmiot badań**

W obrębie pól eksploatacyjnych dochodziło do całkowitej degradacji górnych poziomów glebowych. Silne zanieczyszczenia siarkowe, toksyczny odczyn utworów, mechaniczne i chemiczne zniszczenie poziomu próchnicznego doprowadziło do powstania nowego układu.

Warstwy powierzchniowe zatraciły cechy posiadane przez gleby, których główna funkcja polega na możliwości utrzymania i odtworzenia się roślinności. Na znaczącej części terenów uszkodzonych brak było objawów roślinności z sukcesji naturalnej ze względu na fitotoksycznie kwaśny odczyn, ale także ze względu na brak wystarczającej ilości składników pokarmowych. Zniszczenie warstw próchnicznych pozwala nazwać warstwy powierzchniowe utworami bezglebowymi, do których zalicza się utwory o zawartości materii organicznej mniejszej niż 10 Mg/ha. Tak więc na terenach silnie uszkodzonych nie można mówić o glebach lecz o terenach bezglebowych. Znikoma, a często zerowa aktywność mikrobiologiczna skłania do nazywania warstw powierzchniowych gruntami, a więc utworami „martwymi”. Oczywiście jest, że przy mniejszym stopniu uszkodzenia zachowały się w warstwach powierzchniowych cechy „gleb” tam gdzie pomimo degradacji wkracza roślinność. Są to z pewnością gleby ubogie (o niskiej zawartości próchnicy- do 50 Mg/ha) mogące utrzymać przy życiu wyłącznie gatunki o niskich wymaganiach. Gatunkiem takim jest przede wszystkim trzcinnik piaskowy.

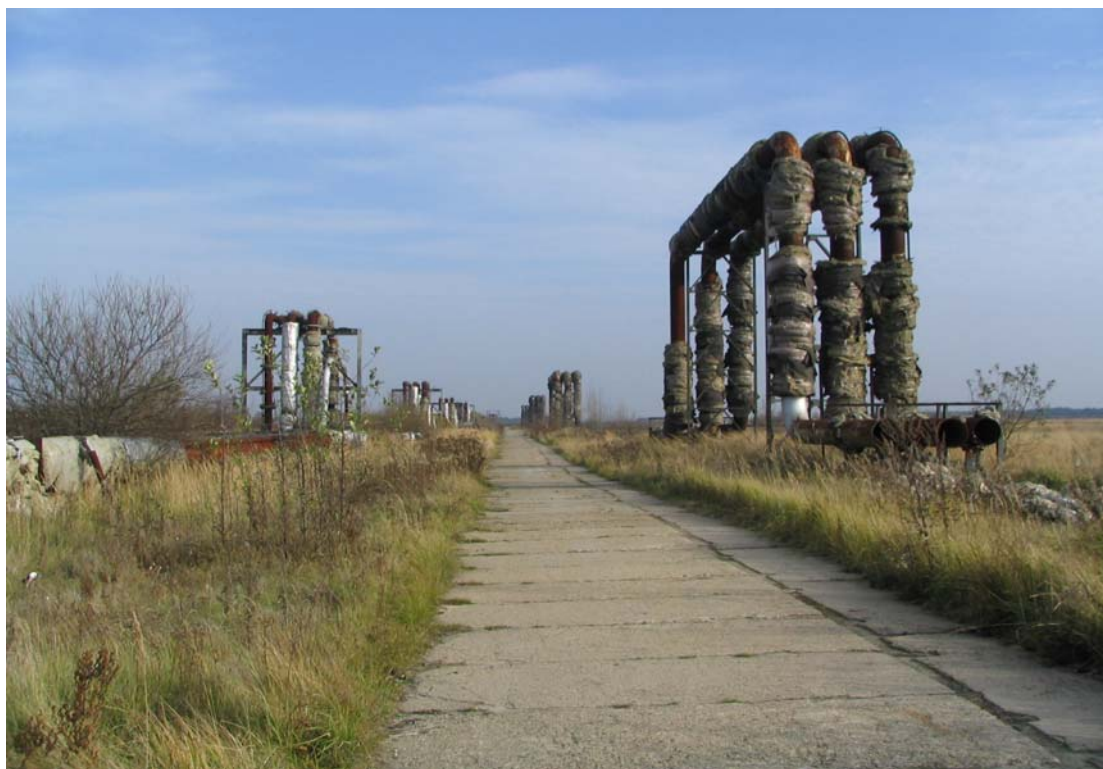
Warunkiem odtworzenia zdolności produkcyjnych tych utworów jest wykonanie szeregu czynności naprawczych jak neutralizacja czy wysokie podstawowe nawożenie. Zainicjowanie życia mikrobiologicznego a także wprowadzenie roślinności rozpoczyna nowe procesy glebotwórcze przesuując grunty do gleb początkowego stadium rozwoju

Wizualizacja obszaru testowego, obejmującego fragment Tarnobrzesckiego Zagłębia Siarkowego znajduje się poniżej (Rys. 1). W obszarze tym zaznaczono w prawym górnym rogu pole testowe. Z lewej strony rysunku znajduje się obszar dawnej kopalni w Piasecznie z dwoma charakterystycznymi obiektami: zbiornikiem i dużym obszarem piaszczystym (pozostałość po wyrobisku), które posłużyły jako obiekty kalibracyjne w trakcie przetwarzania danych teledetekcyjnych. Na zdjęciach poniższych zamieszczono widok ogólny z terenu kopalni Jeziorko (Rys. 2) i przykładową ilustrację gruntów zdegradowanych (Rys. 3).

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 1. Centralna część Tarnobrzeckiego Zagłębia Siarkowego – kompozycja barwna z kanałów 3,2,1 satelity Aster; w prawym górnym narożniku – jedyne nie zachmurzone na DAIS pole testowe.



Rys. 2. Widok ogólny w obszarze testowym kopalni Jeziórko, zaznaczonym w prawym narożniku na Rys. 1

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 3. Przykładowa ilustracja gruntu zanieczyszczonego siarką na obszarze kopalni Jeziórko

## 5. Metodyka

---

Głównym celem prac badawczych prowadzonych w ramach projektu była analiza możliwości wykorzystania naziemnych pomiarów spektrometrycznych w przetwarzaniu obrazów hiperspektralnych dla potrzeb detekcji stopnia degradacji gruntów na rekultywowanym obszarze zagłębia siarkowego Machów/Jeziórko. W ramach projektu UE<sup>2</sup> zostały zarejestrowane obrazy hiperspektralne za pomocą skanera DAIS [<http://www.op.dlr.de/dais/dais-wtb.htm>] oraz wykonano terenowe pomiary spektrometryczne.

W ramach niniejszego projektu KBN:

- przeprowadzono laboratoryjne pomiary spektrometryczne pobranych podczas eksperymentu prób gruntowych
- opracowano wyniki pomiarów spektrometrycznych
- przetworzono lotnicze i satelitarne<sup>3</sup> obrazowania hiperspektralne wykorzystując wyniki pomiarów spektrometrycznych oraz różną metodykę analiz.

### 5.1 Analiza promieniowania elektromagnetycznego w aspekcie przetwarzania obrazowań hiperspektralnych

Przetwarzanie obrazowań hiperspektralnych wymaga uwzględnienia interakcji promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią Ziemi i atmosferą. Źródłem promieniowania EM<sup>4</sup> jest ruch kinetyczny cząstek. Wszystkie cząstki w temperaturze powyżej zera Kelvin'a drgają, co powoduje emisję promieniowania EM.

---

<sup>2</sup>HPRI-CT-1999-00075: „Hysens – DAIS/ROSIS Imaging Spectrometers at DLR”, podprojekt: HS2002-PL4, „Airborne spectrometry for abandoned mine site classification and environmental monitoring at the Machów sulphur mine district in Poland”

<sup>3</sup> Obrazowanie satelitarne ASTER pozyskano gratis z serwera JPL, (Jet Propulsion Laboratory-California Institute of Technology) [<http://asterweb.jpl.nasa.gov>].

<sup>4</sup> EM – promieniowanie elektromagnetyczne

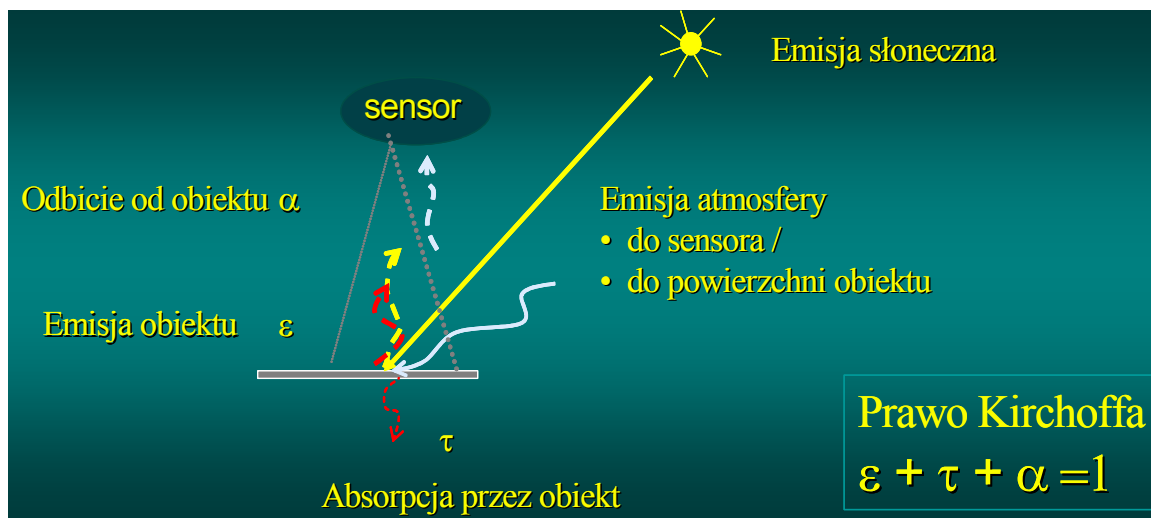
Padająca na powierzchnię Ziemi energia elektromagnetyczna składa się z przepuszczonego przez atmosferę promieniowania Słońca oraz promieniowania atmosfery. Na powierzchni obiektu energia ta może zostać odbita, zaabsorbowana lub/i transmitowana, przy czym procentowy ich udział zależy od współczynników: odbicia, absorpcji, transmisji. Współczynnik odbicia równa się ilorazowi promieniowania odbitego do padającego. Wartości tego współczynnika wynoszą od 0 do 1 lub od 0 do 100%. Definicja pozostałych współczynników jest analogiczna. Promieniowanie rejestrowane przez sensor zależy od energii opuszczającej powierzchnię ciała na Ziemi, czyli od współczynników odbicia i emisyjności, a także od tłumienia atmosfery.

Moc promieniowania elektromagnetycznego, zgodnie z prawem przesunięć Wien'a jest zależna od długości fali i od temperatury ciała. Zgodnie z tym prawem maksimum mocy promieniowania elektromagnetycznego przesuwa się w kierunku fal krótszych. Ma to zasadnicze znaczenie przy analizie danych teledetekcyjnych. W przypadku fal krótkich VNIR i częściowo SWIR (0.3-2.5 $\mu\text{m}$ ) główny udział ma promieniowanie Słoneczne, w przypadku dalszego zakresu SWIR i TIR (2-14  $\mu\text{m}$ ) udział w promieniowaniu EM rejestrowanym przez sensor zaczyna mieć powierzchnia Ziemi.

Oznacza to, że analiza danych teledetekcyjnych zależy od zakresu długości fali. Różne podejście do danych zarejestrowanych w zakresie odbijanego i emitowanego zakresu fal EM występuje zarówno w przypadku klasycznych obrazowań wielospektralnych LANDSAT, jak i obrazowań hiperspektralnych. Jednakże w przypadku LANDSAT'a tylko kanał 6 (termalny) wymaga podczas analiz innego traktowania.

Ogólnie można powiedzieć, że kanały widzialne i bliska podczerwień są przetwarzane klasycznie, i takie obrazowanie jest traktowane jako reprezentacja rozkładu współczynnika odbicia. Kanały w zakresie SWIR i TIR muszą być traktowane odmiennie, ponieważ reprezentują rozkład promieniowania emitowanego z powierzchni Ziemi. Zarejestrowane zatem przez sensor promieniowanie zależy, w tym zakresie fal od temperatury ciała i od ich współczynników emisyjności.

Przetwarzanie danych hiperspektralnych, w większości przypadków polega na analizie zależności współczynnika odbicia/emisyjności od długości fali. Oznacza to, że konieczne jest wstępne przetworzenie danych hiperspektralnych do wartości współczynnika odbicia/emisyjności.



Rys. 4. Interakcja promieniowania elektromagnetycznego z powierzchnią Ziemi.

## 5.2 Pomiar spektrometryczny

W ramach projektu UE wykonano pomiary *in-situ* promieniowania EM w zakresie VNIR, SWIR i TIR. Pomiary w zakresie VNIR i SWIR ( $0.3-2.5 \mu\text{m}$ ) przeprowadzono za pomocą spektrometru ASD dzięki uprzejmości Technicznego Uniwersytetu w Clausthal w Niemczech (Rys. 5). Pomiary spektrometryczne w zakresie SWIR i TIR ( $2-14 \mu\text{m}$ ) wykonano za pomocą własnego spektrometru firmy Design&Prototype (Rys. 6). Oprócz tego wykonano w laboratorium pomiary sztucznie preparowanych mieszanek piasku i siarki, oraz prób pobranych w trakcie kampanii lotniczej.

Szczegółowa metodyka pomiaru spektrometrycznego znajduje się następujących publikacjach: [Hook S.J. Kahle A.B, 1996, Korb. A.R. i in. 1996, Hejmanowska B. 2000, 2002]



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 5. Spektrometr: ASD pracujący w zakresie VNIR [<http://www.asdi.com/products-spectroradiometers.asp>]

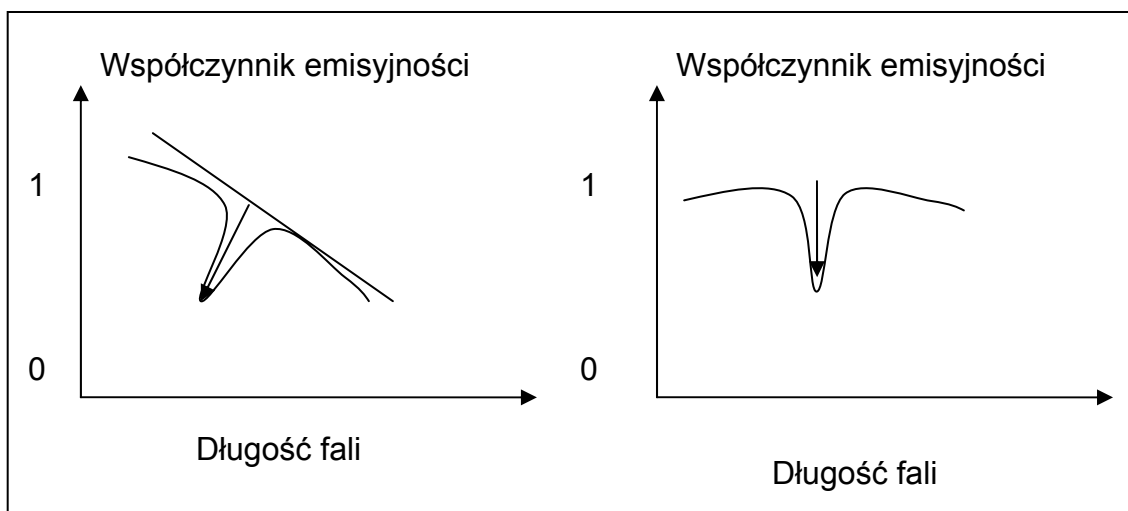


Rys. 6. Spektrometr : Micro Fourier Transform Interferometer firmy Design&Prototypes pracujący w zakresie TIR

W wyniku pomiaru spektrometrycznego uzyskuje się zależność surowego współczynnika odbicia lub emisyjności od długości fali. Wartości bezwzględne współczynnika odbicia/emisyjności powinny mieścić się w zakresie od zera do jeden. Otrzymane w wyniku pomiaru spektrometrycznego wartości bezwzględne współczynnika odbicia lub emisyjności mogą znajdować się poza tym zakresem. Do kalibracji surowych wartości współczynników emisyjność do wartości bezwzględnych współczynnika emisyjności, czyli do wartości od 0 do 1 pomocna może być informacja o maksymalnym

współczynnika emisyjności. Jeżeli przyjąć, że maksymalna wartość współczynnika emisyjności nie może przekroczyć 1 krzywe emisyjności zostają odpowiednio przesunięte po osi rzędnych. Trudności w określaniu bezwzględnych wartości współczynników obicia/emisyjności są powodem, że analizując krzywe spektralne najczęściej analizuje się nie wartości bezwzględne, a głębokości pików.

Problemem przy interpretacji krzywych spektralnych, oprócz wyżej wymienionego jest również ogólny przebieg krzywej. Czasami z pomiaru spektrometrycznego można uzyskać przebieg krzywej spektralnej z tendencją do zapadania lub wznoszenia się wraz z długością fali. Problem ten można rozwiązać stosując transformację krzywej spektralnej do tzw. kontinuum (Rys. 7). Transformacja do kontinuum pozwala na ujednoczenie, pozyskanych w różny sposób krzywych spektralnych, a przez to umożliwia ich porównanie poprzez porównanie głębokości pików.



Rys. 7. Tworzenie kontinuum ( z lewej - surowy współczynnik emisyjności, z prawej – kontinuum)

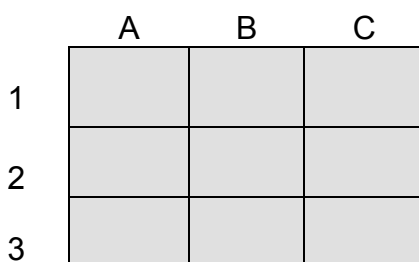
### 5.3 Opis przedmiotu badań spektrometrycznych

Pomiary spektrometryczne przeprowadzono bezpośrednio w terenie równocześnie z kampanią lotniczą. Ponadto wykonano także laboratoryjne pomiary spektrometryczne sztucznie preparowanych mieszanek piasku i siarki oraz pobranych podczas pomiarów terenowych prób laboratoryjnych gruntu z pól testowych.

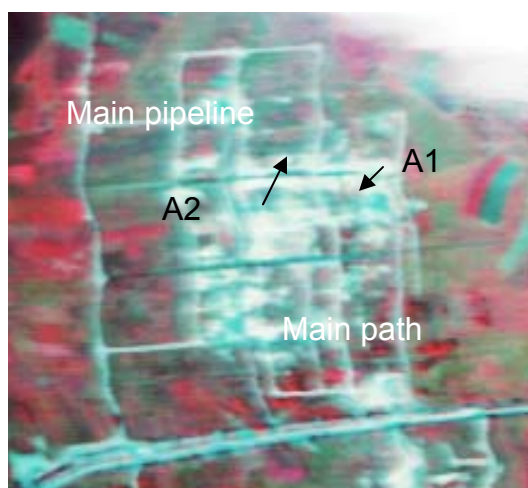
### 5.3.1 Pomiar terenowy

Elementarne pola testowe (3mx3m) były zaznaczane w terenie dziewięcioma kwadratami 1mx1m (Rys. 8). Przyjęto taki układ pola testowego z uwagi na zaplanowaną rejestrację skanerami ROSIS (o rozdzielczości przestrzennej 1m) i DAIS (3m). Niestety z uwagi na złą pogodę nie udało się rejestracja skanerem ROSIS.

Bezpośrednio w terenie wykonywano pomiary spektrometryczne na obszarze 4 pól testowych, z których tylko jedno na obrazowaniu DAIS nie jest pokryte chmurami (Rys. 9, Rys. 10). Na Rys. 9 zaznaczono na kompozycji w barwach umownych (FFC)<sup>5</sup> DAIS pola testowe A1 i A2. Położenie pola testowego na obszarze kopalni Jeziórko można zobaczyć na Rys. 1 na kompozycji FCC ASTER. Na Rys. 10 znajduje się szkic pomiarowy pola A1 i A2.



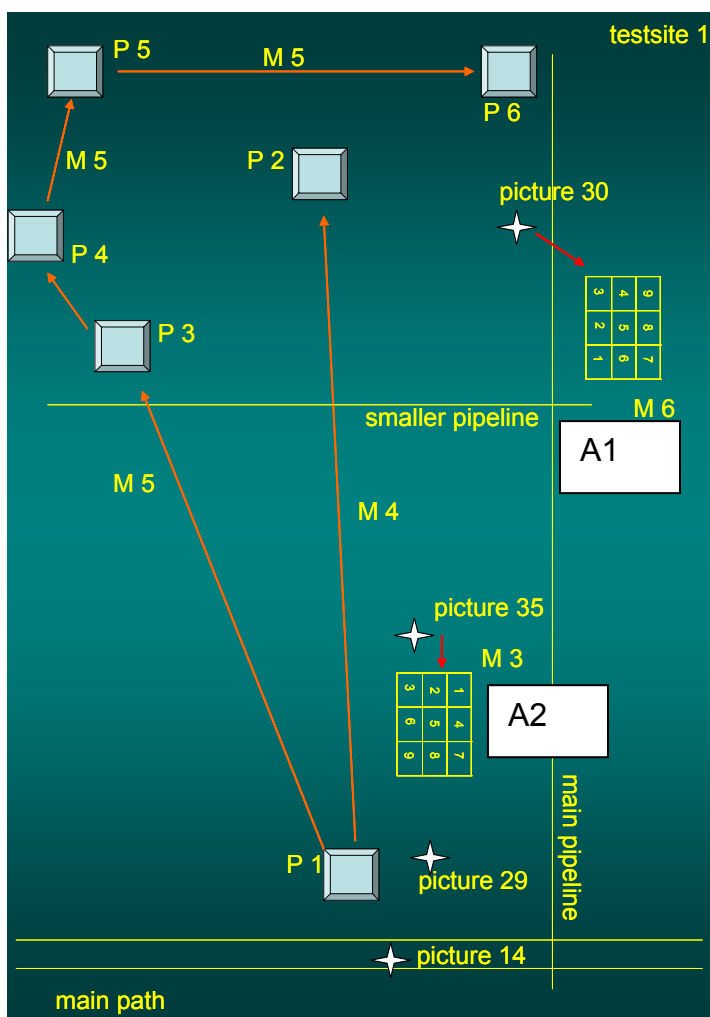
Rys. 8. Schemat elementarnego pola testowego, boki pojedynczego kwadratu 1x1m, całość pola 3mx3m



Rys. 9. Pole testowe, fragment kopalni Jeziórko (por. Rys. 1), FCC DAIS

<sup>5</sup> FFC – False Color Composit – kompozycja w barwach umownych, kanał zielony przedstawiony kolorem niebieskim, kanał czerwony kolorem zielonym i kanał podczerwony kolorem czerwonym

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 10. Szkic pola testowe nr 1 (obrócony o 90° zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara w stosunku do Rys. 9), [Fischer C, 2002]

### 5.3.2 Pomiar laboratoryjny

Pomiar laboratoryjny dotyczył wzorców, czyli sztucznie preparowanych mieszanek piasku i siarki, oraz prób pobranych w terenie z pól elementarnych.

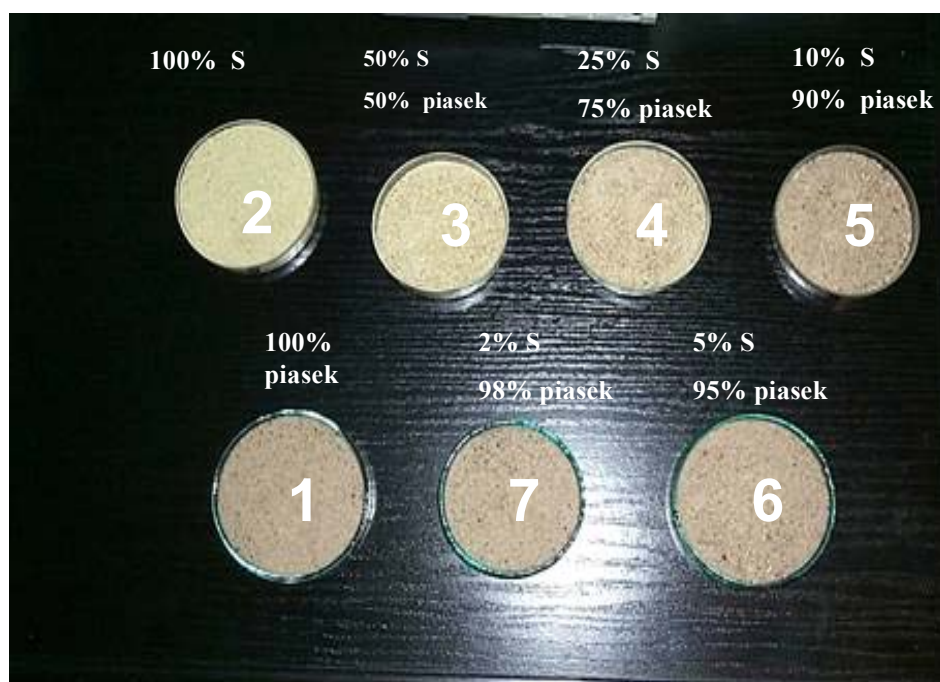
#### Wzorce

Celem pomiarów spektrometrycznych było zbadanie wpływu zanieczyszczenia gruntu siarką na jego odpowiedź spektralną. W celu wyznaczenia wzorcowych charakterystyk spektralnych przygotowanych zostało 7 wzorców Rys. 11 o następującym składzie:

- Próbka 1 - 0% siarki 100% piasku

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

- Próbka 2 - **100 % siarki** 0% piasku
- Próbka 3 - **50 % siarki** 50% piasku
- Próbka 4 - **25% siarki** 75% piasku
- Próbka 5 - **10 % siarki** 90% piasku
- Próbka 6 - **5 % siarki** 95% piasku
- Próbka 7 - **2% siarki** 98% piasku



Rys. 11. Sztucznie preparowane mieszanki piasku i siarki

Wszystkie mieszanki zostały pomierzone w warunkach laboratoryjnych, w dwóch przedziałach spektralnych 0,4 – 2,5  $\mu\text{m}$  (VNIR) oraz 2-14  $\mu\text{m}$  (SWIR i TIR).

### Próby laboratoryjne

Z pól elementarnych pobierano w terenie próby gruntu, które w późniejszym czasie zostały mierzone w laboratorium za pomocą spektrometru w zakresie TIR.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 12. Elementarne pole testowe (9 kwadratów – z lewej), powiększenie pojedynczego kwadratu (z prawej u góry), próba laboratoryjna (z prawej u dołu).

Ogółem pobrano 26 prób gruntu. Wyniki oznaczenia procentowej zawartości części ziemnych, grupa mechaniczna zawartość siarki i kolor gleby znajdują się w tabeli

#### Wyniki oznaczeń laboratoryjnych prób gruntu.

Nr prób laborat.	Nr prób laborat.	% zawartość części ziemnych						Grupa mech.	S [%]	Kolor gleby
		1.0-0.1	0.1-0.05	0.02-0.006	0.006-0.002	0.006-0.002	<0.002			
A1 3A	1	82		17			1	pl	25.58	seledyn
A1 1B	2	83	9	4	3	0	1	pl	26.43	beż
A2 3A	3	73		26			1	plp	46.08	seledyn
A2 1B	4	85	4	1	4	2	4	psg	10.59	brąz
A3 1B	5	71	10	8	5	3	3	pgl	32.8	ciemny seledyn
A3 3A	6	76		23			1	pl	0.93	jasny beż
B1 3A	7	65		11			24	gl	40.96	seledyn
B1 1B	8	79	8	5	4	3	1	psg	14.4	seledyn
B2 3A	9							pl	68.48	seledyn
B2 1B	10	84	4	1	3	4	4	pgl	20.61	brąz
B3 3A	11	67		32			1	plp	8.45	beż
B3 1B	12	70	12	11	2	3	2	psg	44.8	żółty

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrażeń lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

C1	3A	13	91		7			2	pl	19.84	jasny beż
C1	1B	14	73	12	6	3	2	4	psg	8.32	ciemny beż
C2	1B	15	88	4	1	0	3	4	psg	13.57	ciemny beż
C2	3A	16	92		7			1	pl	0.16	ciemny beż
C3	3A	17	65		32			3	plp	1.98	ciemny beż
C3	1B	18	77	8	8	1	2	4	psg	28.8	żółto-beżowy
Iron + S	4	19				skała				0.26	popielaty
1/A-1		20	91	3	0	0	3	3	psg	14.4	beż
M1 pias 3B		21	83	9	4	0	2	2	pl	0.06	ciemny beż
M3 3B		22	51	16	15	12	3	3	pgmp	0.1	brązowo-żółty
M23 3B		23	81	6	4	1	6	2	psg	0.03	jasny brąz
P1 9	Pole	24	83	6	4	5	2	0	psg	3.97	ciemny beż
W1 9	Pole	25	33	8	13	43	2	1	pś	2.88	popiel-zielony
wszyst. Pola		26	92	3	0	1	3	1	pl	12.22	beż

## 5.4 Zobrażenia teledetekcyjne

W trakcie analiz danych teledetekcyjnych wykorzystywano następujące zobrażenia:

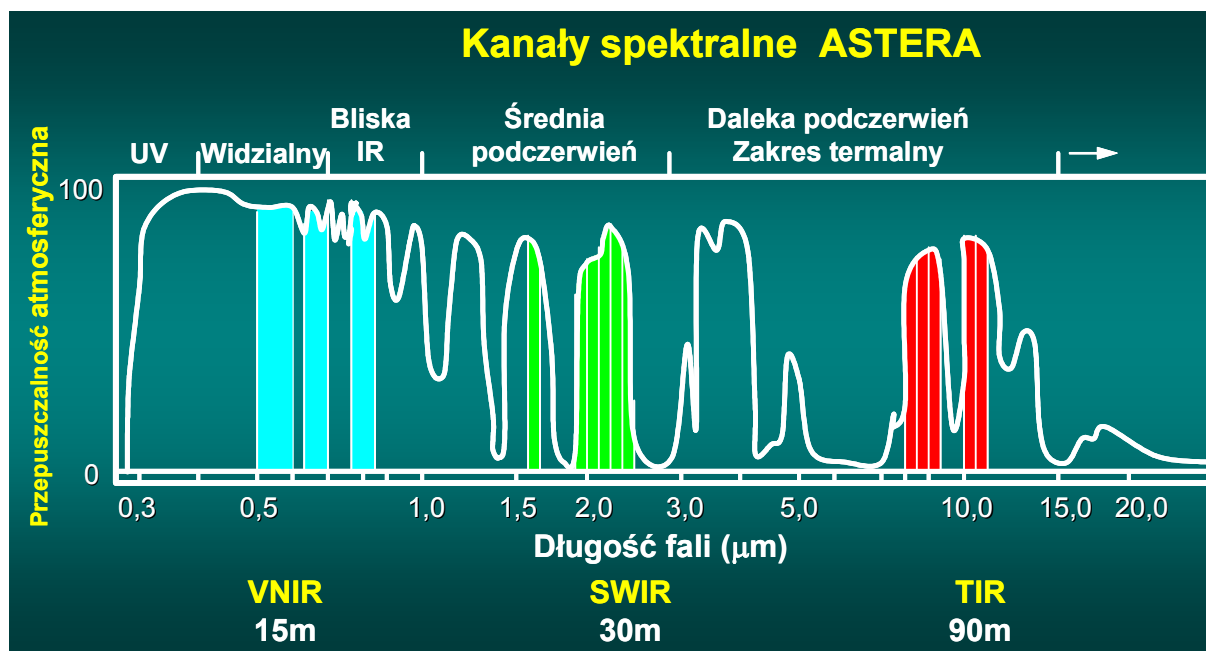
- ASTER
- DAIS

Do przetwarzania danych wykorzystano dwa systemy: ENVI Research System Inc. i PCI Geomatics.

### 5.4.1 Charakterystyka zobrażenia ASTER

ASTER dostarcza zobrażeń 14 kanałowych o zmiennej rozdzielczości przestrzennej od 15 do 90 m (Rys. 13).

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 13. Kanały spektralne ASTER

#### 5.4.2 Charakterystyka obrazowania DAIS

DAIS dostarcza obrazowań w zakresie długości fal: 400nm - 12.6µm, za pomocą rejestracji przez 4 spektrometrów, rejestrujących promieniowanie w 79 kanałach. Charakterystyka spektrometrów jest następująca:

1. 400 - 1000 nm : 32 kanały, szerokość kanału = 15-30 nm, detektor: Si
2. 1500 - 1800 nm : 8 kanały, szerokość kanału = 45 nm, detektor: InSb
3. 2000 - 2500 nm : 32 kanały, szerokość kanału = 20 nm, detektor: InSb
4. 3000 - 5000 nm : 1 kanał, szerokość kanału = 2.0 µm, detektor: InSb
5. 8000 -12600 nm : 6 kanałów, szerokość kanału = 0.9 µm, detektor: MCT

Szczegółowe zakresy fala dla poszczególnych kanałów i spektrometrów znajdują się w poniższych tabelach.

#### Spektrometr I, VIS-NIR

Kanał	Średnia długość fali	Zakres
1	0.502	0.023
2	0.517	0.021
3	0.535	0.020
4	0.554	0.018
5	0.571	0.022



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrażeń lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

6	0.589	0.020
7	0.607	0.020
8	0.625	0.022
9	0.641	0.022
10	0.659	0.024
11	0.678	0.025
12	0.695	0.025
13	0.711	0.028
14	0.729	0.027
15	0.747	0.028
16	0.766	0.029
17	0.783	0.029
18	0.802	0.027
19	0.819	0.030
20	0.837	0.027
21	0.854	0.028
22	0.873	0.028
23	0.890	0.027
24	0.906	0.031
25	0.923	0.028
26	0.939	0.030
27	0.955	0.028
28	0.972	0.028
29	0.990	0.038
30	1.005	0.038
31	1.020	0.036
32	1.033	0.032

#### **Spektrometr II, SWIR-1**

Kanał	Średnia długość fali	Zakres
33	1.542	0.040
34	1.573	0.046
35	1.606	0.046
36	1.639	0.048
37	1.671	0.048

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrażeń lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

38	1.700	0.046
39	1.729	0.044
40	1.755	0.038

### Spektrometr III, SWIR-2

Kanał	Średnia długość fali	Zakres
41	1.948	0.042
42	1.964	0.044
43	1.980	0.046
44	1.995	0.050
45	2.010	0.056
46	2.025	0.058
47	2.042	0.060
48	2.059	0.058
49	2.075	0.056
50	2.092	0.052
51	2.107	0.052
52	2.122	0.048
53	2.137	0.046
54	2.151	0.044
55	2.166	0.040
56	2.179	0.036
57	2.193	0.032
58	2.207	0.030
59	2.224	0.026
60	2.236	0.024
61	2.252	0.022
62	2.264	0.020
63	2.279	0.018
64	2.291	0.016
65	2.304	0.016
66	2.317	0.016
67	2.331	0.016
68	2.343	0.014

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

69	2.357	0.016
70	2.369	0.016
71	2.384	0.016
72	2.395	0.016

#### Spektrometr IV, TIR

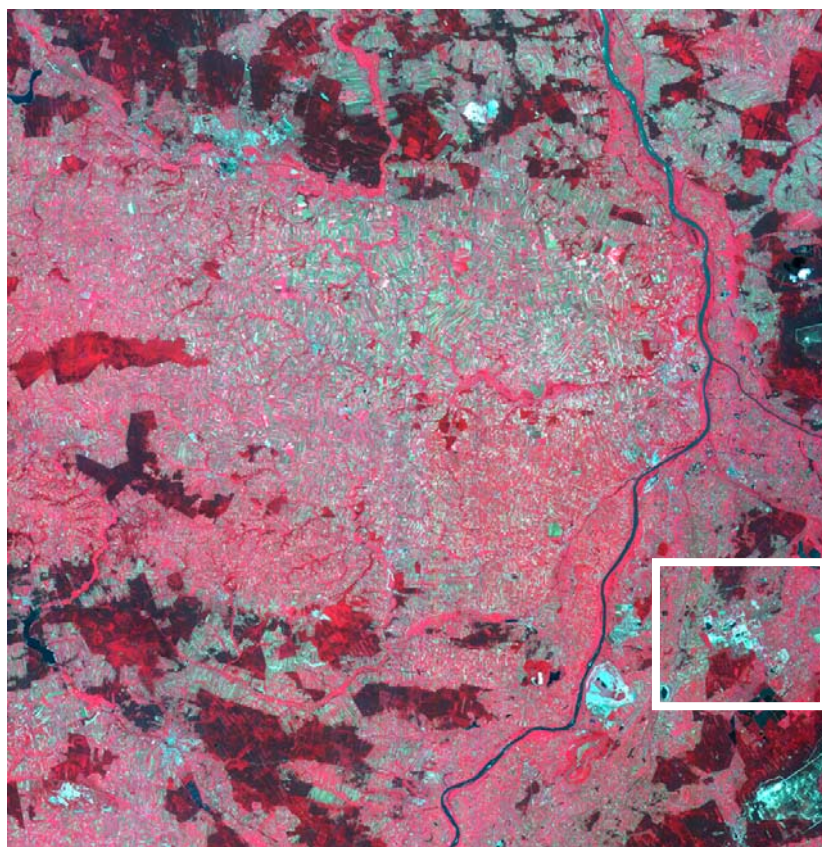
Kanał	Średnia długość fali	Zakres
73	4.299	2.160
74	8.522	1.080
75	9.463	1.065
76	10.252	1.285
77	10.941	1.540
78	11.636	1.820
79	12.278	1.900

W celu przetestowania procedur kalibracji i transformacji obrazowań hiperspektralnych wybrano obszar testowy w okolicy kopani Piaseczno przyjmując dwa obiekty wzorcowe wodę i piasek (Rys. 1).

#### 5.4.3 Zasięg przestrzenny wykorzystywanych w ramach projektu obrazowań.

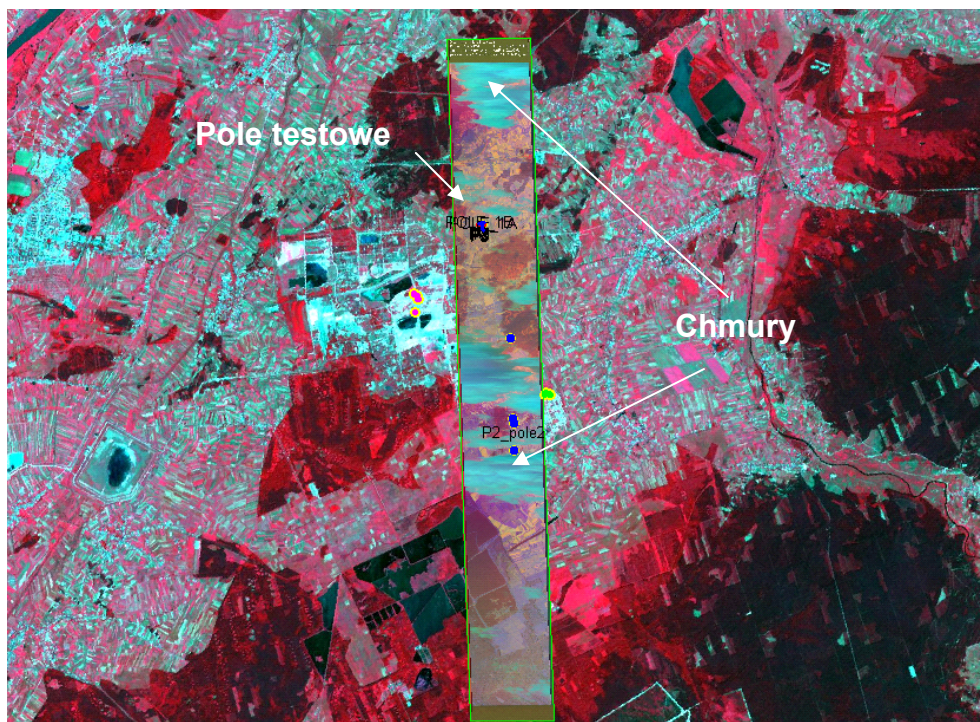
W ramach projektu KBN analizowano obrazowania ASTER (pozyskane w ramach prac własnych) i DAIS (pozyskane w ramach projektu UE). Planowana w ramach projektu UE rejestracja ROSIS nie była możliwa z uwagi na złe warunki pogodowe panujące w trakcie kampanii. Zasięg obrazowania ASTER przedstawiono na Rys. 15. Obrazowanie DAIS rejestrowane jest w stosunkowo wąskim pasie, którego szerokość zależy od wysokości lotu. Zasięg wykonanego w ramach projektu UE obrazowania zamieszczono na Rys. 16.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 15. Zasięg obrazowania ASTER z zaznaczonym fragmentem, dla którego dokonano rejestracji DAIS.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 16. Zobrazowanie DAIS na tle fragmentu obrazowania ASTER

## 5.5 Metodyka analiz obrazowań hiperspektralnych

Przetwarzanie obrazowań hiperspektralnych (podobnie jak wielospektralnych) można podzielić na dwa etapy:

- Przetwarzanie wstępne obejmujące korekcie radiometryczne – usuwanie tzw. *striping'u*<sup>6</sup>, usuwanie zakłócającego wpływu atmosfery oraz ewentualnie ukształtowania terenu, transformacje danych surowych do wartości współczynnika odbicia/emisyjności, oraz korekcie geometryczne
- Przetwarzanie właściwe – ekstrakcja informacji tematycznej.

W trakcie badań prowadzonych w ramach niniejszego projektu wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie dedykowane obrazowaniom hiperspektralnym: ENVI i PCI Geomatics (Advanced Hyperspectral Package). W związku z pewną rozbieżnością w metodach przetwarzania zaimplementowanych w obu programach, zostały one opisane oddzielnie.

<sup>6</sup> *Striping* – zniekształcenie obrazu spowodowane defektem detektora, ujawniające się na obrazowaniu w postaci pasków (por. Rys. 30).

Ponadto w wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że oprogramowanie ENVI dysponuje obszerniejszym niż PCI Geomatics pakietem opcji, zarówno do przetwarzania wstępnego, jak i właściwego i zostało opisane jako pierwsze. W dalszej kolejności przedstawiono możliwości przetwarzania zobrażeń hiperspektralnych za pomocą PCI Geomatics.

### 5.5.1 Przetwarzanie zobrażeń hiperspektralnych za pomocą ENVI

#### Przetwarzanie wstępne

Przetwarzanie wstępne, może odbywać się dla wszystkich kanałów podobnymi algorytmami lub specjalnie przygotowanymi do zakresu VNIR, SWIR i TIR.

#### Zakres VNIR

Poniżej przedstawiono następujące metody dla zakresu VNIR zaimplementowane w ENVI:

- *Flat Field* (FF),
- *Internal Average Relative Reflectance*, (IARR).

Metoda *Flat Field* pozwala na szybką korekcję wpływu atmosfery. Polega ona na zdefiniowaniu obszaru o znanej wartości współczynnika odbicia (np. wody), obliczeniu w tym obszarze średnich wartości odpowiedzi spektralnych w poszczególnych kanałach i podzieleniu każdego piksela każdego kanału obrazu przez tę wartość średnią.

Metoda IARR polega na normalizacji spektrum dla całego obrazu. Ze wszystkich wartości obrazu obliczana jest wartość średnia dla każdego kanału, a następnie wartość odpowiedzi spektralnej dla każdego piksela jest dzielona przez wartość średnią.

#### Zakres SWIR i TIR

Przedział termalny jest trudniejszy do analizy z uwagi na to, że na wartość rejestrowanego przez detektor promieniowania ma wpływ zarówno rodzaj badanego obiektu jak i jego temperatura. Ilość niewiadomych do wyznaczenia wynosi  $n+1$ , gdzie  $n$  to liczba kanałów. Wyznaczane niewiadome to:

współczynnik emisyjności dla każdej długości fali ( $n$ ) (podobnie jak w przypadku fal widzialnych i bliskiej podczerwieni – współczynnik odbicia) oraz jedna wartość temperatury obiektu. Złożona natura promieniowania podczerwonego powoduje komplikacje podczas przetwarzania obrazowań teledetekcyjnych w tym zakresie. Trudności pojawiają się zarówno na etapie wstępnego przetwarzania obrazów jak i podczas późniejszych transformacji w celu wyznaczenia temperatury obiektu i krzywej emisyjności (zależności współczynnika emisyjności od długości fali).

Jedną z nowszych metod korekcji wpływu atmosfery (zaimplementowaną w 4 wersji ENVI) jest metoda - *In-Scene Atmospheric Correction*. W metodzie tej wybierany jest kanał, w którym transmisja atmosfery jest maksymalna (współczynnik transmisji równy w przybliżeniu 1) oraz emisyjność atmosfery jest minimalna (w przybliżeniu równa zero). Następnie, zakładając współczynnik emisyjności, o stałej wartości równej np. 0.95, obliczana jest temperatura radiacyjna za pomocą odwrotnej funkcji Planck'a. W każdym innym kanale, zarejestrowane promieniowanie jest zależne od atmosfery, która w tym przypadku nie jest transparentna i ponadto emituje własne promieniowanie. Następnie, dla każdego kanału, tworzony jest wykres, na którym na osi odciętych znajduje się obliczona dla danego piksela temperatura radiacyjna, a na osi rzędnych pomierzona wartość promieniowania dla tego piksela. Na podstawie analizy regresji liniowej określa się kąt nachylenia prostej regresji oraz wartość odciętej dla punktu przecięcia prostej regresji z osią rzędnych. Kąt nachylenia prostej regresji jest interpretowany jako współczynnik transmisji atmosfery w danym kanale, a wartość rzędnej przecięcia z osią Y jako wartość promieniowania atmosfery. Tak określone wartości współczynnika transmisji atmosfery i wartość promieniowania własnego atmosfery zostają uwzględnione podczas wstępnej korekcji obrazów hiperspektralnych.

Następnym etapem, podczas opracowywania obrazowań w podczerwieni termalnej, jest separacja emisyjności i temperatury. Istnieją generalnie dwie standardowe metody tej separacji: metoda kanału wzorcowego (*Reference Channel*) i metoda normalizacji współczynnika emisyjności (*Emissivity Normalization*).

W metodzie *Reference Channel* zakłada się maksymalną wartość emisyjności dla jednej przyjętej długości fali. Następnie oblicza się temperaturę radiacyjną dla tej długości fali ze wzoru Planck'a i dalej wykorzystuje się tak obliczoną temperaturę radiacyjną dla wyznaczenia pozostałych wartości emisyjności.

W metodzie *Emissivity Normalization* zakłada się maksymalną wartość współczynnika emisyjności, ale nie przypisuje się jej do jednej długości fali. Przyjmuje się, bowiem maksymalną emisyjność w każdym kanale i w związku z tym obliczanych jest wiele wartości temperatury. Ostatecznie, jako temperaturę wprowadza się do wzoru Planck'a maksymalną wartość temperatury jako uzyskano we wszystkich kanałach. Dla długości fali, dla której wystąpiła maksymalna wartość temperatury kinetycznej, przyjmuje się również maksymalną wartość współczynnika emisyjności. W dalszej kolejności, dla każdego kanału, obliczany jest z równania Planck'a współczynnik emisyjności przy założeniu jednej, wyznaczonej w kroku poprzednim, maksymalnej wartości temperatury kinetycznej.

Termalne kanały analizowanego obrazowania DAIS zostały poddane korekcji atmosfery za pomocą metody In-Scene Atmospheric Correction, a separację emisyjności i temperatury dokonano metodą Emissivity Normalization

### **Przetwarzanie właściwe**

Oprogramowanie ENVI umożliwia korzystanie z systemu wspomagania procesu przetwarzania danych hiperspektralnych. Poniżej opisano krok po kroku przetwarzanie obrazów zgodnie tym systemem wspomagania przetwarzania. W związku z tym, że metodyka ta jest w pewnym sensie standardem przetwarzania danych hiperspektralnych ważne jest szczegółowe przeanalizowanie zarówno wykorzystywanych algorytmów obliczeniowych jak i postaci danych wyjściowych.

### **Standardowe przetwarzanie właściwe obrazowań teledetekcyjnych w ENVI z wykorzystaniem szablonu**

W ENVI został zaproponowany szablon przetwarzania danych hiperspektralnych obejmujący następujące kroki, opisane poniżej:

- MNF – Minimum Noise Fraction



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

- PPI – Pixel Purity Index
- SAM – Spectral Angle Mapping
- N-wymiarowa wizualizacja i Spectral Unmixing

#### **MNF- Minimum Noise Fraction**

Metoda Minimum Noise Fraction (MNF) jest wykorzystywana w programie ENVI do analizy wzajemnej korelacji obrazów oraz usuwania zakłóceń i szumów, co jest szczególnie istotne, kiedy przedmiotem badań są dziesiątki, czy setki kanałów. Funkcja ta umożliwia identyfikację szumów, a następnie klasyfikację kanałów ze względu na ich przydatność do dalszego przetwarzania: począwszy od obrazów zawierających najwięcej informacji spektralnej do obrazów silnie zakłóconych przez szumy. Po transformacji MNF uzyskuje się kilka kanałów, tzw. czystych, nieskorelowanych ze sobą i pozostałe kanały, zawierające główne zakłócenia.

#### **PPI – Pixel Purity Index**

Zasada algorytmu Pixel Purity Index (PPI) oparta jest na wyszukiwaniu, ze zbioru wszystkich pikseli obrazowania hiperspektralnego, spektralnie czystych pikseli (tzw. endmembers). Algorytm generuje odpowiednio dużą liczbę niezależnych n-wymiarowych wektorów (n - liczba kanałów spektralnych), na które odwzorowywane zostają piksele przetwarzanego obrazowania (Rys. 17A). Krotność, z jaką położenie danego piksela przestrzeni spektralnej zostało zarejestrowane na wektorze jako ekstremalne, określa jego Pixel Purity Index (PPI). Ostateczna liczba wyselekcjonowanych pikseli zależy od przyjętego progu wartości, dla którego piksele uważane są za ekstremalnie położone. Dokładność całej operacji zależy od liczby przeprowadzonych iteracji. W zależności od liczby pikseli, liczby wektorów oraz od rozdzielczości spektralnej powinna ona wynosić od kilku do kilkudziesięciu tysięcy.

#### **SAM – Spectral Angle Mapping**

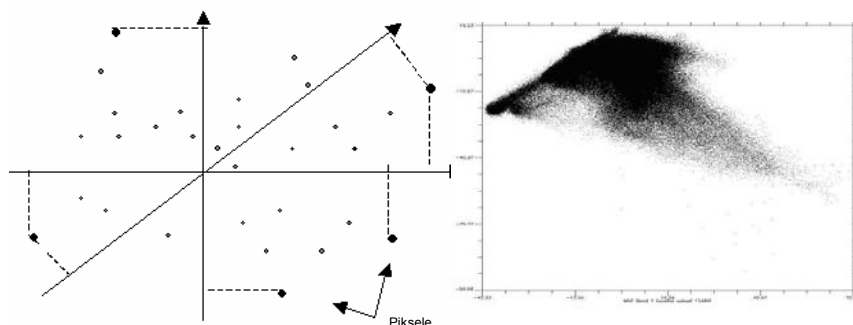
Jedną z metod ekstrakcji informacji ilościowej z obrazu jest Spectral Angle Mapping (SAM). Wymaga ona wykorzystania tzw. danych wzorcowych dla obiektów lub zjawisk, które są przedmiotem analizy. W programie można wyznaczać krzywe spektralne na podstawie danych obrazowych lub

wykorzystywać krzywe spektralne z bibliotek odpowiedzi spektralnych dostępnych z różnych źródeł zewnętrznych, także pozyskanych w oparciu o własne pomiary spektrometryczne. Metoda SAM polega na porównaniu wartości spektralnych dla danego piksela z wzorcową krzywą spektralną obiektu. Wartości odpowiedzi spektralnej dla piksela w n-kanałach można potraktować jako współrzędnej wektora w n-wymiarowej przestrzeni. Następnie obliczany jest kąt pomiędzy tymi wektorami, a ostateczna klasyfikacja następuje po porównaniu obliczonego kąta z zadaną wartością graniczną.

### **N-wymiarowa wizualizacja i Spectral Unmixing**

Krzywa spektralna danego piksela przedstawia zależność współczynnika odbicia czy emisyjności od długości fali. Innym sposobem wizualizacji może być „chmura spektralna” (0Rys. 17B), czyli zbiór punktów w przestrzeni wielowymiarowej, przy czym współrzędnymi tych punktów są odpowiedzi spektralne w wybranych kanałach. Wizualizacja przestrzenna jest możliwa po wybraniu dowolnej kombinacji 3 kanałów. Jeżeli dysponujemy obrazowaniem np. w 79 kanałach spektralnych (DAIS) to każdy piksel takiego obrazowania można przedstawić jako punkt w 79-wymiarowym układzie współrzędnych. W programie ENVI dostępne jest narzędzie (n - Dimensional Visualiser) umożliwiające projekcję danych w dowolnym wymiarze. Technika wizualizacji n-wymiarowej w znacznym stopniu ułatwia selekcję czystych pikseli w przestrzeni spektralnej. Poprzez dowolne obracanie „chmury pikseli” w prosty sposób można wyselekcjonować poszczególne grupy pikseli. Graficznie, w przestrzeni n-wymiarowej, czyste piksele znajdują się na zewnętrznych obszarach „chmury spektralnej”. Natomiast wszystkie piksele odpowiadające mieszaninie tych substancji leżą pomiędzy tworzącymi je czystymi substancjami. Związek liniowy mieszaniny składającej się z substancji A i z substancji B tworzących spektrum obrazu C można zapisać w postaci prostego równania:  $A+B=C$ .

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 17. Rzutowanie pikseli ekstremalnych na wektory w n-wymiarowej przestrzeni (A); wizualizacja "scatter plot" (B) - identyfikacja obiektów na obrazie i w przestrzeni spektralnej (1 i 2 kanał MNF);

### Specjalistyczne metody przetwarzania obrazów hiperspektralnych z wykorzystaniem analiz krzywych spektralnych za pomocą ENVI

Do analiz porównawczych krzywych spektralnych uzyskanych w wyniku pomiaru naziemnymi spektrometrami nieobrazującymi i obrazów hiperspektralnych można wykorzystać w ENVI następujące algorytmy:

- Dopasowanie charakterystyk spektralnych - *Spectral Feature Fitting* (SFF)
- Wydzielenia elementarnych krzywych spektralnych *Spectral Unmixing* (SU)
- Analiza spektralna - *Spectral Analyst* (SA).

Metoda SFF polega na analizie porównawczej metodą najmniejszych kwadratów krzywej referencyjnej ze obrazowaniem hiperspektralnym. Krzywa spektralna i obrazowanie są porównywane po standaryzacji do postaci kontinuum. W wyniku działania tej procedury uzyskuje się dwa obrazy : stopnia dopasowania i błędu dopasowania. Jasne obszary na obrazie stopnia dopasowania, które jednocześnie są ciemne na obrazie błędu dopasowania mogą być interpretowane jako odpowiadające wzorcowi. Wartości stopnia dopasowania są w takim przypadku bliskie 1, a błędy bliskie 0. Występowanie wartości znacznie większych od 1 oznacza zupełnie rozbieżne charakterystyki wzorca i obrazu.

Metoda SU polega na rozdzielaniu wpływu elementarnych krzywych spektralnych w obrębie piksela. Promieniowanie elektromagnetyczne zarejestrowane dla danego piksela jest wypadkową promieniowania pochodzącego od elementarnych składników obszaru piksela. Jeśli w obrębie jednego piksela, czyli w obszarze np. 3x3m znajduje się w rzeczywistości 20%

gruntu odkrytego i 80% roślinności to oznacza, że zarejestrowane w obrębie takiego piksela promieniowanie pochodzi w 20% od piasku i w 80% od roślinności. Metoda SU polega na analizie każdego piksela w porównaniu do krzywych spektralnych wzorców i obliczeniu procentowego udziału każdej z krzywych wzorca w odpowiedzi spektralnej danego piksela. Oprócz tego generowany jest obraz rozkładu błędu dla każdego z wzorców.

Analiza spektralna (SA) polega na obliczeniu wartości prawdopodobieństwa dla każdego piksela przynależności do każdego z wzorców. Metoda ta często jest wykorzystywana w przypadku wstępnej analizy podobieństwa do założonych wzorców. Prawdopodobieństwo zbliżone do 0 dla wszystkich wzorców oznacza, że źle zostały dobrane wzorce.

### **5.5.2 Przetwarzanie obrazów hiperspektralnych za pomocą PCI Geomatics**

W ramach wykonanych badań przetestowano również procedury przetwarzania obrazowań hiperspektralnych dostępne w programie PCI Geomatica (Advanced Hyperspectral Package). Istnieją pewne trudności w bezpośrednim wykorzystywaniu programu PCI Geomatica do przetworzeń obrazowań hiperspektralnych. Wynika to ze specyfiki dostępu do danych. Ograniczenia te, a także pewne dodatkowe opcje niedostępne w programie ENVI zostały krótko opisane poniżej.

Pełne wykorzystanie pakietu analiz hiperspektralnych programu Geomatica możliwe jest jedynie wtedy, gdy danym hiperspektralnym towarzyszą dodatkowe metadane. W obecnej wersji programu oznacza to w praktyce, iż obrazy hiperspektralne przechowywane być muszą w plikach formatu PCIDSK lub przynajmniej *linkowane* do tego typu plików, gdyż tylko w tym formacie możliwy jest zapis odpowiednich metadanych. Metadane zaimportowane mogą zostać z pliku tekstowego (dokumentu XML) i eksportowane do tego samego formatu. Są one wykorzystywane przez programy wchodzące w skład pakietu, a niektóre z tych programów dokonują również ich modyfikacji. Wykorzystanie metadanych ma m.in. na celu zminimalizowanie ilości przechowywanych danych, poprzez ograniczenie potrzeby tworzenia obrazów dla poszczególnych etapów przetwarzania. W metadanych przechowywane są

bowiem wartości *gain* i *offset* dla poszczególnych transformacji radiometrycznych. W efekcie, zamiast tworzyć z oryginalnego obrazu obrazy wielkości promieniowania i współczynnika odbicia, użytkownik może przechowywać jedynie odpowiednie parametry wykorzystywane następnie przez poszczególne programy pakietu.

Analiza zobrazowań hiperspektralnych wymaga również korzystania z plików bibliotek spektralnych. W PCI Geomatica korzystać można z bibliotek w formacie binarnym USGS „Specpr”, bibliotek ISDAS lub bibliotek przechowywanych w odpowiednio sformatowanych plikach tekstowych lub plikach .xls (Microsoft Excel). Możliwa jest konwersja bibliotek pomiędzy tymi formatami. Wykorzystanie posiadanych przez nas bibliotek spektralnych (w tym bibliotek JPL w formacie tekstowym) wymagało utworzenia z nich odpowiednio sformatowanych plików tekstowych.

Programy dostępne w ramach pakietu analiz hiperspektralnych podzielić można na dwie zasadnicze grupy (podobnie jak w przypadku ENVI) – programy przeznaczone do przetwarzania wstępnego, w tym prostych korekcji atmosferycznych oraz przetworzeń właściwych.

### **Wstępne przetwarzanie danych**

W grupie tej wydzielić można trzy podgrupy: programy przeznaczone do kalibracji sensora, korekcji geometrycznej oraz usuwania zakłóceń radiometrycznych (szumów).

#### **Kalibracja sensora**

Obrazy pozyskane przez niektóre sensory hiperspektralne zawierają obszar referencyjny (*dark-reference region*). Zawiera on wartości pikseli uzyskane dla sytuacji, w której do sensora nie dociera żadne promieniowanie z zewnątrz. Wartości te traktowane być mogą jako próbka dodatkowej składowej, obecnej również w innych pikselach obrazu, a nie pochodzącej od obrazowanych obiektów. Program DRSUB umożliwia odjęcie tych wartości referencyjnych od wartości pikseli w poszczególnych kanałach. Uzyskane wartości powinny być bardziej proporcjonalne do wartości promieniowania od oryginalnych wartości pikseli obrazu.

Program SHFTCW umożliwia zmianę wartości centralnej długości fali dla poszczególnych kanałów spektralnych obrazu. Konieczność takiej zmiany zachodzić może, gdy rzeczywista wartość różni się od wartości uzyskanej w procesie kalibracji sensora (np. skutek starzenia się sensora). Program realizuje jedynie samo przesunięcie – jego wartość musi być podana przez użytkownika.

#### **Korekcja geometryczna**

Program ROLLCOR umożliwia korekcję zniekształcenia geometrycznego spowodowanego przez odchylenia samolotu od pionu w kierunku poprzecznym do kierunku lotu.

#### **Korekcja radiometryczna**

Do grupy tej należą programy przeznaczone do usuwania *stripingu*, redukcji różnic jasności w obrębie sceny powodowanych różnicami BRDF, oraz wykonywania transformacji PCA (*Principal Component Analysis*) i MNF (*Maximum Noise Fraction*)

#### **Korekcje atmosferyczne**

Oprogramowanie PCI Geomatica umożliwia przeprowadzenie korekcji atmosferycznej obrazów hiperspektralnych przy użyciu jednej z dwu metod: Empirical Line Correction lub Flat Field Correction. Pierwsza z metod polega na porównaniu dla jednego lub większej ilości typów użytkowania w obrębie sceny krzywych spektralnych pochodzących ze spektrometrycznych pomiarów terenowych.

Metoda *Flat Field*, podobnie jak w przypadku ENVI, nie wymaga posiadania krzywych spektralnych otrzymanych z pomiarów terenowych (laboratoryjnych). Polega ona na określeniu na obrazie obszaru o znanym i możliwie jednolitym w całym zakresie promieniowania współczynniku odbicia. Następnie dla każdego kanału określana jest wartość średnia w tym obszarze. Jej odwrotność przyjmowana jest za wartość parametru *gain*, która używana jest dla transformacji poszczególnych kanałów.

### Przetwarzanie właściwe

Do grupy tej zaliczają się programy ENDMEMB, SPUNMIX oraz SAM.

Pierwszy z nich umożliwia określenie na podstawie obrazu *endmembers* - krzywych spektralnych, które odpowiadać mogą elementarnym (czystym) obiektom (materiałom) występującym w analizowanym obszarze (np. różnym gatunkom gleby, uprawom, betonowi, itp.). Niestety nie zawsze *endmember* odpowiada jakiemuś istniejącemu w rzeczywistości materiałowi, dlatego konieczne jest porównanie wyselekcjonowanych w ten sposób krzywych z krzywymi z biblioteki spektralnej.

SPUNMIX służy do wykonania procedury *spectral unmixing*. W procesie tym dla każdego piksela obrazu określana jest kombinacja *endmembers*, najlepiej pasująca do jego charakterystyki spektralnej. W przypadku SPUNMIX stosowana jest kombinacja liniowa, a jej optymalizacja następuje przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

SAM (*Spectral Angle Mapper*) przeznaczony jest do klasyfikacji zobrazenia hiperspektralnego w oparciu o zestaw krzywych spektralnych definiujących poszczególne klasy.

W ramach badań założono przeprowadzenie wstępnego przetworzenia obrazów hiperspektralnych mającego na celu usunięcie zakłócającego wpływu atmosfery przy użyciu metod *Empirical Line Correction* oraz *Flat Field Correction*. Niestety w trakcie pracy okazało się, iż niektóre z programów pakietu analiz hiperspektralnych oprogramowania Geomatica 9.1 nie funkcjonują poprawnie. W oparciu o uaktualnienie dostępne na stronie producenta oprogramowania zaktualizowano posiadaną wersję do wersji 9.1.5. W zaktualizowanej wersji większość programów działała już poprawnie. Niestety nie udało się jednak wciąż przeprowadzić korekcji metodą *Flat Field*. Z konieczności ograniczono się zatem do metody *Empirical Line Correction*, która jednak nie nadaje się do zastosowania dla kanałów z zakresu podczerwieni termalnej. Dalsze analizy za pomocą PCI ograniczono zatem do danych z zakresu promieniowania widzialnego oraz bliskiej i średniej podczerwieni.

## 6. Założenia dotyczące przetwarzania danych teledetekcyjnych

---

Celem projektu były badania możliwości detekcji zanieczyszczenia gruntów siarką za pomocą hiperspektralnych technik teledetekcyjnych. W pierwszej kolejności zrealizowano zadanie dotyczące analizy charakterystyk spektralnych gruntu zanieczyszczonego siarką. Dokonano tego w oparciu o wyniki spektrometrycznych pomiarów gruntów *in-situ*, prób laboratoryjnych oraz wzorców: mieszanek piasku i siarki.

Następnie dokonano analizy krzywych spektralnych w kontekście wyboru najlepszego dla detekcji siarki przedziału spektralnego. W tym przypadku należy uwzględnić zarówno kształt krzywych spektralnych, a w szczególności piki, jak również możliwości wykorzystywanego skanera obrazującego, który z reguły w znacznym stopniu deformuje krzywe spektralne.

Kolejnym zadaniem była optymalizacja metody przetwarzania obrazów hiperspektralnych w oparciu o naziemne pomiary spektrometryczne z uwzględnieniem problemu generalizacji występującej na obrazach o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej. We wstępnej fazie projektu UE planowano wykorzystanie skanera ROSIS (rozdzielczość 1m) i porównanie jego wyników ze zobrazeniem DAIS (rozdzielczość 3m). Z tą myślą zostały przygotowane pola testowe i wykonany spektrometryczny pomiar *in-situ*. W związku z brakiem danych ROSIS (nie wykonano rejestracji z powodu złych warunków meteorologicznych) do dyspozycji pozostało zobrazenie ASTER i DAIS.

Optymalizacja przetwarzania danych hiperspektralnych oprócz rozwiązania problemu generalizacji odpowiedzi spektralnej na zobrazeniach o różnej rozdzielczości przestrzennej obejmuje szereg innych, równie ważnych zagadnień. Jednym z nich jest fakt uśredniania odpowiedzi spektralnej do zakresu kanału skanera obrazującego. Niemniej istotny jest wybór metody przetwarzania danych hiperspektralnych (przetwarzania właściwego). W



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)

związku z tym, że analizowany obiekt kopalni w Jeziórku jest trudny z inetrpretacyjnego punktu widzenia, głównie z uwagi na stan rozwoju kopalni. Kopalnia jest w fazie likwidacji, duży obszar jest rekultywowany, następuje ponadto naturalna sukcesja roślinna. Grunt w obrębie kopalni jest w różnym stopniu zanieczyszczony, ale trudno obecnie znaleźć duże obszary z siarką rodzimą na powierzchni.

W związku z powyższym przetwarzanie właściwe wykonywano dwu etapowo. W pierwszym kroku dokonywano przetworzenia w obrębie danej kopalni siarki Piaseczno, jeśli uzyskane wyniki były zadowalające przystępowano do przetwarzania obrazowania z obszaru kopalni Jeziórko. Można powiedzieć, że rejon Piaseczna wykorzystano do kalibracji spektralnej wykorzystując dwa charakterystyczne obiekty: zbiornik wodny i duży obszar piasku.

Ostatnim realizowanym zadaniem było opracowanie cyfrowej mapy zanieczyszczenia gruntów.

## 7. Analiza charakterystyk spektralnych gruntu zanieczyszczonego siarką

---

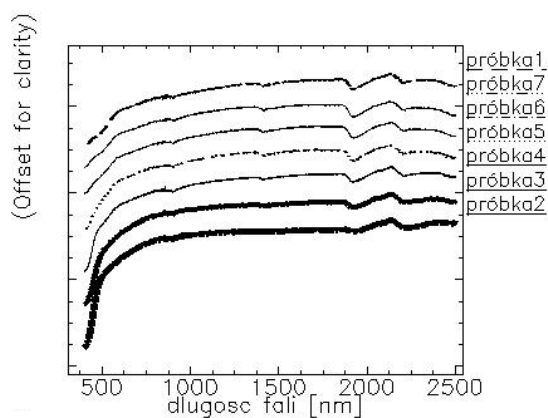
Badania charakterystyk spektralnych gleb zdegradowanych na obszarze kopalni Jeziórko realizowano wykorzystując pomiar spektrometryczny:

- sztucznie preparowanych mieszanek piasku i siarki przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych,
- wykonywany bezpośrednio w terenie na wybranych obszarach testowych,
- prób laboratoryjnych pobranych z obszarów testowych.

Wyniki wszystkich przeprowadzonych pomiarów wraz z wynikami analiz porównawczych zamieszczono w wersji elektronicznej. Poniżej zamieszczono przykładowe, wybrane wyniki pomiarów oraz przedstawiono syntetyczne wnioski wynikające z analizy wyników pomiarów.

### Zakres VNIR

Mieszanki piasku i siarki zostały pomierzone spektrometrem ASD w Uniwersytecie Technicznym w Clausthal w Niemczech. Zależność współczynnika odbicia od długości fali przedstawiono na Rys. 18. W celu przejrzystości rysunku krzywe zostały przesunięte względem siebie w pionie.

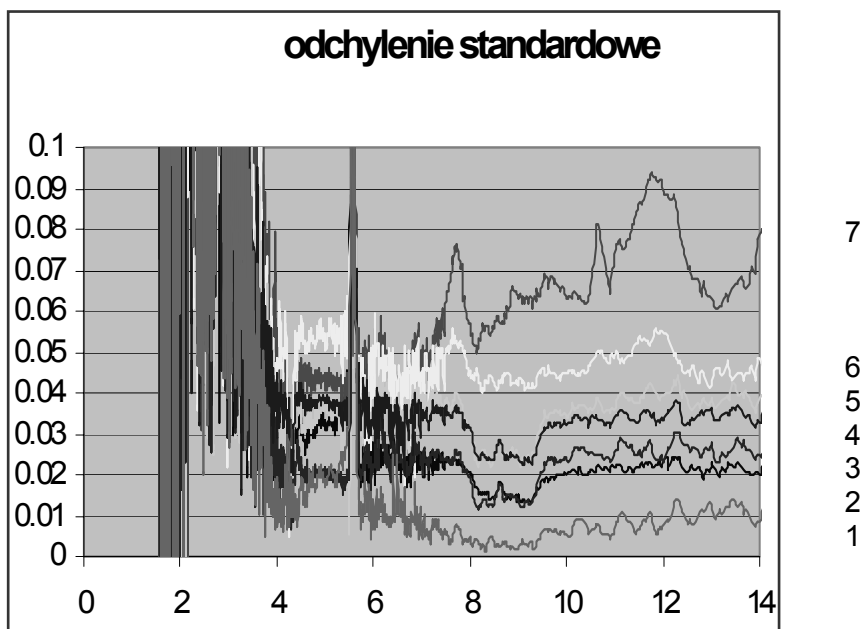


Rys. 18. Zależność współczynnika odbicia od długości fali w zakresie VNIR (przesunięcie wzdłuż osi rzędnych dla przejrzystości diagramu).

Analizując Rys. 18 można stwierdzić, że krzywe spektralne piasku, siarki i mieszanek piasku i siarki w zakresie VNIR nie różnicują się. Ogólnie kształt krzywych jest jednorodny, krzywe podobne są do siebie i nie występują żadne charakterystyczne piki, które umożliwiłyby odróżnienie mieszanek od siebie.

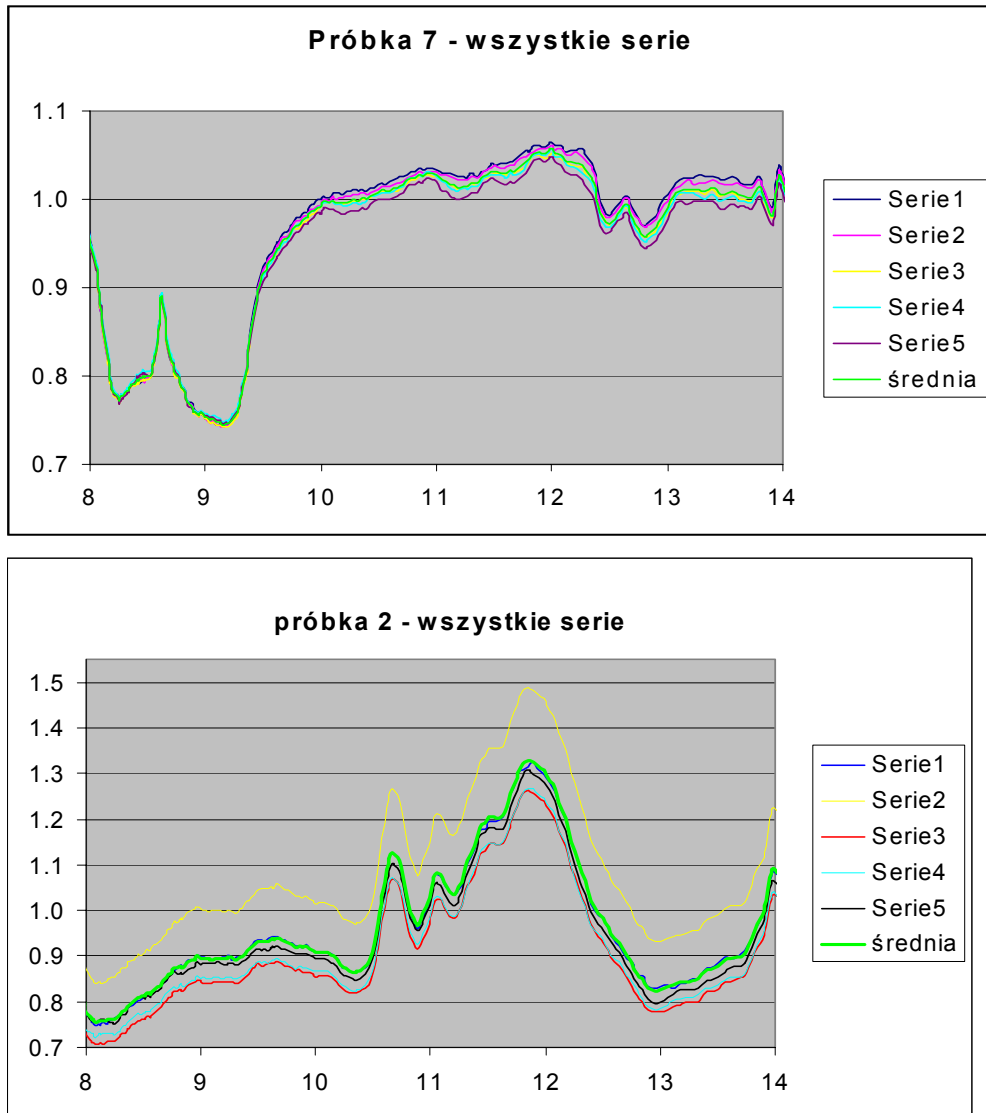
### Zakres SWIR i TIR

Sztucznie preparowane mieszanki piasku i siarki obserwowano za pomocą spektrometru firmy Design&Prototype w zakresie TIR w 5 seriach. Następnie wyniki pomiarów porównano w zakresie **wartości bezwzględnych** współczynnika emisyjności. Uzyskano wartości odchylenia standardowego od wartości średniej w zależności od długości fali dla poszczególnych prób.



Rys. 19. Odchylenie standardowe **surowych** wartości współczynnika emisyjności od wartości średniej w zależności od długości fali dla wszystkich mieszanek piasku i siarki (1-7)

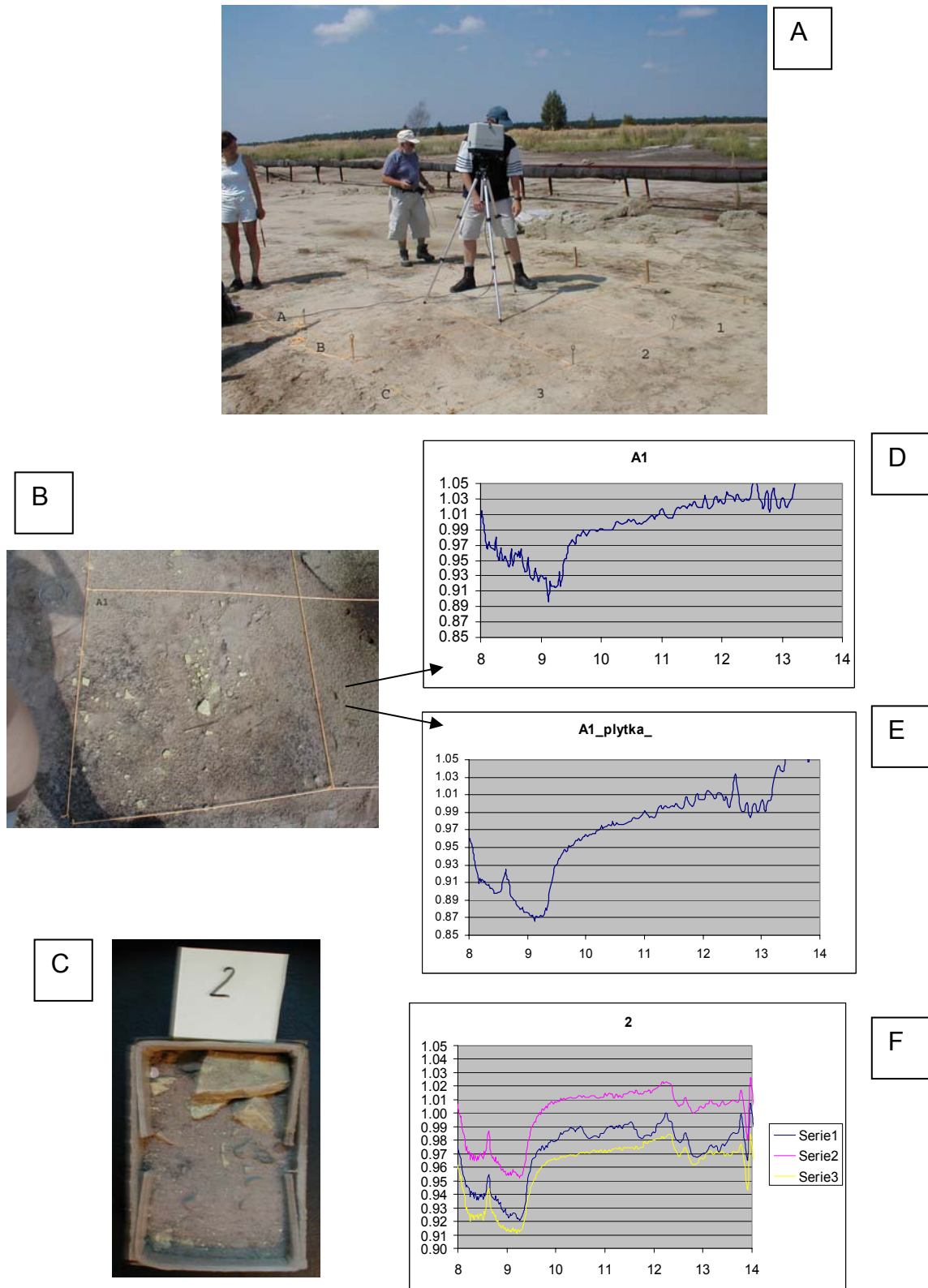
Przykładowe wyniki pomiaru spektrometrycznego dla piasku i siarki zamieszczono na Rys. 20. Na rysunku, na osi rzędnych znajduje się wartość surowego współczynnika emisyjności, tzn. współczynnika emisyjności obliczonego za pomocą oprogramowania współpracującego ze spektrometrem. Nie zawsze podczas przetwarzania sygnału za pomocą oprogramowania spektrometru jest możliwość uzyskania poprawnych wartości bezwzględnych współczynnika emisyjności.



Rys. 20. Zależność surowych wartości współczynnika emisyjności od długości fali dla piasku (wykres górny) i dla siarki (wykres dolny).

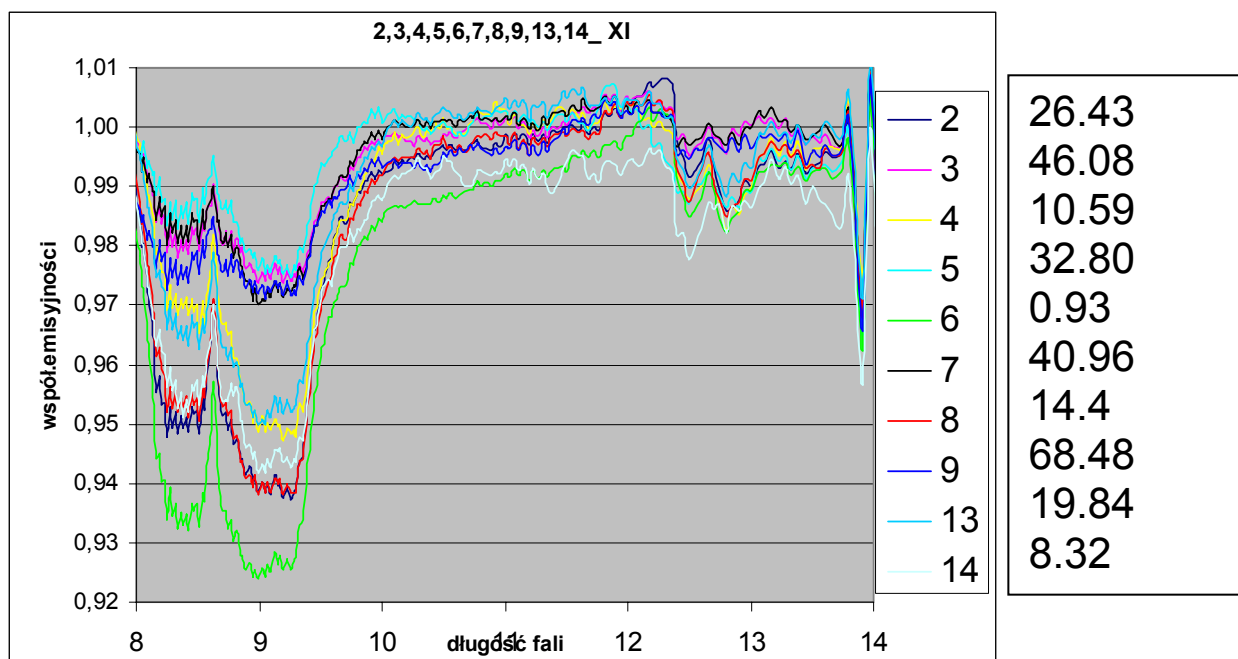
W ramach prac terenowych wykonano szereg naziemnych pomiarów spektrometrycznych gruntów w różnym stopniu zdegradowanych. Przykładowy wynik analizy znajduje się na Rys. 21. Na rysunku pokazano adekwatną do mierzonej w terenie próbkę laboratoryjną wraz z wynikiem pomiaru.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 21. Przykładowa ilustracja: terenowego pomiaru spektrometrycznego (A), pola elementarnego (B), pobranej z pola elementarnego próby laboratoryjnej (C), oraz wyniki pomiaru (D, E, F). Wyniki: D i E dotyczą pola A różnice wynikają ze sposobu modelowania emisyjności otoczenia (D za pomocą aluminiowej pokrywy spektrometru, E za pomocą wzorca ciała doskonale rozpraszającego).

Przeprowadzony spektrometryczny pomiar terenowy potwierdził tendencję, zaobserwowaną w trakcie pomiarów wzorców (laboratoryjnie preparowanych mieszanek piasku i siarki). Wzrost domieszki siarki powoduje zmniejszanie się charakterystycznego dla krzemionki pików: 8- 9.5  $\mu\text{m}$ .



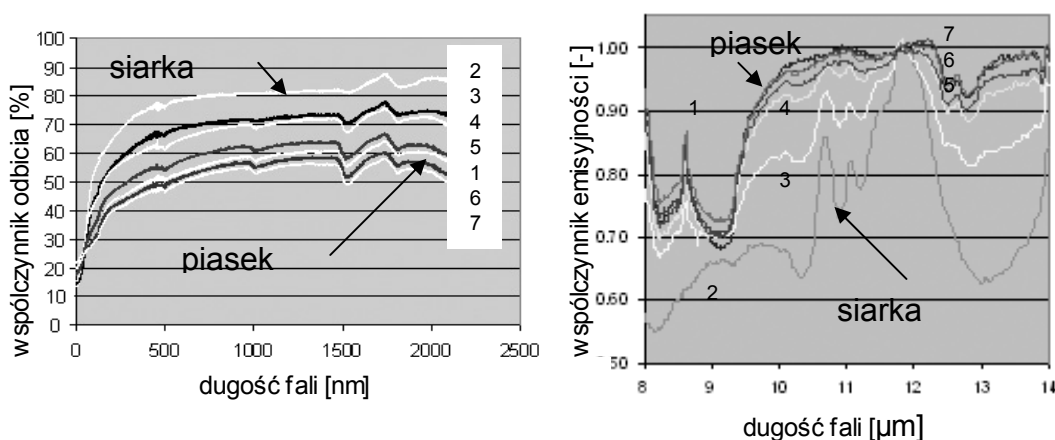
Rys. 22. Przykładowa zależność współczynnika emisyjności od długości fali dla różnych próbek.

W wyniku analizy wielu krzywych spektralnych stwierdzono, że:

- Przebieg krzywych spektralnych w przedziale fal widzialnych, bliskiej podczerwieni (VNIR) oraz częściowo w zakresie SWIR (0.3-2.5  $\mu\text{m}$ ) jest niezależnie od stopnia zanieczyszczenia siarką podobny oraz, że w przebiegu krzywych nie występują żadne, możliwe do wykorzystania piki,
- Zależność współczynnika emisyjności od długości fali (krzywe spektralne w zakresie SWIR i TIR) jest bardziej urozmaicona niż zależność współczynnika odbicia od długości fali w zakresie 0.3-2.5  $\mu\text{m}$ .
- Istnieją dwa przedziały charakteryzujące się pikami:
  - 8-9  $\mu\text{m}$  – pik pochodzący od krzemionki
  - 12-14  $\mu\text{m}$  – pik pochodzący od siarki.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)

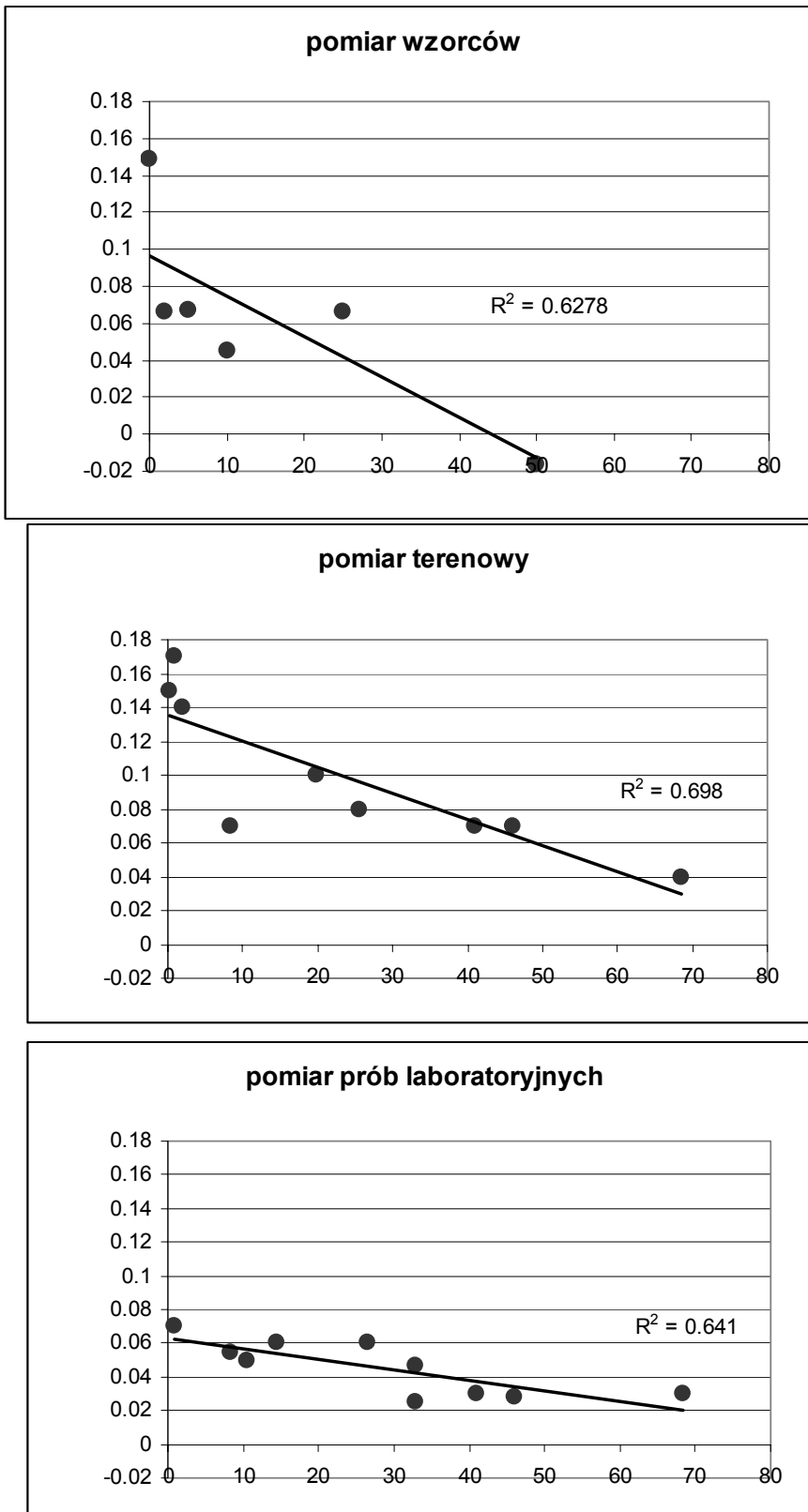
- Zwiększanie zawartości siarki w piasku powoduje zmniejszanie się piku od krzemionki i zwiększanie się piku od siarki.



Rys. 23. Krzywe charakterystyczne piasku, siarki i mieszanek piasku i siarki (numeracja prób zgonie z rozdziałem 5.3.2).

W związku ze zmianami zachodzącymi w obszarze kopalni Jeziórko związanymi z rekultywacją nie istnieje już możliwość znalezienia obszarów pokrytych siarką i w związku z tym nie można było przeanalizować zmian piku pochodzącego od siarki. Pik ten bowiem występuje w przypadku dużego, bo ponad 25% zanieczyszczenia gruntu siarką. Przeanalizowano zatem zmiany głębokości piku pochodzącego od krzemionki. Tendencja zmniejszania się głębokości tego piku w raz ze wzrostem zawartości siarki w gruncie została zaobserwowana we wszystkich przypadkach: pomiarach wzorców, pomiarach terenowych krzywych pomiarach prób laboratoryjnych. Poniżej zamieszczono wykresy zależności głębokości piku od zawartości siarki.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 24. Zmiana głębokości pików od krzemionki krzywych zależności od zawartości siarki w gruncie dla pomiaru wzorców, pomiaru *in-situ* krzywych pomiaru laboratoryjnego.



## **8. Analizy krzywych spektralnych w kontekście wyboru przedziału/przedziałów spektralnych najkorzystniejszych dla monitoringu gleb zdegradowanych**

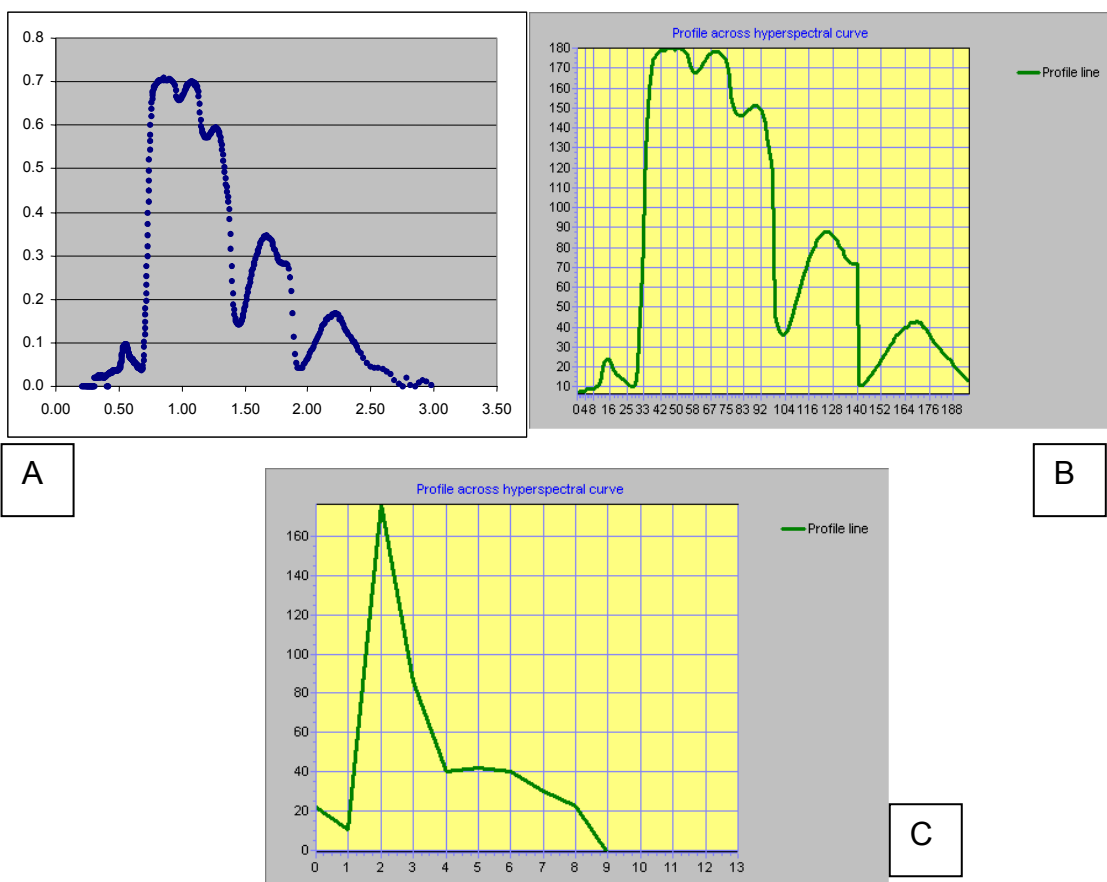
---

Analiza krzywych spektralnych pod kątem wyboru przedziału odpowiedniego do monitoringu jakiegoś zjawiska musi uwzględniać dwa aspekty:

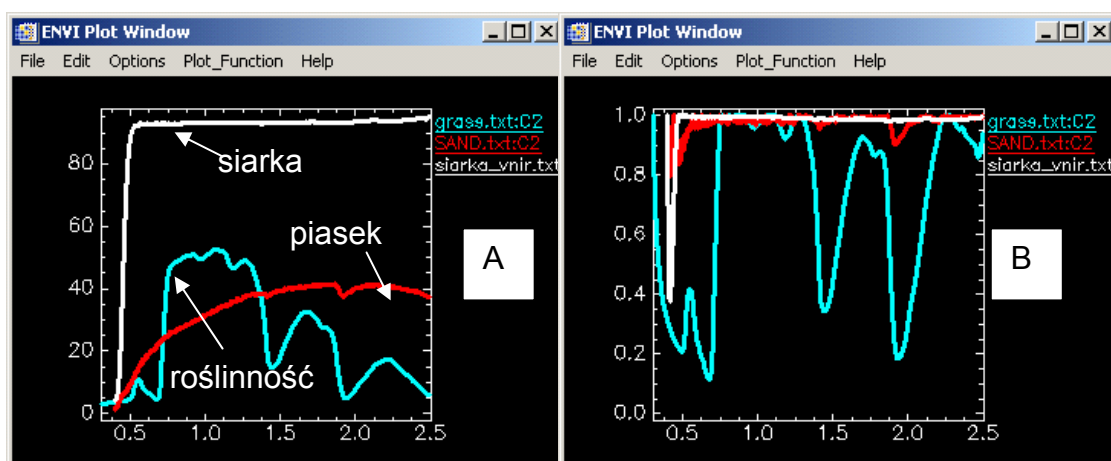
- Zbadanie, czy dane zjawisko ogólnie rzecz biorąc w sensie fizycznym różnicuje się w sposób wystarczający od tła (czy różnice są większe niż błędy pomiarowe)
- Czy istnieje możliwość detekcji tego zjawiska w praktyce?

Pierwsze zagadnienie można badać za pomocą spektrometrów, które dostarczają najdokładniejszej jak to możliwe obecnie informacji na temat zmienności zdolności odbijania lub emitowania promieniowania elektromagnetycznego przez obiekty. Drugie zagadnienie może być rozwiązane poprzez porównanie uzyskanych w punkcie pierwszym wyników z możliwością detekcji promieniowania przez obecnie dostępne skanery lotnicze lub satelitarne. Jak ważne jest to zagadnienie można stwierdzić analizując Rys. 25, na którym zilustrowano zjawisko degradacji informacji spektralnej występujące wraz ze zmniejszającą się liczbą kanałów, w których następuje rejestracja promieniowania. Charakterystyczna krzywa spektralna zdrowej roślinności przedstawia zależność pomiędzy współczynnikiem odbicia, a długością fali. Wyniki pomiaru spektrometrycznego możemy uśrednić do zakresów dostępnych skanerów i uśrednione wartości współczynnika odbicia lub emisyjności przeanalizować pod kątem zmienności przebiegu krzywej spektralnej.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 25. Ilustracja zjawiska degradacji informacji spektralnej spowodowanego zmniejszaniem się liczby kanałów, w których następuje rejestracja promieniowania (A – pomiar spektrometryczny – ilość kanałów rzędu tysiąca, B – pomiar hiperspektralny – AVIRIS – 224 kanały, pomiar wielospektralny – ASTER -14 kanałów)



Rys. 26. Zależność współczynnika odbicia od długości fali (VNIR i SWIR), A – wartości bezwzględne współczynnika odbicia, B – wartości kontinuum.

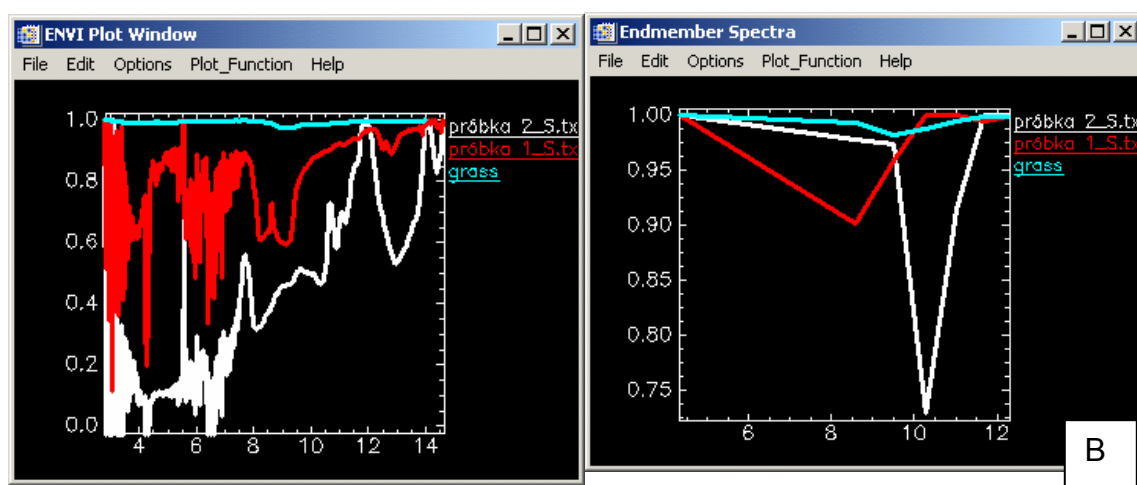
Innym problemem pojawiającym się podczas analizy danych hiperspektralnych jest trudność w pomiarze i analizie wartości bezwzględnych

współczynnika odbicia czy emisyjności. Na Rys. 26 znajdują się krzywe spektralne siarki, piasku i roślinności w zakresie fal widzialnych i bliskiej i średniej podczerwieni (VNIR, SWIR). Krzywe te przedstawiają zależność **bezwzględnych** wartości współczynnika odbicia od długości fali. Siarka charakteryzuje się wysokim współczynnikiem odbicia niezależnie od długości fali. Piasek w zakresie fal widzialnych charakteryzuje się współczynnikiem odbicia 5-krotnie niższym niż siarka z tendencją wzrostową wraz z długością fali. W podczerwieni średniej (SWIR) współczynnik odbicia jest praktycznie niezależny od długości fali i jest około 2.5 mniejszy niż współczynnik odbicia dla siarki. Roślinność, przeciwnie niż piasek i siarka charakteryzuje się dużą zmiennością współczynnika odbicia od długości fali, kształt krzywej spektralnej jest bardzo urozmaicony, można zaobserwować charakterystyczne piki (0.7  $\mu\text{m}$ , 1.5  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ ). Pomiar wartości bezwzględnych współczynnika odbicia i emisyjności jest trudny, dlatego też w analizach wyników pomiarów hiperspektralnych przyjęto zasadę analizy pików. Analizę pików przeprowadza się przetransformowanych do tzw. kontinuum krzywych spektralnych (Rys. 26B). Oznacza to, że obecność piku w krzywej spektralnej dla danego obiektu daje nadzieję na możliwość odróżnienia tego obiektu od innego nieposiadającego piku. Z tego wynika, że analiza kontinuum nie umożliwia rozróżnienia piasku i siarki.

W rzeczywistości rzadko mamy do czynienia z czystymi obiektami (czysty piasek, czysta siarka). Najczęściej przedmiotem pomiaru jest mieszanina piasku i siarki, gruntu macierzystego i zanieczyszczenia. Dodatkowym elementem mającym wpływ na rejestrowane metodami teledetekcyjnymi promieniowanie jest roślinność. Pojawia się ona w wyniku wykonywania zabiegów rekultywacyjnych lub jest spowodowana naturalną sukcesją roślinną. Zarejestrowane w takiej sytuacji promieniowanie pochodzi od gruntu, od substancji zamieszczonej i dodatkowo od roślinności. Odpowiedź spektralna mieszanek różnych substancji jest wypadkową odpowiedzi spektralnych poszczególnych składników. Jeśli w jakimś przedziale spektralnym występuje pik charakterystyczny dla jednego ze składników, a inne składniki w tym zakresie nie posiadają piku mogą one wpłynąć na głębokość piku mieszaniny, mogą zmniejszyć głębokość piku. Kształt krzywych spektralnych w przedziale

VNIR i SWIR nie pozwala na analizę tego zjawiska, pod kątem badania zawartości siarki w mieszaninie gruntowej (Rys. 26B).

Bardziej obiecujący jest przedział fal termalnych (TIR), co zostało już w ramach wstępnych badań stwierdzone. Przykładowe krzywe spektralne piasku, siarki i roślinności zamieszczono na Rys. 27A. Analiza krzywych pozwala na stwierdzenie, że przedział krótkiej podczerwieni termalnej do 8  $\mu\text{m}$  jest w dużym stopniu zakłócony przez atmosferę, przedział dalszej podczerwieni termalnej 8-14  $\mu\text{m}$  jest nieporównywalnie mniej zakłócony. W tym też zakresie występuje znaczne zróżnicowanie krzywych spektralnych siarki i piasku. Krzywa spektralna roślinności charakteryzuje się w tym zakresie brakiem pików. Praktyczne wykorzystanie tego zróżnicowania w przypadku skanera DAIS, po uśrednieniu do jego zakresów spektralnych ilustruje wykres Rys. 27B. Pomimo widocznej degradacji krzywych spektralnych można zaobserwować ok. 9  $\mu\text{m}$  pik od krzemionki. W tym zakresie zarówno siarka jak roślinność nie posiadają pików i dodatkowo charakteryzują się wysokim współczynnikiem emisyjności. Można założyć więc, hipotezę, że wzrost zawartości siarki oraz/lub wzrost pokrycia roślinnego spowoduje zmniejszenie się tego pik. W rzeczywistości oba te zjawiska się wykluczają. Wzrost zawartości siarki w gruncie wyklucza wzrost pokrycia roślinnego.



Rys. 27. Zależność współczynnika emisyjności od długości fali w zakresie fal termalnych (TIR); A – pomiar spektrometryczny, B – wartości uśrednione do zakresów DAIS.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)

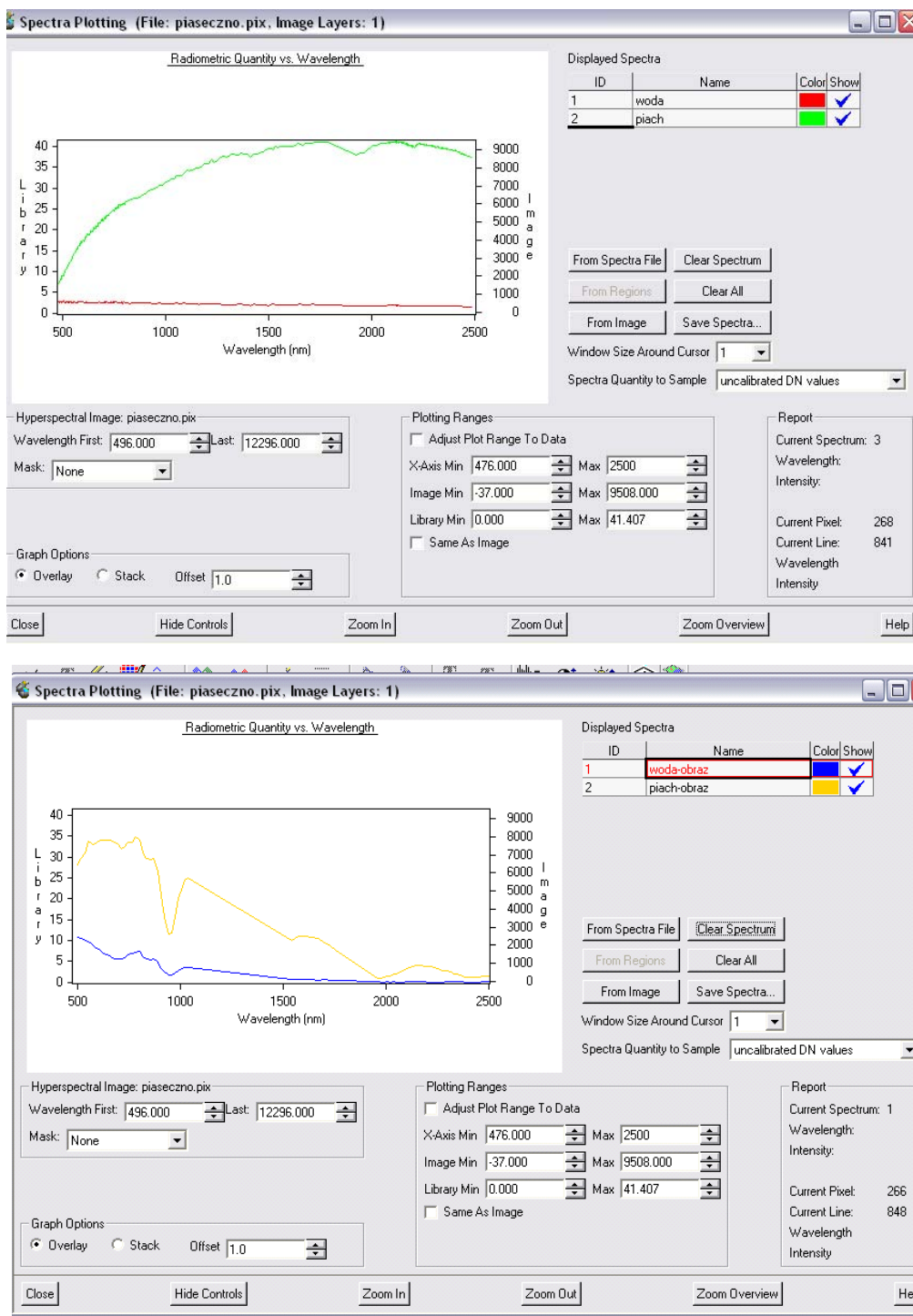
Drugi pik, tym razem charakterystyczny dla siarki, występuje w zakresie ok. 10  $\mu\text{m}$ . W tym zakresie zarówno piasek jak i roślinność mają wysoką emisyjność i nie charakteryzują się pikiem. Niestety nie udało się zbadać możliwości zmian tego pików z powodu braku gruntów w ekstremalnym stopniu zanieczyszczonych siarką.

## **8.1 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni.**

### **8.1.1 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni za pomocą PCI Geomatics.**

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebieg krzywych spektralnych wody i piasku. Pierwszy przedstawia krzywe z biblioteki spektralnej JPL, drugi natomiast krzywe uzyskane z obrazu hiperspektralnego DAIS.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

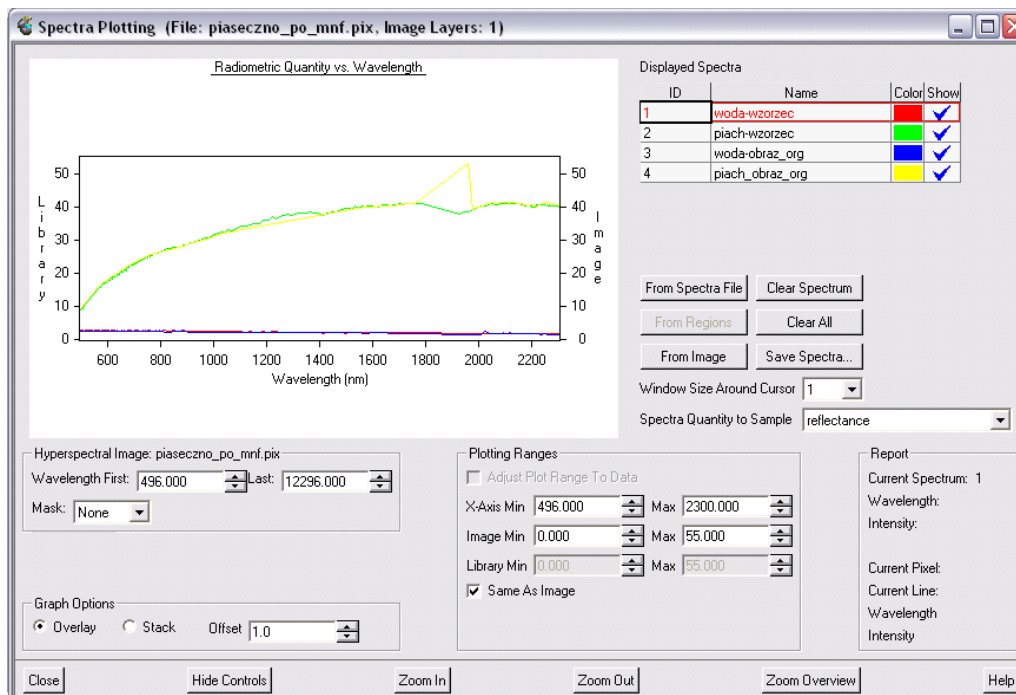


Rys. 28. Krzywe spektralne wody (kolor niebieski) i piasku (kolor żółty), u góry – z biblioteki JPL, u dołu uzyskane w wyniku pomiaru na obrazie DAIS przed kalibracją radiometryczną

Jak można zauważyć krzywe kształt krzywych obrazowych w sposób znaczący różni się kształtu krzywych biblioteki spektralnej.

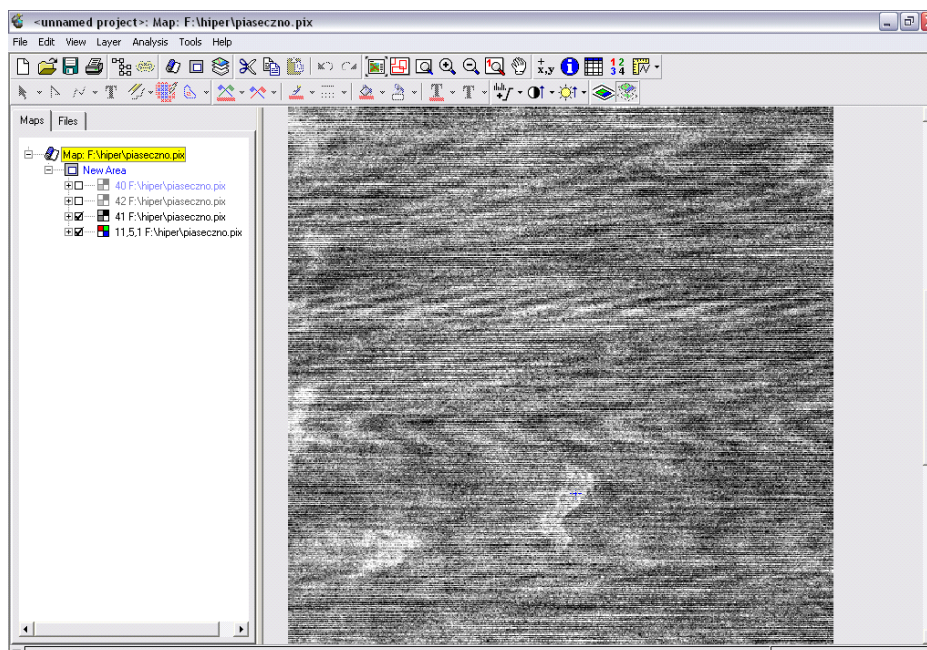
Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

Poniższy rysunek przedstawia krzywe spektralne z biblioteki JPL oraz krzywe spektralne uzyskane po przeprowadzeniu korekcji metodą *Empirical Line*. Stosując tą metodę uzyskano krzywe spektralne dobrze oddające przebieg krzywych wzorcowych. Znaczące odchylenie występuje jedynie w 41 kanale obrazu DAIS (dł. fali 1958 nm) i spowodowane być może niezwykle silnym w tym kanale zakłóceniem typu *stripping* (por. Rys. 30



Rys. 29. Krzywe spektralne wody i piasku po kalibracji radiometrycznej metodą Empiric Line.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)

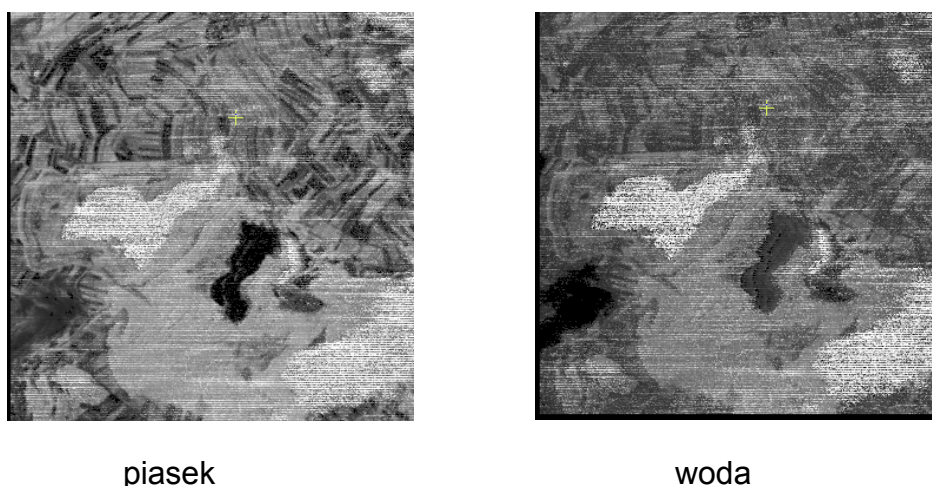


Rys. 30. Kanał 41 DAIS, widoczne duże zakłócenie typu *striping*

Obraz hiperspektralny po korekcji poddano klasyfikacji metodą SAM. Klasyfikację przeprowadzono w oparciu o krzywe spektralne wody i piasku z biblioteki JPL ograniczając się do kanałów spektralnych z zakresu VNIR oraz SWIR. Prezentowane obrazy przedstawiają rozkład przestrzenny kąta spektralnego dla klas: piasek i woda. Im mniejsza wartość kąta (ciemniejszy kolor) tym bardziej dany piksel podobny jest, w sensie spektralnym, do wzorca klasy. W przypadku piasku uzyskano dobrą detekcję pikseli należących do klasy. W przypadku wody klasyfikacja nie dała spodziewanego wyniku.

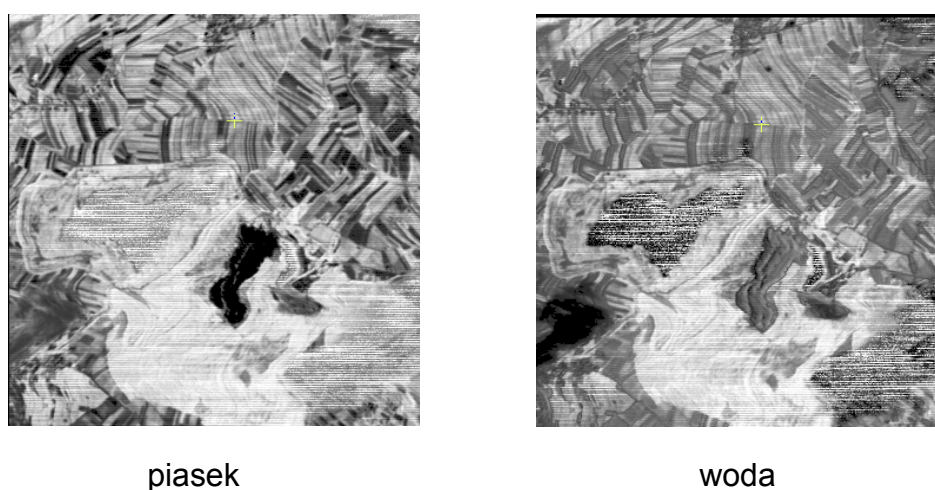


Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 31. Wynik klasyfikacji metodą SAM

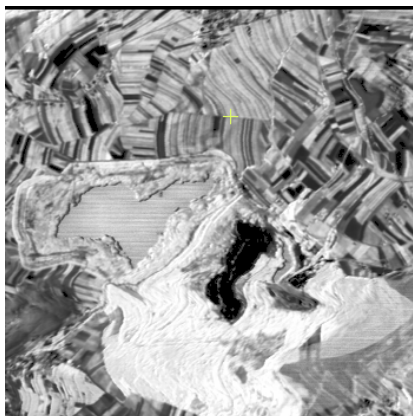
Wizualna ocena obrazów otrzymanych po klasyfikacji SAM pozwoliła na wysunięcie hipotezy, iż na wynik klasyfikacji wpływać może w znacznym stopniu obecność w klasyfikowanych kanałach spektralnych zakłócenia typu *stripping*. W kolejnym kroku przeprowadzono więc klasyfikację z pominięciem trzech kanałów skanera DAIS (41, 42, 70), w których zakłócenie to było silnie obecne. Otrzymane wyniki przedstawiono poniżej.



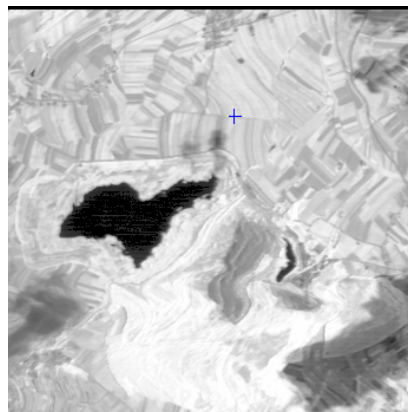
Rys. 32. Wynik klasyfikacji metodą SAM z pominięciem kanałów: 41, 42 i 70

Uzyskano poprawę wyników, jednak w przypadku wody otrzymany rezultat wciąż nie by zadowalający. Kolejne testowane rozwiązanie polegało na

przeprowadzeniu klasyfikacji SAM wyłącznie w oparciu o kanały 1-40. W tym przypadku otrzymano znacznie lepsze rezultaty.



piasek



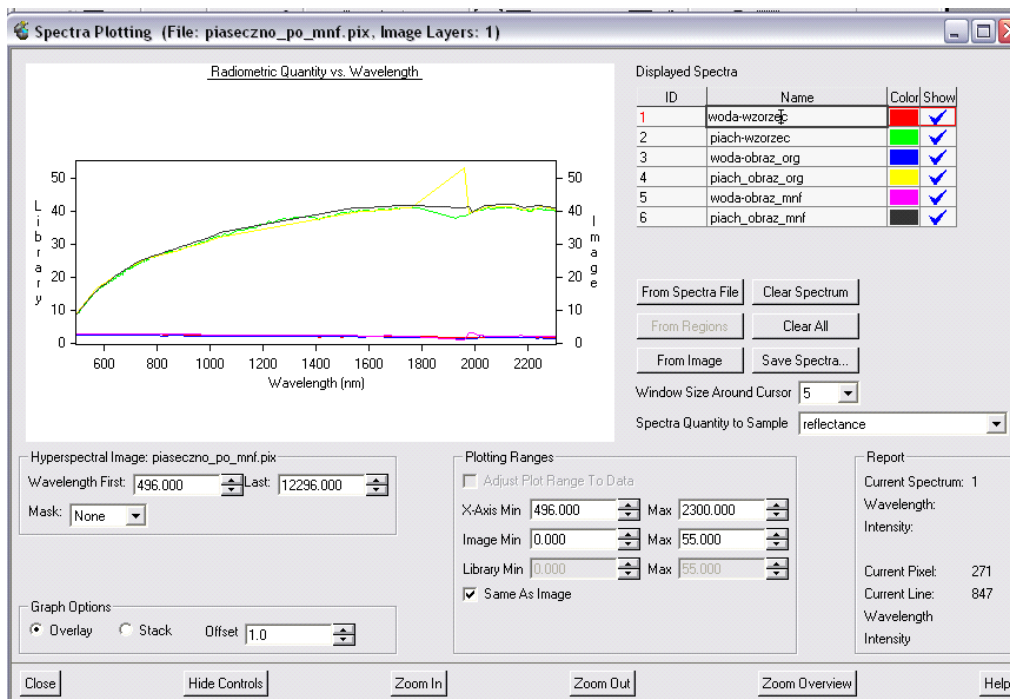
woda

Rys. 33. Wynik klasyfikacji metodą SAM tylko o kanały 1- 40.

Przeprowadzone badania uwidocznily wpływ zakłócenia typu *stripping* na wynik klasyfikacji metodą SAM. W kolejnym etapie badań przeprowadzono więc usunięcie tego zakłócenia przy wykorzystaniu metody MNF. Kanały 1-70 poddano transformacji MNF. Następnie dokonano wizualnej oceny obrazów uzyskanych po transformacji. Usunięto te z nich, w których lokowało się zakłócenie *stripping*, a nie była widoczna inna informacja. Pozostałe obrazy, w których widoczne było zakłócenie poddano filtracji uśredniającej i wykonano transformację odwrotną. Następnie uzyskane kanały poddano korekcji metodą *Empirical Line*.

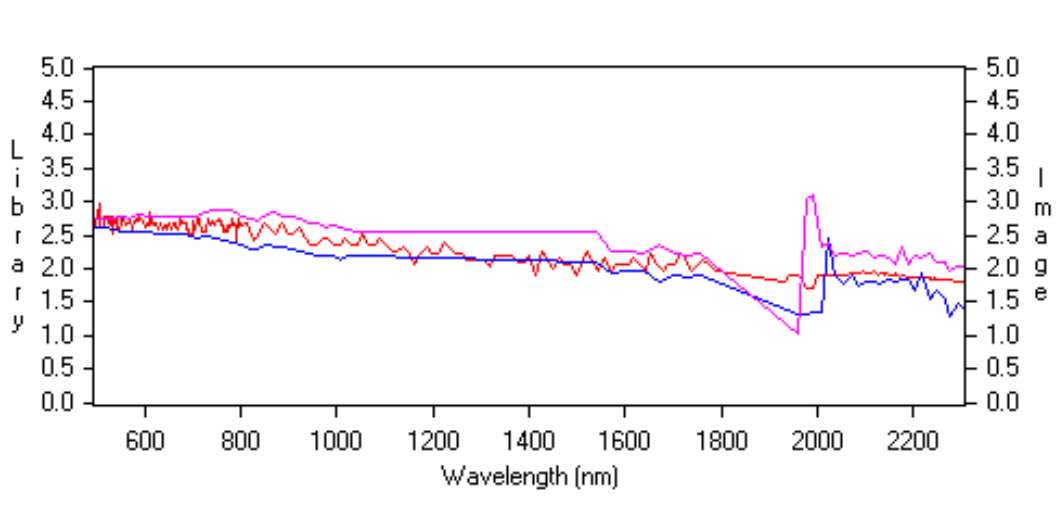
Poniższy rysunek przedstawia kształt krzywych spektralnych dla wody i piasku uzyskanych z poddanego korekcji obrazu hiperspektralnego oraz krzywych wzorcowych i krzywych dla obrazu hiperspektralnego nie poddanemu korekcji z wykorzystaniem metody MNF.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



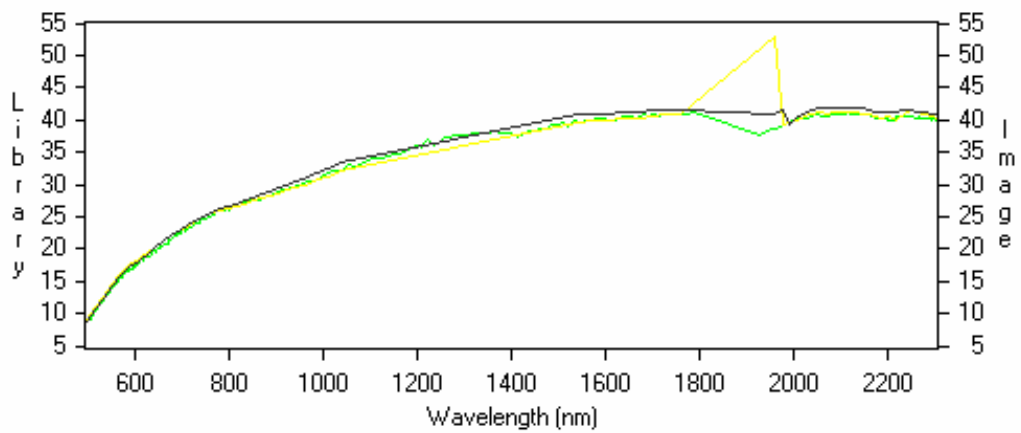
Rys. 34. Krzywe spektralne wody i piasku po kalibracji radiometrycznej metodą Empiric Line na obrazach wstępnie przetworzonych za pomocą metody MNF

Powiększenia poszczególnych krzywych spektralnych pozwalają dokładniej prześledzić występujące między nimi różnice.



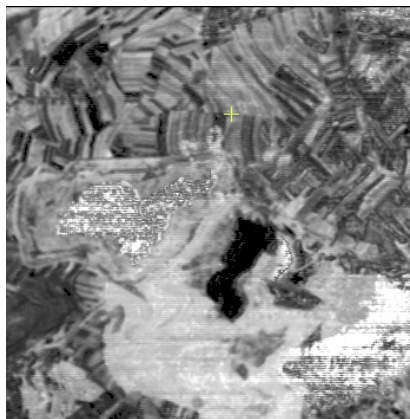
Rys. 35. Krzywe spektralne wody po kalibracji radiometrycznej metodą Empiric Line na obrazach wstępnie przetworzonych za pomocą metody MNF (powiększenie), (czerwona – wzorzec JPL, niebieska bez transformacji MNF, fioletowa z uwzględnieniem transformacji MNF)

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

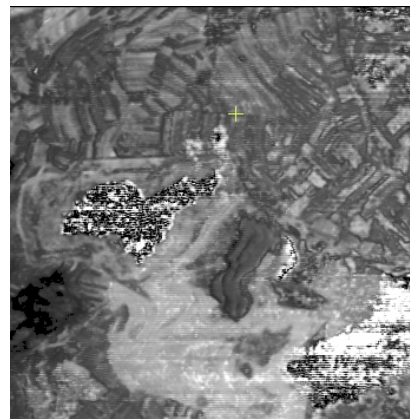


Rys. 36. Krzywe spektralne piasku po kalibracji radiometrycznej metodą Empiric Line na obrazach wstępnie przetworzonych za pomocą metody MNF (powiększenie), (zielona – wzorzec JPL, żółta bez transformacji MNF, czarna z uwzględnieniem transformacji MNF)

Uzyskane kanały poddano klasyfikacji SAM, tak jak kanały oryginalne. W tym przypadku dla otrzymania zadowalającego wyniku klasyfikacji wystarczyło usunięcie trzech kanałów (41, 42, 70), w których *stripping* był najmocniejszy.



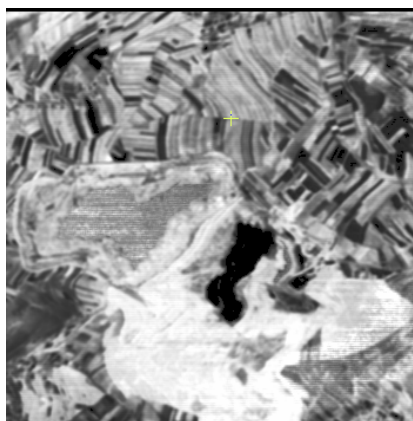
piasek



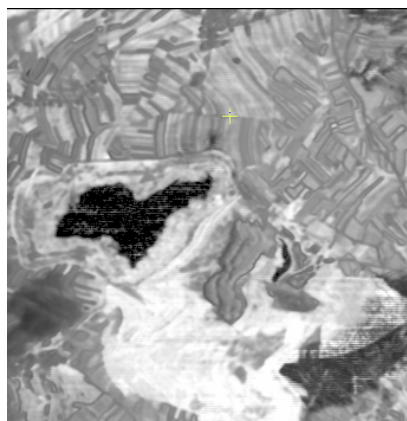
woda

Rys. 37. Wynik klasyfikacji SAM dla wszystkich kanałów (1-70)

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

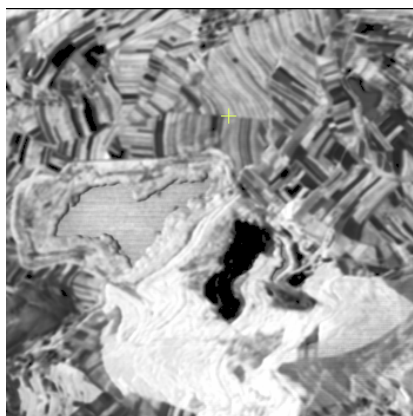


piasek

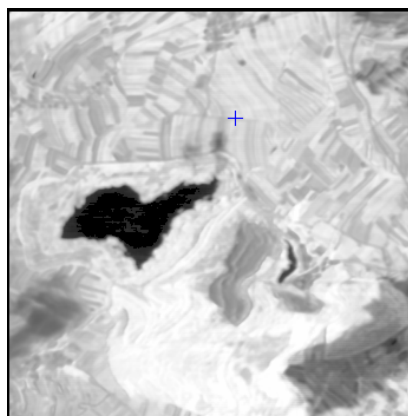


woda

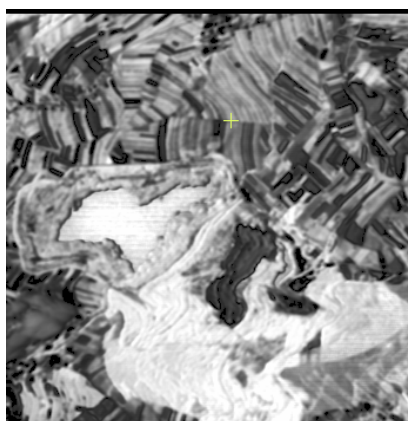
Rys. 38. Wynik klasyfikacji SAM dla kanałów :1-70, z wyłączeniem: 41, 42, 70.



piasek



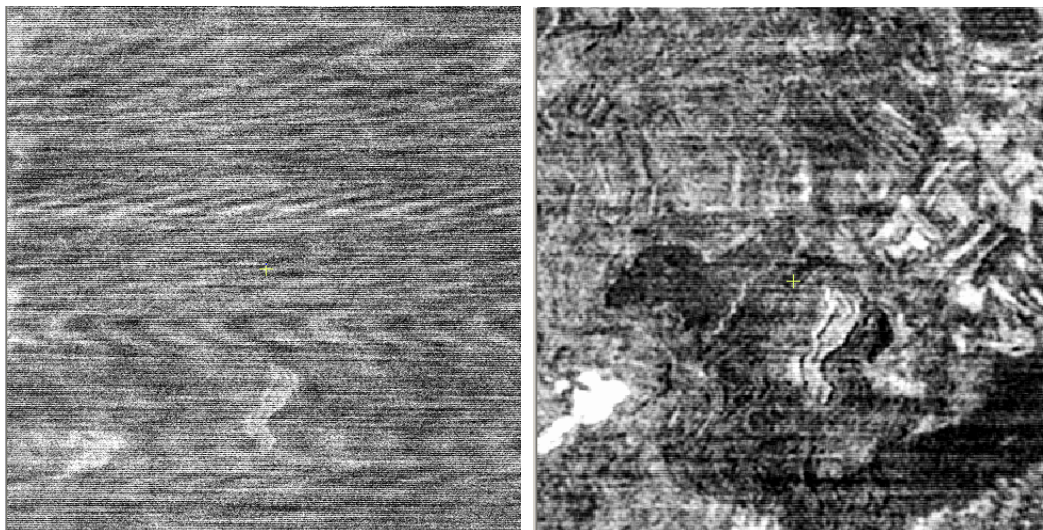
woda



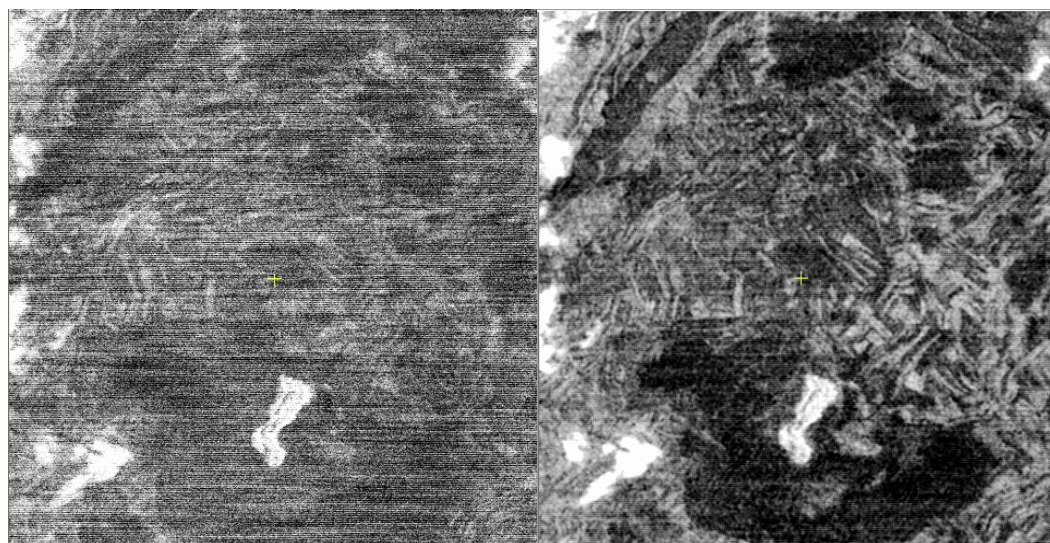
roślinność

Rys. 39. Wynik klasyfikacji SAM dla kanałów :1-40.

Poniżej przedstawiono porównanie kanałów spektralnych przed i po usunięciu *strippingu* z wykorzystaniem transformacji MNF

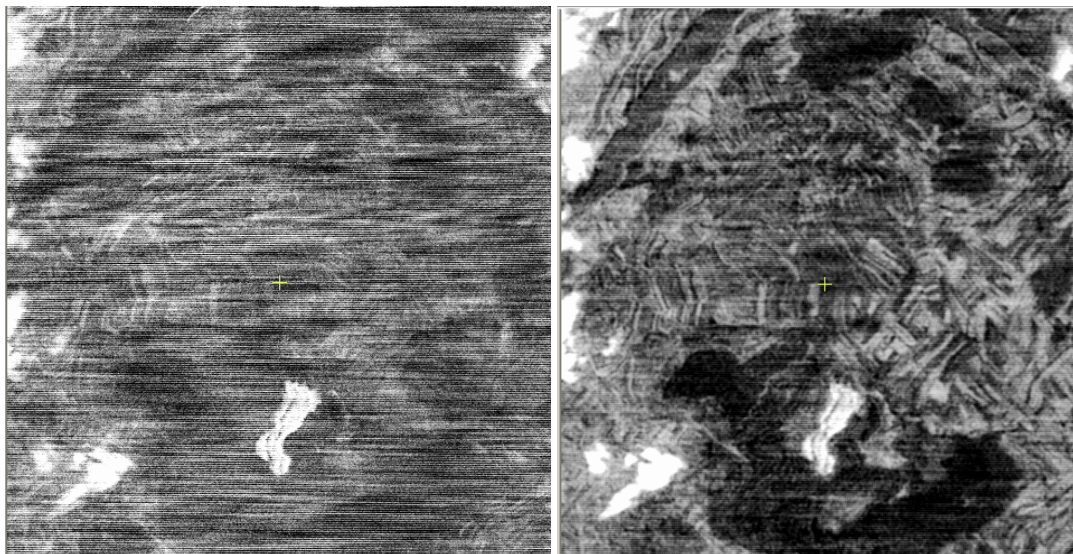


Rys. 40. Porównanie kanałów spektralnych przed i po usunięciu *strippingu* z wykorzystaniem transformacji MNF – kanał 41

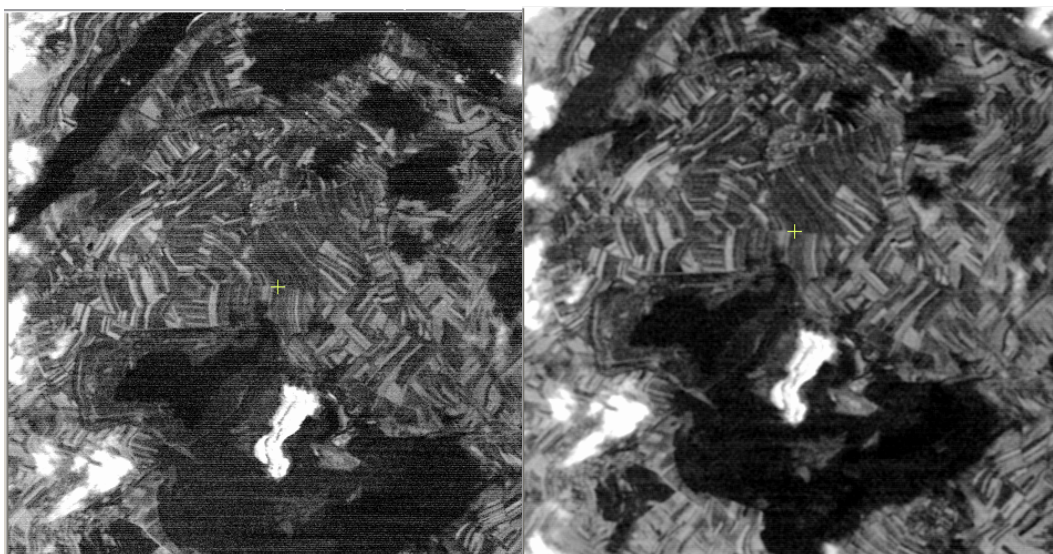


Rys. 41. Porównanie kanałów spektralnych przed i po usunięciu *strippingu* z wykorzystaniem transformacji MNF – kanał 42

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 42. Porównanie kanałów spektralnych przed i po usunięciu *strippingu* z wykorzystaniem transformacji MNF – kanał 70

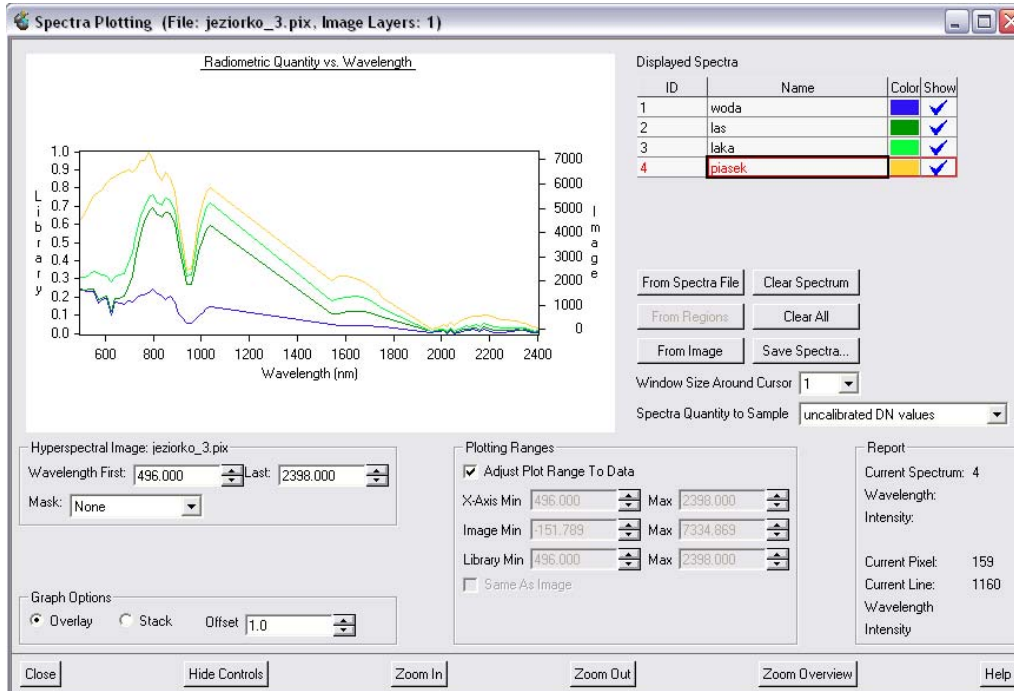


Rys. 43. Porównanie kanałów spektralnych przed i po usunięciu *strippingu* z wykorzystaniem transformacji MNF – kanał 44

W dalszej części badań przewidziano zastosowanie postępowania przetestowanego na obszarze Piaseczno do obrazu hiperspektralnego zarejestrowanego dla kopalni Jeziórko. Ze względu na podobny charakter zakłóceń (*stripping*) obraz ten poddano procedurze korekcyjnej z zastosowaniem transformacji MNF. Zachodziła również konieczność poddania

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

obrazu korekcji atmosferycznej (rysunek poniżej przedstawia krzywe spektralne dla obrazu przed korekcją atmosferyczną).

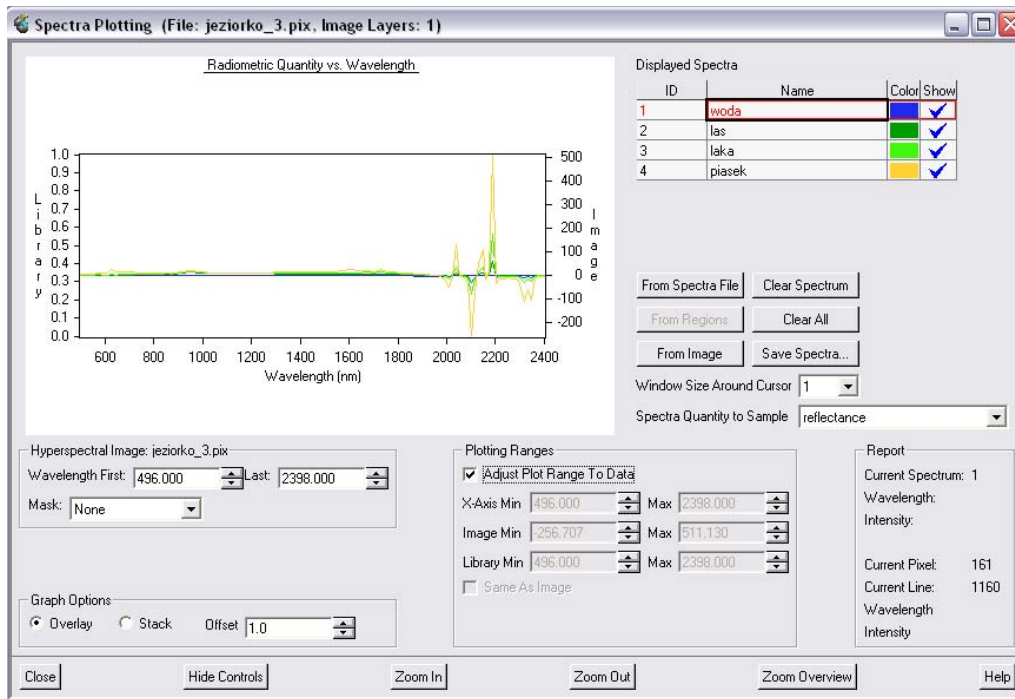


Rys. 44. Krzywe spektralne przed korekcją radiometryczną (niebieska – woda, ciemnozielona – las, jasnozielona – łąka, żółta – piasek)

Korekcję atmosferyczną przeprowadzono metodą *Empirical Line* w oparciu o krzywą spektralną wody (na obrazie nie dało się odnaleźć „czystych” obszarów piasku). Poniższy rysunek przedstawia krzywe spektralne uzyskane po korekcji.



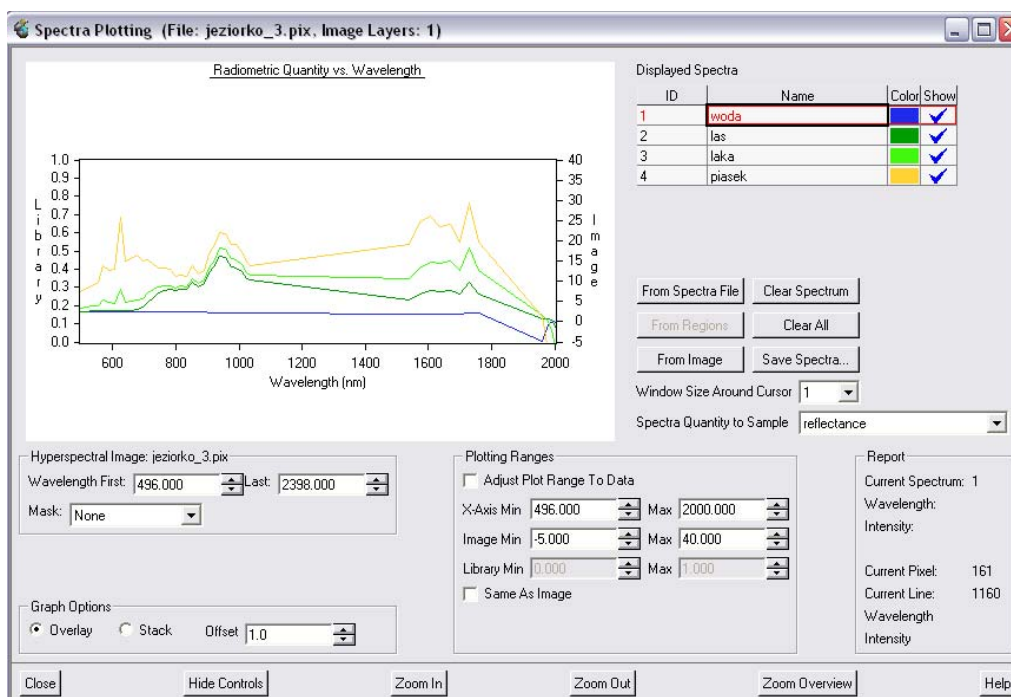
Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 45. Krzywe spektralne przed korekcją radiometryczną (niebieska – woda, ciemnozielona – las, jasnozielona – łąka, żółta – piasek)

Ze względu na zniekształcenia występujące w kanałach spektralnych o długości fali przekraczającej 2000 nm, dla lepszego porównania krzywych zwizualizowano je w ograniczonym zakresie długości fali.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 46. Krzywe spektralne przed korekcją radiometryczną (niebieska – woda, ciemnozielona – las, jasnozielona – łąka, żółta – piasek), w ograniczonym zakresie długości fali.

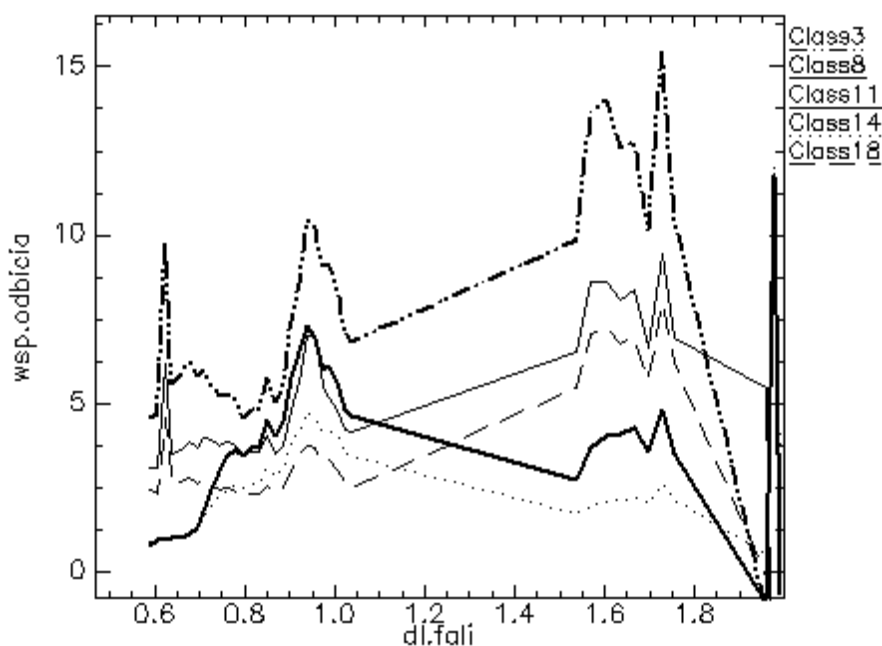
Niestety uzyskane krzywe spektralne wskazują, iż dokonana korekcja wpływu atmosfery nie przyniosła spodziewanego efektu. Osiągniętego rezultatu nie poprawiało również zastosowanie, poza krzywą wody, innych krzywych spektralnych (np. zielonej trawy czy betonu). Brak zadowalających efektów korekcji uniemożliwił w praktyce wykonanie klasyfikacji metodą SAM. Wskazywać to może na konieczność wykonania korekcji atmosferycznej inną metodą lub w oparciu o odpowiedni model atmosfery (np. przy użyciu dedykowanego lotniczym obrazowaniom hiperspektralnym modelu ATCOR4).

### 8.1.2 Analiza danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni za pomocą ENVI.

W celach porównawczych wykonano w programie ENVI, I analogiczne jak przeprowadzono za pomocą PCI, przetworzenia obrazowań DAIS w zakresie VNIR zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 5.5.1. Na Rys. 47 zamieszczono krzywe spektralne wybranych pięciu klas uzyskanych jako

*endmembers*. Klasy 11 i 14 reprezentują roślinność, a klasy: 3, 8, 18 grunt odkryty. Generalnie przebieg krzywych spektralnych, po mimo korekcji radiometrycznej jest zniekształcony w stosunku do krzywych spektralnych wzorcowych (np. z biblioteki JPL). Przebieg krzywych roślinności (klasy 11 i 14) jest, jeśli chodzi o charakterystyczny pik w podczerwieni bliskiej (ok. 0.9  $\mu\text{m}$ ) jest poprawny. Ponadto przebieg obu tych te krzywych różni się od pozostałych krzywych. Niestety pozostałe krzywe (klasy: 3, 8 i 18) nie dają się zinterpretować:

- Nie są podobne do wzorców (por. Rys. 18).
- Ich przebiegi są podobne, co uniemożliwia zastosowanie analizy zmian w głębokościach pików.



Rys. 47. Krzywe spektralne roślinności (klasy 11 i 14) oraz gruntów odkrytych.

### 8.1.3 Wnioski z analizy danych hiperspektralnych w zakresie fal widzialnych i bliskiej podczerwieni.

Analizę danych ze skanera DAIS przeprowadzono za pomocą oprogramowania ENVI i PCI. Sposób przetworzenia obrazowania DAIS przetestowano w rejonie Piaseczna wykorzystując obiekty referencyjne: wodę

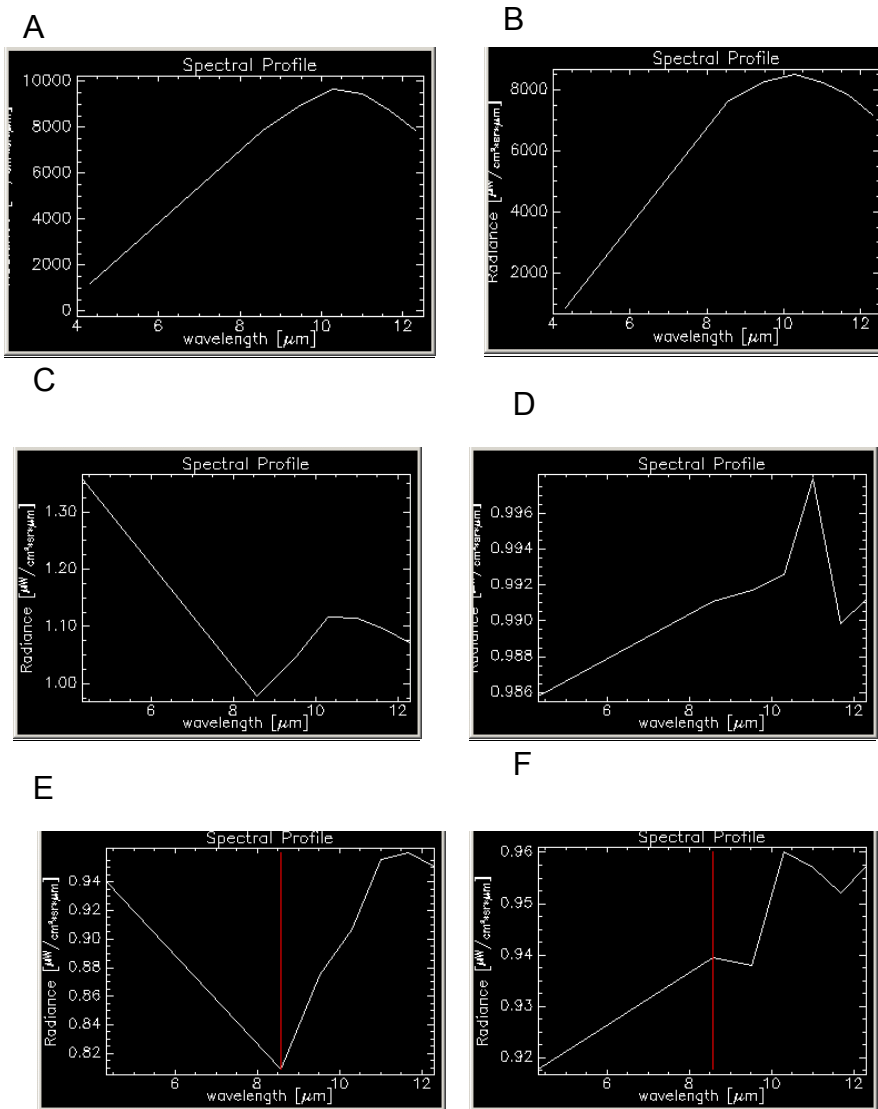
i piasek. Wstępna kalibracja pozwoliła na uzyskanie zadawalająco podobnych krzywych spektralnych dla wody i dla piasku ze obrazowania DAIS do krzywych spektralnych biblioteki JPL. Przeprowadzone na tak skalibrowanych obrazach przetworzenia właściwie, oparte o metodę SAM dało zadawalające wyniki dla Piaseczna po wcześniejszej kilkukrotnej redukcji liczby wykorzystywanych kanałów, w których obserwowano zakłócenia. Próba przeniesienia opracowanej w referencyjnym obszarze Piaseczna metodyki przetwarzania obrazowania DAIS na obszar Jeziorka zakończyła się niepowodzeniem. Nie udało się wydzielić za pomocą analizy wzorcowych krzywych spektralnych obiektów podobnych do wzorców.

## **8.2 Analiza danych hiperspektralnych w podczerwieni średniej i termalnej.**

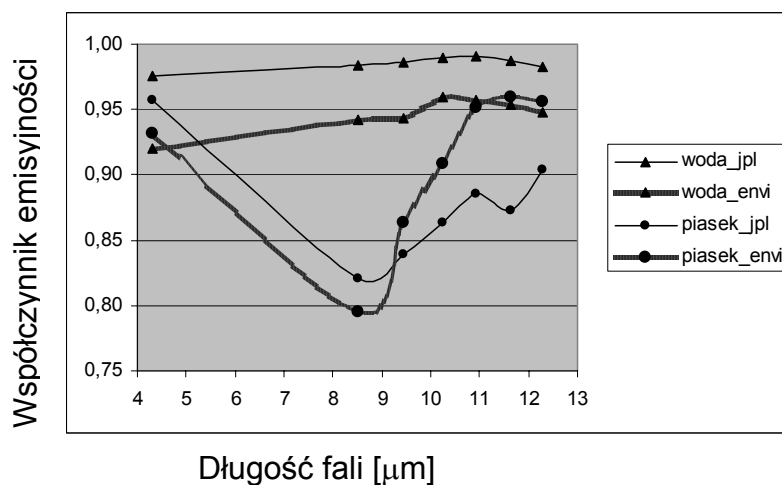
Oprogramowanie PCI nie posiada procedur umożliwiających przetwarzanie obrazowań w podczerwieni termalnej. W związku z tym przetwarzanie w tym zakresie fal przeprowadzono za pomocą ENVI.

Wykorzystano również rejon Piaseczna do kalibracji metodyki przetwarzania, którą później wykorzystano w przetworzeniu obrazowań z Jeziorka.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 48. Zależność promieniowania elektromagnetycznego (przed korekcją) od długości fali, (A – piasek, B - woda), po korekcji *Flat Field* (C – piasek, D – woda), po korekcji *In-Scene Correction + Emissivity Normalisation* (E – piasek, F – woda).



Rys. 49. Zależność współczynnika emisyjności od długości fali dla wody i piasku; porównanie danych z JPL z wartościami uzyskanymi w wyniku przetwarzania danych hiperspektralnych DAIS za pomocą programu ENVI.

Interpretacja danych surowych, bez wstępnego przetworzenia danych, nie jest możliwa. Przebieg krzywych spektralnych odzwierciedla głównie wpływ innych czynników niż samego obiektu. Niezależnie od obiektów, nawet tak różnych jak piasek i woda, charakter krzywej spektralnej jest bardzo podobny, tylko przesunięty względem osi Y. W związku z tym obrazowania poddano wstępnej korekcji metodą *Flat Field*, uzyskując w wyniku skorygowane krzywe spektralne (Rys. 48 C, D). Po korekcji widoczne są różnice przebiegu krzywych spektralnych dla obu wzorcowych obiektów, włącznie z charakterystycznym pikiem pochodzącym od krzemionki dla ok. 8,5 μm. Korekcję przeprowadzono również metodą *In-Scene Correction*, a następnie wynik poddano procedurze separacji emisyjności i temperatury za pomocą metody: *Emissivity Normalization*. Ostatecznie uzyskano zależność współczynnika emisyjności od długości fali dla piasku i wody (Rys. 48 E i F). Następnie porównano uzyskane dla wody i piasku wartości współczynnika emisyjności z danymi z biblioteki JPL. Jak widać na rysunku (Rys. 49) przebiegi zależności obu współczynników emisyjności od długości fali są podobne. Kształt krzywej dla wody w obu przypadkach jest bardzo zbliżony w całym zakresie TIR (współczynnik korelacji 0,94). Dla piasku kształt krzywej

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)

jest dla długości fali  $< 8.5 \mu\text{m}$  bardziej, a dla długości fali  $> 8.5 \mu\text{m}$  mniej zbliżony do krzywej z biblioteki JPL (współczynnik korelacji – 0.70).

Przetestowany sposób przetwarzania danych hiperspektralnych DAIS na obszarze wzorcowym Piaseczno zastosowano do przetwarzania obrazowań w Jeziórku.

## **9. Optymalizacja metody przetwarzania obrazów hiperspektralnych w oparciu o naziemne pomiary spektrometryczne z uwzględnieniem problemu generalizacji występującej na obrazach o różnej rozdzielczości przestrzennej i spektralnej.**

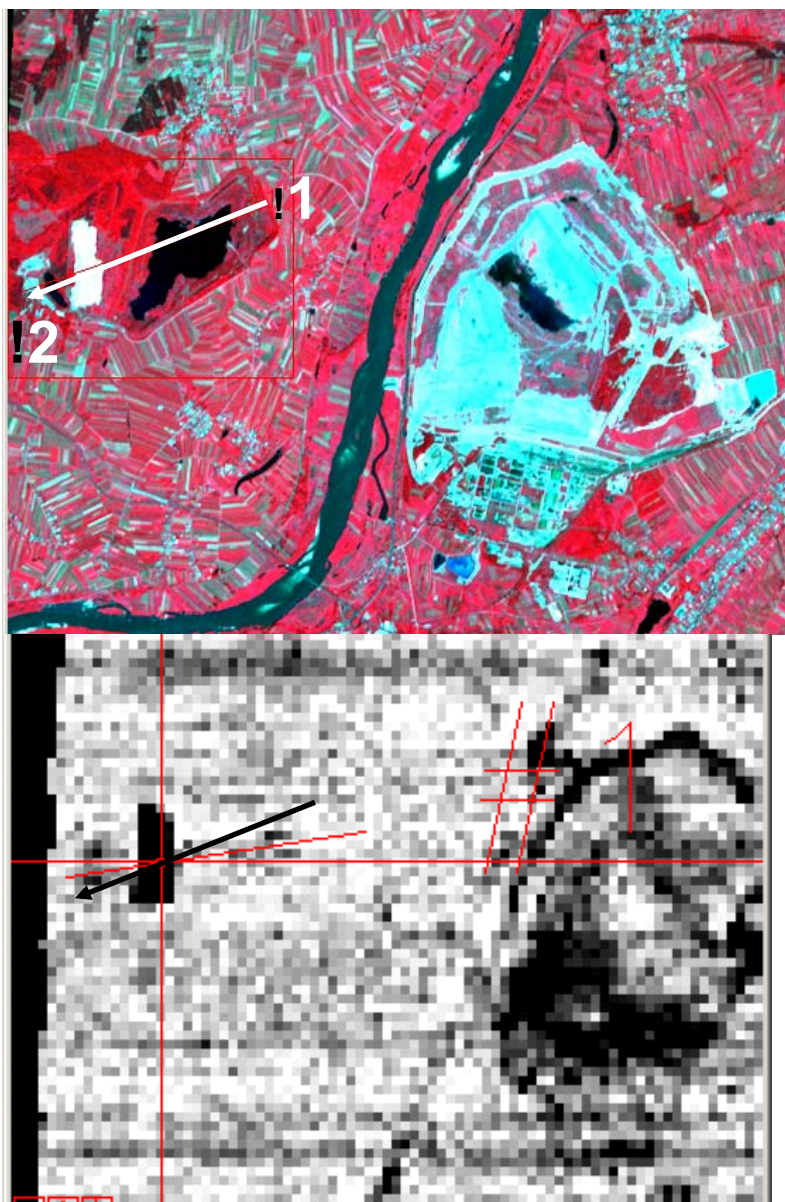
---

Wybór metody przetwarzania obrazów hiperspektralnych zależy zarówno od zjawiska, które jest przedmiotem detekcji jak i wykorzystywanego do detekcji systemu skanerowego. Zjawisko musi być mierzalne za pomocą metod teledetekcyjnych, czyli badane obiekty lub cechy obiektów muszą różnicować się od tła. Ponadto, to zróżnicowanie musi być możliwe do zaobserwowania przez wykorzystywany system skanerowy (spektralna zdolność rozdzielcza). W detekcji zjawiska lub obiektu istotna jest również przestrzenna zdolność rozdzielcza. Dla porównania wpływu przestrzennej i spektralnej zdolności rozdzielczej zobrażenia wykonano profile spektralne przez charakterystyczne obiekty w obszarze referencyjnym: Piaseczno (Rys. 50 - Rys. 53). Na Rys. 50A znajduje się kompozycja w barwach umownych ASTER a na Rys. 50 B rozkład współczynnika emisyjności ASTER. Na Rys. 51 A zamieszczono zmianę współczynnika odbicia wzdłuż linii profilowej, a na Rys. 51 B zmianę współczynnika emisyjności wzdłuż tej linii profilowej. Zobrazowania w barwach umownych i rozkład współczynnika emisyjności DAIS zamieszczono na Rys. 52, a zmienność współczynników odbicia i emisyjności wzdłuż linii profilowej na Rys. 53. Rozdzielczość przestrzenna objawia się większą fluktuacją wartości współczynników wzdłuż linii profilowej DAIS niż ASTER, co wynika z 5-ciokrotnie większej rozdzielczości. Ponadto na uwagę zasługuje fakt różnych wartości tych współczynników. Analizując współczynniki emisyjności ASTER i DAIS na Rys. 51 B i Rys. 53B można zauważyć, że w obu przypadkach wartość tego współczynnika dla wody wynosi ok. 0.96. W przypadku piasku współczynnik emisyjności zmienia się w zależności od kanału spektralnego dla: ASTER – od 0.5 do 0.53, a dla DAIS – od 0.8 do 0.93. Fakt ten wynika z innego zakresu spektralnego ASTER i DAIS



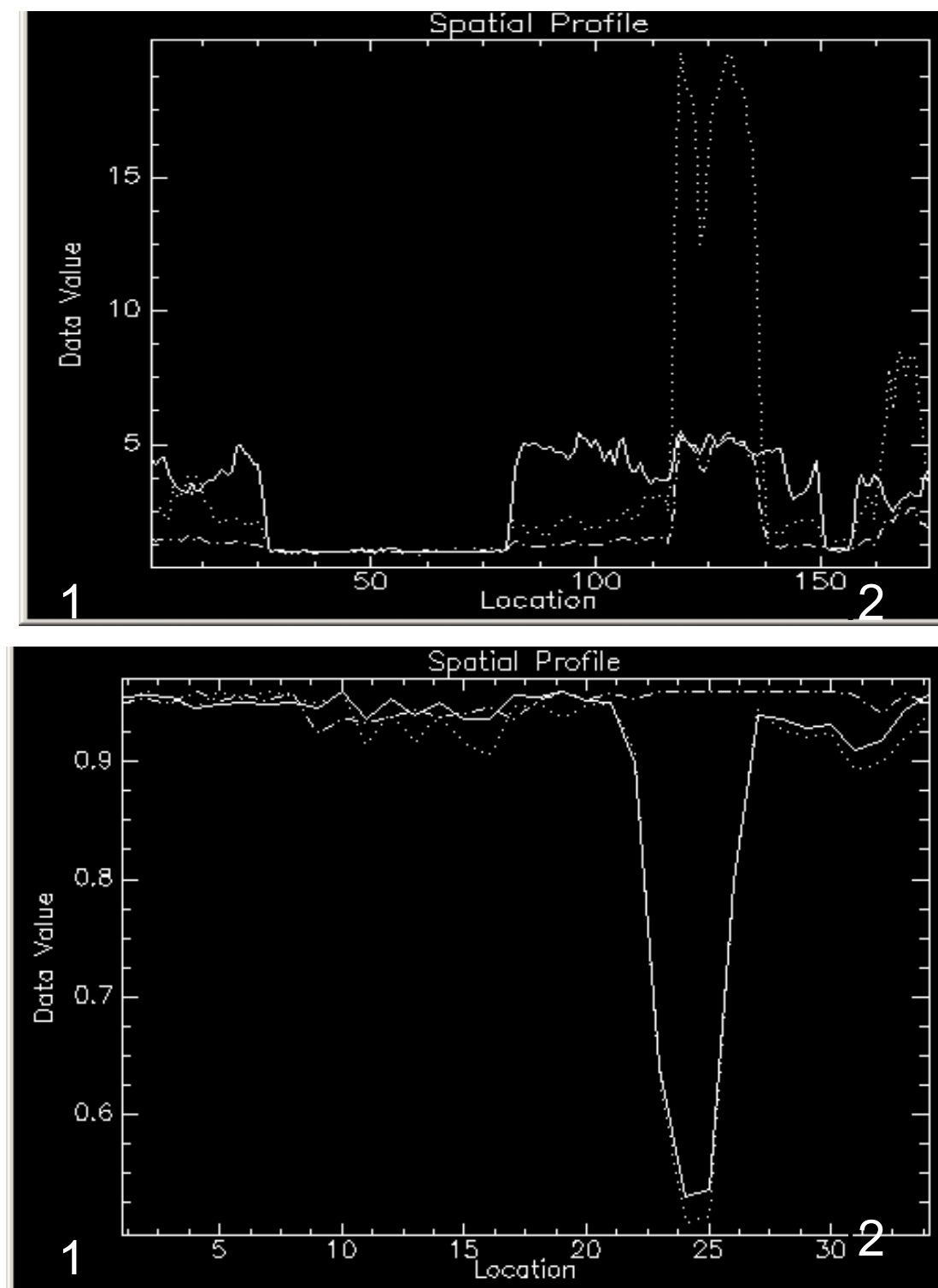
(Rys. 54. Na osi odciętych wykresów znajduje się numer kanału, a na osi rzędnych długość fali w  $\mu\text{m}$ . Porównując zakresy DAIS i ASTER można zauważyć, że DAIS ma, co prawda więcej kanałów (7), ale o szerszych zakresach spektralnych niż ASTER, który ma tylko 5 kanałów. Oznacza to, że w przypadku obrazowania DAIS następuje w większym stopniu uśrednienie odpowiedzi spektralnej w porównaniu do obrazowania ASTER. Zakresy DAIS w dużym stopniu nachodzą wzajemnie na siebie. Zakresy ASTER są wąskie, co z kolei powoduje, że są zakresy, w których w ogóle nie następuje rejestracja. Piki w krzywych spektralnych są z reguły wąskie i jeśli tylko znajdują się w zakresie rejestracji ASTER mogą zostać wykorzystane do detekcji danego zjawiska. Tłumaczy to fakt, że obliczony w oparciu o obrazowanie ASTER pik związany z krzemionką w krzywej spektralnej dla piasku jest w tym przypadku większy i bardziej adekwatny do wyniku uzyskiwanego za pomocą spektrometru, niż obliczony w oparciu o obrazowanie DAIS.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



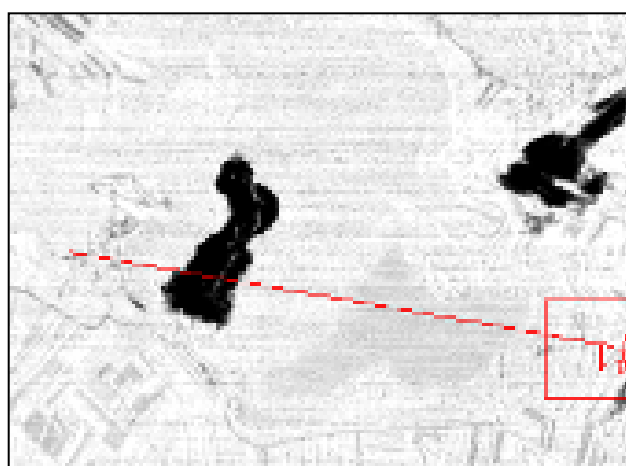
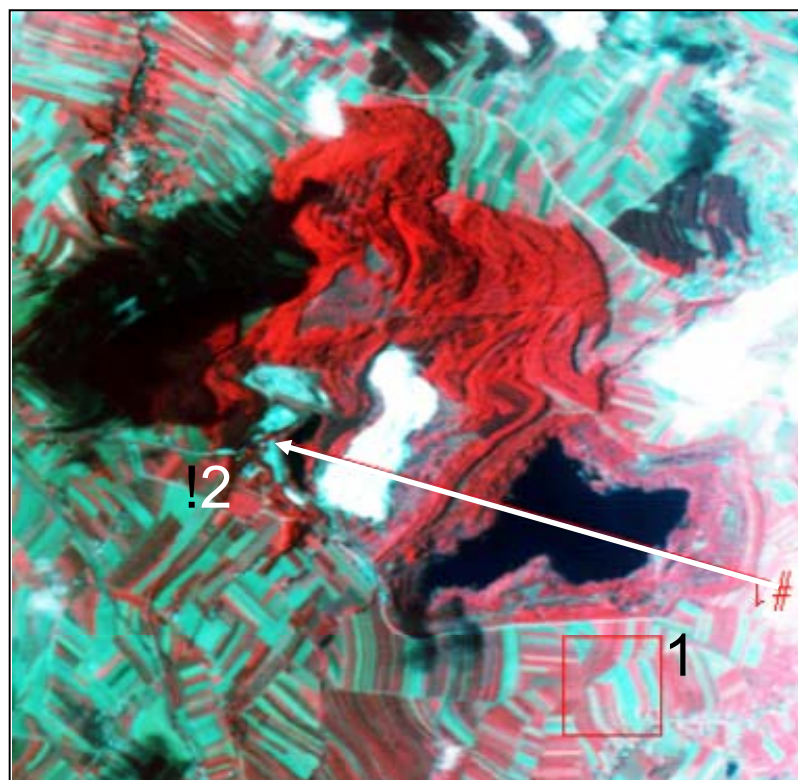
Rys. 50. Linia profilowa – ASTER, VNIS i TIR

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



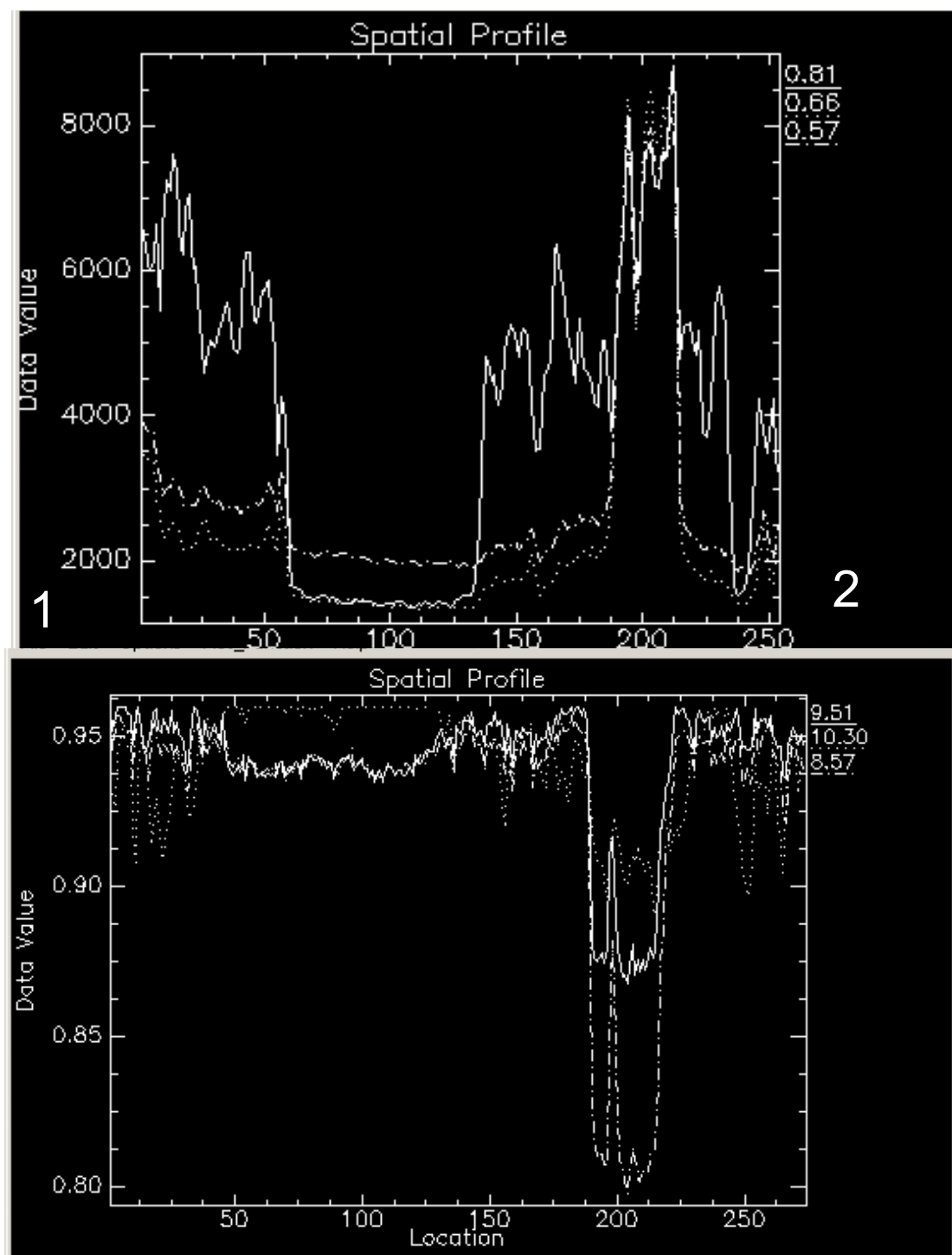
Rys. 51. Profil – ASTER (górnny-VNIR, dolny-TIR)

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych zobrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

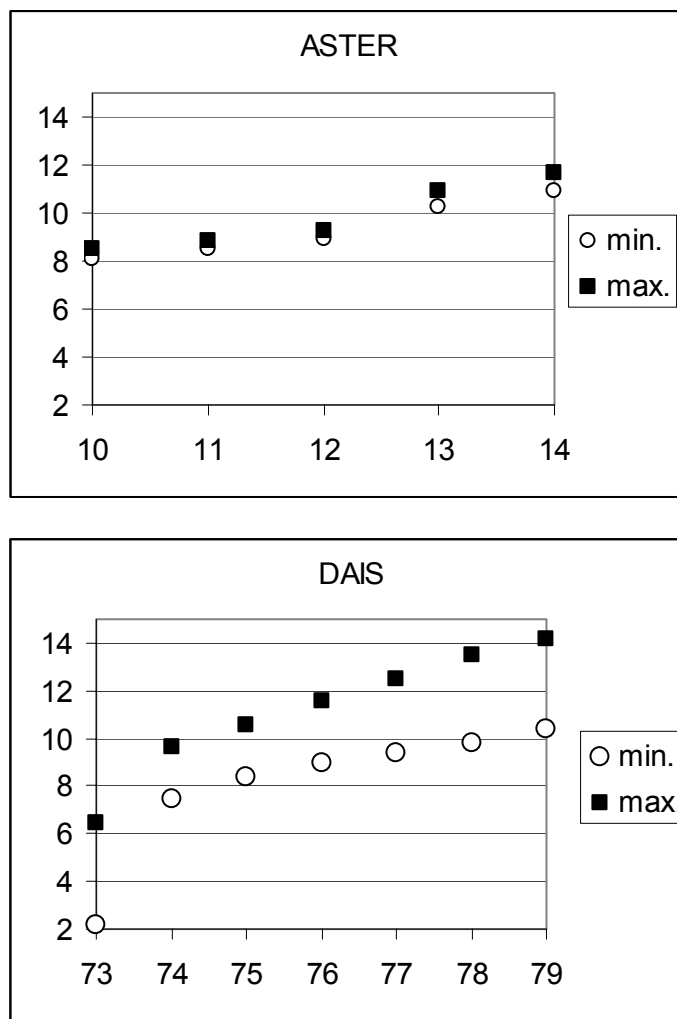


Rys. 52. Linia profilowa – DAIS, VNIS i TIR

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 53. Profil – DAIS (górnny-VNIR, dolny-TIR)



Rys. 54. Szerokości spektralne kanałów ASTER i DAIS AIDS zakresie TIR

## 9.1 Badanie efektywności wykorzystania pomiarów spektrometrycznych w celu kalibracji obrazowań hiperspektralnych.

Analizę obrazowań hiperspektralnych z wykorzystaniem pomiarów spektrometrycznych przeprowadzono za pomocą oprogramowania: ENVI wykorzystując dedykowane do tego celu procedury.

### 9.1.1 Analizy z wykorzystaniem procedur oprogramowania: ENVI

Przed przystąpieniem do wykonywania właściwych analiz obrazowań hiperspektralnych, których celem jest ekstrakcja informacji tematycznej należy koniecznie przeprowadzić korekcję zakłócającego wpływu atmosfery

(algorytmy wykorzystywane do tego celu omówiono w rozdziale 5.5.1, a praktyczny przykład obrazowań przed i po korekcji zamieszczono w rozdziale 8). W przypadku przetwarzania obrazowań w kanałach VNIR i częściowo SWIR nie uzyskano zadowalającego wyniku dla testowego obszaru w Jeziórku, tzn. nie uzyskano podobieństwa krzywych spektralnych pomierzonych spektrometrycznie z krzywymi spektralnymi uzyskanymi w oparciu o obrazowanie DAIS. Wniosek powyższy został sformułowany w rozdziale 8. Przedziałem bardziej odpowiednim wydaje się być przedział TIR, w związku z tym badanie efektywności wykorzystania pomiarów spektrometrycznych w celu kalibracji obrazowań hiperspektralnych przeprowadzono w tym zakresie fal.

W ramach prac badawczych przeprowadzono analizy obrazowań DAIS zgodnie z wyżej opisanymi metodami przyjmując krzywe spektralne wzorców : piasku, siarki oraz uzyskane w wyniku pomiaru *in situ*. Żadną z metod nie uzyskano zadowalającego wyniku.

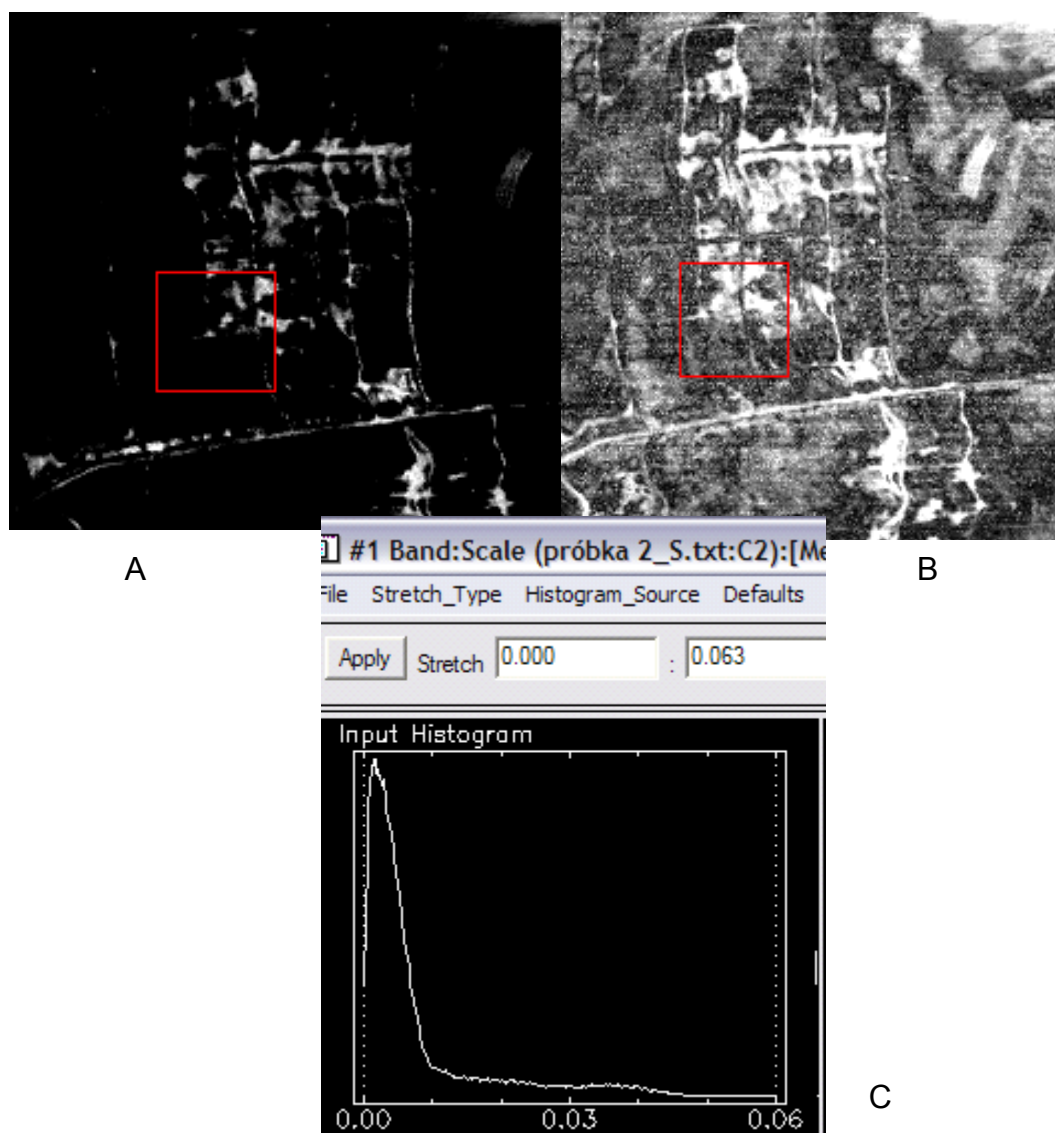
Przykładowe wyniki transformacji metodą SFF, w celu porównania współczynnika emisyjności z wzorcem siarki, znajdują się na Rys. 55. Na rysunku pokazano stopień i błąd dopasowania, oraz histogram stopnia dopasowania. Jak widać z histogramu stopień dopasowania oznacza brak dopasowania wartości emisyjności ze obrazowania do krzywych spektralnych siarki. Na Rys. 56 znajduje się obraz stopnia dopasowania do wzorca piasku oraz histogramy stopnia dopasowania i błędu stopnia dopasowania. W tym przypadku wyznaczone obszary wykazują odpowiedni stopień dopasowania (zaznaczono obszary o wartości stopnia dopasowania 0.8-1) i mały błąd dopasowania. Przeprowadzono podobne testy dla innych wzorców, prób i pól elementarnych mierzonych *in-situ*. Dla różnych prób i prób elementarnych uzyskiwano duży stopień dopasowania i mały błąd, ale przestrzenie obszary te nie uzupełniały się a nakładały na siebie.

Przeprowadzono testowanie za pomocą metody SA i SU uzyskując podobne wyniki jak za pomocą metody SFF.

Podsumowując, uzyskane wyniki, zarówno z standardowej metody przetwarzania danych hiperspektralnych w ENVI, jak i z wykorzystaniem

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

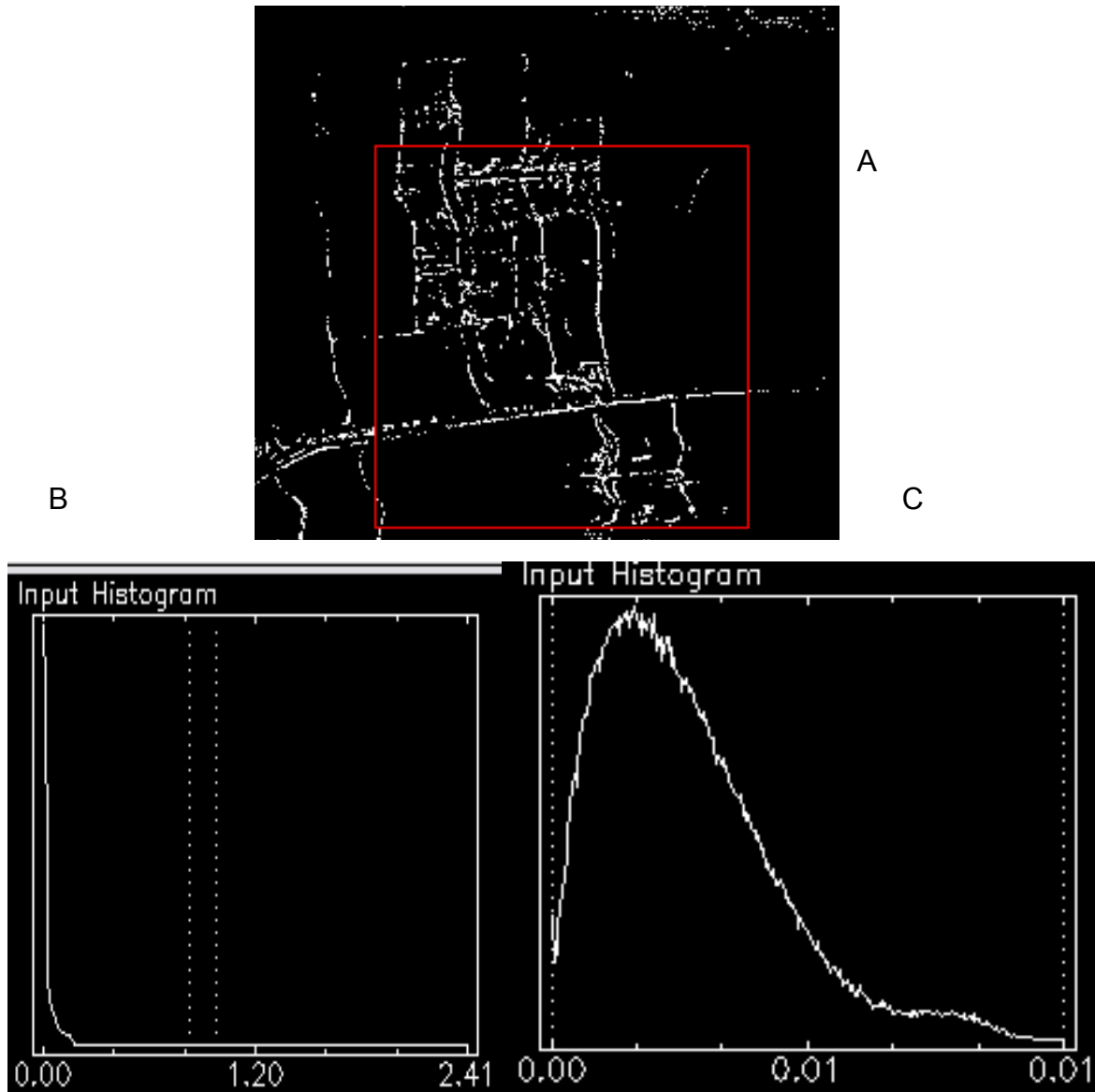
specjalistycznych algorytmów były niezadowalające. W związku z tym przystąpiono do prób zaproponowania innego sposobu przetworzenia tych danych.



Rys. 55. Wynik przetwarzania metodą SFF (porównanie z wzorcem siarki), A - stopień dopasowania, B - błąd, C - histogram stopnia dopasowania



Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



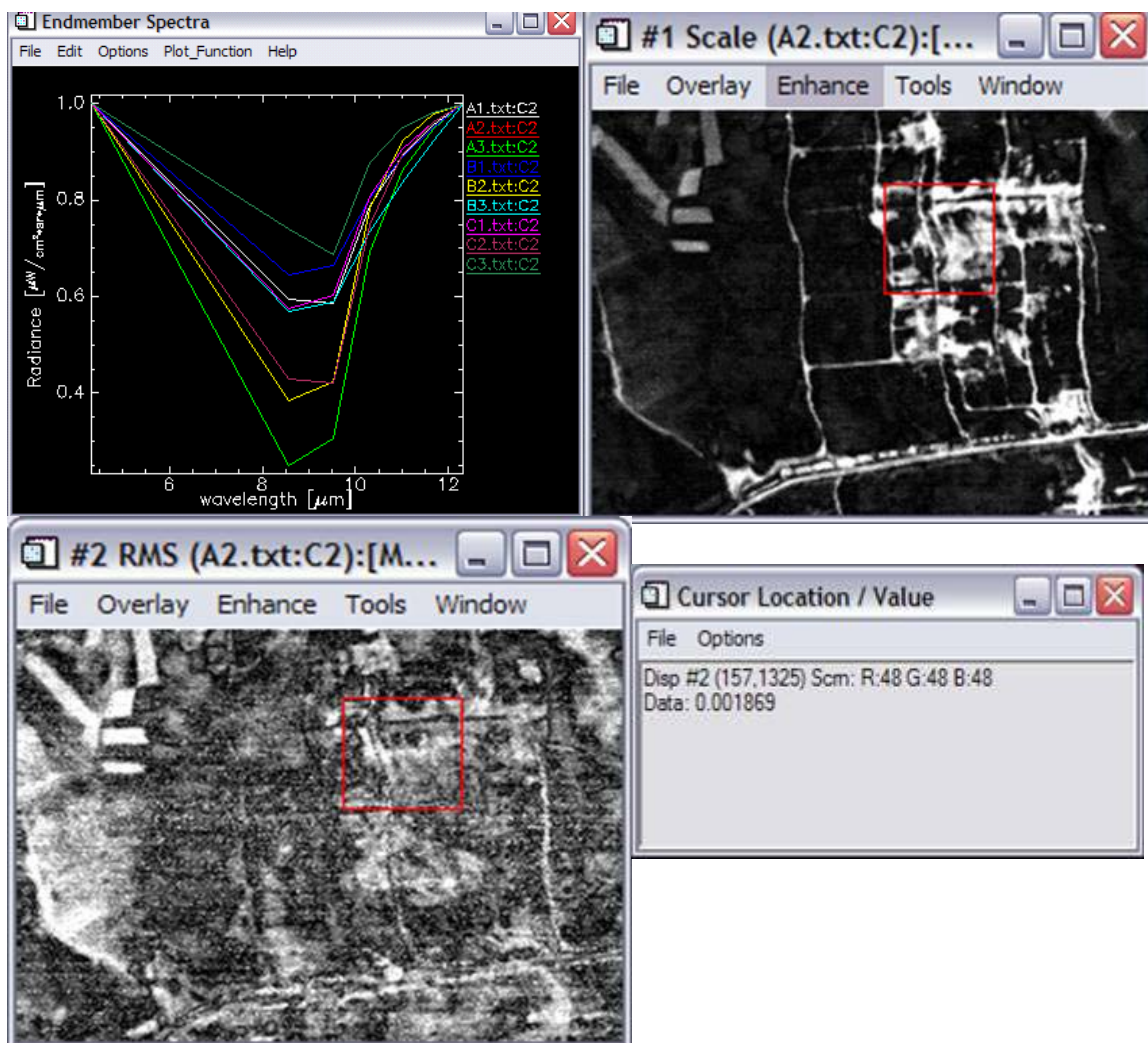
Rys. 56. Wynik przetwarzania metodą SFF (porównanie z wzorcem piasku), A - stopień dopasowania, B – histogram stopnia dopasowania, C - histogram błędu dopasowania

Analizowane krzywe spektralne były pomierzone dla tych samych gruntów, dla których wykonane zostało obrazowanie DAIS, co oznacza, że muszą być one wzajemnie do siebie podobne, niezależnie od tego czy uzyskano zadawalający wynik dokonując przetworzeń standardowymi metodami ENVI czy uzyskane wyniki nie są zadawalające. Po szczegółowej analizie krzywych spektralnych wzorców, wyników pomiarów spektrometrycznych *in situ* oraz wykonanych w laboratorium na próbach pobranych w terenie przeprowadzono próbę analizy zmian głębokości pików charakterystycznych dla krzemionki ok. 9

$\mu\text{m}$ . Analizując obrazowanie DAIS jedynie w kanale 74 można zauważyć zmianę głębokości pików dla pola testowego w Jeziórku (Rys. 58 po prawej). Kolory krzywych na wykresie odpowiadają kolorom na obrazie pola testowego w Jeziórku, po prawej. Kolorem niebieskozielonym zaznaczono obszary o największym współczynniku emisyjności w kanale 74 DAIS (por. krzywą spektralną na (Rys. 58)). Kolorem czerwonym zaznaczono obszary, dla których pik w tym kanale jest najgłębszy. Kolorem niebieskim i żółtym obszary charakteryzujące się stopniowym zmniejszaniem się tego pików.

Analizując wynik klasyfikacji metodą analizy głębokości pików w kanale 74 DAIS w porównaniu z klasycznym indeksem wegetacji (Rys. 59) postawiono hipotezę, że zmiana emisyjności w tym kanale jest spowodowana roślinnością. Kolor niebieskozielony na (Rys. 59 po lewej) odpowiada obszarom pokrytym roślinnością, a kolor czerwony gruntom całkowicie odkrytym. Kolorem granatowym i żółtym przedstawione są grunty z odpowiednio mniejszym i większym stopniem pokrycia roślinnością.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzezkiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)

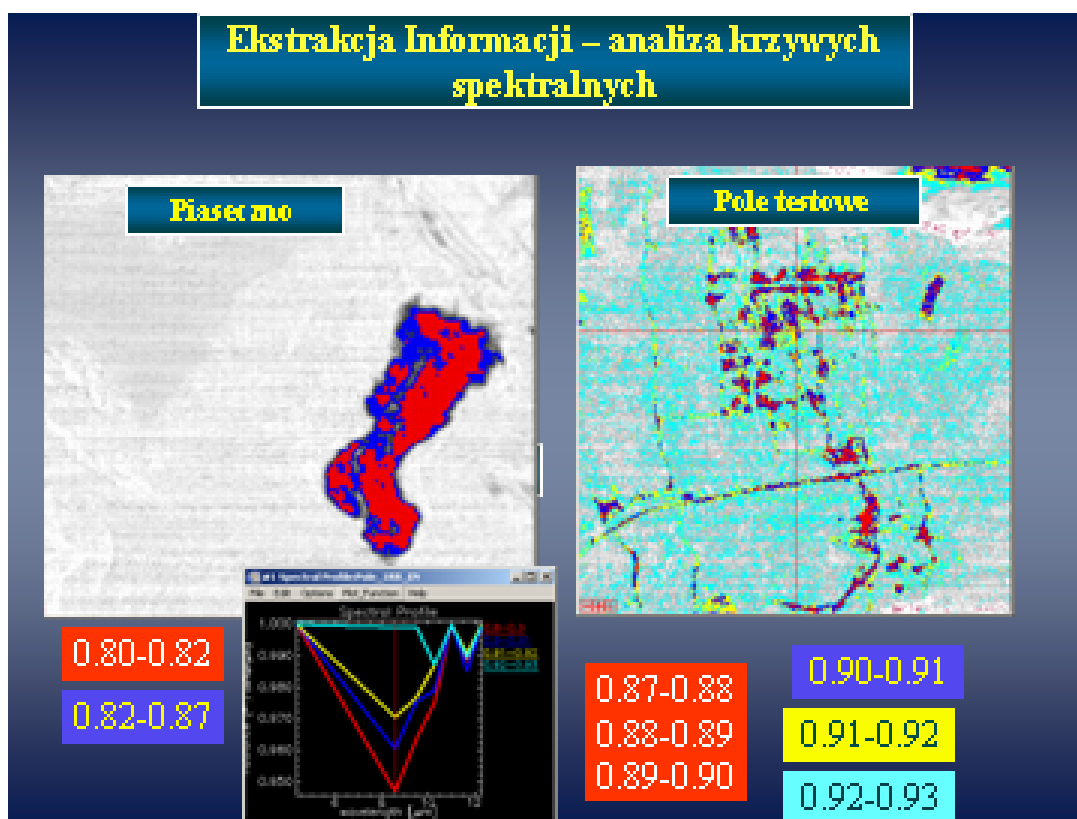


Rys. 57. Metoda dopasowania charakterystyk spektralnych (SFF). Współczynnik emisyjności dla wszystkich pól elementarnych pola A2. Stopień dopasowania, błąd dopasowania i wartości błędu dopasowania.

Podsumowując, można stwierdzić, że w obecnym stanie, w kopalni Jeziórko nie można wydzielić obszarów zanieczyszczonych siarką bezpośrednio poprzez detekcję ilości siarki w gruncie. Zanieczyszczenie gruntu siarką powoduje jego zakwaszenie, co z kolei uniemożliwia rozwój roślinności. Im więcej siarki w gruncie tym mniejsze szanse na pojawienie się tam roślinności. Roślinność może w tym przypadku być pośrednim wskaźnikiem zanieczyszczenia gruntu.

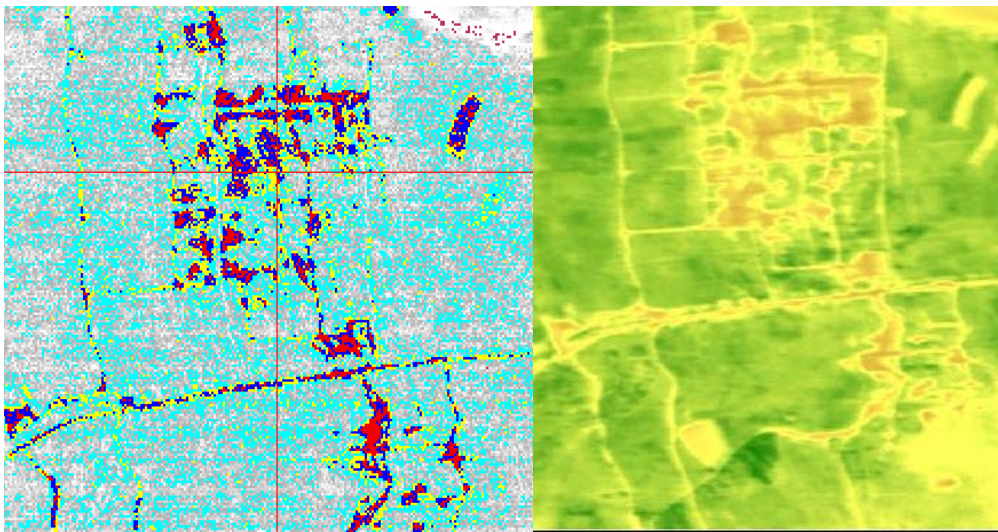
Głębokość piksu od krzemionki (niezanieczyszczonej siarką, w Piasecznie) wynosi średnio 0.16 (por. Rys. 58 po lewej). Głębokość piksu gruntu całkowicie odkrytego w rejonie Jeziórka (por. Rys. 58 po prawej) wynosi średnio 0.12.

Analizując głębokości pików na obrazowaniu DAIS (Rys. 58), w kontekście głębokości pików z pomiaru *in situ* (Rys. 24) można stwierdzić, że 0.16 odpowiada rzeczywiście gruntowi nie zanieczyszczonego siarką. Głębokość pików równa 0.12 odpowiada przedziałowi 10-20% siarki (można by podać wartość dokładniejszą np. w oparciu o prostą regresji, lecz jej wiarygodność nie byłaby zbyt wysoka). Średnia zawartość siarki w pobranych do oznaczeń laboratoryjnych próbach wynosiła 17%. Można więc zaryzykować wniosek, że ogólnie w obszarach, dla których głębokość pików wynosi średnio 0.12 zanieczyszczenie gruntu waha się od 10-20% (kolor czerwony na Rys. 59 z lewej)



Rys. 58. Analiza zmian głębokości pików w kanale 74 DAIS (po lewej dla Piaseczna, po prawej dla obszaru testowego w Jeziórku), Na wykresie krzywe charakterystyczne odczytane ze obrazowania DAIS (kolory krzywych odpowiadają kolorom na obrazowaniu).

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 59. Wynik klasyfikacji metodą analizy zmiany głębokości pików w kanale 74DAIS (z lewej), indeksu wegetacji (z prawej), obszary pokryte wegetacją – kolor zielony, obszary odkryte – kolor brązowy.

## 10. Opracowania cyfrowej mapy zanieczyszczenia gruntów

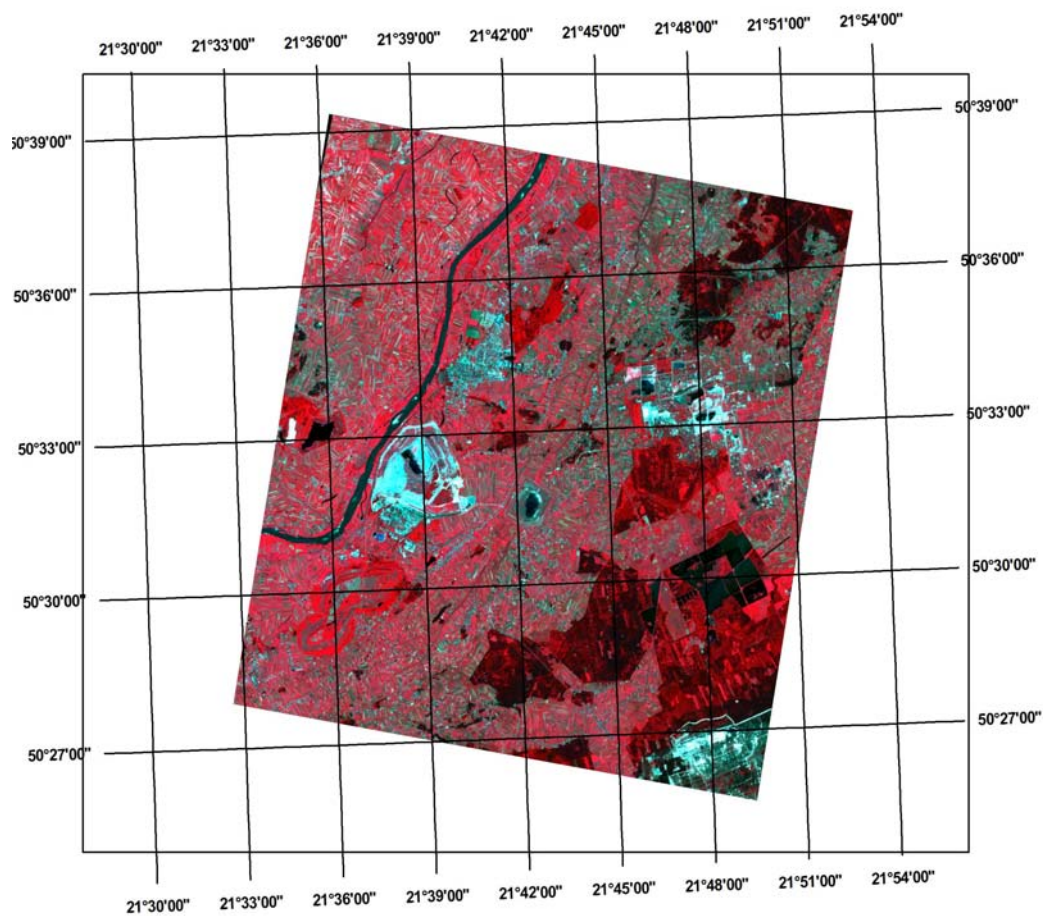
---

Ostatecznym wynikiem przeprowadzonych analiz było opracowanie mapy zanieczyszczenia gruntów. Dla całego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego Machów/Jeziorko wykonano mapę pokrycia terenu na podstawie przetworzenia obrazowań ASTER. Na Rys. 61 zamieszczono kompozycję w barwach umownych wykonaną ze obrazowania ASTER, wpasowaną układ92. Obrazowanie ASTER zostało przetworzone wykorzystując metodę klasyfikacji nadzorowanej, w wyniku, czego uzyskano mapę pokrycia terenu (Rys. 62). Kolorem żółtym przedstawiono najbardziej zdegradowane grunty, które w tym przypadku pozostają odkryte, nie pokryte żadną roślinnością (tereny odkryte zdegradowane). Dla odróżnienia wydzielono klasę: grunty odkryte naturalne (między innymi użytkowane rolniczo).

Na obszarze pola testowego w kopalni Jeziorko (kompozycja w barwach umownych z DAIS (Rys. 63) wykonano również klasyfikację, w tym przypadku opartą o analizę współczynnika emisyjności i uzyskano mapę przedstawiającą stopień degradacji gruntów (Rys. 64). Stopień degradacji został przedstawiony w kolorach: czerwonym, niebieskim i żółtym. W tym przypadku kolorem czerwonym zaznaczono największy stopień degradacji (1) i dalej kolorem niebieskim mniejszy stopień degradacji (2) i najmniejszy (3) kolorem żółtym.

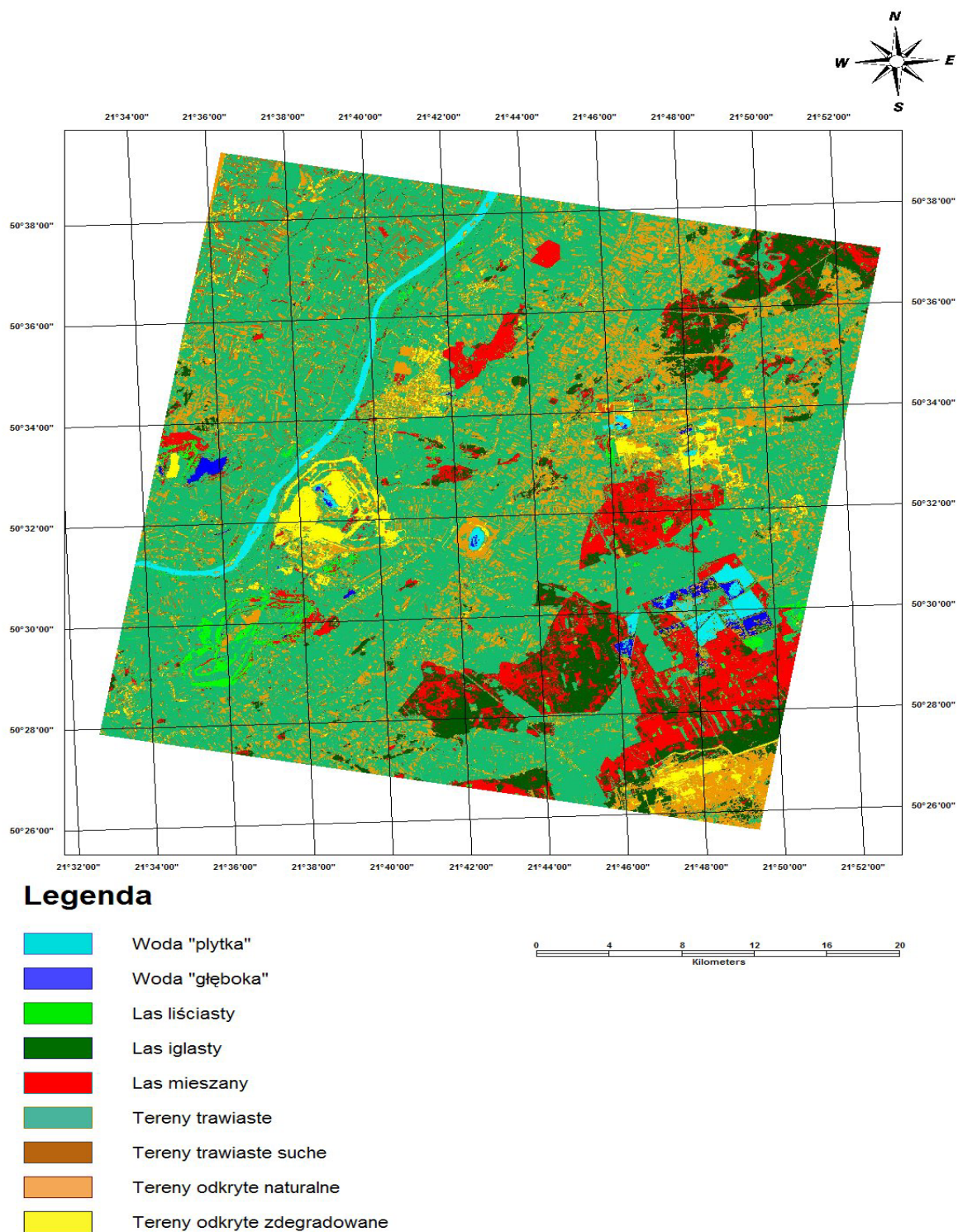
Wszystkie 4 mapy jako gotowe do drukarni pliki typu TIF znajdują się załączonym CD.

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębienia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 61. Tarnobrzesckie zagłębienie siarkowe – ortofotomapa, ASTER, FCC, układ 1992

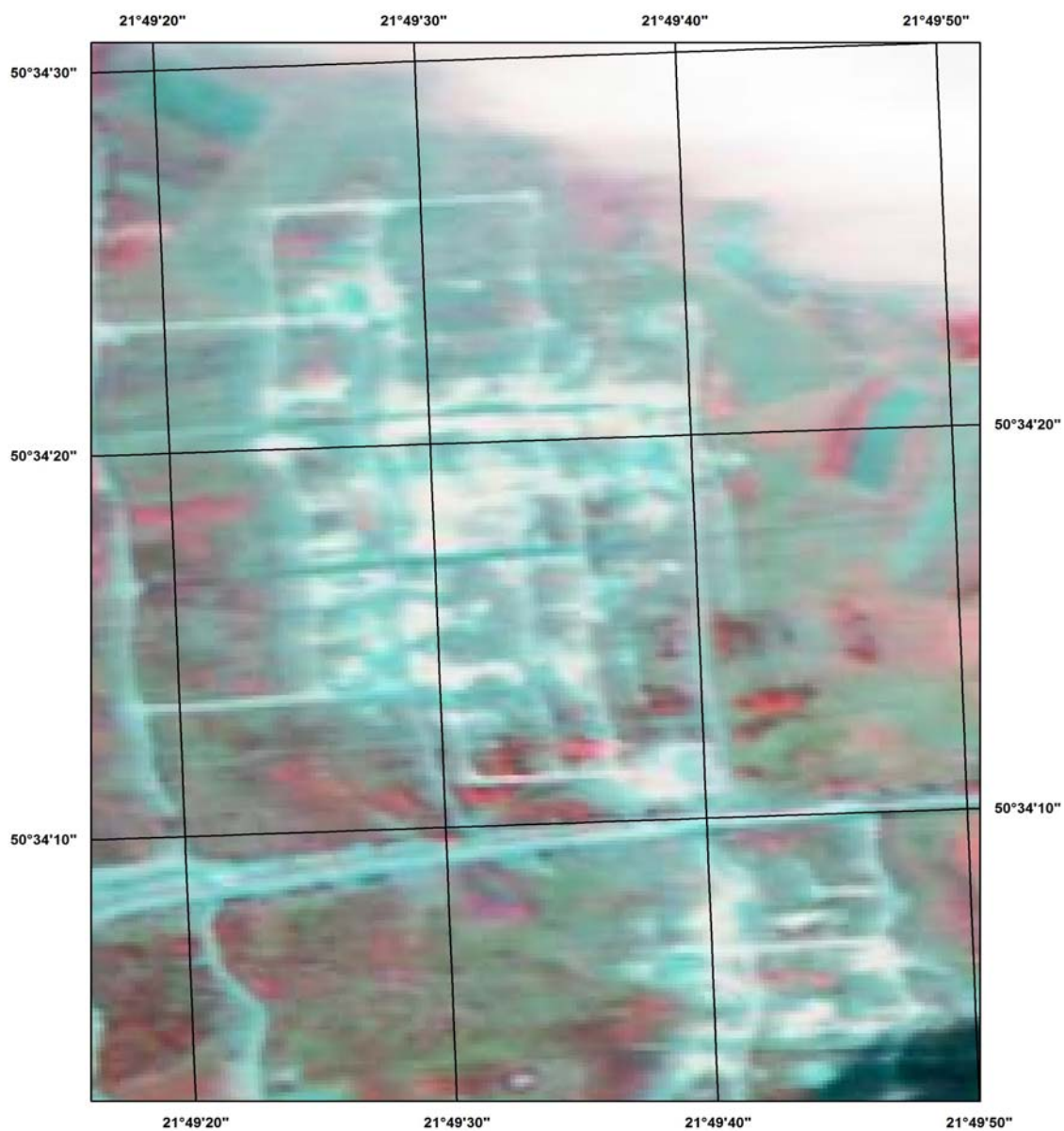
Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 62. Tarnobrzesckie zagłębie siarkowe – mapa użytkowania terenu – układ 1992

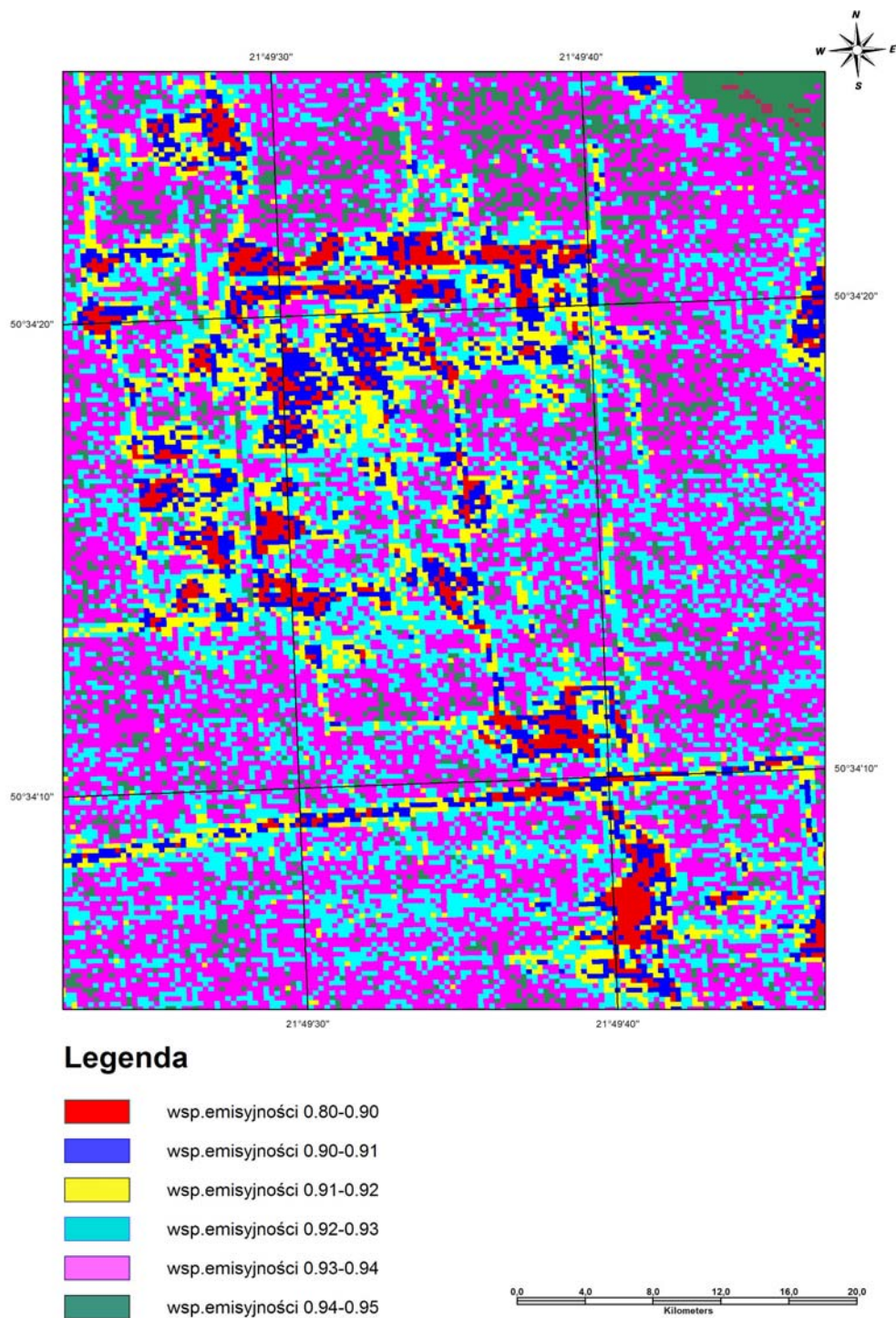


Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazowań lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzesckiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 63. Pole testowe, kopalnia Jeziórko, przybliżone wpasowanie w układ 1992 - kompozycja barwna DAIS

Wykorzystanie naziemnych pomiarów spektrometrycznych do kalibracji hiperspektralnych obrazów lotniczych i satelitarnych na przykładzie rekultywowanego obszaru tarnobrzeskiego zagłębia siarkowego (Machów/Jeziórko)



Rys. 64. Pole testowe, kopalnia Jeziórko, przybliżone wpasowanie w układ 1992; wynik klasyfikacji obrazowania DAIS; kolor czerwony -stopień degradacji 1, niebieski – stopień degradacji 2, żółty – stopień degradacji 3

## 11. Wnioski

---

W wyniku pomiarów spektrometrycznych stwierdzono, że przedział podczerwieni termalnej, szczególnie w zakresie od 8-14  $\mu\text{m}$ , jest odpowiedniejszy dla detekcji zanieczyszczenia gruntów siarką niż zakres fal widzialnych, bliskiej i średniej podczerwieni (0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ). Istnieją dwa przedziały charakteryzujące się pikami: 8-9  $\mu\text{m}$  – pik pochodzący od krzemionki i 11  $\mu\text{m}$  – pik pochodzący od siarki. W przypadku zwiększania się zawartości siarki w gruncie następuje zmniejszanie się piku od krzemionki i zwiększanie się piku od siarki. Zjawisko to może być wykorzystywane w przypadku dużych zawartości siarki w gruncie. Przy małej zawartości siarki występuje naturalna sukcesja roślinna, której udział uwidacznia się w rejestrowanej krzywej spektralnej.

Możliwość detekcji piku zależy od tego, czy wykorzystywane obrazowanie teledetekcyjne obejmuje określoną długość fali i czy zakres długości fali rejestrowanego promieniowania nie powoduje uśrednienia odpowiedzi spektralnej w stopniu uniemożliwiającym zauważenie piku. ASTER rejestruje promieniowanie termalne w węższych zakresach niż DAIS. Kanałem odpowiednim dla detekcji piku od krzemionki (8.7  $\mu\text{m}$ ) jest kanał 10 ASTER i kanał 74 DAIS. Długość fali odpowiednia dla piku od siarki (11  $\mu\text{m}$ ) odpowiada 13 kanałowi ASTER i jest teoretycznie niejednoznacznie identyfikowalna dla DAIS (kanały 76, 77, 78, 79). Wydaje się jednak, że w kanale 76 DAIS pik ten jest najbardziej widoczny.

Właściwa analiza obrazowań hiperspektralnych DAIS jest możliwa po uprzedniej korekcji wstępnej, której głównym celem jest usunięcie wpływu atmosfery. Wykorzystywane oprogramowanie ENVI oraz PCI umożliwiają tego rodzaju korekcję, z tym, że możliwości ENVI są większe. Zastosowana metodyka umożliwiła uzyskanie zgodności krzywych spektralnych dla obszarów kalibracyjnych obrazowania teledetekcyjnego (piasku i wody) z

krzywą spektralną uzyskaną w wyniku pomiaru spektrometrycznego na poziomie współczynnika korelacji 0.9.

Analiza obrazowania DAIS w zakresie fal widzialnych nie doprowadziła do satysfakcjonującego wyniku, tzn. wydzielenia gruntów zdegradowanych. Może to być spowodowane bardzo złą jakością obrazowania DAIS, która jest wynikiem niekorzystnych warunków meteorologicznych panujących podczas rejestracji lub też wykorzystywaną metodyką, polegającą na analizie kontinuum krzywych spektralnych, w których w tym zakresie promieniowania nie występują piki.

W przypadku zakresu termalnego wydzielenie gruntów zdegradowanych okazało się niemożliwe w oparciu o standardowe procedury wykorzystujące analizę porównawczą przebiegu krzywych spektralnych ze obrazowania z wzorcem. Wynika to w tym przypadku z szerokich przedziałów spektralnych DAIS i zbyt dużego uśredniania krzywych. Zadowalający efekt dała natomiast zaproponowana metoda analizy głębokości pojedynczego pików od krzemionki w kanale 74.

W podsumowaniu można jeszcze dać uwagi dotyczące wykorzystywanego oprogramowania. Porównanie funkcjonalności ENVI i PCI wypada na korzyść ENVI, jeśli bierze się pod uwagę zakres funkcjonalności oprogramowania. Moduł dotyczący danych hiperspektralnych w PCI jest stosunkowo nowy i z wersji na wersję rozbudowywany. Pojawianie się nowych opcji zwiększa możliwości przetworzeń, ale jednocześnie charakteryzuje się normalnymi, w takim przypadku, nieprawidłowościami funkcjonowania, usuwanymi sukcesywnie w dostępnych aktualizacjach programu. Utrudnieniem w PCI jest również konieczność przygotowywania krzywych spektralnych wzorców w specjalnym formacie, który jest przeznaczony do odczytywania wprost danych związanych z hiperspektralnym systemem AVIRIS. Z drugiej strony PCI dysponuje unikalną możliwością kompresji danych hiperspektralnych, której to możliwości nie można było przetestować z tego powodu, że moduł ten nie został zakupiony. Na uwagę zasługuje również możliwość wykorzystania w PCI zaawansowanych algorytmów usuwania wpływu atmosfery (MODTRAN).

## 12. Literatura

---

1. Bastin L., 1997, - "Comparision of fuzzy c-means classification, linear mixture modeling and MLC probabilities as tools for unmixing coarse pixels"– International Journal of Remote Sensing 18 (17), 3629-3648;
2. Benecke N., Brandt S., Vossen P., Fischer Chr., Spreckles V., 1999, - „Überwachung der Tagesoberfläche des Steinkohlentiefbaus” - Geoinformationssysteme - Zeitschrift für raumbecogene Informationen und Entscheidungen - GIS in Bergbau und Geologie, 12.02.1999
3. Białołuż S., Oszamińska M., 1977 - „Krzywe spektrometryczne niektórych gleb z Polski” - Fotointerpretacja w Geografii 1977, z. 10
4. Białołuż S., Girard M.C., 1978 - „Współczynniki odbicia spektralnego w pasmach pracy satelity Landsat” - Fotointerpretacja w Geografii 1978, T. 3, nr 13
5. Cierniewski, J., Verbrugge, M., 1997 - “Influence of soil surface roughness on soil bidirectional reflectance” - Int.J.Remote Sensing, 1997, Vol.18, No.6, 1277-1288.
6. Cierniewski, J., 1999- “Geometrical modeling of soil bidirectional reflectance in the optical domain” - Bogucki Scientific Publishers, Poznań,
7. Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J. R., 1999, :*Interpretacja zdjęć lotniczych*, Warszawa 1999;
8. Ciołkosz A., Kęsik A., 1989, „*Teledetekcja satelitarna*”- PWN Warszawa 89,
9. Dehaan R.L, Taylor G.R., 2002 – “*Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization*”, Remote Sensing of Environment 80 (2002) 406– 417
10. Doyle F.J., 1996 -*Thirty Years of Mapping from Space* – Intern. Archiv of Ph.&R.S. Vol. XXXI part B4, Wiedeń, 1996,
11. Drzewiecki W., Mularz S., Pirowski T., 2000 - „*Merging Landsat TM images and airborne photographs for monitoring of open-cast mine area*” – XIX Kongres ISPRS. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000,

12. Fischer Chr., Hersmeyer D., 1999 - „*Digital photogrammetry and GIS in tilings and mine waste managment*” - Tailings and Mine Waste'99 © 1999 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 025 6
13. Ekstrand, S., 1996, Landsat TM based forest damage assessment Correction for topographic effects. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 62(2), 151-161.
14. Fritz L.W., 1996 – *Commercial Earth Observation Satellites* - Intern. Archiv of Ph.&R.S. Vol. XXXI part B4, Wiedeń, 1996,
15. Gołda T., Trafas M., 1997 - “*Rekultywacja silnie zdewastowanych terenów górniczych na przykładzie rejonu olkuskiego*” – Przegląd Górniczy 2 (881)/1997, Katowice 1997,
16. Gołda T. i in., 1994 – “*Problemy likwidacji kopalń i rekultywacji terenów pogórniczych w górnictwie siarki*” – Konferencja Naukowo-Techniczna nt. Współczesne Problemy Ochrony Środowiska w Górnictwie. Krynica czerwiec, 1994
17. Hejmanowska B, Mularz S., Sroka R., Stencel M., 1996 - “*Pomiary temperatury kinetycznej powierzchni gruntu przy użyciu cyfrowego termometru matrycowego*” - XXVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM'96, Politechnika Częstochowska
18. Hejmanowska B., Mularz S., Sitek Z. 1997 – “*Badania wilgotności gruntów z wykorzystaniem obrazowań teledetekcyjnych i modelu inercji termalnej*” – Projekt badawczy KBN Nr. 9 S605 019 06
19. Hejmanowska B. 1997 - “*Numeryczne modelowanie inercji termalnej gruntu dla teledetekcyjnego określania jego wilgotności*”- praca doktorska
20. Hejmanowska B. , 2000, - „*Polowy spektrometr pracujący w podczerwieni termalnej – wstępne wyniki pomiarów*” – IV Konferencja: Termografia i termometria w podczerwieni termalnej, Łódź
21. Hejmanowska B. , 2002 - „*Badania zmian emisyjności pisku kwarcowego w zależności od wilkości ziaren w zakresie: 2-14  $\mu\text{m}$* ” – Geodezja, Kraków 2002,
22. Hejmanowska B., Głowienka E. 2004 - “*Hyperspectral remote sensing - a new tool in soil degradation monitoring*”, Interdisciplinary International Journal Agribusiness landscape and environment management, Udine, Włochy, 2003

23. Hejmanowska B., Głowienka E. 2004 - *"Wstępne wyniki pomiarów spektrometrycznych i klasyfikacji obrazów hiperspektralnych rekultywowanego obszaru Tarnobrzeskiego Zagłębia Siarkowego"* Geoinformatica, Polonica, T.6
24. Hejmanowska B., Głowienka E., Fischer C. 2005 - *Detection of soil contamination by sulphur using field and airborne hyperspectral data*, 4th Workshop on Imaging Spectroscopy, Warsaw 2005, EARSeL, Warszawa . 26.04.2005
25. Hook S.J. Kahle A.B. – *"The Micro Fourier Transform Interferometer ( $\mu$ FTIR) – A New Field Spectroradiometer for Acquisition of Infrared Data of Natural Surface"* – Remote Sens. Environ. 56:172-181 (1996),
26. Korb. A.R. i in. – *"Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurement of radiance and emissivity"* – Applied Optics, 1 April 1996
27. Kruger G., 1999 - *„Quantitative Analyse mitteldeutscher Braunkohlenabraumkippen mit reflexionsspektrometrischen Methoden (0.4-2.5  $\mu$ m)“* - Scientific Technical Technical Report STR99/06
28. Reinhackel G., 1999 - *„Quantitative Analyse von Braunkohlenabraumkippen mit laboratoriskopischen Infrarot-Messungen (2.5 - 14  $\mu$ m) und Fernerkundungsdaten (DAIS 7915/ASTER)“* - Scientific Technical Technical Report STR99/05
29. Mularz S. 1987 - *"Termowizyjne badania gruntów zwałowych"* – Ochrona Terenów Górniczych Nr 80/2
30. Mularz S., 1998 - *„Satellite and airborne remote sensing data for monitoring of an open-pit mine"* - Int. Archives of Photogrammetry and Remote sensing ISPRS Commission IV Symposium „GIS - Between Vision and Application” , Stuttgart, Niemcy, wrzesień 7-10, 1998,
31. Mularz S., Pirowski T. 2001 - *„Scalanie obrazów z różnych sensorów dla monitoringu kopalń odkrywkowych"*, poster - Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacji pt. Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych”, Wysowa 2001
32. Ranchin T, Wald L., 2000 - *"Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: The ARSIS Concept and Its Implementation"* 1/2000

33. Sandmeier St. and Deering D.W, 1999 - "*Structure Analysis and Classification of Boreal Forests Using Airborne Hyperspectral BRDF Data from ASAS*", Remote Sens. Environ. 69:281–295 (1999),
34. Sitek Z. ,1997 - "*Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej*"- Wydawnictwa AGH ISSN 0239-6114, Kraków, 1997.
35. Sitek Z., 1997- "*Komercyjne obrazy satelitarne Ziemi i GIS w fotogrametrii cyfrowej*"- Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 6, Kraków 1997
36. Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, P.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J., and Roth, S., 2000, "*Using imaging spectroscopy to map acidic mine waste*", Environmental Science and Technology, vol. 34, p. 47-54.
37. Te-Ming Tu, Hsuen-Chyun Shyu, Ching-Hai Lee, Chein-I Chang, 1999 – "*An oblique subspace projection approach for mixed pixel classification in hyperspectral images*" Pattern Recognition 32 (1999) 1399}1408,
38. Vrabel J. 2000 – „*Multispectral Imagery Advanced Band Sharpening Study*”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 1/2000,
39. Welch R., 1996 – *U.S. Government Satellite Remote sensing Programs: 1995 – 2000* - Intern. Archiv of Ph.&R.S. Vol. XXXI part B4, Wiedeń, 1996,
40. <http://www.digitalglobe.com> – EarthWatch Incorporated
41. <http://www.jpl.nasa.gov/index/> – Jet Propulsion Laboratory
42. [http://www//geo.unizh.ch/~schaep/research/apex/is\\_list.html](http://www//geo.unizh.ch/~schaep/research/apex/is_list.html) - *Imaging Spectrometer*
43. <http://geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/pecora.html> – "*The Landsat Programm: Toward Landsat 7 and Beyond*"
44. <http://speclab.cr.usgs.gov/index.html> – USGS