

Uniwersytet Warszawski  
**Wydział Geografii i Studiów Regionalnych**  
**Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji**

## **Metody i techniki badań geoinformatycznych**

Bogdan Zagajewski, Anna Jarocińska, Dawid Olesiuk  
[bogdan@uw.edu.pl](mailto:bogdan@uw.edu.pl)

Skrypt dla studentów.  
Wersja 2

Warszawa, 2009

## Od autorów

Głównymi inspiratorami powstania niniejszego skryptu są studenci specjalności *geoinformatyka* WGiSR UW, którzy od lat zwracali uwagę na konieczność zebrania materiałów prezentowanych w ramach zajęć *Techniki hiperspektralne*, *Podstawy SIG*, *Naziemne metody i techniki badań teledetekcyjnych* oraz *Terenowe pomiary teledetekcyjne* byłoby niezwykle przydatne podczas zajęć oraz przygotowywania prac magisterskich.

Ogniwem spajającym poszczególne części nowoczesnej geoinformatyki są zagadnienia cyfrowego przetwarzania obrazów dla danych rastrowych oraz danych wektorowych dla GIS.

Prace nad zebraniem materiałów dydaktycznych, jeszcze do przedmiotu Cyfrowe Przetwarzanie Obrazu rozpoczęły się kilka lat temu. Krałyły one wówczas wśród studentów w postaci luźnych notatek B. Zagajewskiego, później praktyczne aspekty wykorzystania programu Erdas Imagine zebrane zostały w postać internetowej publikacji *Cyfrowe Przetwarzanie Obrazów w systemie Erdas Imagine 8.4. Skrypt dla studentów*<sup>1</sup>.

Wzrost zainteresowania geoinformatyką ze strony studentów Uniwersytetu Warszawskiego oraz chęć pogłębienia poruszanych treści zachęca do przygotowania bardziej rozbudowanych materiałów. W zamiarze autorów proces ten będzie odbywał się w dłuższej perspektywie czasu (dzieje się to głównie ze względu na ograniczenia czasowe), a poszczególne etapy pracy będą dokumentowane kolejnymi wersjami niniejszego skryptu, które mają być bardziej uporządkowane i rozbudowane o kolejne moduły. Zpraszzamy zatem do odwiedzania stron internetowych Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW ([www.telegeo.wgsr.uw.edu.pl](http://www.telegeo.wgsr.uw.edu.pl)).

Autorzy mają nadzieję, że te, nawet wstępne materiały przydadzą się do samodzielnych prac poszczególnych studentów. Autorzy jednocześnie zachęcają wszystkich czytelników do zgłoszenia wszelkich uwag, dotyczących zarówno napotkanych błędów, jak i kierunków w których powinna nastąpić rozbudowa prezentowanych treści, pozwoli to na stworzenie przydatnego kompendium wiedzy.

Nie bez znaczenia jest skład autorski, szczególnego znaczenia nabiera udział Ani i Dawida, nowo wypromowanych magistrów, którzy uczestnicząc w procesie tworzenia niniejszych materiałów dydaktycznych posiadają świeżo w pamięci proces przyswajania geoinformatycznych procedur i potrafią spojrzeć na całość okiem adresata Skryptu.

Bogdan Zagajewski, Anna Jarocińska, Dawid Olesiuk

---

<sup>1</sup> [http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/Zagajewski\\_cyfrowe\\_przetwarzanie\\_obrazu\\_Erdas.pdf](http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/Zagajewski_cyfrowe_przetwarzanie_obrazu_Erdas.pdf)

## Spis treści

<b>1 Wstęp .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Podstawowe pojęcia fizyczne.....</b>	<b>5</b>
2.1 Spektroskopia, a spektrometria.....	11
<b>3 Słońce - źródło życia i badań teledetekcyjnych .....</b>	<b>12</b>
3.1 Krzywa odbicia spektralnego .....	12
<b>4 Metody i narzędzia badań teledetekcyjnych.....</b>	<b>14</b>
4.1 Pomiary spektrometryczne .....	16
4.2 Biblioteki spektralne.....	17
4.3 Pomiary akumulowanej energii fotosyntetycznej czynnej (APAR).....	26
4.4 Pomiary powierzchni projekcyjnej liści LAI.....	27
4.5 Pomiary wskaźnika temperaturowego ts-ta .....	27
<b>5 Metody rejestracji sygnału .....</b>	<b>28</b>
<b>6 Podstawowe operacje na obrazach wielo- i hiperspektralnych w programie ENVI 4.5....</b>	<b>30</b>
6.1 Wyświetlanie obrazów .....	30
6.2 Import i eksport plików .....	34
6.3 Wybór poszczególnych kanałów i fragmentów obrazów .....	35
6.4 Odwrócenie obrazu .....	38
6.5 Eksport.....	38
6.6 Rozciagnięcie obrazu.....	38
6.7 Obliczanie statystyk obrazu.....	39
6.7.1 Obliczanie statystyk .....	39
6.7.2 Obliczanie statystyk w oparciu o wszystkie kanały .....	40
6.7.3 Rozrzucenie losowe próbek.....	42
6.8 Narzędzie pomiarowe .....	42
6.9 Działania na kanałach i krzywych obicia spektralnego .....	43
6.9.1 Funkcja BandMath .....	43
6.9.2 Funkcja SpectralMath .....	44
6.10 Region Of Interest.....	45
6.11 Tworzenie maski .....	49
6.12 Mozaikowanie obrazów .....	51
<b>7 Wstępne przetwarzanie lotniczych obrazów hiperspektralnych .....</b>	<b>52</b>
7.1 Korekcja radiometryczna.....	53
7.2 Korekcja atmosferyczna .....	55
7.3 Korekcja geometryczna .....	58
<b>8 Klasyfikacja obrazów wielo- i hiperspektralnych .....</b>	<b>65</b>
8.1 Klasyfikacja nienadzorowana .....	65
8.2 Klasyfikacja nadzorowana .....	67
8.3 Klasyfikacja Spectral Angle Mapper (SAM) .....	71
8.4 Metoda Linear Spectral Unmixing (LSU) .....	72
8.5 Metoda Matched Filtering (MF) .....	74
8.6 Metoda Mixture-Tuned Matched Filtering (MTMF) .....	74
8.7 Ocena dokładności klasyfikacji .....	76
<b>9 Wzmocnienie przestrzenne obrazu .....</b>	<b>77</b>
<b>10 Pozyskiwanie charakterystyk spektralnych.....</b>	<b>82</b>
10.1 Pozyskiwanie charakterystyk spektralnych z obrazów hiperspektralnych .....	83
<b>11 Metody wyboru i kompresji danych.....</b>	<b>84</b>

11.1	Principal Component Analysis (PCA) – analiza głównych składowych.....	84
11.2	Minimum Noise Fraction (MNF) – redukcja wymiarów przestrzeni spektralnej.....	85
11.3	Wybór pikseli czystych spektralnie, tzw. endmembers .....	85
11.3.1	Pixel Purity Index (PPI) – wskaźnik czystości piksela .....	85
11.3.2	N – wymiarowa wizualizacja (n – dimensional vizualization) .....	88
<b>12</b>	<b>Analizy stanu roślinności.....</b>	<b>91</b>
12.1	Transformacja Tasseled Cap.....	94
12.2	Wskaźniki roślinności .....	95
12.3	Złożone analizy wegetacyjne .....	98
<b>13</b>	<b>Detekcja zmian .....</b>	<b>102</b>
<b>14</b>	<b>Korekcja pomiarów spektrometrycznych za pomocą AS Tools .....</b>	<b>106</b>
14.1	Tworzenie bibliotek spektralnych z danych pozyskanych za pomocą ASD .....	107
14.2	Kalibracja ASD FieldSpec Pro i korekcja pomiarów spektralnych .....	108
14.3	AS Tools – funkcja Correct ASD jump .....	109
<b>Spis literatury .....</b>		<b>112</b>

## 1 Wstęp

W roku 1988 Międzynarodowe Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji (ISPRS) zdefiniowało teledetekcję wspólnie z fotogrametrią jako „dział nauk technicznych zajmujących się pozyskiwaniem wiarygodnych informacji o obiektach fizycznych i ich otoczeniu drogą rejestracji, pomiaru i interpretacji obrazów lub ich reprezentacji cyfrowych uzyskiwanych dzięki sensorom nie będącym w bezpośrednim kontakcie z tymi obiekttami” (za Sitek, 1992<sup>1</sup>; 2000<sup>2</sup>). Identyczną definicję teledetekcji przyjmuje PAU w swoim Słowniku Geoinformatycznym ([Słownik Geoinformatyczny PAU, 2001<sup>3</sup>](#)). Obecnie ISPRS rekomenduje ogólną definicję określającą teledetekcję jako „pomiary lub pozyskanie informacji poprzez instrument, który nie ma bezpośredniego kontaktu z badanym obiektem lub zjawiskiem” (Committee on Earth Observations Satellites CNES [CEOS 2000<sup>4</sup>](#)). W roku 1989 geografowie, A. Ciołkosz oraz A. Kęsik teledetekcję zdefiniowali jako „teorię i metody pozyskiwania i interpretowania danych będących wynikiem rejestracji promieniowania elektromagnetycznego odbitego lub emitowanego przez różnego rodzaju obiekty” ([Ciołkosz, Kęsik, 1989<sup>5</sup>](#)). Najistotniejszą cechą teledetekcji jest zatem pozyskiwanie, przetwarzanie i analizowanie informacji o badanych obiektach lub zjawiskach za pomocą promieniowania elektromagnetycznego, magnetycznego lub fal akustycznych. Fale te mogą być emitowane lub odbijane od badanych obiektów. Istotnym faktem, jest to, że całość procesu odbywa się w sposób zdalny, czyli detektor sygnału, nie ma fizycznego kontaktu z obiektem lub zjawiskiem będącym przedmiotem zainteresowania ([de Jong, van der Meer, 2004<sup>6</sup>](#)). Tak ogólna definicja teledetekcji pociąga za sobą szereg klasyfikacji. Najbardziej podstawowy, to podział wynikający z poziomu pozyskania informacji. Jeśli detektor rejestrujący promieniowanie umieszczony jest na satelicie, to taki poziom nazywany jest satelitarnym. Inne poziomy to lotniczy lub naziemny. Każdy z poziomów dostarcza innej informacji i wymaga zastosowania specjalnych procedur w pozyskaniu i przetworzeniu informacji.

## 2 Podstawowe pojęcia fizyczne

**Moc promieniowania** (strumień energetyczny – radiant flux) jest definiowana jako całkowita emisja energetyczna  $Q_E$  źródła promieniowania w jednostce czasu dt ([Rataj, 2000<sup>7</sup>](#); [Targowski, Ziętek, 2003<sup>8</sup>](#)):

$$\Phi_E = \frac{dQ_E}{dt} \quad [W] \quad (1)$$

**Luminancja energetyczna**  $L_E$  (radiance) jest to stosunek natężenie promieniowania ( $I_E$ ) do powierzchni prostopadłej do danego kierunku promieniowania, rzutowaną ortogonalnie na powierzchnię jednostkową. Luminancja energetyczna jest jednym z najważniejszych pojęć teledetekcji, ponieważ podaje ile energii emitowane jest z powierzchni rozciągłego źródła energii w danych kierunku, uwzględniając geometrię układu detektor (obserwator) oraz normalną powierzchni. W przypadku, gdy kąt patrzenia na badaną powierzchnię jest różny od zera względem normalnej ( $\theta \neq 0$ ), to detektor rejestruje powierzchnię mniejszą od rzeczywistej ( $S^* \cos \theta$ ). ([CIE International Lighting Vocabulary, 1987<sup>9</sup>](#); [Rataj, 2000](#)<sup>7</sup>; [Targowski, Ziętek, 2003<sup>8</sup>](#)):

$$L_E = \frac{d\Phi_E}{d\Omega * dS * \cos \theta} = \frac{dI_E}{dS * \cos \theta} \quad \left[ \frac{W}{m^2 * sr} \right] \quad (3)$$

Gdzie:

$L_e$  – luminancja energetyczna,  
 $d\Phi_E$  – strumień energetyczny (*radiant flux*),  
 $dI_E$  – natężenie promieniowania (*radiant intensity*),  
 $d\Omega$  – elementarny kąt bryłowy,  
 $dS$  – powierzchnia jednostkowa źródła promieniowania,  
 $d\theta$  – kąt utworzony między danym kierunkiem, a normalną powierzchni źródła.

G. Schaepman-Strub i in. (2005<sup>10</sup>) podaje także definicję spektralnej luminancji energetycznej, czyli luminancji energetycznej dla danej długości fali. Jej jednostką, zgodnie ze standardem SI jest [ $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ]

**Emitancja energetyczna  $M_E$**  (*radiant flux density*) (egzytancja energetyczna – *radiant exitance*) jest definiowana jako stosunek strumienia energetycznego wysyłanego przez powierzchnię jednostkową źródła promieniowania elektromagnetycznego do pola powierzchni tego elementu. Zatem emitancja energetyczna opisuje całkowity strumień energii emitowanej z jednostkowej powierzchni we wszystkich kierunkach. Matematycznie proces obliczenia emitancji różni się od luminancji tym, że emitancja jest całkowaniem poszczególnych jednostkowych luminancji po półpełnym kącie bryłowym (Rataj, 2000<sup>7</sup>; Targowski, Ziętek 2003<sup>8</sup>):

$$M_E = \frac{d\Phi_E}{dS} = \int L_E(\theta, \phi) \cos \theta d\Omega \quad [ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} ] \quad (4)$$

Jeżeli źródło promieniowania jest typu Lamberta, czyli luminancja energetyczna jest niezależna od kąta obserwacji ( $\theta, \phi$ ), czyli nie istnieje konieczność jej całkowania i luminancja może ona zostać zapisana w postaci następującego wzoru (Targowski, Ziętek 2003<sup>8</sup>):

$$M_E = \pi L_E \quad (5)$$

Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana emitancja promieniowania ciała doskonale czarnego jest wprost proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej  $T$ :

$$E = \sigma T^4 \quad (6)$$

Gdzie:

$\sigma$  – stała Stefana Boltzmana ( $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$ )

$T$  – temperatura bezwzględna (K)

**Natężenie napromienienia  $E_E$**  (*irradiance*) jest to pojęcie charakteryzujące powierzchnię na którą pada promieniowanie (odbiornik promieniowania) i definiowane jest jako iloraz mocy promieniowania (strumienia energetycznego) padającego na daną powierzchnię jednostkową ( $d\Phi_E$ ) oraz jej powierzchnię ( $dA$ ) (CIE International Lighting Vocabulary, 1987<sup>9</sup>; Rataj, 2000<sup>7</sup>; Targowski, Ziętek 2003<sup>8</sup>)

$$E_E = \frac{d\Phi_E}{dA} = \int_{2\pi r} L_E \cos \theta d\Omega \quad (7)$$

Gdzie:

$E_E$  – natężenie napromienienia

$d\Phi_E$  – strumień energetyczny

$dA$  – jednostkowa powierzchnia napromieniowywana

$L_E$  – luminancja energetyczna

**Współczynnik odbicia R (reflectance)** jest definiowany jako iloraz natężenia promieniowanego  $I_E$  odbitego od obiektu do natężenia napromienienia  $E_E$  padającego na niego:

$$R = \frac{I_E}{E_E} \quad (8)$$

Ze względu na występowanie zależności pomiędzy wartością współczynnika odbicia, a długością fali elektromagnetycznej powszechnie w teledetekcji operuje się pojęciem **spektralnego współczynnika odbicia  $R_{(\lambda)}$** :

$$R_{(\lambda)} = \frac{I_{E(\lambda)}}{E_{E(\lambda)}} \quad (9)$$

W przypadku pomiarów spektralnego współczynnika odbicia obiektów typu Lamberta ( $\rho_{(\lambda)}$ ) wykorzystuje się wzór (Rataj, 2000<sup>7</sup>):

$$\rho_{(\lambda)} = \frac{\pi L_{E(\lambda)}}{E_{E(\lambda)}} \quad (10)$$

Gdzie:

$\pi L_{E(\lambda)}$  – emitancja źródła typu Lamberta dla danej długości fali

$E_{E(\lambda)}$  – natężenie napromienienia dla danej długości fali

Uzyskiwane wartości współczynnika odbicia zawierają się w przedziale <0, 1>, graficzna prezentacja spektralnych współczynników odbicia na wykresie układu kartezjańskiego (x, y), w funkcji długości fali nazywa się **krzywą odbicia spektralnego** lub **charakterystyką spektralną** danego obiektu.

Kolejny często wykorzystywany wskaźnik do określenia odbiciowych właściwości obiektu, to **albedo A** (z łac. „białość”), jest on definiowany jako średni współczynnik odbicia dla danego obiektu. Albedo obliczane jest z wzoru (Rataj, 2000<sup>7</sup>):

$$A = \frac{M_E}{E_E} \quad (11)$$

Gdzie:

$M_E$  – emitancja obiektu wysyłana w półsfery

$E_E$  – natężenie napromienienia (od słońca, w cały zakres widma elektromagnetycznego)

Uzyskiwany zakres wartości zawiera się w przedziale <0, 1>. Albedo Ziemi wynosi  $0,297 \pm 0,005$  (Goode P.R., Qiu J., Yurchyshyn V., Hickey J., Chu M-C., Kolbe E., Brown C.T., Koonin S. E., 2001<sup>11</sup>). Możliwości obliczenia dokładnych wartości spektralnych współczynników odbicia na podstawie danych hiperspektralnych predysponują tą część teledetekcji do obliczania wartości albedo. Znajduje to szerokie zastosowania praktyczne, np. w modelowaniu zmian klimatu.

Promieniowanie elektromagnetyczne przechodząc przez warstwę atmosfery napotyka na szereg przeszkód, wchodząc z nimi w interakcje. Rodzaj interakcji zależy w głównej mierze od rodzaju substancji oraz wielkości cząsteczek i długości danej fali. W przypadku napotkania cząstek lub molekuł, których wielkość jest znacznie mniejsza (np. promień cząsteczki zawiera się w zakresie od ułamka nanometra do około 90 nm) następuje rozpraszanie Rayleigha i absorpcja energii przez gazy (jest to jedno z głównych źródeł energii w atmosferze, różnice między energią występującą w różnych częściach atmosfery determinują ruchy cyrkulacyjne). Każdy proces

rozpraszania związany jest ze zmianą kierunku padającej fali, która padając na kolejne cząsteczki podlega kolejnym zmianom, zależnym od wielkości przeszkód na jakie napotyka. Zdecydowana większość zjawisk rozpraszania związana jest z zachowaniem długości fali (rozpraszanie elastyczne), rozpraszanie nieelastyczne (np. Ramana) jest stosunkowo rzadkie. Natężenie promieniowania docierająca do detektora po rozproszeniu na jednej cząstce  $I$  jest definiowane jako

$$I = I_E \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \left(\frac{d}{2}\right)^6 \quad (12)$$

Gdzie:

$I_E$  – natężenie promieniowania padająca na daną cząstkę

$R$  – odległość od cząstki

$\theta$  – kąt rozproszenia,

$n$  – współczynnik załamania fali elektromagnetycznej (np. dla fali 580 nm dla próżni wynosi 1, dla powietrza 1,0003, wody 1,33)

$d$  – średnica cząstki

$\lambda$  – dana długość fali elektromagnetycznej

W przyrodzie powszechnie jest rozpraszanie danej fali na wielu cząstkach. Intensywność promieniowania rozpraszanego we wszystkich kierunkach zależy od długości fali elektromagnetycznej oraz wielkości cząsteczek. **Współczynnik rozpraszania Rayleigha  $k_s$**  opisany jest wzorem (Markowicz, 2005<sup>12</sup>)

$$k_s = \frac{2\pi^5}{3} m \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2 \frac{d^6}{\lambda^4} \quad (12)$$

Gdzie:

$m$  – liczba cząsteczek rozpraszających,

$n$  – współczynnik załamania fali elektromagnetycznej,

$d$  – średnica cząstki

$\lambda$  – dana długość fali elektromagnetycznej.

Reasumując należy stwierdzić, że rozproszenia Rayleigha obserwuje się w przypadku stosunkowo niewielkich cząsteczek i jest wprost proporcjonalne do ich wielkości ( $d^6$ ), intensywność procesu wzrasta w niezwykle szybkim tempie wraz ze wzrostem wielkości cząsteczek rozpraszającej oraz odwrotnie proporcjonalnie do długości fali ( $\lambda^4$ ). W przyrodzie obserwujemy je powszechnie, a jego efektem jest, np. błękit nieba w dzień (rozpraszania niebieskiego widma elektromagnetycznego na cząsteczkach azotu i tlenu) lub róż i czerwień podczas zachodu słońca, gdy promieniowanie przenika przez grubszą warstwę atmosfery.

Wyraźna zależność pomiędzy rozpraszaniem, a długością fali oraz powszechność tego zjawiska zmusza wszystkich badaczy zajmujących się teledetekcją do wykonywania korekcji atmosferycznej obrazów lotniczych i satelitarnych. W przypadku danych hiperspektralnych, w których występują bardzo wąskie i liczne zakresy spektralne wykonanie prawidłowej korekcji atmosferycznej jest wymagane bezwzględnie (Jakomulska, Sobczak, 2001<sup>13</sup>).

Podczas gdy wielkość cząsteczek jest porównywalna z długością fali - następuje rozpraszanie Mie. Dotyczy to większości aerosoli i kropelek wody zawartych w chmurach. Biała barwa chmur powstaje w skutek dominacji tego typu rozpraszania. Obserwuje się wtedy, że część promieniowania, ulegając rozproszeniu na jednej części cząsteczek może być niezgodna w fazie z promieniowaniem rozproszonym przez inną część cząsteczek. Wtedy następuje wzajemne osłabienie promieniowania przez interferencję. Różnice faz wzrastają wraz z kątem obserwacji, w

kierunku pokrywającym się z kierunkiem padania. Tak więc wraz ze wzrostem cząsteczki maleje symetria rozproszenia w kącie bryłowym, wzrastaż zaś natężenie promieniowania w kierunku zgodnym z kierunkiem padania, a przy wystarczająco dużych cząsteczkach nie obserwuje się rozpraszania w funkcji długości fali. W zanieczyszczonej atmosferze, gdzie występują duże cząstki nasycenie barwą niebieską jest o wiele mniejsze niż w warunkach o zwiększonej przejrzystości (Meyer-Arendt, 1979<sup>14</sup>).

Podobne procesy rozpraszania zachodzą na poszczególnych obiektach, np. na zewnętrznej powierzchni liścia (epidermie, woskach i włoskach) obserwuje się zarówno rozpraszanie Rayleigha, jak i Mie. A.S Belward (1991<sup>15</sup>) zauważył, że w naturalnych warunkach mnogość liści i ich zróżnicowane ułożenie wewnątrz warstwy baldachimu zwiększa się znacząco odbicie porównując do pojedynczego, wyizolowanego liścia. Rozpraszanie Rayleigha zachodzi także na strukturach komórkowych, np. granach chloroplastów (średnica wynosi 500 nm), lizosomach (pęcherzyki o średnicy 50-500 nm, które zawierają enzymy do rozkładu białka i tłuszczy), czy też strukturach zawierających wodę, np. wakuolach (indeks refrakcji 1,47) lub powietrze (1.0) lub też na granicy tych struktur (Gausman, 1985<sup>16</sup>, Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001). Element ten znacząco utrudnia badanie górskich zbiorowisk roślinnych, gdyż te same gatunki roślin występując na różnych wysokościach nad poziomem morza oraz na siedliskach o różnej ekspozycji dają różną odpowiedź spektralną, co utrudnia proces klasyfikacji roślinności wysokogórskiej (Zagajewski, Sobczak, Wrzesień, Kozłowska, Krówczyńska, 2006<sup>17</sup>). Dzieje się to za sprawą faktu, iż rośliny absorbują i odbijają promieniowanie nie tylko zgodnie z cechami charakterystycznymi dla własnego gatunku, ale także i warunków w jakich wzrastały. Wynika to ze zdolności adaptacji struktur chloroplastów do ilości promieniowania jakie do nich dociera. Polega to na rozwoju odpowiedniej ilości gran komórkowych. Promieniowanie wnikając do komórki ulega rozproszeniu na epidermie liścia i chloroplastach oraz odbija się na ścianach komórkowych wewnątrz komórki i jest absorbowane przez barwniki i płyny wewnętrzkomórkowe (Zurzycki, Michniewicz, 1985<sup>18</sup>). Ponadto promieniowanie odbite od zewnętrznej części liścia ulega często spolaryzowaniu. Zależy to od gatunku rośliny oraz substancji i struktur pokrywających liście (Vanderbilt, Grant, 1986<sup>19</sup>).

W przypadku gdy fala elektromagnetyczna napotka na swojej drodze cząsteczki znacznie większe niż jej długość, fala zachowuje się zgodnie z prawami optyki geometrycznej (zjawiska rozpraszania obserwuje się jako odbicie, ugięcie i załamanie fal). Zjawisko to można obserwować podczas występowania chmur burzowych (*Cumulonimbus*). Występujące na krawędzi chmur duże krople wody powodują ugięcie fal elektromagnetycznych dających srebrzystą obwiednię chmury, natomiast załamanie fal obserwuje na kryształkach lodu w chmurach piętra wysokiego (*Cirrostratus*) dając zjawisko halo.

Reasumując, bilans energii słonecznej wskazuje, iż około 51% energii jest absorbowany przez powierzchnię Ziemi, 20% odbija się od chmur, 19% jest absorbowane przez atmosferę i chmury, 6% odbija się od atmosfery i 4 procent od powierzchni ziemi. Proporcje te różnią się w zależności od długości fali.

Promieniowanie przechodząc przez atmosferę ulega osłabieniu, czyli **ekstynkcji E** (Markowicz, 2005<sup>20</sup>). Jest ona definiowana wzorem

$$E = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (13)$$

Gdzie:

$I_0$  – oznacza natężenie promieniowania dochodzące do danego ośrodka

$I$  – oznacza natężenie promieniowania wychodzące z danego ośrodka

Różnica pomiędzy natężeniem promieniowania dochodzącym, a wychodzącym z ośrodka ( $dI_0$ ) może być definiowana także przez prawo ekstynkcji Lamberta:

$$dI_0 = -\sigma_{ext} I_0 ds \quad (14)$$

Gdzie:

$\sigma_{ext}$  – współczynnik ekstynkcji,

$dS$  – odległość jaką pokonuje fala elektromagnetyczna w badanym ośrodku,

Współczynnik ekstynkcji jest sumą absorpcji i rozpraszania jakie napotyka na swojej drodze fala elektromagnetyczna przechodząca przez ośrodek, ponadto współczynnik ten jest zależny od danej długości fali. W przypadku pionowego przejścia promieniowania przez atmosferę istotny wpływ na wartość współczynnika ma grubość optyczna atmosfery ( $\tau$ ):

$$\tau = \int \sigma_{ext} dS \quad (15)$$

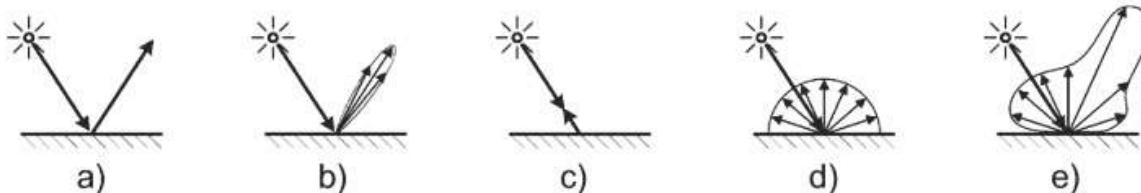
Jednym z ważniejszych zagadnień w teledetekcji jest odbicie promieniowania od powierzchni na którą pada. Często odbiciu towarzyszy także absorpcja promieniowania przez daną powierzchnię. W teledetekcji najbardziej pożądanym rodzajem odbicia jest rozproszenie we wszystkich kierunkach z taką samą intensywnością. Sytuacja taka sprawia, że niezależnie od kierunku padania promieniowania rejestracja promieniowania przez detektor umieszczony w dowolnym miejscu będzie taka sama, czyli niezależnie gdzie będzie się znajdował detektor, to zarejestrowane zostanie promieniowanie w takiej samej ilości. W fizyce zjawisko to opisuje prawo Lamberta (Rataj, 2000<sup>7</sup>; Strug, 2004<sup>21</sup>), a powierzchnie o takiej charakterystyce nazywa się powierzchniami lambertowskimi.

$$I_e = I_0 \cos\theta \quad (16)$$

Gdzie:

$I_e$  – natężenie promieniowania w danym kierunku

$I_0$  – natężenia promieniowania źródła w kierunku normalnym do powierzchni źródła,  
 $\cos\theta$  – kąt między danym kierunkiem a kierunkiem normalnej.



Rycina 2.1 Modele odbicia promieniowania a) kierunkowe, b) kierunkowo-rozproszone, c) powrotnie, d) rozproszone, e) rzeczywiste (Petty, 2006 22)

W naturalnych warunkach odbicie rozproszone jest stosunkowo rzadkie, podobnie jak kierunkowe, najczęstszym przypadkiem jest odbicie rzeczywiste (ryc. 2.1 e). Oznacza ono, iż część promieniowania padającego na badany obiekt odbija się zgodnie z prawem Snella<sup>2</sup> (Ryc. 2.1a). W takim przypadku, pracując z danymi hiperspektralnymi należy wykonać modelowanie dwukierunkowego odbicia BRDF.

<sup>2</sup> Promień światła padającego i odbitego znajdują się w tej samej płaszczyźnie co normalna do powierzchni oraz kąt padania równa się kątowi odbicia. Tymi cechami charakteryzują się powierzchnie lustrzane i chromowane

## 2.1 Spektroskopia, a spektrometria

Początki badań spektroskopowych sięgają lat 1670-72, wtedy to Izaak Neewton (1642/3-1727) udowodnił, że widmo składa się z monochromatycznych przedziałów promieniowania, które można rozszczepić, a następnie połączyć w światło. Kolejnym krokiem były prace Josefa von Fraunhofera (1787-1827) z zakresu optyki (1814) w których opisał linie spektralne (linie Fraunhofera) umożliwiające badanie spektralne obecności lub braku wybranych związków (linie absorpcyjne i emisyjne). Prace te zostały niezależnie rozwinięte przez Gustawa Kirchoffa (1842-1887) i Roberta Gunsena (1811-1899), którzy opracowali metodę analizy spektralnej, stwierdzając, że każdy pierwiastek jest ściśle związany z określonymi liniami Fraunhofera, podając długości fal odpowiadających za absorpcję określonych molekuł, np. linia Fraunhofera A odpowiada O<sub>2</sub> i absorbuje w 759,37 nm, linia D1 oznacza sód (Na) i absorbuje w 589,594 nm. Pierwszym obszernym dziełem poświęconym analizie widmowej było dzieło sir Williama Hugginsa (1824-1910) wydane w roku 1866 „Spectrum analysis etc.” (Petykiewicz, 1986<sup>23</sup>, Bogusz, Garbarczyk, Krok, 1997<sup>24</sup>).

Spektroskopia jest częścią fizyki, zajmującej się tworzeniem, przesyłaniem, pomiarami i interpretacją spektrów elektromagnetycznych (Swain, Davis, 1978<sup>26</sup>, Petykiewicz, 1986<sup>23</sup>, Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001<sup>25</sup>), czyli badanie właściwości obiektów za pomocą informacji niesionej przez falę elektromagnetyczną w poszczególnych jej długościach. Badanie to może odbywać się na drodze cyfrowych analiz za pomocą spektroradiometrów lub też obrazujących spektrometrów w warunkach terenowych (lotniczych, czy satelitarnych) lub laboratoryjnych. Właściwości materiałów, które generują sinusoidalną falę elektromagnetyczną charakteryzującą dany obiekt w każdym zakresie widma nazywa się właściwościami spektralnymi obiektu. Cechy spektralne obiektu są charakterystyczne dla danego obiektu, gdyż powstają w wyniku oddziaływania energii z molekułami gazów, płynów i ciał stałych. Powstałe promieniowanie z tych interakcji jest charakterystyczne dla tego układu, jednakże możliwości interakcji pomiędzy poszczególnymi kompozycjami częstek sprawiają, że możliwa jest identyfikacja nawet bardzo skomplikowanych układów (Swain, Davis, 1978<sup>26</sup>). W naturalnych warunkach środowiskowych wiele cech spektralnych jest trudna do detekcji, gdyż następuje addycja spektrów, potęgując lub eliminując poszczególne sygnały, część z nich jest zupełnie nierejestrowana ze względu na rozdzielcość spektralną lub radiometryczną polowych urządzeń (Suits, 1983<sup>27</sup>).

Spektroskopia jest definiowana jako nauka zajmująca się powstawaniem i interpretacją widm elektromagnetycznych powstałych w wyniku współoddziaływania promieniowania elektromagnetycznego i materii. W praktyce obejmuje to szeroki zakres zagadnień, takich jak atomowa i molekularna struktura materii, diagnostyka plazmy, rozwój instrumentów, badanie materii, identyfikacja substancji. Spektroskopia jest przedmiotem badań fizyki, chemii, inżynierii genetycznej, astronomii, przemysłu spożywczego, przetwórczego, metalurgicznego, naukach przyrodniczych (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001<sup>25</sup>). Ten ostatni przykład jest domeną teledetekcji hiperspektralnej, która w ostatnich latach przeżywa prawdziwy rozkwit, wynikający z postępów i rozwoju elektroniki. Umożliwia to konstruowanie wielu przenośnych urządzeń do badań naziemnych, lotniczych i satelitarnych o dużych możliwościach wzmacnienia rejestrowanego sygnału, co owocuje zwiększeniem rozdzielcości spektralnej, radiometrycznej oraz terenowej pozyskiwanych danych.

Termin spektrometria wywodzi się ze spektrofotometrii, gdzie spektrometria oznaczała pomiary fotonów w funkcji długości fali. W teledetekcji wykorzystanie matematycznych analiz kształtu fali, przez próbkowanie obrazu jest rzadko spotykane, gdyż zdecydowanie częściej wykorzystuje się bezpośrednie pomiary obiektu spektrometrami lotniczymi bądź satelitarnymi skanerami (Suits, 1983<sup>27</sup>, Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001<sup>25</sup>).

### 3 Słońce - źródło życia i badań teledetekcyjnych

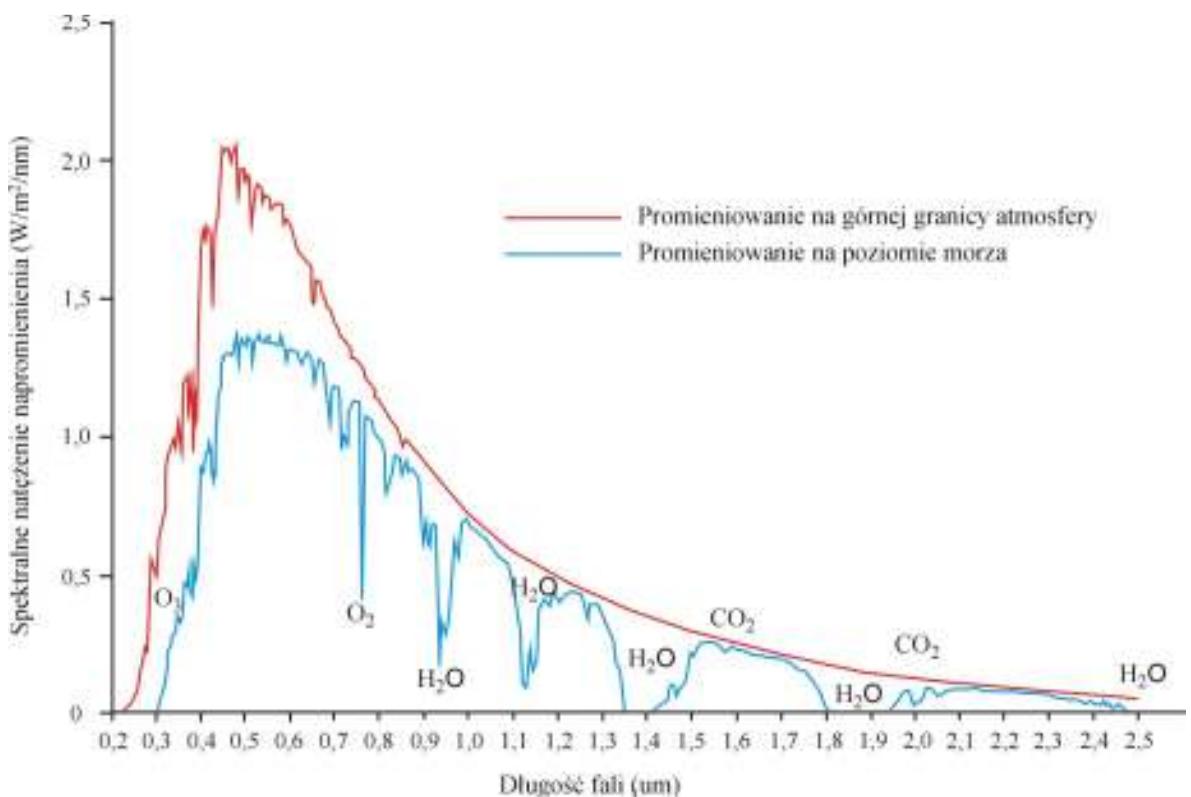
Główym motorem życia na Ziemi jest Słońce. Jest ono głównym dostawcą energii, część tej energii trafia do układów fotochemicznych roślin, stając się podstawą piramidy troficznej zdecydowanej większości organizmów. Zdolność akumulacji energii przez rośliny wynika z obecności chloroplastów. Ich obecność wiąże się z wykorzystaniem widzialnego zakresu widma elektromagnetycznego. Około 28% promieniowania zakumulowanego przez rośliny jest zamienione w procesie fotosyntezy na wysokoenergetyczne związki biochemiczne (ATP). Interakcje pomiędzy promieniowaniem a rośliną dotyczą także innych zakresów widma. Obok promieniowania widzialnego do najważniejszych należy zaliczyć bliską i średnią podczerwień (gdzie można obserwować fotomorfogeniczne efekty, np. procesy biochemiczne oraz budowę strukturalną komórek) oraz podczerwień termalna (procesy wymiany ciepła). Ta część spektrum jest szczególnie ważna, ponieważ ponad 70% promieniowania absorbowanego przez rośliny jest wymieniane na ciepło w szeregu procesów fizjologicznych (Gates 1965<sup>28</sup>). Promieniowanie elektromagnetyczne dochodzące do powierzchni liścia ulega odbiciu, absorpcji i transmisji, wszystkie to procesy zachodzą w różnym stosunku, zależnym od długości padającej fali, kąta oraz właściwości liścia (zawartości substancji biochemicznych występujących wewnętrz i na zewnątrz liścia oraz struktur pokrywających epidermę, a warunkujących szorstkość liścia (woski oraz włoski). Wspólnie z kutikulą wpływają one znacząco na absorpcję i odbicie fal elektromagnetycznych (Ross, 1981<sup>29</sup>).

Wykorzystanie teledetekcji w badaniach nad roślinnością opiera się na analizie promieniowania elektromagnetycznego, które docierając do roślin, ulega absorpcji, odbiciu lub transmisji. Po uwzględnieniu procesów fizycznych jakie zachodzą w atmosferze, ilość promieniowania zależy od położenia geograficznego obiektu ( $\varphi, \lambda$ ), pory dnia, długości fali oraz geometrii układu słońce - roślina – detektor, właściwości biochemicznych roślin oraz rodzaju użytego detektora (w szczególności od rozdrobnienia terenowej, spektralnej i radiometrycznej). Szerokopasmowe skanery (np. Landsat TM) rejestrują promieniowanie w szerokich zakresach, w znaczący sposób uśredniając mierzone współczynniki odbicia, co obniża informacyjność rejestrowanego sygnału.

Problem ten zostaje znacznie ograniczony w przypadku technik hiperspektralnych, gdzie wąskie zakresy rejestrowanego promieniowania umożliwiają rejestrację bardzo specjalistycznych procesów biochemicznych lub substancji, np. absorpcja chlorofilu a (w zakresie 430 i 660 nm), chlorofilu b (460, 640 nm), procesy fotosyntezy, np. karboksylacji (przyłączania CO<sub>2</sub> do białka D-ryбуulozo 1,5 dwufosforan) i tworzenie 3 fosfo-D-glicerynanu. 30-50% procesów zachodzących w roślinie jest możliwa do rejestracji w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni (1500, 1680, 1740, 1940, 2050, 2170, 2290 i 2470 nm). Innym przykładem może być celuloza, będąca polimerem D-glukozy, budując ściany komórkowe i jest jednym z najważniejszych składników suchej biomasy, możliwa jest do rejestracji przez techniki hiperspektralne w zakresie 1220, 1480, 1930, 2100, 2340 i 2480 nm (Elvidge, 1990<sup>30</sup>).

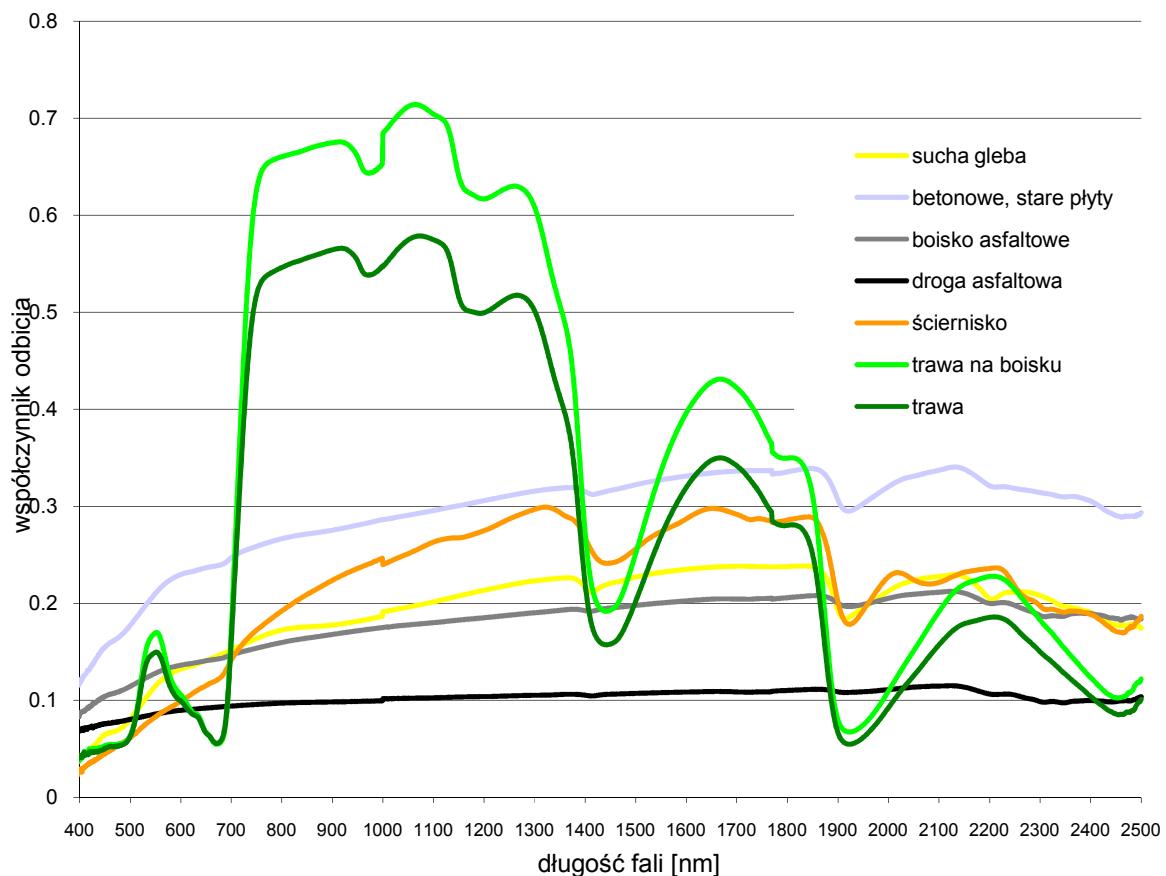
#### 3.1 Krzywa odbicia spektralnego

Badania teledetekcyjne bazują na analizie widma elektromagnetycznego. W zdecydowanej większości przypadków źródłem tego promieniowania jest Słońce, promieniowanie elektromagnetyczne padając na różne obiekty odbija się od nich i trafia do detektorów (pasywne techniki teledetekcyjne). W każdej chwili do Ziemi dociera ogromna ilość energii, wahająca się w zakresie 1365 – 1372 Wm<sup>-2</sup>, większość dochodzącej energii zawarta jest w zakresie widzialnym (Ryc. 3.1.1). Zakres ten jest silnie absorbowany przez atmosferę. Część promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 1200, 1450, 1940, 2500, 2660, 2730 i 6270 nm jest prawie całkowicie absorbowana przez parę wodną i gazy .



Rycina 31.1 Promieniowanie słońca dochodzące do górnej powierzchni atmosfery i poziomu morza. Źródło: Cahalan R. 31 . Zmodyfikowane

Promieniowanie dochodzące i odbite nie zmienia częstotliwości monochromatycznych składowych promieniowania. Powyższa prawidłowość oraz fakt, iż poszczególne molekuły absorbują promieniowanie w charakterystyczny sposób zależący od rodzaju wiązań chemicznych występujących w danej substancji i danej długości fali wchodzącej w interakcję z materią, umożliwia na identyfikację obiektów za pomocą charakterystyk spektralnych, nazywanych także krzywymi odbicia spektralnego. Różnorodność wiązań i molekuł chemicznych pozwala na identyfikację poszczególnych obiektów (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001<sup>32</sup>). Dzieje się to za sprawą, iż w poszczególnych długościach fali elektromagnetycznej następują stałe i charakterystyczne dla poszczególnych substancji procesy, a tym samym krzywe odbicia spektralnego mają różny kształt (rycina 31.2).



Rycina 31.2 Charakterystyki spektralne wybranych obiektów. Krzywe odbicia spektralnego pozyskane na obszarze zlewni Bystrzanka w okolicach miejscowości Szymbark (koło Gorlic), w sierpniu 2002 r., w trakcie pomiarów spektrometrycznych hiperspektralnym spektrometrem

## 4 Metody i narzędzia badań teledetekcyjnych

Pomiar teledetekcyjne prowadzi się na trzech zasadniczych poziomach: naziemnym, lotniczym oraz satelitarnym. Każdy z tych poziomów jest względem pozostałych komplementarny i najczęściej stanowi odniesienie referencyjne do danych pozyskanych na innym poziomie.

Poziom naziemny umożliwia szczegółowe zbadanie obiektów i poświęcenie im wystarczająco dużej ilości czasu na wykonanie wszelkich niezbędnych pomiarów. Jednakże ze względu na fakt niewielkich możliwości eksploracyjnych zespołu badawczego, wyznacza się w ciągu dnia kilka-kilkanaście poligonów kluczowych, charakterystycznych dla danego obszaru badań. Służą one kalibracji i odniesieniu się do danych pozyskanych z innych poziomów. Pomiary lotnicze wykonywane są na stosunkowo niewielkich wysokościach (w porównaniu do satelitarnych). Optymalna wysokość lotu powinna być wyższa niż 1000 m powyżej najwyższego punktu terenowego. Wysokość ta znaczaco ogranicza wpływ orografii na zawirowania mas powietrza w atmosferze, ograniczając niekontrolowane ruchy samolotu podczas lotu. Mimo to, niejednorodność atmosfery znaczaco utrudnia zachowanie założonej linii lotu (następują wychylenia samolotu w wszystkich kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Nie bez znaczenia pozostaje też fakt zmienności warunków pogodowych w trakcie badań, szczególnie jeśli trwają one kilka dni. Nie bez znaczenia pozostaje także zmienność warunków nasłonecznienia (zmiana azymutu i kąta padania promieni słonecznych). Dlatego podczas

planowania badań teledetekcyjnych należy wybrać optymalną liczbę obszarów kluczowych, wiernie odzwierciedlających charakter badanego terenu. Dodatkową niezbędną grupę stanowią poligony „kalibracyjne” służące do pobrania charakterystyk spektralnych i wykonania korekcji atmosferycznej rejestrowanego obrazu. Powinny być to homogeniczne powierzchnie o rozmiarach pięciokrotnej wielkości rejestrowanego piksela i charakteryzować się dużym i niewielkim odbiciem (powierzchnie jasne i ciemne spektralnie). Dobrymi przykładami takich poligonów mogą być głębokie i czyste zbiorniki wodne (powierzchnie ciemne spektralnie), tereny pokryte betonem (parkingi, boiska sportowe), asfaltem (boiska, skrzyżowania dróg), zaorane i równomiernie pobronowe grunty orne z przeschniętą warstwą powierzchniową gleby, równomiernie skoszone łąki, boiska sportowe, ścierniska, duże homogeniczne powierzchnie skał. Na tych powierzchniach wykonuje się szczegółowe pomiary spektrometryczne, np. w kilku transektach.

Badania z wykorzystaniem poziomu satelitarnego dostarczają zobrazowań znaczących powierzchni terenu, jednakże obarczone są błędami wynikającymi ze zniekształceń wywołanych przez atmosferę. Niewątpliwym ograniczeniem poziomu satelitarnego jest niewielka ilość promieniowania elektromagnetycznego odbitego od powierzchni ziemi i dopływająca do detektora, wpływa to bezpośrednio na wielkość piksela (rozdzielcość przestrzenna) lub zmniejszenie skali zapisywanego sygnału/czułości detektora (rozdzielcość radiometryczna) lub szerokości stosowanych filtrów i ilości rejestrowanych kanałów (rozdzielcość spektralna). Rozwój technologiczny ostatnich lat pozwala na konstruowanie coraz to lepszych detektorów i wzmacniaczów sygnałów, jednakże to prawa fizyki wyznaczają granice konstruktorom.

Zobrazowania lotnicze i satelitarne zdecydowanie skracają czas trwania pozyskania informacji o terenie badań, jednakże pociągają za sobą nowe problemy. Pierwszy najważniejszy dotyczy obecności atmosfery i oddziaływanego mas powietrza na jakość rejestrowanego sygnału i geometrię lotu samolotu, co w przypadku rejestracji nowoczesnymi skanerami, posiadającymi detektory liniowe wywołuje zniekształcenia geometryczne poszczególnych pikseli bądź linii rejestrowanego obrazu. Ten problem jest zminimalizowany na poziomie satelitarnym. Pojawia się tam za to nowe wyzwanie wynikające z dużych prędkości przemieszczania się satelity. Detektor rejestrujący sygnał odbity od powierzchni ziemi musi zostać znacznie wzmacniony (odbywa się to przez zwiększenie chwilowego kąta widzenia (większy piksel), zwiększenie zakresu rejestrowanego przedziału widma elektromagnetycznego lub też zastosowanie silnych wzmacniaczów sygnału). Ponadto stosunkowo duży udział w rejestracji sygnału ma promieniowanie odbite z poszczególnych warstw atmosfery, co pociąga za sobą konieczność wykonania korekcji ograniczającej wpływ atmosfery. Dane do korekcji atmosferycznej są pozyskiwane z terenowych pomiarów spektrometrycznych, wykonanych podczas badań terenowych, równolegle z rejestracją obrazu na tzw. poligonach kalibracyjnych.

Wykorzystanie danych lotniczych, czy satelitarnych musi zostać poprzedzone szczegółowymi badaniami terenowymi, które pozwolą zidentyfikować i powiązać cechy obiektu z uzyskiwanymi odpowiedziami spektralnymi (spektralnymi współczynnikami odbicia i unikatowymi dla każdego obiektu krzywymi odbicia spektralnego). Jednakże ze względu na fakt, iż mierzony sygnał pochodzi od grupy obiektów (np. woda, rośliny, gleba, skały), problemem pozostaje ekstrakcja sygnałów związanych z obiektami będącymi przedmiotem badań. By tego dokonać prowadzi się rejestrację informacji w różnych zakresach spektrum elektromagnetycznego lub też silnie zawęża się przedziały rejestrowanego promieniowania i mnoży się liczbę kanałów spektralnych. Takie podejście stosowane jest w technikach hiperspektralnych, które dają szerokie możliwości szczegółowej analizy komponentów środowiska, np. roślinności.

Naziemne pomiary teledetekcyjne roślinności wykonywane są według klucza, zakładającego zebranie w pierwszej kolejności informacji bez naruszenia badanego obiektu. Do tej grupy zalicza się kartowanie terenu w oparciu o transekty wykonane podczas marszrutu terenowej przy pomocy zdjęcia lotniczego. Po rozpoznananiu badanego terenu wyznacza się poligony kluczowe, na których

równolegle z zobrazowaniem lotniczym czy satelitarnym, wykonuje się pomiary spektrometryczne, czyli rejestrację promieniowania elektromagnetycznego odbitego od badanego obiektu. Pomiar ten pozwala na pozyskanie unikatowych dla każdego obiektu charakterystyk spektralnych, które umożliwiają identyfikację poszczególnych obiektów oraz w przypadku roślinności określić stan biofizyczny (ogólny skład i relacje między barwnikami, stan struktur komórkowych, ich budowę oraz zawartość substancji budujących roślinę, np. nutrienty, celuloza). Równolegle z pomiarami spektrometrycznymi wykonuje się radiometryczny pomiar bilansu ciepła roślin. Rejestruje się temperaturę radiacyjną baldachimu roślinności (ts) i temperaturę termodynamiczną powietrza (ta) znajdującego się nad badaną roślinnością.

Kolejny pomiar wykonywany w badaniach roślinności to pomiar promieniowania czynnego z zakresu fotosyntezy (PAR) i szczegółowy pomiar zawartości barwników fotosyntetycznych czynnych (chlorofil a, b i karotenoidy) i ich wzajemnych relacji oraz analiza stanu i aktywności aparatu fotosyntetycznego. W tej grupie pomiarowej mierzy się m.in. zawartość chlorofilu całkowitego, fluorescencję.

Kolejna grupa badań dotyczy określenia biomasy porastającej powierzchnię pomiarową. Do najważniejszych wskaźników należy zaliczyć powierzchnię projekcyjną liści (LAI). Pomiar teledetekcyjny wykonuje się w zakresie światła niebieskiego, także bez ingerencji w badany obiekt. Wskaźnik LAI jest ściśle powiązany z produkcją biomasy, którą należy ściąć z powierzchni jednostkowej, np. 0,25 m<sup>2</sup>

## 4.1 Pomiary spektrometryczne

Pomiary odbicia promieniowania od obiektów bazują na następujących metodach (Kimes, Kirchner, 1982<sup>33</sup>):

- stożkowo-hemisferycznego odbicia (ang. *hemispherical-conical reflectance*). Metoda ta jest powszechnie wykorzystywana, bazuje na pomiarze napromienienia wzorcowej powierzchni kalibracyjnej o charakterystyce Lamberta i pomiarze natężenia promieniowania odbitego od badanego obiektu.
- dwu-hemisferycznego odbicia (ang. *bi-hemispherical reflectance*), które wykonuje się w laboratoryjnych warunkach z wykorzystaniem integrującej sfery (ang. *integrationg sphere*<sup>3</sup>),
- funkcji dwukierunkowego rozkładu promieniowania (BRDF). Jest to teoretyczna funkcja luminancji energetycznej mierzonej w kierunku detektora do natężenia napromienienia mierzonego zgodnie z kierunkiem padania promieniowania.

Do pomiarów spektrometrycznych wykorzystuje się spektrometry. Rozdzielcość spektralna detektorów jest zmienna (zależna od rodzaju instrumentu) i waha się od kilku nanometrów (spektrometry hiperspektralne - 1,2 nm w zakresie 350-1400 nm oraz 10-300 nm w zakresie 1400-2500 nm), do kilkuset nm w przypadku spektrometrów wielospektralnych. Pociąga to za sobą liczbę rejestrowanych kanałów (spektrometr hiperspektralny ASDI FieldSpec Pro rejestruje widmo elektromagnetyczne z zakresu 325-2500 nm w 2154 kanałach).

W specjalistycznych badaniach spektrometrycznych wykonuje się pomiary *in situ* niewielkich powierzchni, np. poszczególnych części roślin (liście, kwiatostan). W tym celu wykorzystuje się światłowody spektrometrów hiperspektralnych oraz zmienny kąt widzenia (1-25°). Gwarantuje to pozyskanie spektrum pochodzącego z homogenicznego obiektu.

<sup>33</sup> Jako przykład może służyć urządzenie ASD Integration Sphere firmy Analitycal Spectral Devices, Inc. USA

Podobnie postępuje się przy analizie właściwości spektralnych minerałów. Uzyskane wyniki zapisuje się w bazach danych, zwanych bibliotekami spektralnymi (m.in. biblioteka spektralna minerałów United States Geological Service). Wykorzystanie bibliotek pozwala na szczegółowe kartowanie skał i minerałów z danych hiperspektralnych.

W przypadku roślinności nie powstała do tej pory uniwersalna biblioteka spektralna gatunków i zbiorowisk roślinnych. Wynika to z ogromnej różnorodności gatunków porastających poszczególne strefy klimatyczne, szeregu możliwych ich kombinacji (zbiorowisk roślinnych), wpływu procentowego pokrycia terenu i biomasy na wielkość odbicia spektralnego, wpływu układu samych liści w stosunku do sensora, zmian fenologicznych roślin itd. Dlatego też praktyczne zastosowanie spektrometrii obrazowej (technik hiperspektralnych) wymaga, aby równolegle do rozwoju skanerów hiperspektralnych i technik cyfrowego przetwarzania danych prowadzone były intensywne prace laboratoryjne i terenowe, mające na celu identyfikację właściwości spektralnych roślin i tworzonych przez nie zbiorowisk roślinnych. W efekcie powinno to zaowocować utworzeniem lokalnych bibliotek spektralnych charakterystycznych dla danego obszaru. Posiadanie danych z takiej biblioteki pozwoliłoby na prowadzenie teledetekcyjnego monitoringu roślinności (składu gatunkowego i kondycji roślinności).

Szczególnym przypadkiem badań roślinnych są ekosystemy górskie, które cechują się ogromną różnorodnością wewnętrzgatunkową i siedliskową. W efekcie badania zbiorowisk wysokogórskich należą do najtrudniejszych zadań, wynika to ze specyficznych przystosowań roślin do środowiska, wyrażających się istotnymi różnicami w budowie morfologicznej i anatomicznej oraz w fizjologii roślin (to samo zbiorowisko może wyglądać różnie w zależności od położenia – ekspozycja, wysokość). Ponadto warunki pogodowe często utrudniają wykonanie zobrazowań i podstawowych badań terenowych. Tak więc wykorzystanie technik hiperspektralnych, analizujących roślinność w bardzo wąskich i licznych przedziałach spektrum elektromagnetycznego ukazuje zróżnicowanie parametrów biofizycznych, np. ilościowe i jakościowe zmiany zawartości barwników fotosyntetycznych czynnych, poziom fluorescencji, wymianę cieplną, detekcję specyficznych powłok ochronnych, zawartość wody i nutrientów w tkankach.

## 4.2 Biblioteki spektralne

Biblioteki spektralne są rodzajem baz danych w których gromadzi się charakterystyki spektralne poszczególnych obiektów pozyskanych w trakcie pomiarów terenowych z wykorzystaniem spektrometrów hiperspektralnych. Podstawowe są jednak badania laboratoryjne (w mniejszym stopniu dotyczy to roślinności), jak i z obrazów hiperspektralnych po zidentyfikowaniu tzw. pikseli czystych spektralnie (endmember) i pozyskaniu z nich krzywych odbicia spektralnego.

Pozyskane spektra są dokumentowane materiałem zdjęciowym oraz opisowym i wchodzą w skład lokalnej biblioteki spektralnej. Jako przykład takiego opisu może służyć karta identyfikacyjna charakterystyki spektralnej roślinności, wchodzącej w skład biblioteki USGS Digital Spectral Library (Clark i in. 2003<sup>34</sup>):

TITLE:  
DOCUMENTATION\_FORMAT:  
SAMPLE\_ID:  
PLANT\_TYPE:  
PLANT:  
LATIN\_NAME:  
COLLECTION\_LOCALITY:  
COLLECTION\_LATITUDE:  
COLLECTION\_LONGITUDE:

Coordinate DATUM:

ORIGINAL\_DONOR:

SAMPLE\_DESCRIPTION:

== sample description goes here ==

END\_SAMPLE\_DESCRIPTION.

COMPOSITIONAL\_ANALYSIS\_TYPE:

COMPOSITION KEYWORD	Composition ASCII	Amount	Weight Percent, %
COMPOSITION:	Water:		%(of fresh weight)
COMPOSITION:	Total_Chlorophyll:		%(of fresh weight)
COMPOSITION:	Chlorophyll_A:		%(of fresh weight)
COMPOSITION:	Chlorophyll_B:		%(of fresh weight)
COMPOSITION:	Nitrogen:		%(of dry weight)
COMPOSITION:	Lignin:		%(of dry weight)
COMPOSITION:	Cellulose:		%(of dry weight)

COMPOSITION\_DISCUSSION:

END\_COMPOSITION\_DISCUSSION.

TRACE\_ELEMENT\_ANALYSIS:

TRACE\_ELEMENT\_DISCUSSION:

END\_TRACE\_ELEMENT\_DISCUSSION.

SPECTROSCOPIC\_DISCUSSION:

END\_SPECTROSCOPIC\_DISCUSSION.

IMAGE\_OF\_SAMPLE:

SPECTRAL\_PURITY:

LIB_SPECTRA_HED:	where	Wave Range	Av_Rs_Pwr	Comment
LIB_SPECTRA:				
LIB_SPECTRA:				

Biblioteki spektralne tworzone w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW posiadają dodatkowo nagranie cyfrową kamerą video, które wykonane jest w trakcie pomiarów terenowych wzbogacając dokumentację terenową.

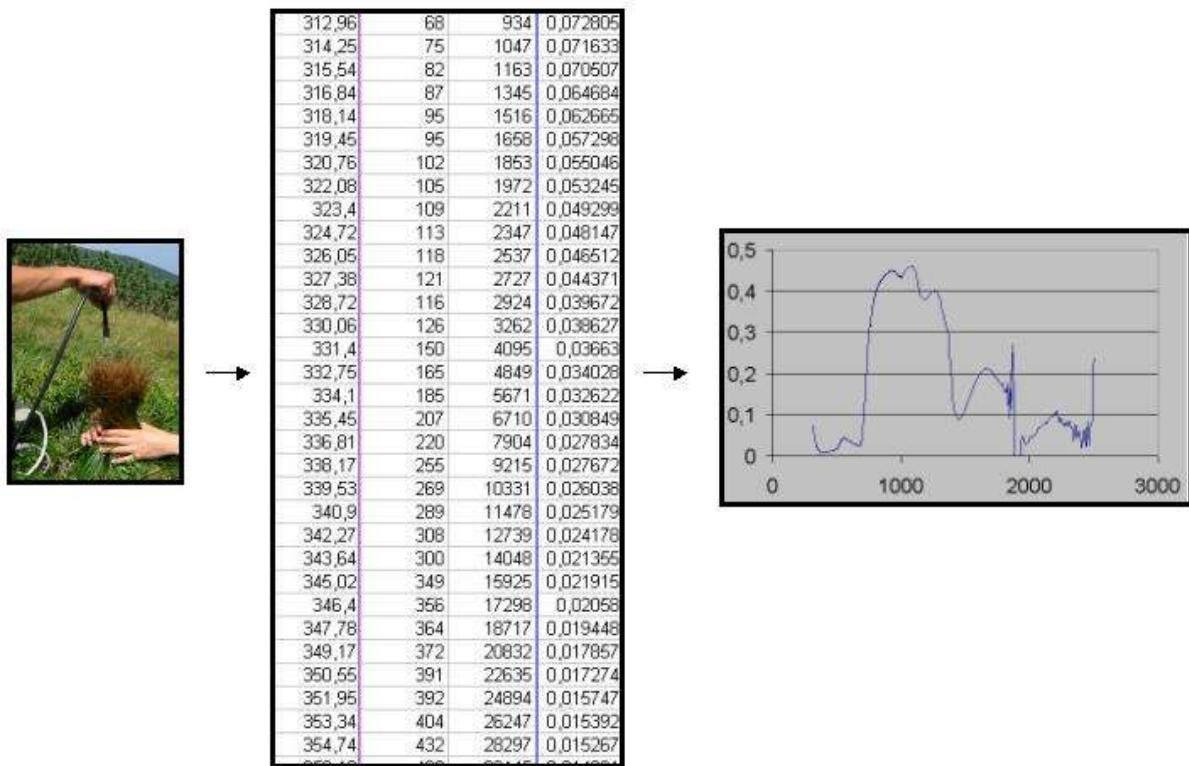




Rycina 42.1 Pomiary spektrometryczne spektrometrem hiperspektralnym FieldSpec HH

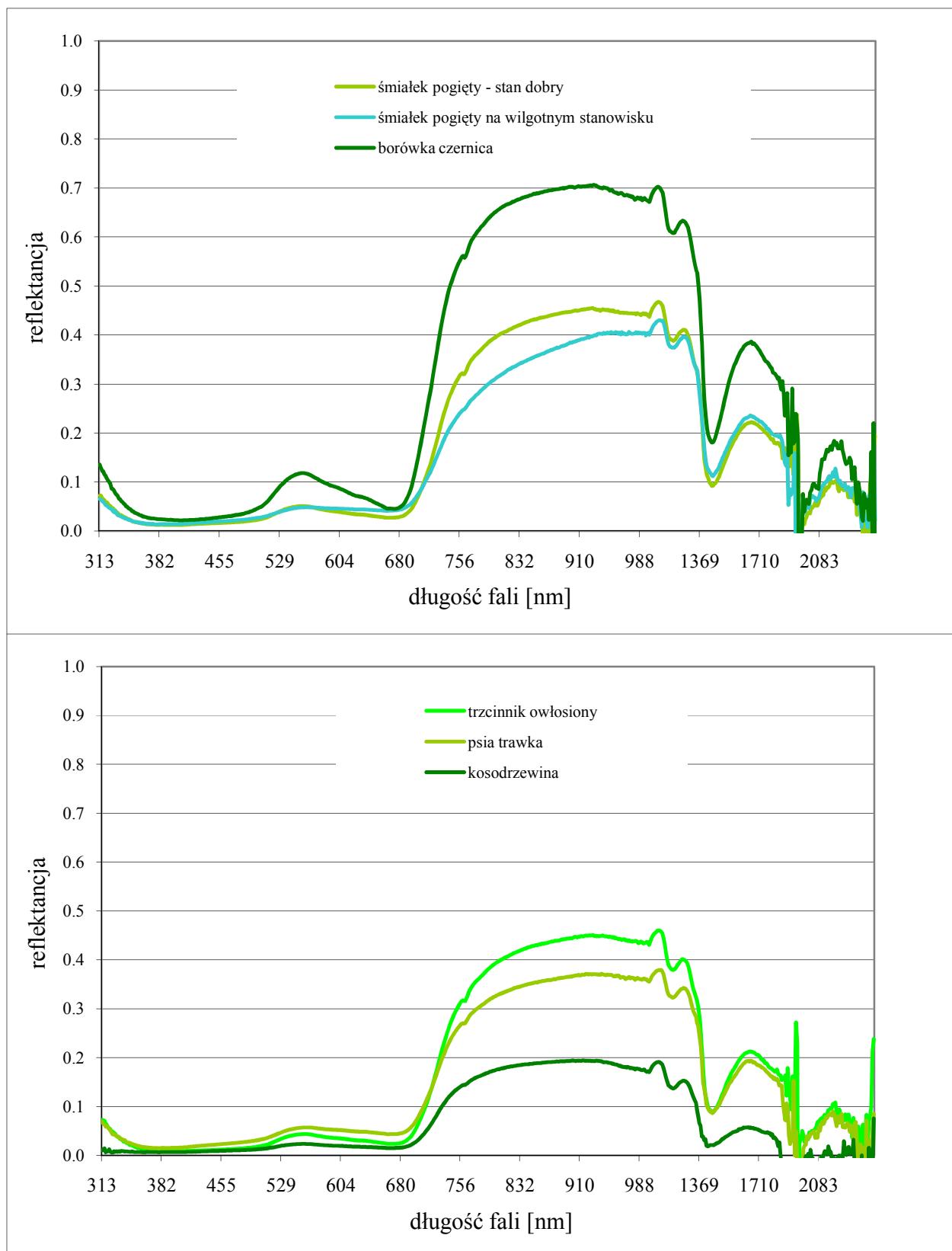


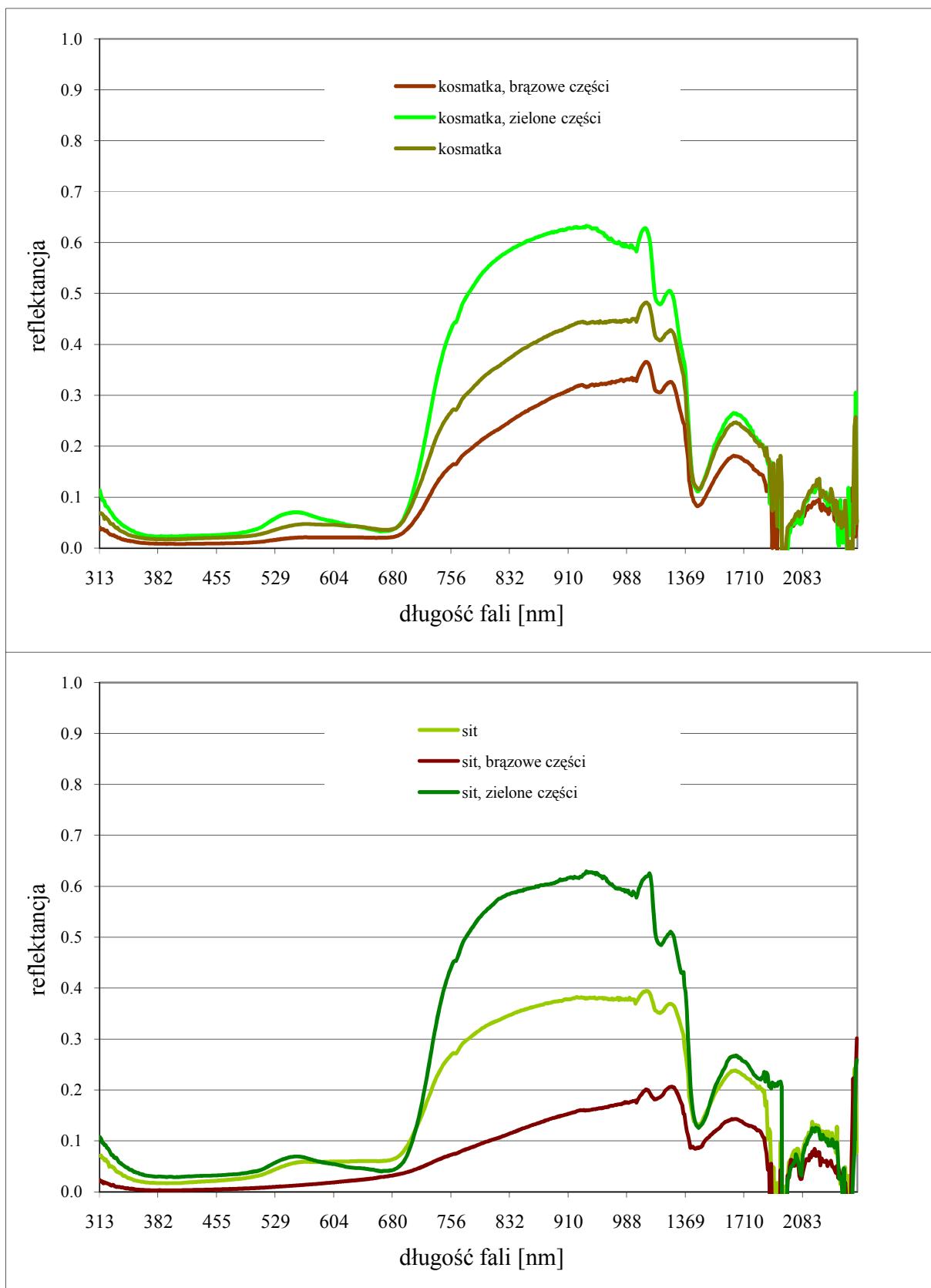
Rycina 42.2 Pomiary spektrometryczne spektrometrami hiperspektralnymi a) GER 3700, b) FieldSpec® Pro. W obu przypadkach wiązka promieniowania odbitego dociera do spektrometru poprzez światłowód. Umożliwia to wykonanie precyzyjnego pomiaru nawet niewielkich obiektów. Położenie każdego obiektu jest określone za pomocą pomiaru GPS.

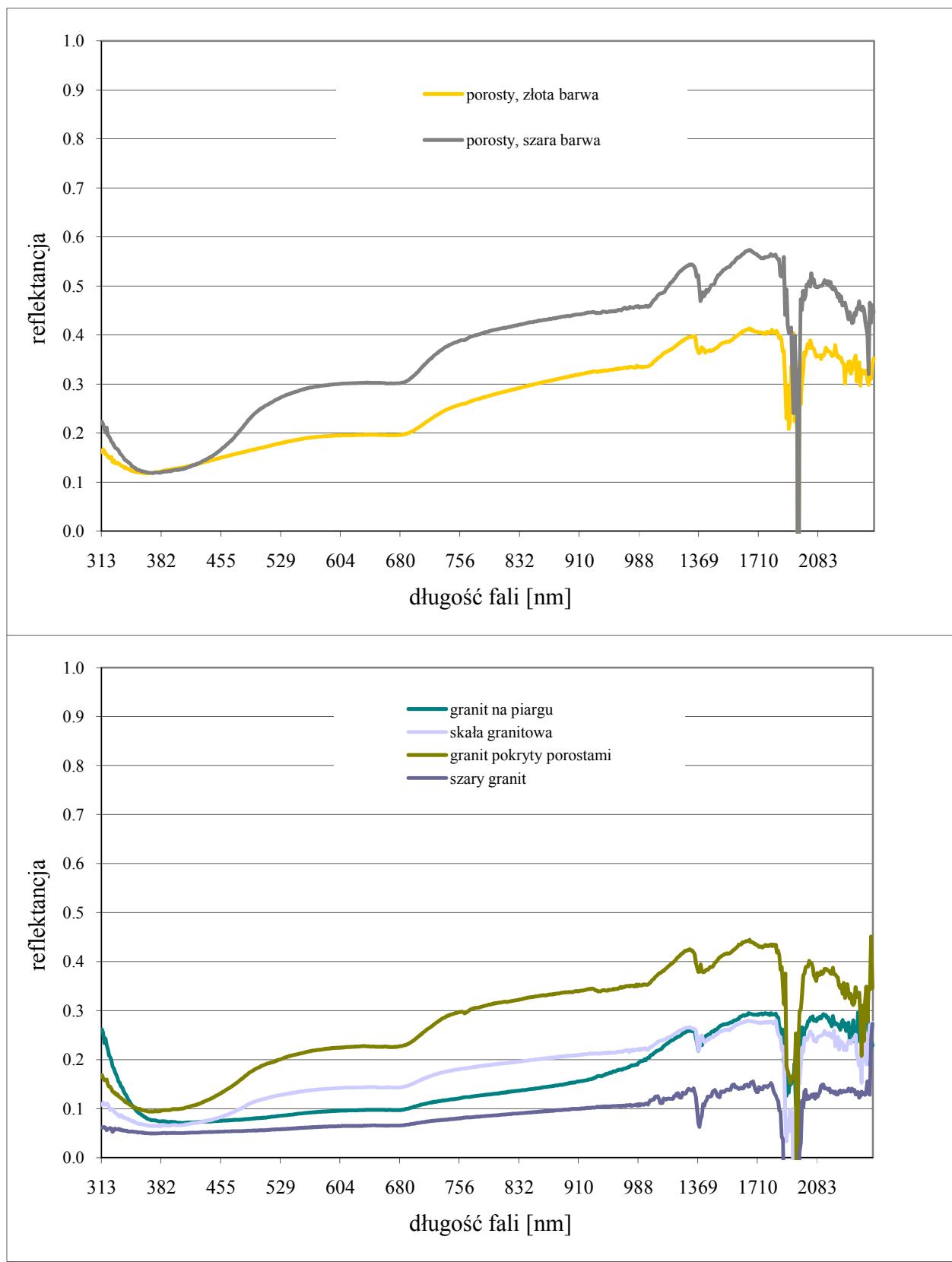


**Rycina 42.3 Pozyskanie krzywej odbicia spektralnego: pomiar spektrometryczny, obliczenie spektralnego współczynnika odbicia, wyrysowanie krzywej.**

Poniżej zaprezentowane zostały wybrane charakterystyki gatunków roślin tworzących stosunkowo duże i homogeniczne zbiorowiska ekosystemów wysokogórskich (Rycina 42.4), które zostały wykorzystane do klasyfikacji obrazów hiperspektralnych DAIS 7915 z wykorzystaniem metody Spectral Angle Mapper, bazującej na analizie charakterystyk spektralnych.



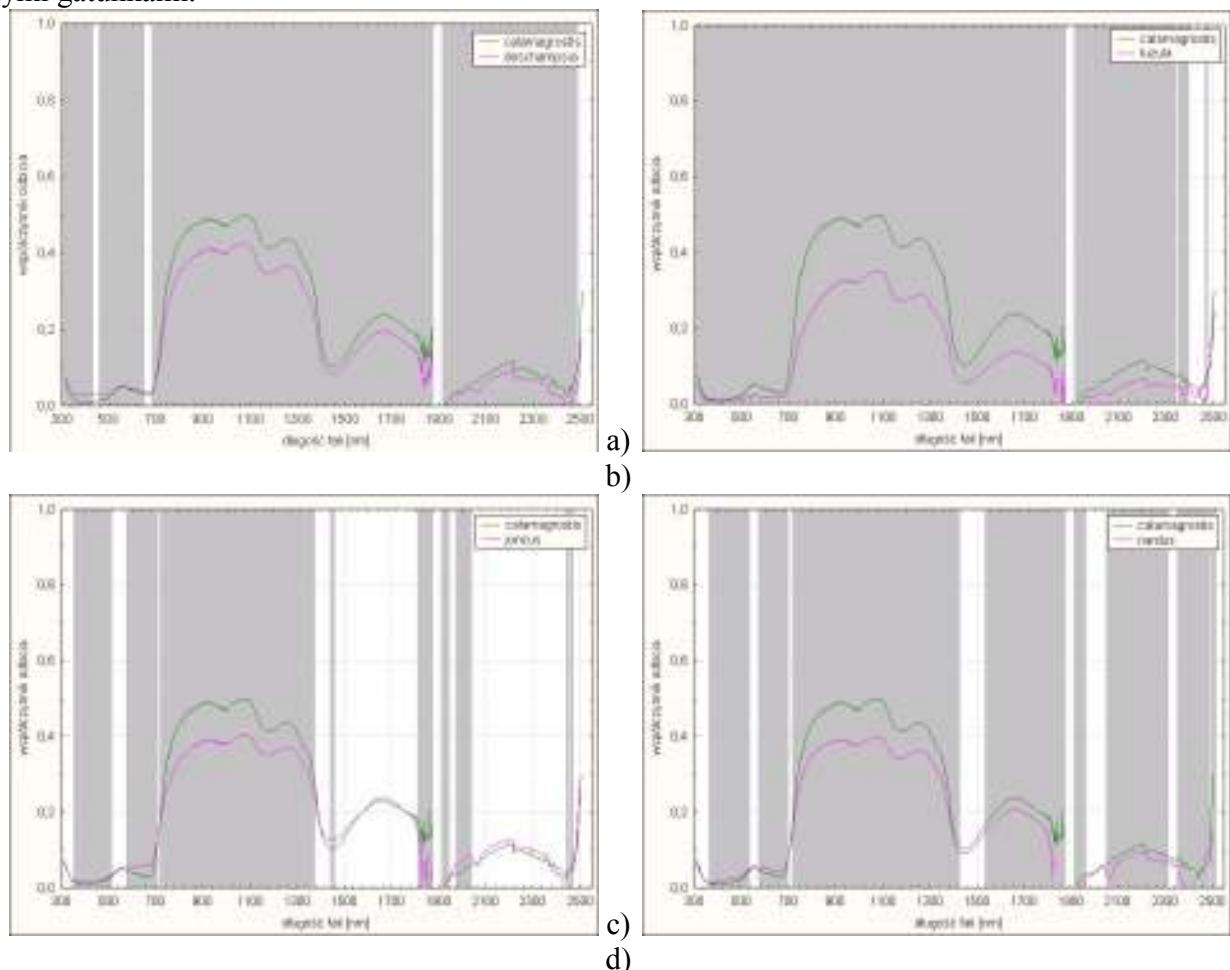


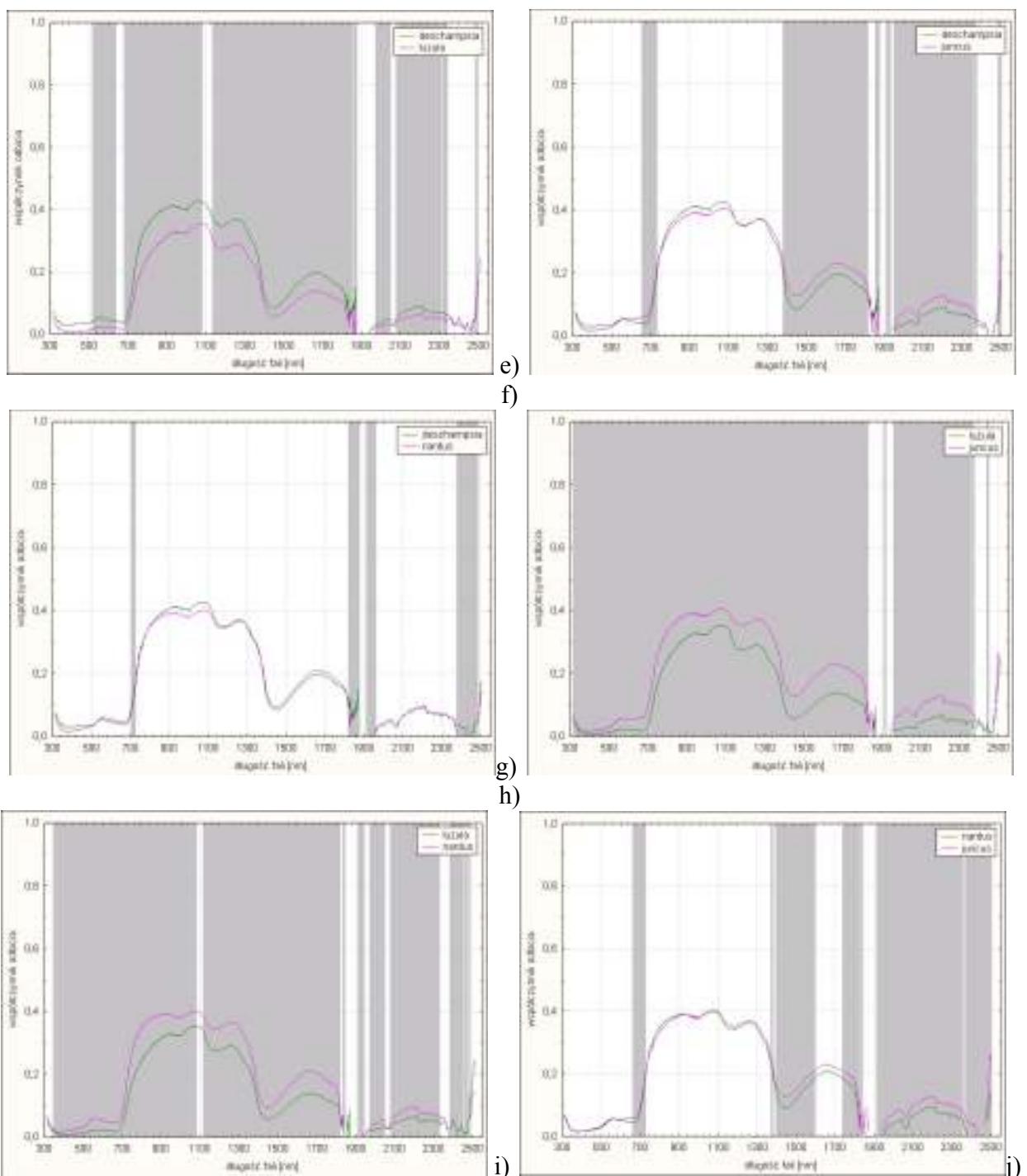


Rycina 42.4. Wybrane charakterystyki gatunków i skał Tatr Wysokich

Udostępnianie danych odbywa się przy pomocy plików tekstowych lub w specjalistycznym formacie, dedykowanym określonemu standardowi, np. ENVI

Charakterystyki spektralne mierzone dla poszczególnych form pokrycia charakteryzują się stosunkowo dużymi różnicami. Problemem pozostaje wyróżnienie poszczególnych gatunków o pokroju trawiastym. Dlatego istotne wydaje się szczegółowe porównanie tych gatunków pod względem spektralnym. Zastosowany do porównania średnich wartości odbicia spektralnego w poszczególnych kanałach test *t Studenta* wykazał duże statystyczne zróżnicowanie średnich w przypadku par: trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villosa*) – śmiałek darniowy (*Deschampsia caespitosa*), trzcinnik-kosmatka, trzcinnik-bliźniczka, śmiałek-kosmatka, kosmatka-sit oraz kosmatka-bliźniczka (Rycina 42.5 a, b, d, e, h, i). Wskazuje to na duże możliwości rozróżnienia pomiędzy tymi gatunkami na podstawie ich charakterystyk spektralnych. W przypadku pary trzcinnik-sit (Rycina 42.5c) badane zróżnicowanie jest istotne głównie dla zakresów spektralnych poniżej 1350 nm, natomiast w przypadku par śmiałek-sit oraz bliźniczka-sit (Rycina 42.5 f, j) istotne statystycznie różnice średnich występują głównie w zakresach spektralnych powyżej 1350 nm. Największe trudności w identyfikacji na podstawie krzywych spektralnych mogą wystąpić w przypadku pary śmiałek-bliźniczka (Rycina 42.5g), ponieważ jedynie w kilku wąskich zakresach spektralnych daje się zaobserwować statystycznie istotne różnice współczynnika odbicia między tymi gatunkami.

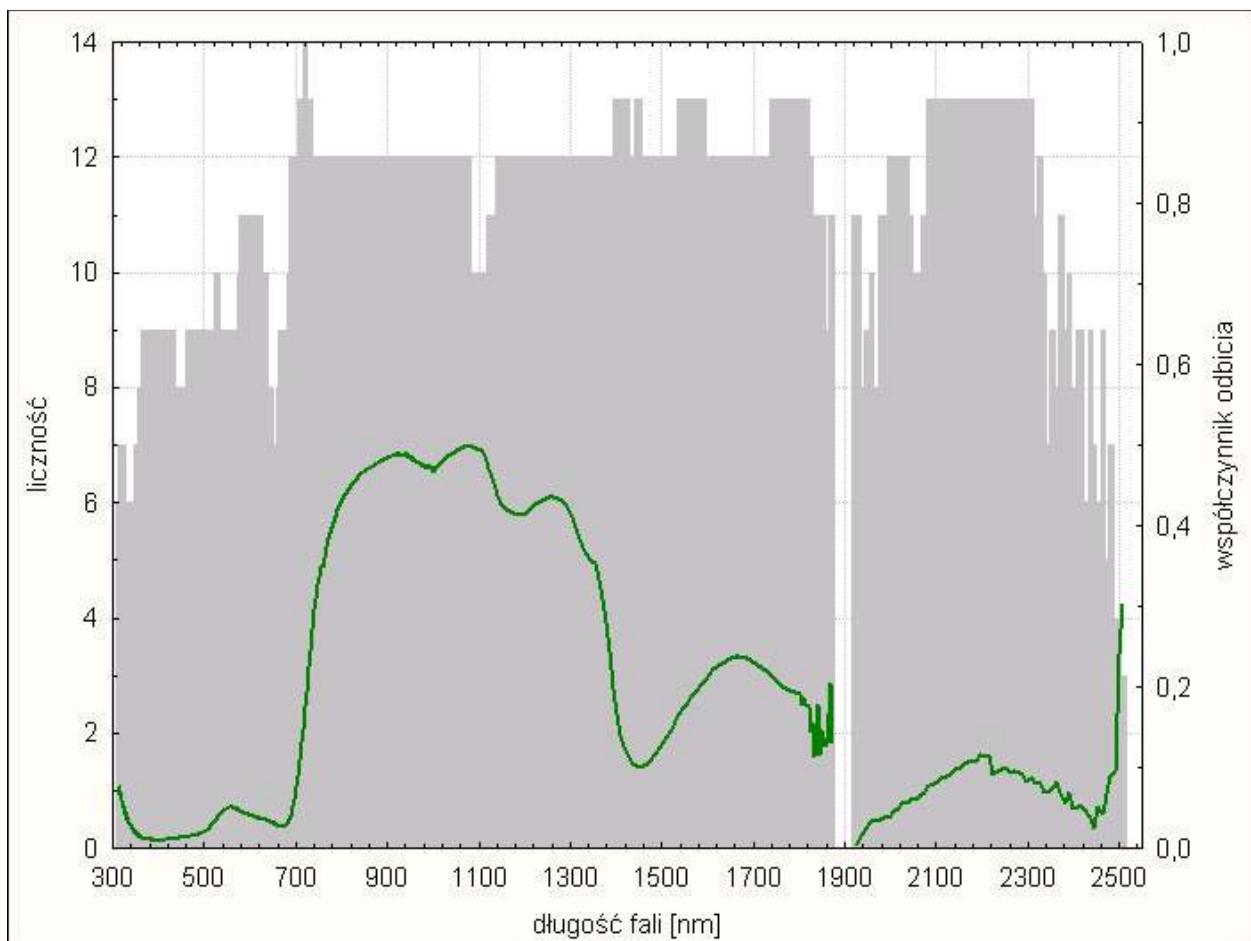




**Rycina 42.5:** Wykresy istotności statystycznej na poziomie  $p < 0.05$  (kolor szary) dla par gatunków:  
 a) trzcinnik-śmialek; b) trzcinnik-kosmatka; c) trzcinnik-sit; d) trzcinnik-bliźniczka; e) śmialek-kosmatka; f) śmialek-sit; g) śmialek-bliźniczka; h) kosmatka-sit; i) kosmatka-bliźniczka j) bliźniczka-sit.

Zestawienie wyników testów statystycznych przeprowadzonych dla poszczególnych par gatunków pozwala określić, które kanały spektralne są najbardziej przydatne w procesie identyfikacji badanej roślinności trawiastej. Rycina 42.6 przedstawia liczebność występowania statystycznie istotnej

różnicy średnich wartości współczynnika odbicia w poszczególnych zakresach spektralnych (lewa oś wykresu – szare słupki). Dla łatwiejszej interpretacji na wykres naniesiona została również typowa krzywa odbicia spektralnego dla roślinności trawiastej.



Rycina 42.6. Liczebność występowania statystycznie istotnych różnic średnich wartości współczynnika odbicia spektralnego (szare słupki, lewa oś)

#### 4.3 Pomiary akumulowanej energii fotosyntetycznej czynnej (APAR)

Głównym źródłem energii dla roślin jest zakres widzialny i nazywany jest on promieniowaniem fotosyntetyczne czynnym (PAR - Photosynthetic Active Radiation). Energia światłna zawarta w fotonach zamieniana jest w głównej mierze na energię wysokoenergetycznych wiązań chemicznych ATP, a następnie wykorzystywana jest w procesach fizjologicznych roślin.

W przypadku badań teledetekcyjnych głównym wskaźnikiem świadczącym o kondycji roślin jest analiza widma elektromagnetycznego w zielonym, czerwonym i podczerwonym zakresie promieniowania. Analizy te można przeprowadzać za pomocą szeregu wskaźników roślinnych. Generalna idea tych pomiarów sprowadza się do następującej prawidłowości: rośliny absorbują promieniowanie w niebieskim i czerwonym zakresie przez chlorofil, a odbijają w zielonym. Im więcej jest chlorofili i jest on w lepszym stanie, tym minima absorpcji się zwiększa. Przekłada się

to na możliwość rejestracji akumulowanego promieniowania z zakresu fotosyntezy APAR (Accumulated Photosynthetic Active Radiation).

Pomiar APAR jest wykonywany za pomocą instrumentu zwanego ceptometrem liniowym (AccuPAR). Badanie polega na rejestracji gęstości strumienia promieniowania bezpośredniego dochodzącego do roślin ( $\text{PAR}_0$ ), przenikającego przez nie ( $\text{PARt}$ ), odbitego od gleby ( $\text{PARs}$ ) oraz od górnej powierzchni roślin ( $\text{PARc}$ ). Mierzony zakres promieniowania elektromagnetycznego to przedział 400-700 nm. Wykonanie powyższego pomiaru pozwala na obliczenie bilansu strumieni ilości energii zakumulowanej według wzoru (17):

$$\text{APAR} = (\text{PAR}_0 + \text{PARs}) - (\text{PARt} + \text{PARc}) \quad (17)$$

Jednostką względną tego pomiaru jest współczynnik fAPAR (frakcja APAR nazywana jest też produktywnością (p)). Jest on obliczany jako stosunek zakumulowanego promieniowania (APAR) do całkowitej energii dopływającej do powierzchni roślin ( $\text{PAR}_0$ )(18).

$$p=f\text{APAR}=\text{APAR}/\text{PAR}_0 \quad (18)$$

Każdy poligon pomiarowy powinien zostać pomierzony w kilku powtórzeniach w różnych miejscach. Na opracowanie wyników powinno się składać obliczenie APARu i jego względnej postaci (fAPAR), umożliwiającej porównanie wyników z różnych warunków oświetlenia i terminach fenologicznych.

#### **4.4 Pomiary powierzchni projekcyjnej liści LAI**

Wykorzystanie energii PAR przez rośliny wiąże się głównie z przyrostem biomasy, która pośrednio może być rejestrowana teledetekcyjnie, np. poprzez wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści (LAI - Leaf Area Index). Pomiar LAI polega na obliczeniu sumarycznej powierzchni liści przypadających na jednostkową powierzchnię terenu. Wykorzystuje się do tego celu instrument LAI-2000 Plant Canopy Analyser firmy Li-Cor.

Pomiar bazuje na analizie promieniowania rozproszonego docierającego do detektora typu „rybie oko” w zakresie fal niebieskich w całej półsferze. Najpierw wykonuje się pomiar referencyjny (powyżej baldachimu roślinnego), a następnie kilka pomiarów pod roślinnością. Ze względów statystycznych każdy poligon powinien zostać scharakteryzowany kilkoma powtórzeniami. Własne doświadczenia przeprowadzone na polu testowym w Szymbarku, jak i przegląd literatury (Welles, Norman, 1991) potwierdzają dużą korelację ( $R^2=0,96$ ) pomiaru teledetekcyjnego i biometrycznego (wycięcie i splanimetrowanie liści znajdujących się na danej powierzchni jednostkowej). Pomiar LAI-2000 Plant Canopy Analyzer jest powszechnie stosowany w badaniach, gdyż nie niszczy roślin i pozwala szybko, z dużą dokładnością wykonać pomiary (odchylenie standardowe wykonanych pomiarów było niższe niż 3-5%).

#### **4.5 Pomiary wskaźnika temperaturowego ts-ta**

Pomiar temperatury termodynamicznej powietrza (ta) znajdującego się nad roślinnością oraz temperatury radiacyjnej powierzchni liści (ts) pozwala na analizę procesów ewapotranspiracji roślin, wskazując pośrednio na stress wody. Idea pomiaru sprowadza się do pomiaru spektralnej luminancji energetycznej w zakresie podczerwieni termalnej (8-14 μm) i przeliczeniu jej na temperaturę według prawa Stefana-Boltzmana. Temperatura termodynamiczna powietrza (ta) jest mierzona sondą zewnętrzną do pomiarów powietrza iRtec MiniRay.

W każdym punkcie pomiarowym należy wykonać kilka powtórzeń każdego pomiaru. Opracowanie wyników polega na obliczeniu: średniej temperatury radiacyjnej powierzchni liści danego punktu

pomiarowego (ts), średniej temperatury powietrza znajdującego się nad danym zbiorowiskiem (ta) oraz wskaźnika temperaturowego ts-ta.

## 5 Metody rejestracji sygnału

Ze względu na sposób rejestracji sygnału wyróżniamy metody aktywne i pasywne. W pierwszym przypadku system wykorzystuje własne źródło promieniowania elektromagnetycznego, które wysyła wiązkę w kierunku badanego obiektu, następnie odbiera sygnał odbity. Jako przykład mogą służyć lidary i radary. Metody pasywne bazują natomiast napomiarze promieniowania pochodzącego głównie ze Słońca, które odbija się od badanego obiektu i trafia do detektora. W zakresie podczerwieni, źródłem takiego promieniowania są fale emitowane przez badane obiekty, jako przykłady takich urządzeń mogą służyć spektrometry, radiometry, skanery, kamery. Kolejny istotny podział wynika z podziału promieniowania elektromagnetycznego na zakresy promieniowania stosowanego w teledetekcji, to: pasmo optyczne ( $0,3\text{-}50 \mu\text{m}$ ) i mikrofalowe ( $0,1\text{-}100 \text{ cm}$ , co odpowiada  $300 \text{ GHz} - 300 \text{ MHz}$ )<sup>4</sup>. W paśmie  $0,3\text{-}2 \mu\text{m}$  dominuje promieniowanie odbite, w przedziale  $2\text{-}5 \mu\text{m}$  współwystępuje mieszanie sygnałów odbitych oraz emitowanych przez badany obiekt. Ze względu na obecność okna atmosferycznego w badaniach teledetekcyjnych powszechnie wykorzystuje się zakres  $8\text{-}12 \mu\text{m}$ . Zakres ten jest najefektywniejszy energetycznie ponieważ długości fali  $9,7 \mu\text{m}$  odpowiada temperatura  $300 \text{ K}$ , czyli powszechnie występująca w środowisku (Rataj, 2000; Liou, 2002<sup>35</sup>).

Dane teledetekcyjne mogą być zapisywane jako rastrowe lub wektorowe. W przypadku rastrowych najmniejszą jednostką jest piksel, do którego przypisane są dane przestrzenne i opisowe. Taki model składa się z dwuwymiarowej macierzy – szachownicy elementów o określonym przez współrzędne położeniu.

Obrazy charakteryzowane są przez cztery rodzaje rozdzielczości: przestrzenną, spektralną, radiometryczną i dla wielu zastosowań, istotna jest także rozdzielcość czasowa (Ciolkosz, Jakomulska, 2004<sup>36</sup>). Rozdzielcość przestrzenna określana jest wielkością najmniejszej rejestrowanej powierzchni terenu przedstawianej jako najmniejszy, homogeniczny element obrazu (piksel). W technicznym ujęciu rozdzielcość ta jest determinowana przez chwilowe pole widzenia detektora (IFOV) oraz wysokości lotu. W praktycznym wymiarze im mniejszy piksel, tym zobrazowanie przedstawia więcej szczegółów, pociągając za sobą zwiększenie wielkości plików, co w przypadku badań prowadzonych na większych obszarach jest znaczącym utrudnieniem. W przypadku wysokorozdzielczych sensorów (np. Ikonos, QuickBird)<sup>5</sup> rozdzielcość ta waha się w granicach  $0,6\text{-}4 \text{ m}$ , dla satelitów środowiskowych wartości te oscylują w granicach kilkudziesięciu – kilkuset metrów, (np. Landsat ETM+  $15\text{-}60 \text{ m}$ , SPOT HRVR  $10\text{-}20 \text{ m}$ , a SPOT Vegetation  $1000 \text{ m}$ ), dla satelitów meteorologicznych wartości te oscylują wokół kilku kilometrów (Meteosat  $2500\text{-}5000 \text{ m}$  w punkcie nadiowym).

Rozdzielcość spektralna definiowana jest szerokością połówkową zastosowanych filtrów, co wpływa na liczbę kanałów w jakich wykonywane jest zobrazowanie. W przypadku sensorów satelitarnych szerokość połówkowa stosowanych detektorów panchromatycznych obejmuje kilkaset nanometrów (zazwyczaj cały zakres widzialny), natomiast poszczególnych kanałów spektralnych wynosi kilkadziesiąt nanometrów (QuickBird: kanał panchromatyczny rejestrowany jest w zakresie  $450\text{-}900 \text{ nm}$ , zakres B  $450\text{-}520 \text{ nm}$ , G  $520\text{-}600 \text{ nm}$ , R  $630\text{-}690 \text{ nm}$ , Near-IR  $760\text{-}900 \text{ nm}$ ; Landsat ETM+: kanał panchromatyczny:  $520\text{-}900 \text{ nm}$ , kanały: 1:  $450\text{-}520 \text{ nm}$ , 2:  $520\text{-}600 \text{ nm}$ , 3:  $630\text{-}690$

<sup>4</sup> Zależność pomiędzy długością fali ( $\lambda$ ), a częstotliwością ( $v$ ) określona jest wzorem  $\lambda v = c$ . Prędkość światła w próżni ( $c$ ) wynosi około  $2,99793 \pm 1 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

<sup>5</sup> Dane techniczne pochodzą ze strony [www.eurimage.com](http://www.eurimage.com), <http://eo1.usgs.gov/hyperion.php> oraz domowych stron poszczególnych systemów satelitarnych

nm, 4: 760-900 nm, 5: 1550-1750 nm, 6: 10420-12500 nm, 7: 2080-2350 nm. Specjalną grupę sensorów stanowią instrumenty hiperspektralne, w przypadku których rozdzielcość spektralna wynosi kilka – kilkanaście nanometrów, a liczba stosowanych kanałów przekracza sto. Za przykład może służyć satelita Hyperion, którego rozdzielcość przestrzenna wynosi 30 m (szerokość pasa 7,5x100 km), a spektralna 10 nm. Liczba rejestrowanych kanałów 220 w zakresie 440-2500 nm.

Rozdzielcość radiometryczna, zgodnie z definicją *Glossary of Remote Sensing Technology (Committee on Earth Observations Satellites CNES*<sup>37</sup>), oznacza ilość potrzebnej energii do podniesienia sygnału obrazu o jeden poziom. Natomiast zgodnie z ogólnie przyjętą definicją rozdzielcość radiometryczna oznacza ilość poziomów na jakich może zostać zapisany zarejestrowany sygnał. A. Ciołkosz i A. Jakomulska (2004<sup>36</sup>) definiują ją także jako „czułość detektora na różnicowanie wielkości energii docierającej do niego od poszczególnych obiektów terenowych. Oznaczających liczbę rozróżnialnych poziomów sygnału wyrażonych na czarno-białych zdjęciach tonami szarymi (achromatycznymi)”. Oko ludzkie jest zdolne do rozróżnienia około szesnastu takich poziomów szarości. Jednakże zastosowanie większej liczby poziomów ułatwia łatwiejszą obróbkę cyfrową i prowadzenie klasyfikacji danych. Obecnie wykorzystywane dane satelitarne zapisane są na kilku-kilkudziesięciu tysiącach stopni szarości (Landsat ETM+ 256 poziomów, QuickBird – 2048, Hyperion – 65536).

Rozdzielcość czasowa oznacza czas niezbędny do wykonania ponownego zobrazowania danego obszaru. Dla satelitów meteorologicznych jest on bardzo krótki (MSG – 15 min., Meteosat - 30 min.), natomiast dla satelitów pogodowych wynosi kilkanaście dni (Ikonos – 11 dni, Landsat – 16 dni, Hyperion 16 – dni).

Cyfrowe obrazy wielospektralne teledetekcyjne składają się z wielu kanałów. Przechowywanie poszczególnych obrazów może odbywać się na trzy sposoby (Ciołkosz, Jakomulska, 2004<sup>36</sup>):

- BIP – pasmo z przeplotem pikseli. Wartości odpowiadające każdemu kanałowi zapisane są sekwencyjnie. Najpierw zapisywane są wartości pierwszego piksela w pierwszej linii w pierwszym kanale, potem w drugim, trzecim itd.
- BIL – pasmo z przeplotem linii. Zapis następuje linia po linii: najpierw cała pierwsza linia z pierwszego kanału, potem z drugiego, potem z trzeciego itd. Następnie zapisywana jest druga linia z pierwszego kanału, drugiego, trzeciego itd.
- BSQ – sekwencja pasm. Zapisany jest najpierw cały pierwszy kanał, potem drugi, trzeci itd.

Cyfrowe obrazy są zapisywane za pomocą różnych formatów. Oto kilka przykładów:

- Windows Bitmap Format (BMP) – zapis w RGB
- GIF – obraz z indeksowanymi kolorami
- JPEG – zapis w odcieniach szarości, CMYK oraz RGB
- TIFF – uniwersalny zapis graficzny
- GeoTIFF – zapis formatu graficznego wraz z informacją geograficzną
- GRID – struktura skompresowanych warstw danych rastrowych

Poszczególne programy teledetekcyjne mają własne formaty rastrowe i wektorowe. Obrazy w programie ERDAS zapisywane są w dwóch plikach: o rozszerzeniu .img, gdzie przechowywany jest obraz oraz .rrd, który zawiera informacje nagłówkowe. W przypadku programu ENVI pierwszy plik ma rozszerzenie .bsq lub .img, nagłówkowy natomiast .hdr.

## **6 Podstawowe operacje na obrazach wielo- i hiperspektranych w programie ENVI 4.5.**

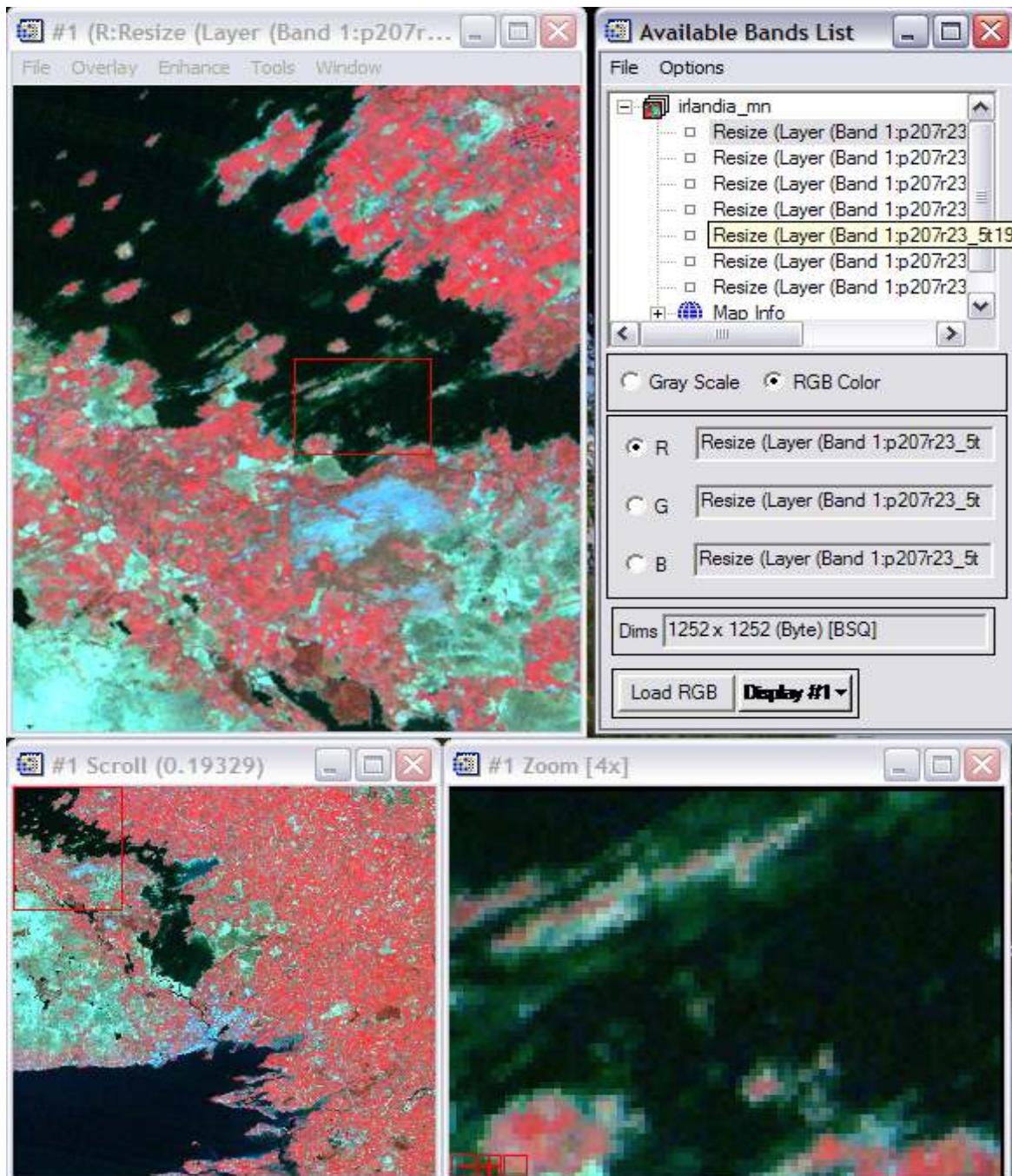
### **6.1 Wyświetlanie obrazów**

Wszelkie operacje na obrazach są poprzedzone ich wizualną oceną. W programie ENVI 4.5 możliwe jest otwarcie trzech rodzajów danych: rastrowych, wektorowych oraz krzywych odbicia spektralnego ([ENVI User's Guide, 2001<sup>38</sup>](#)).

Aby wyświetlić obraz rastrowy należy wybrać opcję: File->Open Image File. W oknie Available Bands List pojawiają się możliwe do wyświetlenia obrazy z kanałami (Rycina 61.1). Wyświetlenie pojedynczego kanału odbywa się przy pomocy opcji Load Band, a barwnej kompozycji RGB – Load RGB, po zaznaczeniu trzech wybranych kanałów. Następnie widoczne są trzy w trzech oknach:

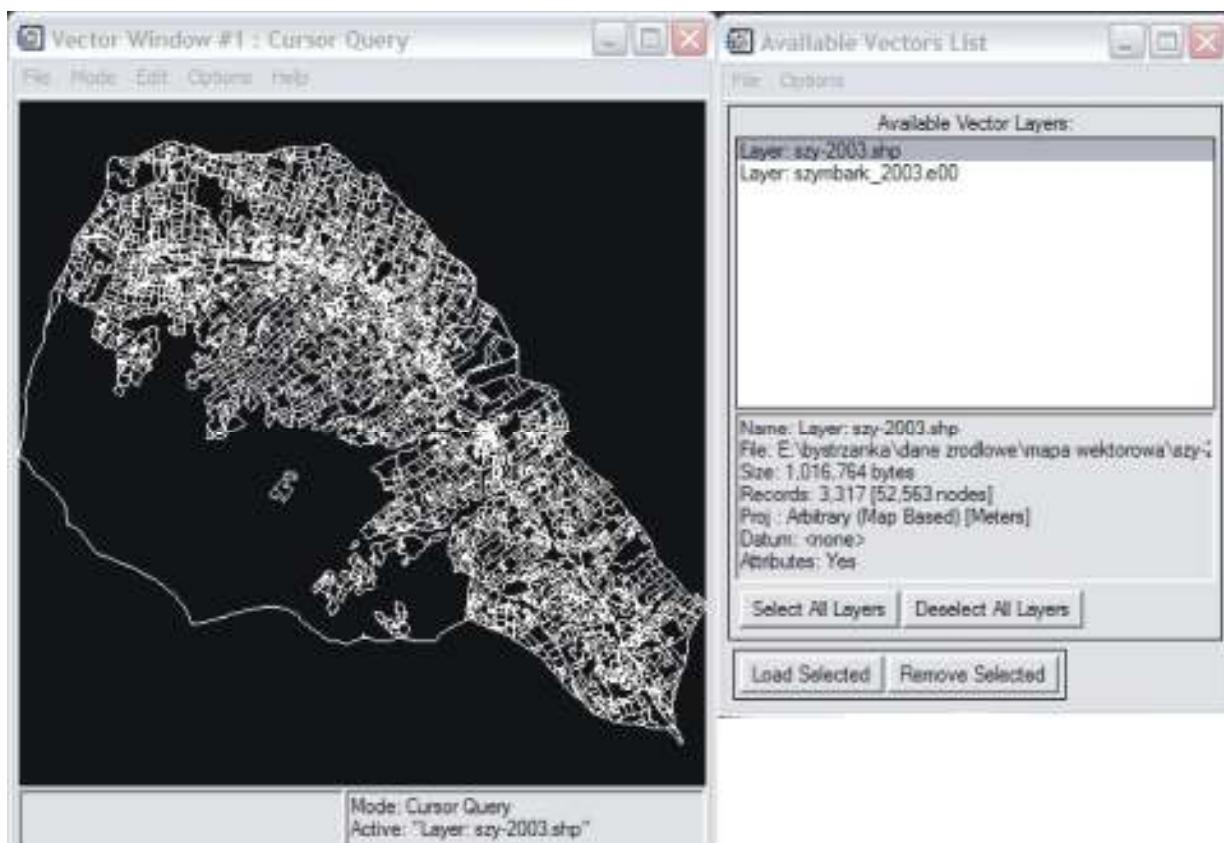
- Scroll – okno z zmniejszonym całym obrazem
- Image – okno z fragmentem obrazu w podstawowej rozdzielczości
- Zoom – okno z powiększonym fragmentem obrazu

Na pierwszych dwóch widoczne są zasięgi mniejszych okien przy pomocy czerwonej ramki: okna Image w oknie Scroll oraz Zoom w Image.



**Rycina 61.1 Wyświetlanie obrazów cyfrowych w ENVI w trzech oknach: Image, Scroll i Zoom**

Pliki wektorowe otwierane są za pomocą opcji File->Open Vector File. Po pojawienniu się okna Available Vector List można sprawdzać atrybuty warstwy, dodawać je i usuwać oraz otwierać nowe warstwy w nowym oknie (rycina 61.2).



**Rycina 61.2 Wyświetlenie warstw wektorowych bez podkładu cyfrowego**

Aby otworzyć warstwę wektora na wyświetlnym obrazie należy w oknie obrazu (Image) wybrać w menu opcję Overlay->Vectors i wybrać warstwę. Następnie w oknie dialogowym wybierany jest Vector Parameters: File->Open Vector File i kliknąć Apply (rycina 61.3).



Rycina 61.3 Wyświetlenie warstw wektorowych na obrazach cyfrowych

Aby otworzyć plik z krzywymi odbicia spektralnego należy otworzyć okno do wyświetlania tego typu plików (opcja Window->Start New Plot Window z menu programu). Następnie otworzyć File->Input Data oraz zdefiniować rodzaj pliku, w jakim przechowywane są krzywe. Dopuszczalne do wyświetlania są biblioteki spektralne (Spectral Library) z zestawem krzywych oraz plik typu ASCII, który jest tworzony przez ENVI (rycina 61.4). W ten sposób wyświetlane są także krzywe odbicia spektralnego pobrane z obrazu.



Rycina 61.4 Okno z wyświetlonymi krzywymi odbicia spektralnego

## 6.2 Import i eksport plików

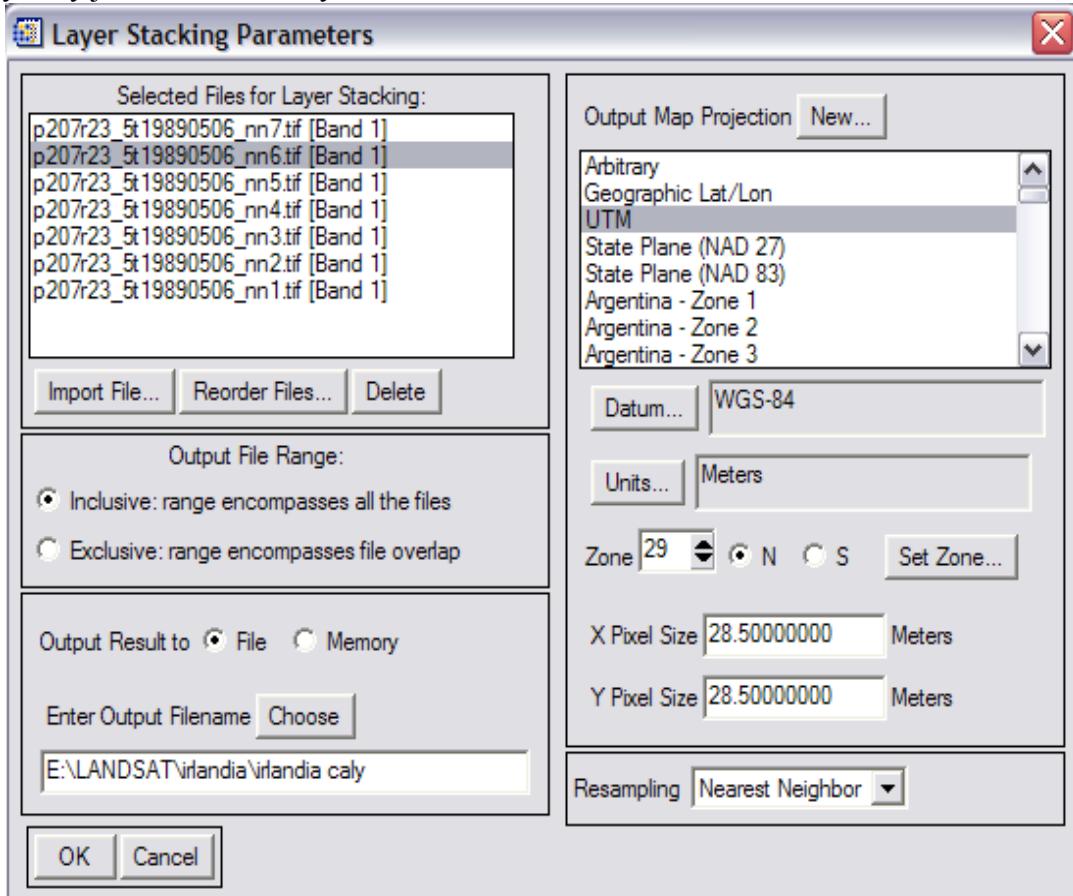
W programach teledetekcyjnych możliwa jest zmiana formatów charakterystycznych dla innych programów. W przypadku otwierania plików spoza standartowych formatów ENVI 4.5 możliwy jest import. Możliwe jest szybkie otworzenie zewnętrznych plików, jeśli wiadomo, jakiego typu jest plik. Odbywa się to przez opcję **File->Open External File** ([ENVI User's Guide, 2001<sup>38</sup>](#)). Otwieranie plików, które nie pochodzą z ENVI, wymaga podania parametrów umożliwiających ich przeliczenie i poprawne wyświetlenie (np. ilość kolumn i wierszy). Podobnie wygląda sytuacja z eksportem plików.

W programie ENVI 4.5 można w szybki sposób otworzyć między innymi następujące formaty:

- Obrazy Landsat: Temmatic Mapper, standartowy format GeoTIFF i inne
- Obrazy SPOT: dane nieprzetworzone, GeoSPOT (format ArcView rasterowy), SPOT VEGETATION
- Obrazy IKONOS – GeoTIFF i inne
- Obrazy IRS
- Obrazy QuicBird
- Obrazy AVHRR
- Obrazy ENVISAT
- Obrazy termalne: NASA Thermal infrared Multispectral Scanner, ASTER, MASTER (syulacja MODIS/ASTER), ENVISAT-AATSR
- Obrazy radarowe: RADARSAT, ERS, JESR, TOPSAR, ENVISAT-ASAR
- Dane z USGS: DEM i DSTS DEM
- Dane lidarowe
- Obraz pochodzące z innych programów teledetekcyjnych: ArcView raster, ERDAS IMGINE, ER MAPPER, PCI, ESRI GRID
- Modele terenu: USGS DEM, SRTM DEM
- Plik typu ASCII
- Bitmapa BMP
- Format JPEG

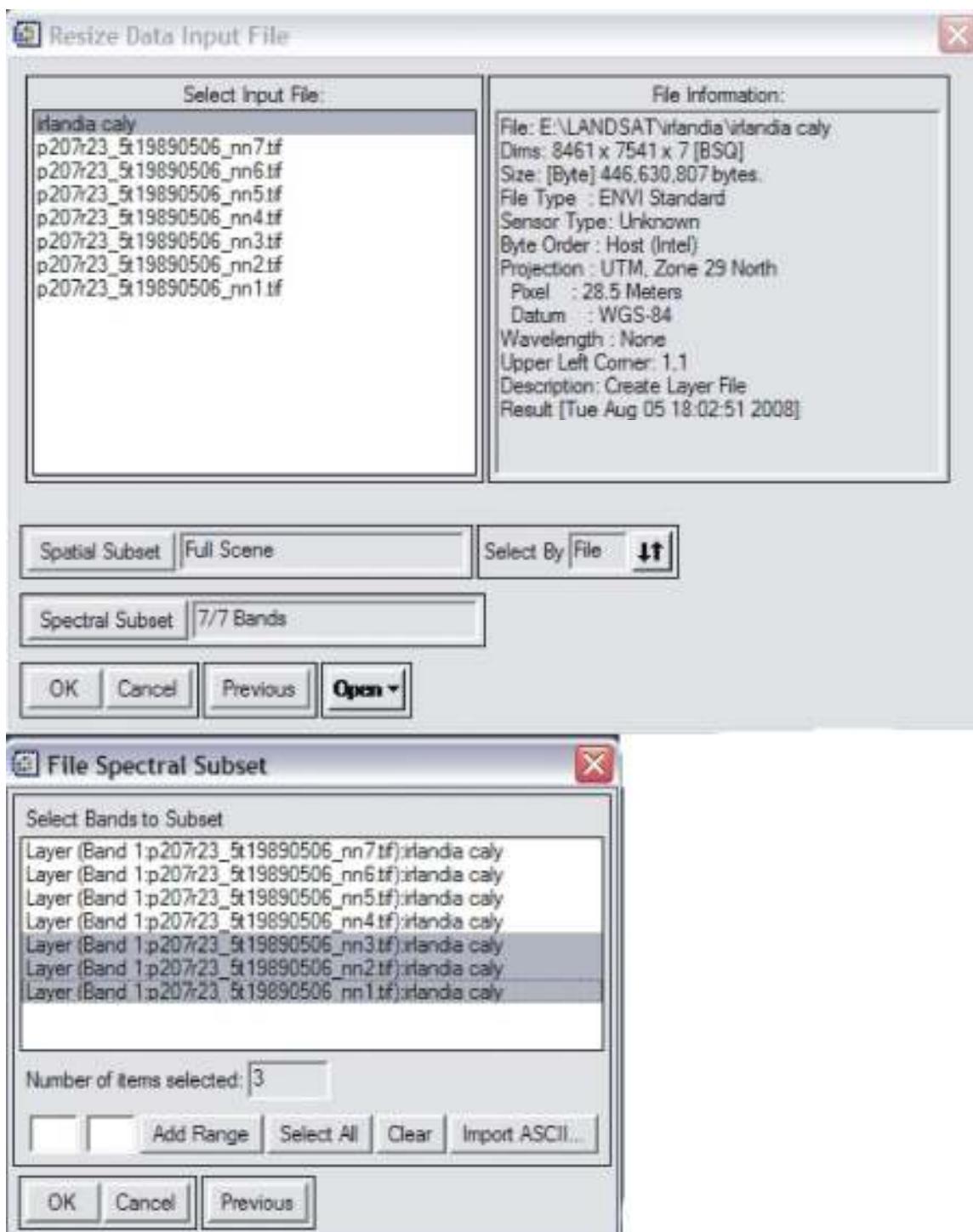
### 6.3 Wybór poszczególnych kanałów i fragmentów obrazów

Wyciągi spektralne nie zawsze zapisane są w postaci obrazu wielospektralnego, np. obrazy z satelity Landsat. Dlatego konieczne jest ich połączenie w jeden obraz wielokanałowy. Aby było to możliwe, wszystkie obrazy muszą posiadać tą samą geometrię i odwzorowanie. W programie ENVI łączenie odbywa się za pomocą zakładki w menu programu: Basic Tools->Layer Stacking (ENVI User's Guide, 2001<sup>38</sup>). W oknie dialogowym należy zaznaczyć pliki z poszczególnymi kanałami, wprowadzić nazwę pliku wyjściowego oraz wybrać odwzorowanie i metodę przepróbkowywania (więcej informacji w rozdziale 7), czyli przeliczania obrazu wejściowego na wyjściowy (rycina 63.1). Możliwa jest także zmiana kolejności warstw przy użyciu opcji Reorder Files. Po jej naciśnięciu pojawia się okno, gdzie możliwa jest zmiana kolejności warstw. W ten sposób otrzymywany jest wielokanałowy obraz.

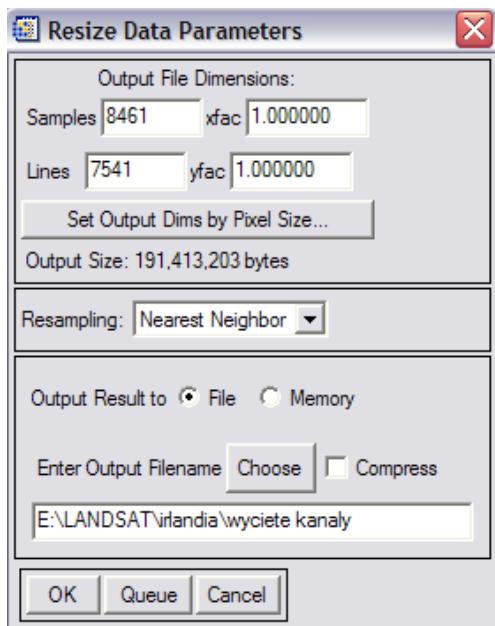


Rycina 63.1 Okno dialogowe przy łączeniu wyciągów spektralnych w jeden obraz wielokanałowy (wykaz poszczególnych kanałów do połączenia, nazwa pliku wyjściowego oraz odwzorowanie pliku wyjściowego).

Wybór poszczególnych kanałów odbywa się w programie ENVI za pomocą opcji umieszczonej w menu programu: Basic Tools->Resize Data (Spatial/Spectral). Zaznaczany jest plik, z którego mają być wycięte kanały. Przy użyciu opcji Spectral Subset zaznaczane są odpowiednie kanały (rycina 63.2). W następnym oknie dialogowym potwierdzana jest liczba linii i kolumn, określany jest sposób przepróbkowania oraz nazwa pliku wyjściowego (rycina 63.3).

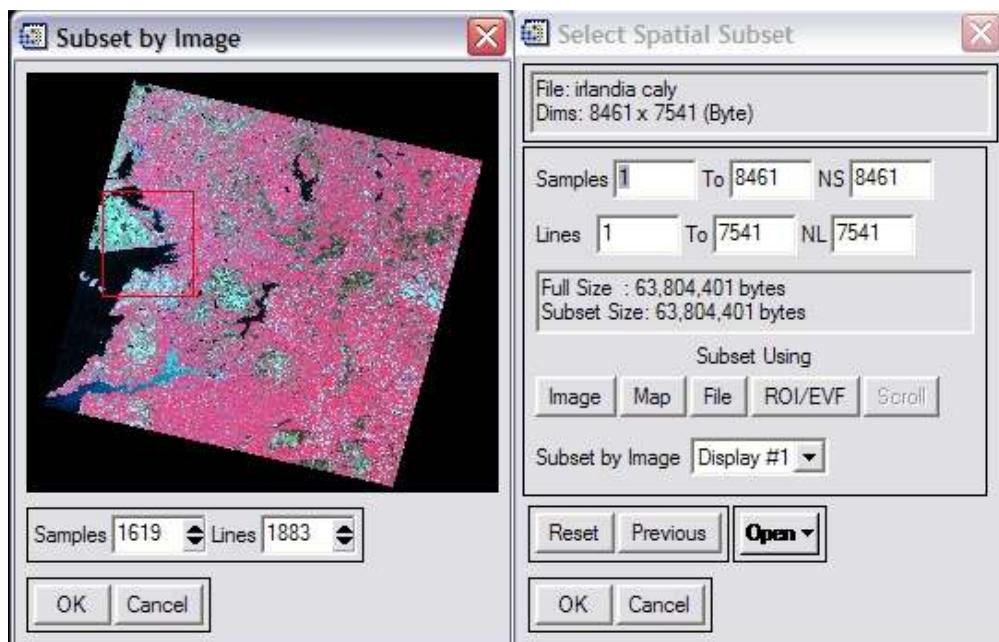


Rycina 63.2 Okno dialogowe do wyboru kanałów spektralnych z obrazu (zaznaczenie pliku z wyselekcjonowanymi kanałami oraz okno dialogowe z zaznaczonymi kanałami, z których ma zostać wyświetlony obraz)



Rycina 63.3 Okno dialogowe przy wyborze kanałów: definicja wielkości obrazu i sposobu przepróbkowywania

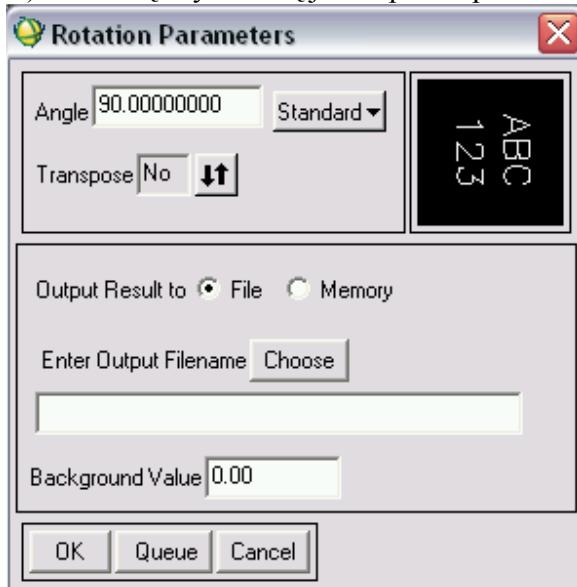
Inną przydatną opcją jest wycinanie fragmentu obrazu. Odbywa się to za pomocą zakładki z menu Basic Tools: Resize Data (Spatial/Spectral). Wybierany jest obraz, a następnie opcja Spatial Subset ([ENVI User's Guide, 2001<sup>38</sup>](#)). W oknie dialogowym można zdefiniować sposób wycinania fragmentu: Image – zaznaczanie prostokąta na obrazie, Map – wybór według współrzędnych geograficznych, File – z wczytanego pliku oraz z ROI (funkcja ROI jest opisana w dalszej części). Następnie należy określić metodę przepróbkowywania oraz nazwę pliku wyjściowego.



Rycina 63.4 Okno dialogowe do wycinania fragmentu obrazu według zaznaczonego prostokąta na obrazie

## 6.4 Odwrócenie obrazu

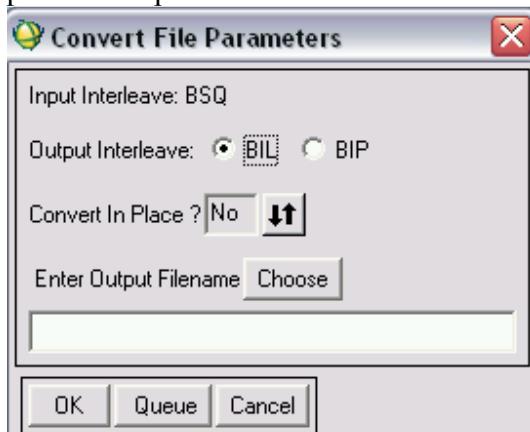
Odwrócenie obrazu odbywa się przy pomocy opcji Basic Tools->Rotate/Flip Data (Ryc.64.1). Powoduje odwrócenie obrazu o konkretny kąt lub odwrócenie lustrzane. Należy wprowadzić plik, następnie wybrać kąt, o jaki ma być odwrócony obraz. Można także dodać opcję Transpose (odbicie lustrzane). Ostatnią czynnością jest zapis do pliku.



Rycina 64.1 Okno dialogowe opcji obracania obrazu.

## 6.5 Eksport

Opcja umożliwia zmianę sposobu zapisu zmieniając opcje BIL/BIP/BSQ. Należy wybrać opcję Convert Data (Ryc. 65.1). Konieczne jest wczytanie pliku, wybrać typ zapisu a następnie poddać konwersji. Opcja Convert in place włączona konwertuje istniejący plik, natomiast wyłączona, tworzy nowy plik z nowym sposobem zapisu.

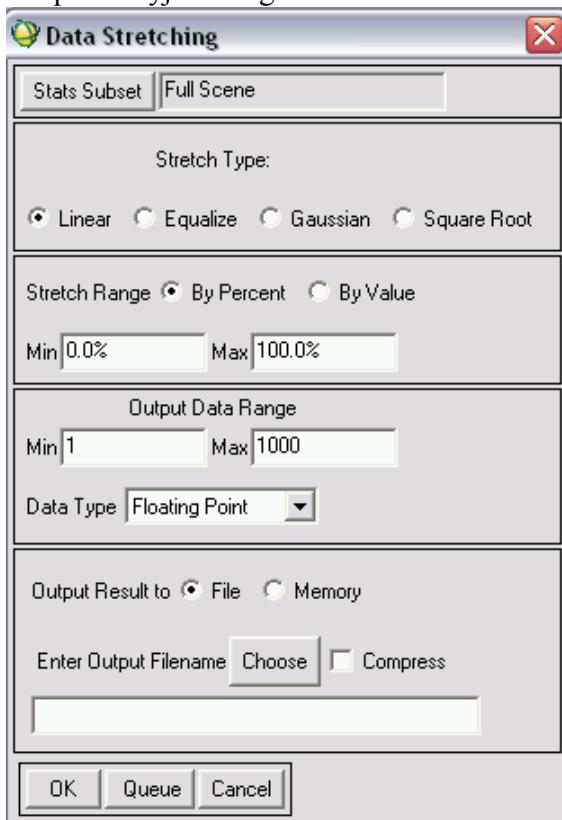


Rycina 65.1 Okno dialogowe do zmiany sposobu zapisu plików

## 6.6 Rozciągnięcie obrazu

Możliwe jest także rozciągnięcie radiometryczne obrazu za pomocą opcji Stretch Data w menu Basic Tools. W oknie Data Streching można wybrać zakres przestrzenny przetwarzanego obrazu, np. jego fragment (ryc. 66.1). Następnie należy wybrać plik wejściowy. Konieczny jest wybór

jednego z czterech typów zmian wartości pikseli: **Linear** (liniowe), **Equalize** (takie same podkreślenie dla wszystkich wartości), **Gaussian** (zgodne z rozkładem normalnym) oraz **Square Root** (podkreślające wartości skrajne). Dostępne są dwie opcje rozciągnięcia: **By value** (bierze pod uwagę wartości) lub **By percent** (rozciagnięcie procentowe). Następnie należy ustalić wartość maksymalną i minimalną, jaka ma być na obrazie wyjściowym. Ostatnią opcją do ustawienia jest format wartości wyjściowych np., liczb całkowitych (integer), rzeczywistych dodatnich (float). Ostatnim etapem jest zapisanie pliku wyjściowego.



Rycina 66.1 Okno dialogowe opcji Data Streching

## 6.7 Obliczanie statystyk obrazu

### 6.7.1 Obliczanie statystyk

W programie ENVI 4.5 możliwe jest obliczanie statystyk za pomocą opcji z **Basic Tools->Statistics->Compute Statistics** (Ryc. 67.1a). Należy wczytać plik. Możliwe jest obliczenie statystyk podstawowych (**Basic Stats**), otrzymanie histogramów (**Histograms**) oraz informację o kowariancji (**Covariance**). Następnie ustalany jest współczynnik zmieniający rozmiar próbek (**Samples Resize Factor**) lub linii (**Lines Resize Factor**). Na ogół współczynniki równe są 1, dla obliczania statystyk dla całego obrazu niezmienionego. Możliwe są różne sposoby zapisu uzyskanych statystyk: pokazanie wyniku na ekranie (**Output to Screen**), zapisanie do pliku ze statystykami (**Output to a Statistic File**) lub do raportu tekstowego (**Output to a Text Report File**). Wynikiem jest informacja o podstawowych statystykach obrazu (Ryc. 67.1b). Otwieranie pliku ze statystykami umożliwia opcja **View Statistic File**, która znajduje się w zakładce **Basic Tools->Statistics**.



Rycina 67.1 Okno dialogowe do obliczania statystyk podstawowych obrazu (a) oraz wynik - okno ze statystykami (b)

### 6.7.2 Obliczanie statystyk w oparciu o wszystkie kanały

Możliwe jest uzyskanie statystyk opartych jednocześnie o wszystkie kanały (Basic Tools->Statistics->Sum Data Bands). Wybierany jest wielokanałowy obraz wejściowy. Następnie określane są kanały, jakie mają zostać utworzone:

- Suma
- Suma kwadratowa
- Średnia z kanałów
- Odchylenie standardowe wartości w kanałach
- Wariancja
- Skewness
- Kurtoza
- Średnie odchylenie Absolutne

Wzory, według których liczone są zmienne zamieszczone są na rycinie 67.2. Po zaznaczeniu ich, należy wybrać typ danych wyjściowych: całkowite, rzeczywiste itd., a następnie wpisać nazwę pliku wyjściowego (Ryc. 67.3).

$$\text{Sum} = \sum_{j=1}^N x_j$$

$$\text{Sum}^2 = \sum_{j=1}^N x_j^2$$

$$\text{Mean} = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$$

$$\text{Variance} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2$$

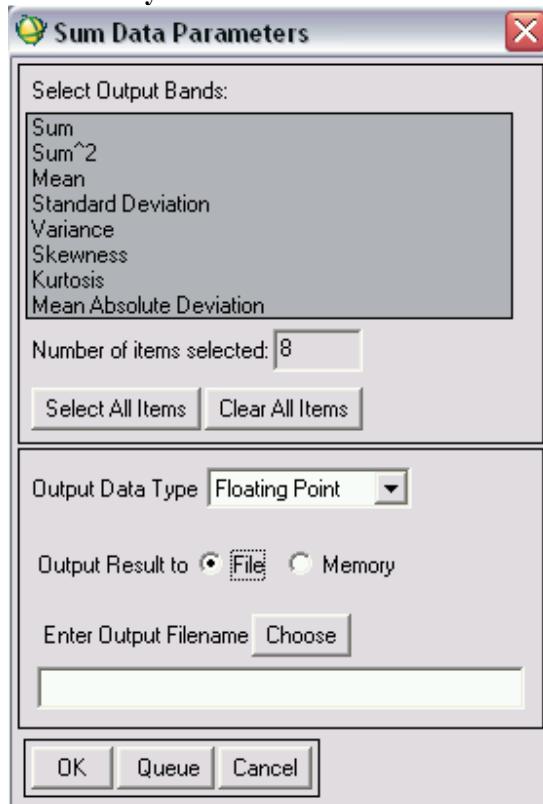
$$\text{Skewness} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{x_j - \bar{x}}{\sqrt{\text{Variance}}} \right)^3$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left( \frac{x_j - \bar{x}}{\sqrt{\text{Variance}}} \right)^4 - 3$$

$$\text{Mean Absolute Deviation} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |x_j - \bar{x}|$$

$$\text{Standard Deviation} = \sqrt{\text{Variance}}$$

Rycina 67.2 Zmienne liczone dla wszystkich kanałów



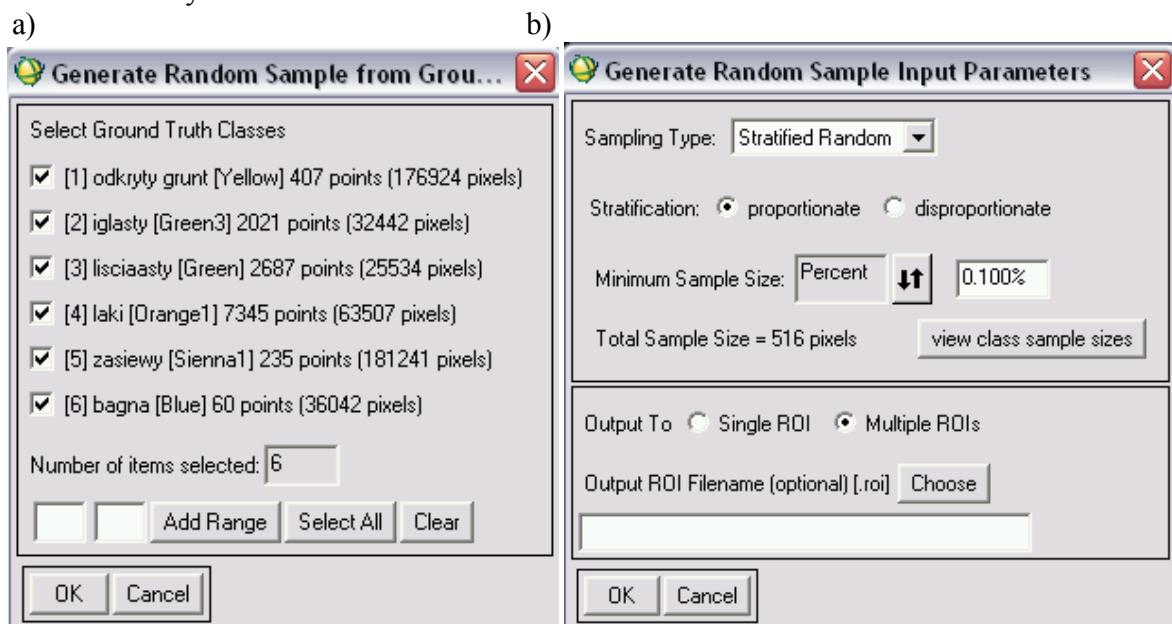
Rycina 67.3 Okno dialogowe do wyznaczenia statystyk opartych na wszystkich kanałach

### 6.7.3 Rozrzucenie losowe próbek

Rozrzucenie losowe próbek może być przydatne do określania dokładności klasyfikacji. Możliwe jest przy użyciu dwóch opcji. Obydwie znajdują się w menu: Basic Tools->Statistics->Generate Random Sample. Pierwsza z nich to rozrzucenie losowe próbek na podstawie prawidłowo sklasyfikowanego obrazu oraz zapisanie ich w postaci Region Of Interest (Using Ground Truth Classification Image). Należy wprowadzić sklasyfikowany obraz, a następnie wybrać klasy, z jakich mają powstać próbki (Ryc. 67.4a). Kolejnym krokiem jest wybranie sposobu rozrzucenia punktów (Ryc. 67.4b):

- Losowy (Random) – należy jedynie określić ilość pikseli procentowo na obrazie lub podać konkretną ich liczbę,
- Porównując ilości pikseli w klasie (Stratified Random) – można określić proporcjonalnie do ilości pikseli w klasie (określając procentowo lub konkretną liczbą minimalną ilość próbek w każdej klasie) lub nieproporcjonalnie definiując każdorazowo ilość próbek jednopikselowych w każdej klasie
- Taka sama ilość pikseli w każdej klasie (Equalized Random) – określając liczbowo tą samą ilość próbek przypadająca na każdą klasę.

Następnie należy zapisać próbki do jednego lub wielu ROI, w zależności od tego, z jakiej klasy pochodzą. Ostatnim etapem jest podanie nazwy pliku wyjściowego. Powstają losowe punkty ROI rozrzucone na całym obrazie.



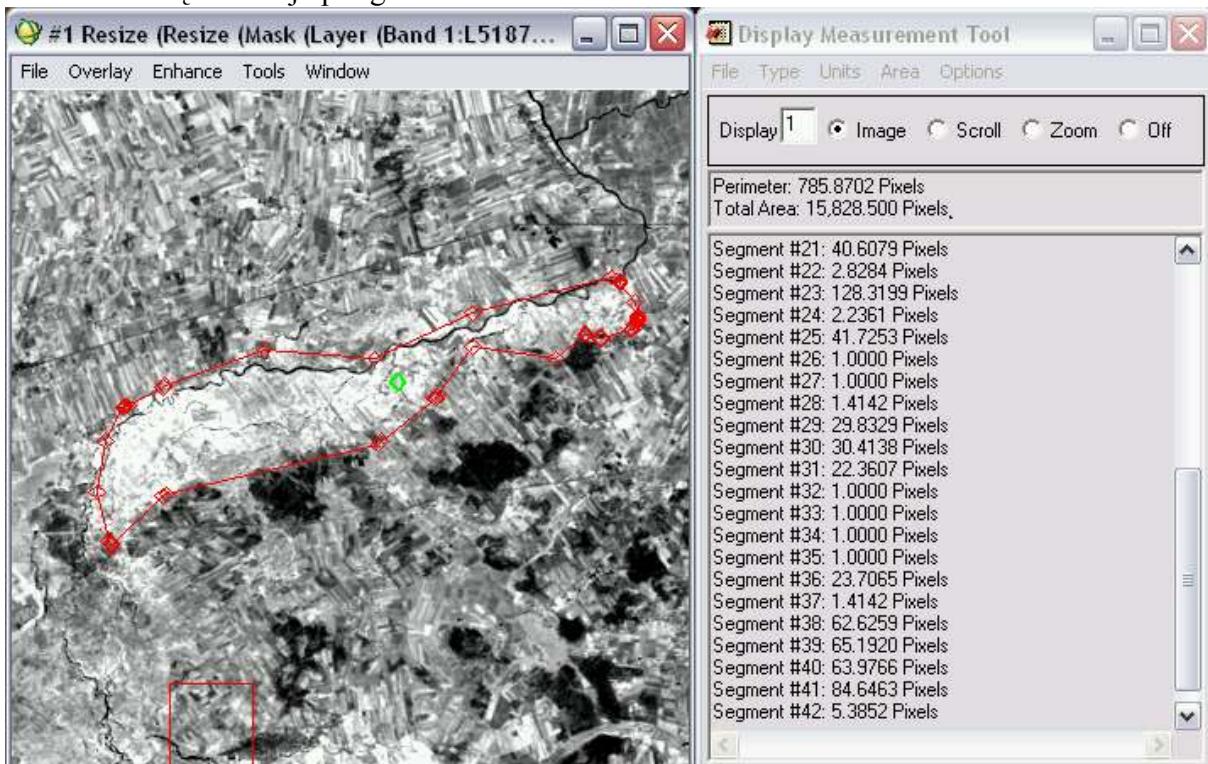
Rycina 67.4 Wybór klas użytych do rozrzucania próbek (a) oraz ono dialogowe opcji (b)

Druga opcja rozrzucania próbek jest przy użyciu ROI bazujących na informacji terenowej (Using Ground Truth ROI). Należy wybrać plik, do którego są dopasowane ROI, następnie, podobnie jak w poprzednim przypadku, wybrać klasy, jakie mają zostać użyte (Ryc. 67.4a). Dalsze postępowanie jest takie same, jak w przypadku próbek bazujących na klasach. Powstaje ROI złożony z punktów, które są umiejscowione jedynie tam, gdzie były poligony ROI źródłowe.

### 6.8 Narzędzie pomiarowe

Program pozwala także na wykonywanie pomiarów na obrazach. Możliwe jest to za pomocą opcji Meaurement Tool znajdującej się w menu Basic Tools. Pierwszym krokiem jest wybranie obrazu.

Następnie w oknie **Measurement Tool** można określić, w jakim oknie będą wykonywane pomiary (Ryc. 68.1). Możliwe jest mierzenie odcinków różnego rodzaju kształtów zmieniając opcje w menu **Type** (linie, poligony nieregularne, prostokąty, okręgi). Możliwa jest zmiana jednostek, w jakich są pomiary, poza pikselami, możliwe są metry, mile itd. (opcje dostępne w zakładce **Units**). Zmiana jednostek powierzchni odbywa się w menu **Area**. Możliwa jest zmiana trybu raportowania odcinków za pomocą segmentów lub punktów w menu **Options**. Zapis narysowanych odcinków odbywa się przez opcję **File->Save Points to ASCII**. W oknie rysuje się za pomocą lewego klawisza myszki, zakończenie poligonu odbywa się przez kliknięcie prawego przycisku, natomiast ponowne kliknięcie kasuje poligon.



Rycina 68.1 Obraz z zaznaczonym poligonom, którego dane są w oknie narzędzia pomiarowego

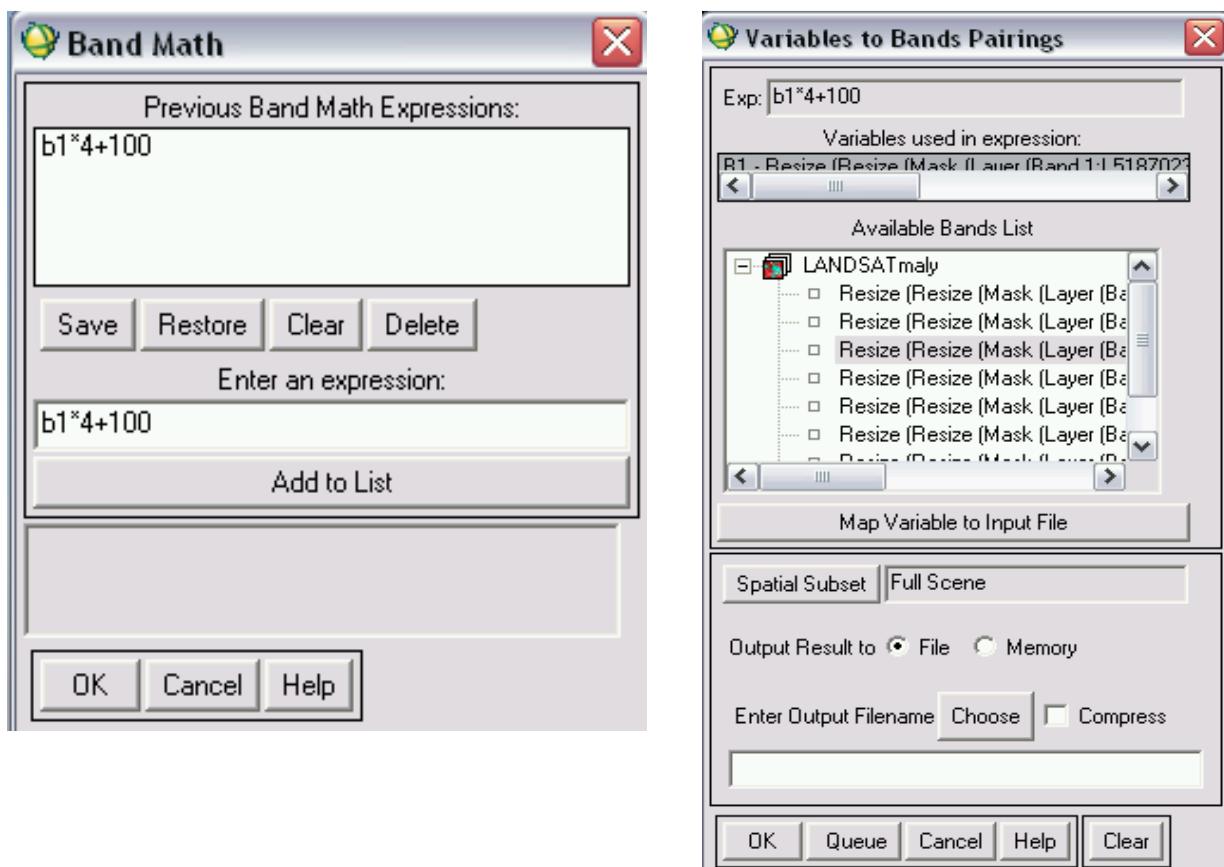
## 6.9 Działania na kanałach i krzywych obicia spektralnego

### 6.9.1 Funkcja BandMath

W programie ENVI 4.5 możliwe jest przeliczanie wartości pikseli w dowolnym kanale za pomocą wpisanej formuły. Jest to możliwe za pomocą funkcji **BandMath** znajdującej się w menu **Basic Tools**. Po wpisaniu formuły z symbolem zamiast kanału w okno dialogowe naliczy ją wczytać za pomocą opcji **Add To List** (Ryc. 69.1a). Możliwe jest także wczytanie już zapisanej formuły (opcja **Restore**) lub zapisanie istniejącej za pomocą opcji **Save**. Symbol kanału domyślnie jest w liczbach całkowitych i taki także jest wynik. Istnieje możliwość uwzględnienia liczb rzeczywistych wpisując np. float przed symbolem w nawiasie: `float(b1)` zamiast `b1`.

Następnie konieczna jest identyfikacja kanału w kolejnym oknie (Ryc. 69.1b). Należy zaznaczyć odpowiedni kanał, a następnie zapisać obraz wyjściowy.

a) b)

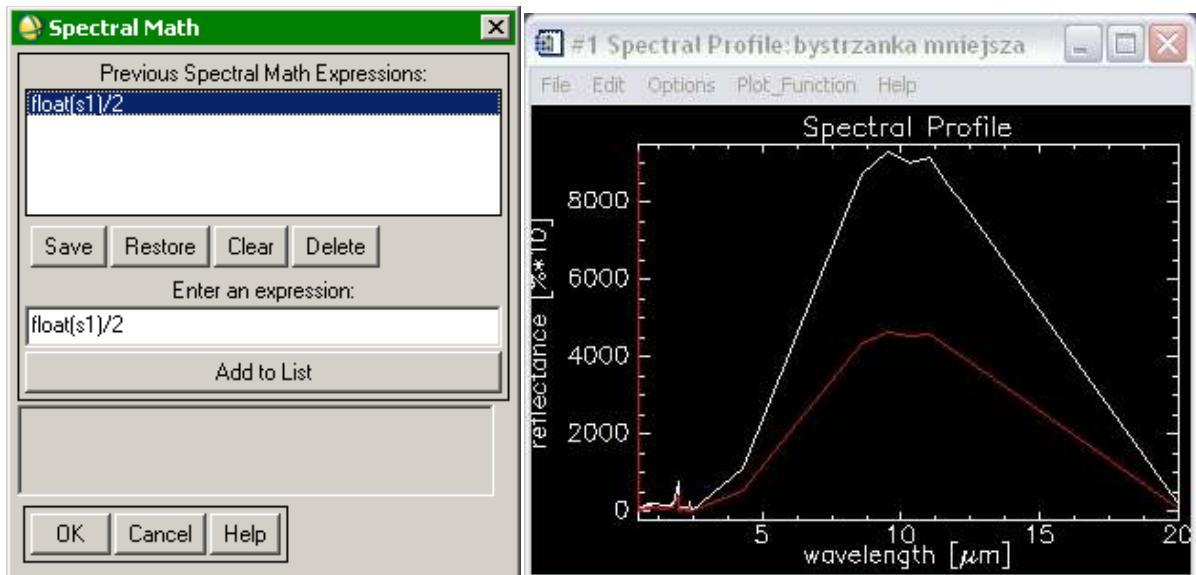


Rycina 69.1 Okno dialogowe funkcji BandMath: wpisanie formuły (a) oraz identyfikacja kanału b1 (b)

### 6.9.2 Funkcja SpectralMath

Możliwe jest także przeliczanie nie samych kanałów, a krzywych odbicia spektralnego przy użyciu funkcji Spectral Math. Działa na podobnej zasadzie i według tych samych reguł, co funkcja BandMath. Najpierw należy wprowadzić formułę (Ryc 69.2a), następnie zdefiniować przeliczane spektrum i sposób zapisu. Możliwe jest wyświetlenie spektrum wejściowego i wyjściowego w tym samym oknie (Ryc. 69.2b).

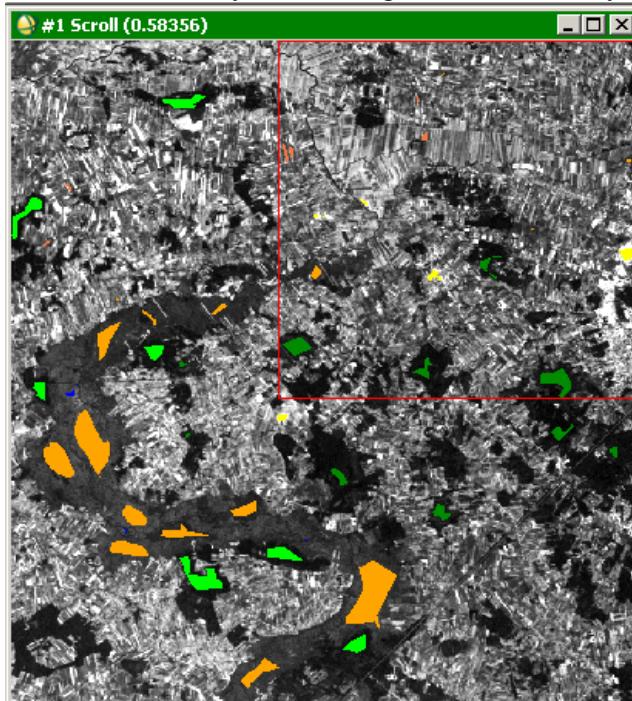
a) b)



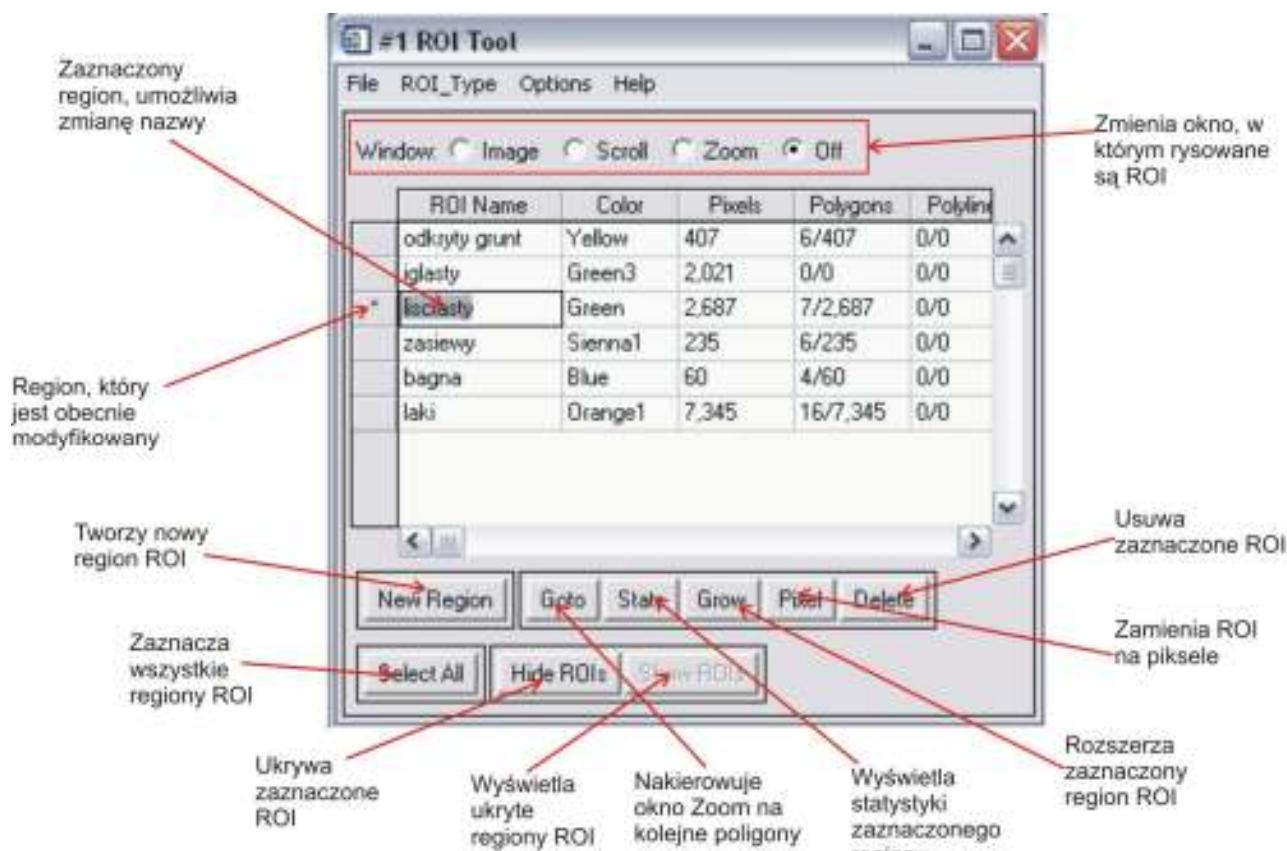
Rycina 69.2 wpisanie formuły w okno SpectralMath (a) oraz okno z krzywą źródłową i przekształconą (b)

## 6.10 Region Of Interest

Narzędzie Region Of Interest służy do tworzenia regionów nanoszonych na obraz. Regiony mogą być poligonami, liniami lub punktami (Ryc. 610.1). Jeden region może składać się z wielu poligonów lub punktów, niepołączonych ze sobą. Po wywołaniu z menu Basic Tools->Region Of Interest otwiera się okno ROI Tool (ryc. 610.1). W zależności od zaznaczonego okna, w nim będą nanoszone nowe regiony. Umożliwia ono rysowanie regionów w dowolnym oknie na obrazie.

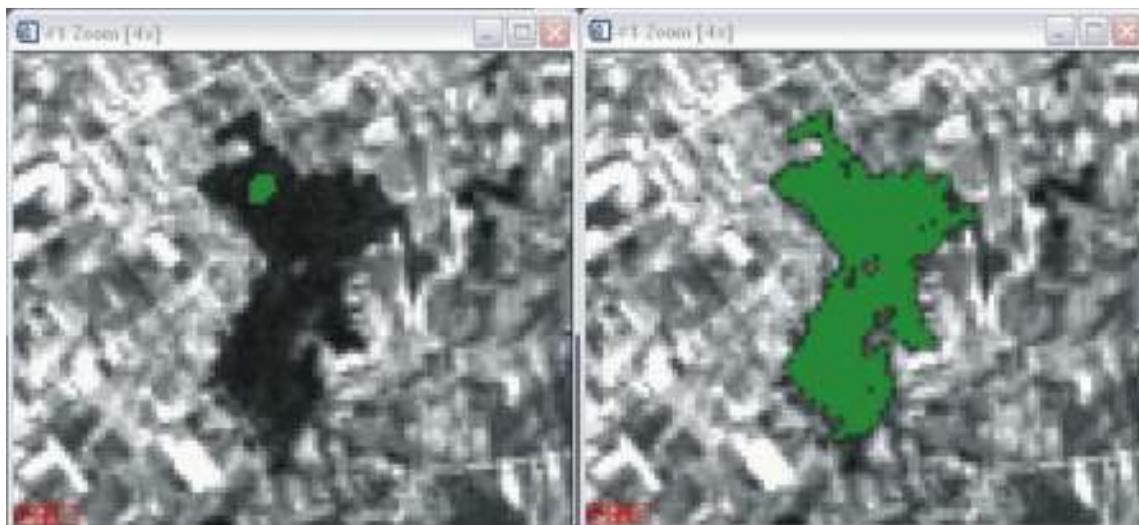


Rycina 610.1 Przykład ROI nałożonych na obraz odpowiadające danym z rycinie nr 610.2



**Rycina 610.2 Okno narzędzia Region of Interest**

W oknie dialogowym można zmieniać okno, w którym nanoszone są nowe ROI (Image, Scroll, Zoom lub wyłącza edycję). Za pomocą opcji New Region można utworzyć nowy ROI. Aby nakierować okno Zoom na kolejne poligony/punkty należące do zaznaczonego ROI należy użyć opcji Goto. Opcja Stats wyświetla okno ze statystykami dla zaznaczonego regionu. Przy użyciu Grow rozszerza się zaznaczony region według pikseli znajdujących się w sąsiedztwie o takich samych cechach spektralnych (Ryc. 610.3). Przycisk Pixels umożliwia przekształcenie poligonów z ROI na pojedyncze piksele. Można usunąć wybrany ROI naciskając Delete. Opcja Select All zaznacza wszystkie dostępne ROI. Za pomocą Show/Hide ROIs można ukryć zaznaczone lub wyświetlić ukryte ROI.



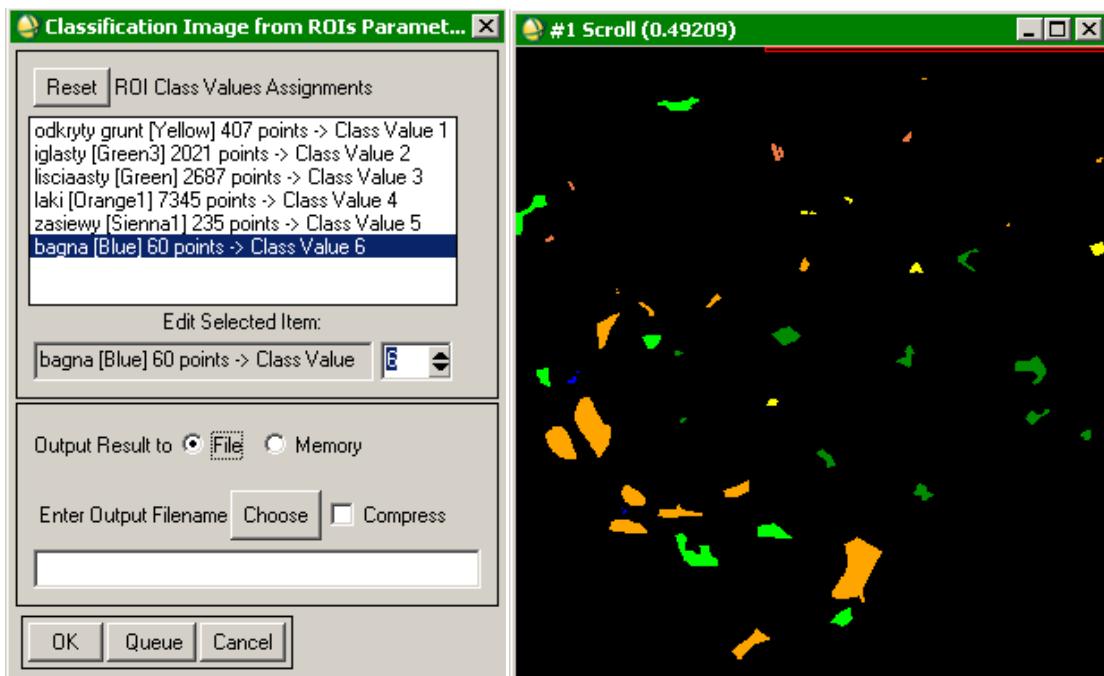
Rycina 610.3 Zasada działania opcji **Grow**: na obrazie po lewej stronie jest zaznaczony oryginalny ROI, natomiast po prawej rozszerzony, po użyciu opcji

W menu File możliwe jest zapisanie utworzonych ROI za pomocą wielu formatów: zwykłego ROI, wektorowej (.evf, Shapefile) oraz w ASCII. W menu ROI\_Type wybierany jest typ tworzonych regionów: poligony, linie, punkty oraz ich kształt, np. prostokąt, elipsa itd. W menu Options znajdują się następujące funkcje:

- Calculate Covariance with Stats – obliczenie statystyk dla zaznaczonych ROI
- Measurement Report – określa, ile zaznaczony segment ma pikseli i jakiej długości ma boki w pikselach
- Report Area of ROI's – podaje powyższy raport w jednostkach powierzchni
- Merge Regions – połączenie różnych regionów w jeden. Należy zaznaczyć regiony do połączenia i wybrać, czy usunąć regony połączone.
- Intersect Regions – dzieli dwa regiony według wartości pikseli
- Reconcile ROI – skopiowanie ROI z jednego obrazu na drugi pokrywającym ten sam teren
- Band Threshold to ROI – tworzy regiony na podstawie wartości pikseli. Konieczny jest wybór kanału, na podstawie którego wartości będą dzielone. Następnie wprowadzić minimalną i maksymalną wartość ograniczającą ROI, nazwę regionu i kolor. Tworzony jest region złożony z pikseli o wartościach pomiędzy określonymi maksymalnymi i minimalnymi.
- Create Class Image from ROI's – tworzy obraz z regionami jako klasami. Należy wybrać regiony, jakie mają być przekształcone na klasy, określić numerację klas a następnie zapisać wynik (Ryc. 610.4a). Wynikiem jest obraz poklasyfikacyjny na rycinie 610.4b.

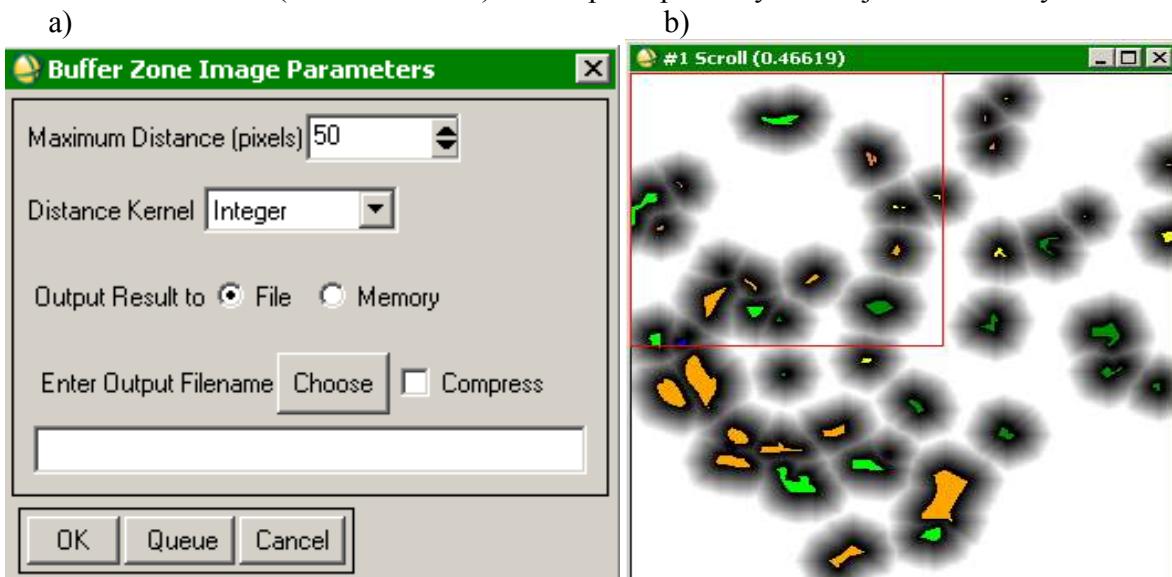
a)

b)



Rycina 610.4 Tworzenie obrazu sklasyfikowanego na podstawie ROI: okno dialogowe (a) i obraz wynikowy (b)

- Create Buffer Zone from ROI – tworzy strefę buforową wokół ROI. Należy wybrać region, wokół których ma być tworzona strefa buforowa (Ryc. 610.5a). Następnie w oknie dialogowym należy określić maksymalny zasięg strefy w pikselach (Maximum distance), typ danych, w jakich ma być podany zasięg: naturalne lub rzeczywiste dodatnie (Distance kernel) oraz zapisac plik. Wynikiem jest obraz na rycinie 610.5b.

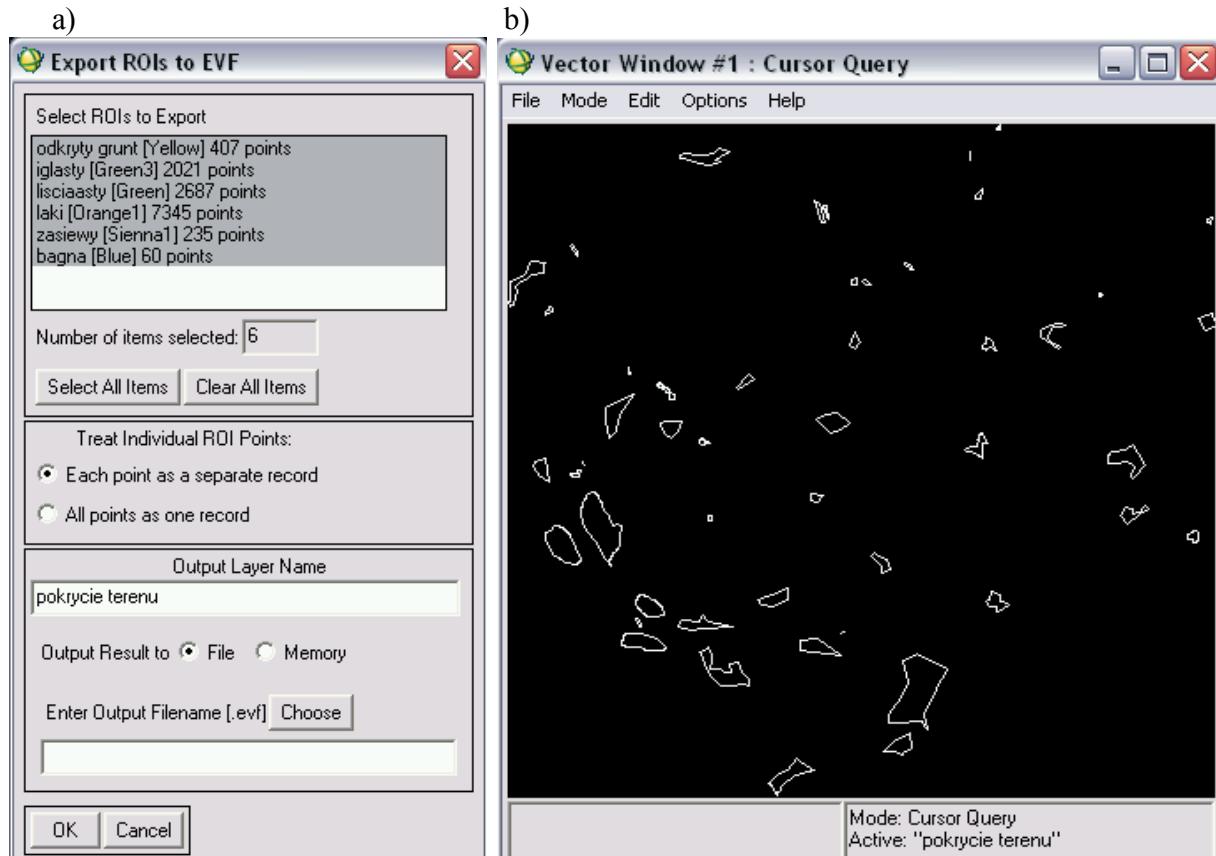


Rycina 610.5 Tworzenie strefy buforowej wokół ROI: okno dialogowe (a) oraz wynik (b)

- Compute ROI Separability – zwraca raport na temat związków między poszczególnymi regionami.
- Hide Window – ukrywa okno ROI Tool, nadal jednak wyświetla regiony na obrazie.

Wszystkie z wymienionych funkcji znajdują się także w menu Basic Tools->Region of Interest. Poza tym w tym samym menu można eksportować ROI do formatu wektorowego .evf za

pomocą opcji. Najpierw należy wybrać obraz, z którym powiązane są ROI. Następnie w oknie zaznaczyć, jakie ROI mają być wyeksportowane i wybrać opcję, czy mają być w tej samej, czy w różnych warstwach (Ryc. 610.6a). Potem trzeba nazwać warstwę wyjściową i zapisać plik wyjściowy (Ryc. 610.6b).

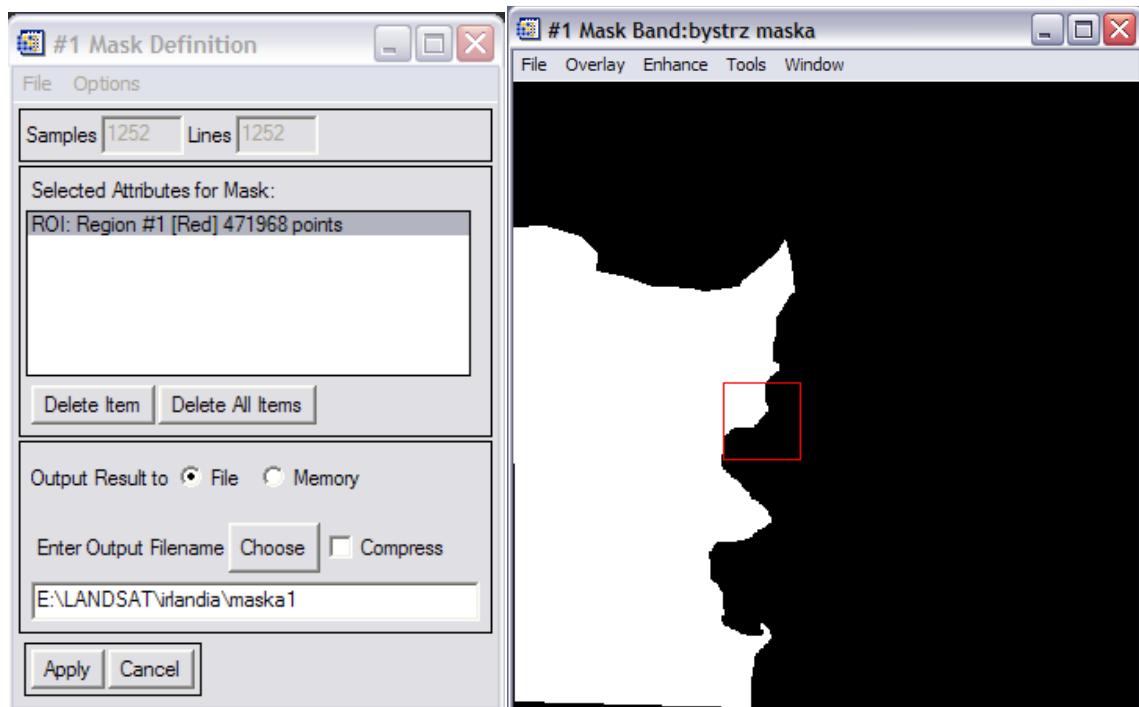


Rycina 610.6 Okno eksportowania ROI do formatu wektorowego (a) oraz obraz wynikowy z warstwą wektorową (b)

## 6.11 Tworzenie maski

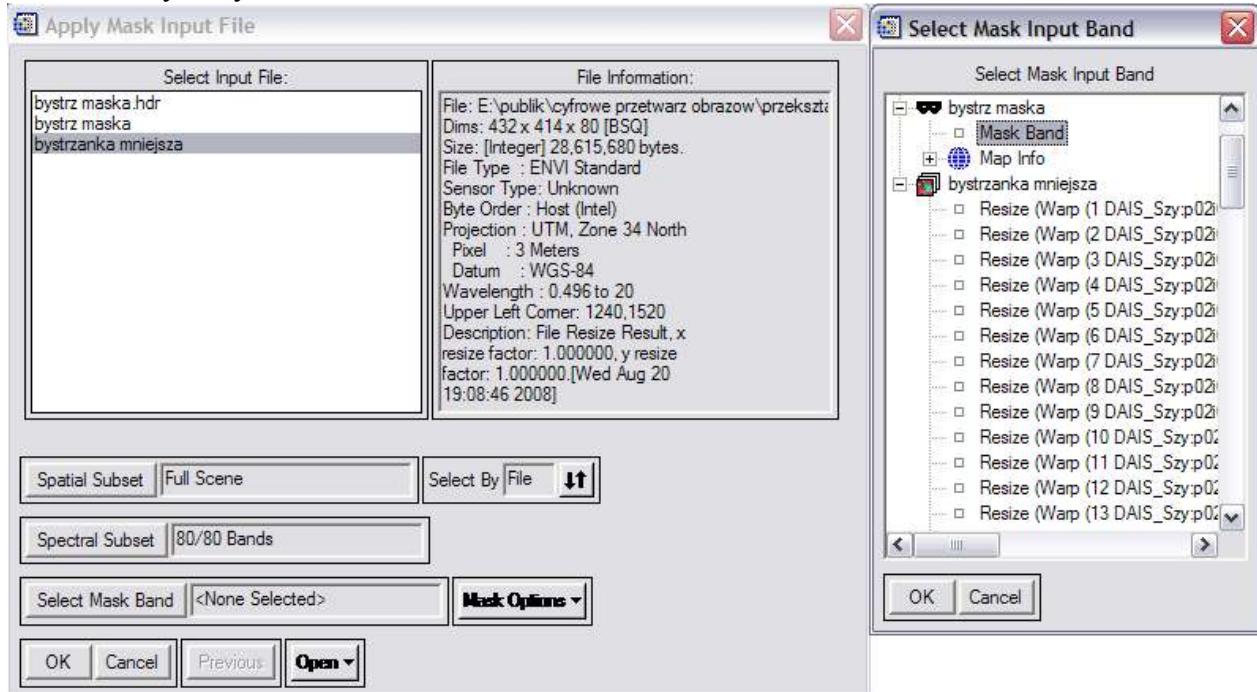
W programie ENVI możliwe jest także tworzenie masek, które można nakładać na obrazy, aby zakrywały jakiś fragment. Tworzenie masek odbywa się przez opcję **Basic Tools->Build Mask**, gdzie możliwe jest jej zdefiniowanie. W oknie dialogowym wybierany jest zakres maski z zakładki **Options** (Ryc. 611.1a). Jest to możliwe np. za pomocą ROI. Po zimportowaniu pliku lub plików można zmienić zaznaczone obszary przez zmianę w menu **Options** czy zaznaczone obszar mają być włączone czy wyłączone (**Selected Areas „On” lub „Off”**). Następnie należy podać nazwę pliku wyjściowego. Przykładowa maska została zamieszczona na rycinie 611.1b.

a) b)

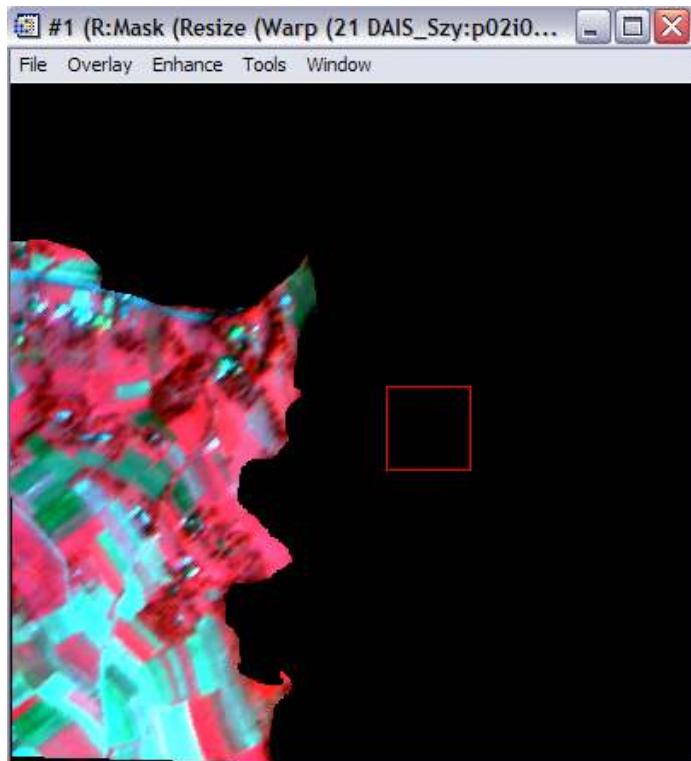


**Rycina 611.1 Definiowanie maski – zaznaczony fragment oraz nazywanie maski (a) oraz przykładowa zdefiniowana maska (b)**

Nałożenie maski na obraz przeprowadzane jest przez Basic Tools->Apply Mask. Należy wybrać plik, na który ma być nałożona maska, a następnie samą maskę (Select Mask Band) (rycina 611.2). W ostatnim oknie dialogowym definiowany jest plik wyjściowy. Obraz z nałożoną maską został zamieszczony na rycinie 611.3.



**Rycina 611.2 Nakładanie maski na obraz cyfrowy (wybór obrazu i maski do nałożenia)**

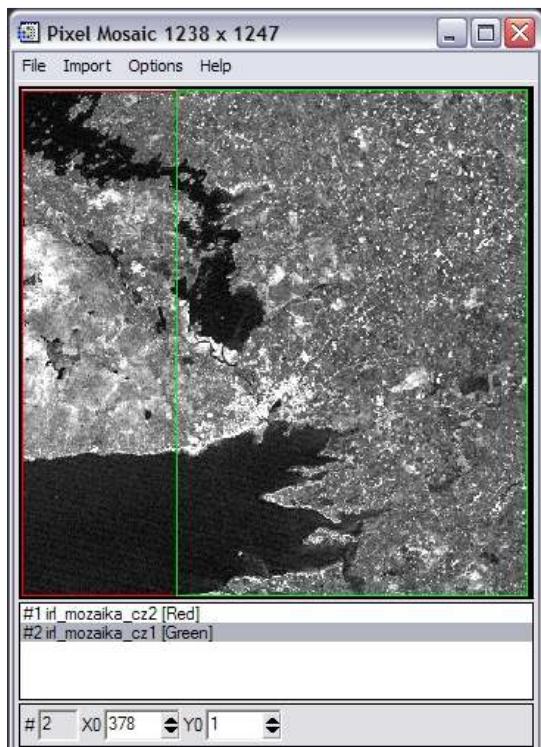


Rycina 611.3 Obraz z zamaskowanym fragmentem zdjęcia

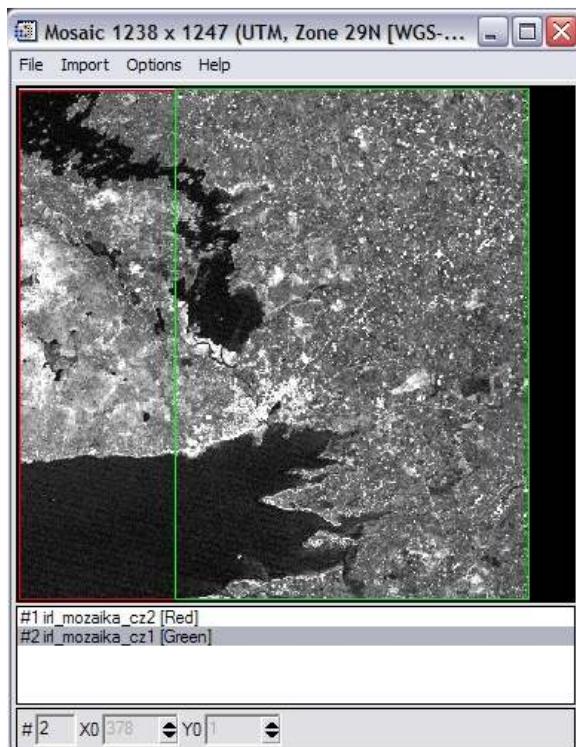
## 6.12 Mozaikowanie obrazów

W związku z częstym brakiem możliwości zarejestrowania całego badanego terenu na jednej scenie, konieczne jest połączenie ze sobą wielu obrazów. Proces ten nazywa się mozaikowaniem. Można tworzyć mozaiki **niekontrolowane** (obrazy nie są poddane korekcji radiometrycznej i geometrycznej) i, zdecydowanie lepsze, **kontrolowane** (z obrazów poddanych korekcji) ([ENVI User's Guide, 2001<sup>38</sup>](#)).

Tworzenie mozaik łączących kilka obrazów możliwe jest za pomocą zakładki Basic Tools->Mosaicking. Wersja Pixel Based wymaga zimportowania plików, których właściwości można zmieniać. Tym samym jest to mozaika niekontrolowana. Możliwe jest także zmiana kolejności obrazów nakładanych na siebie i ich ręczne dopasowanie (rycina 612.1). Następnie należy zapisać obraz (File->Apply). Wadą tego typu mozaik jest utrata odwzorowania, pozostając jedynie współrzędne piksela (kolumna i linia), dlatego taka mozaika jest przydatna jedynie do prezentowania danych. W opcji Georeferenced zachowane jest odwzorowanie i dlatego nie ma możliwości ręcznego dopasowania obrazów (rycina 612.2). Tak utworzona mozaika może być dalej przekształcana i jest mozaiką kontrolowaną.



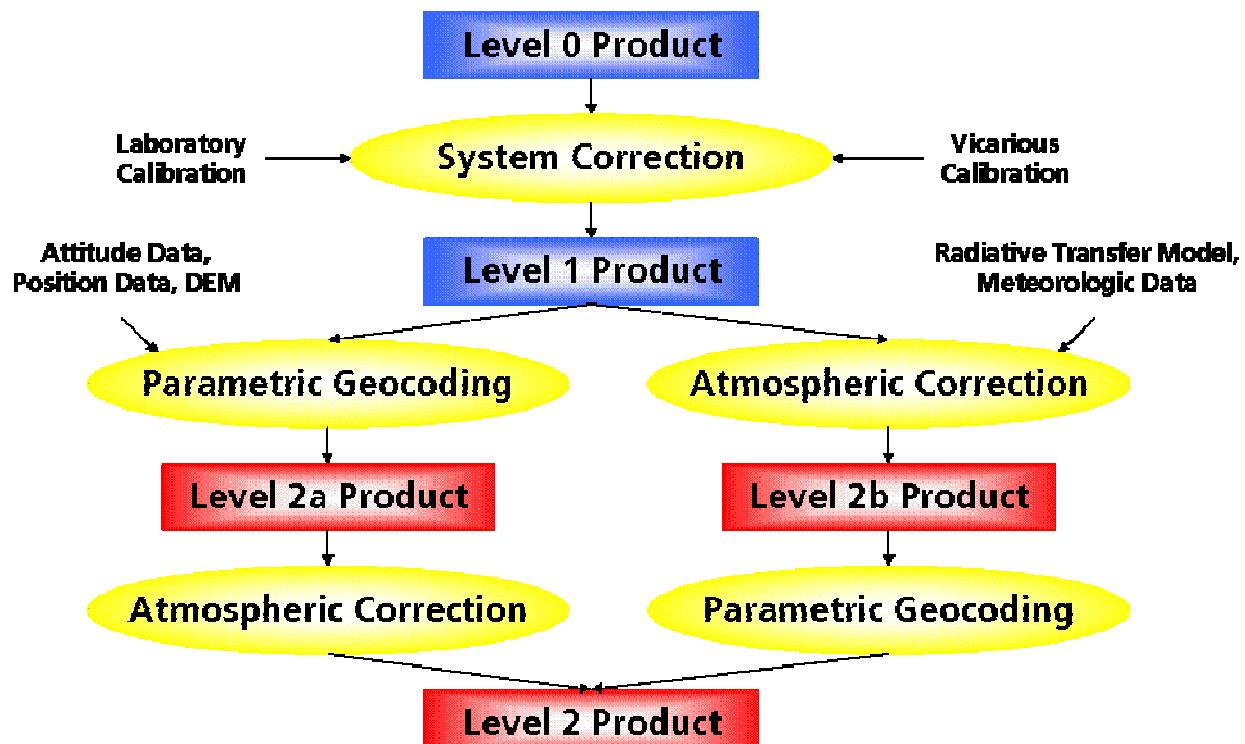
Rycina 612.1 Tworzenie mozaiki niekontrolowanej na podstawie pikseli



Rycina 613.2 Tworzenie mozaiki na podstawie współrzędnych geograficznych

## 7 Wstępne przetwarzanie lotniczych obrazów hiperspektralnych

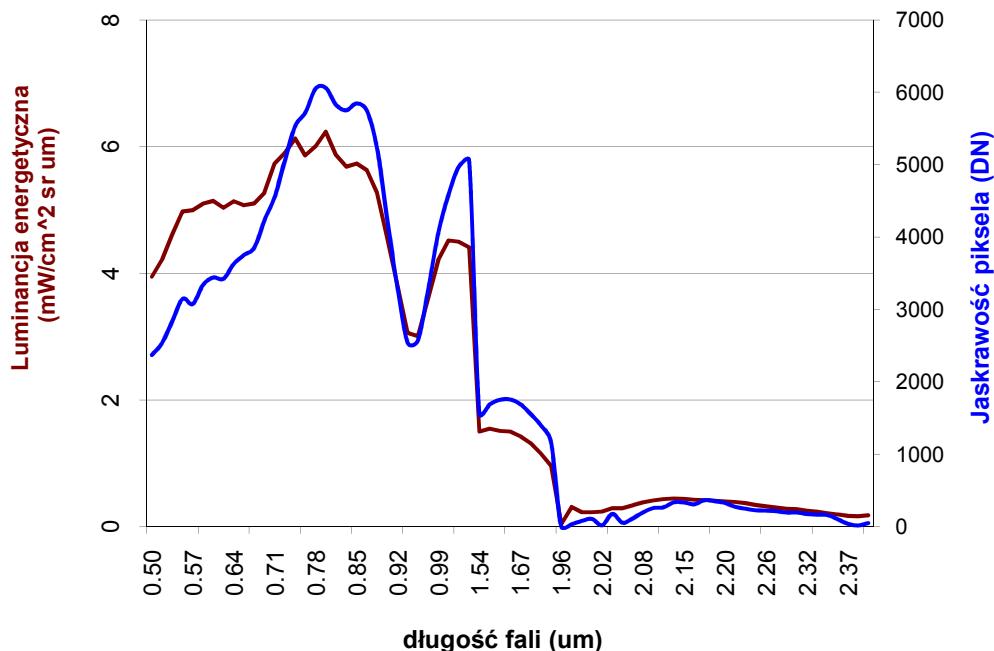
Zobrazowania lotnicze obarczone są szeregiem zniekształceń. Zniekształcenia te wynikają z faktu, iż samolot porusza się w atmosferze i praktycznie nie ma możliwości utrzymania stałej linii lotu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku rejestracji sygnału za pomocą skanowania terenu piksel po pikselu lub linijka po linijce. Wtedy dochodzi do wychylenia samolotu z lini lotu i skutkuje to przesunięciami poszczególnych fragmentów zobrazowań względem siebie. Problem ten jest obserwowany w mniejszym stopniu, gdy cała scena obrazu pozyskiwana jest w jednym momencie, np. po otwarciu przesłony zapisywany jest cały obraz. Zobrazowania lotnicze wykonane cyfrowymi skanerami wymagają przeprowadzenia szeregu procedur korygujących pozyskane dane. Procedury te związane są z usuwaniem zaburzeń sygnałów docierających do detektora, jak konieczności wynikającą ze składu atmosfery jaki dociera do detektora. Dlatego konieczne jest przeprowadzanie różnego rodzaju korekcji przed przystąpienia do analizy i przekształcania obrazów (rycina 7.1).



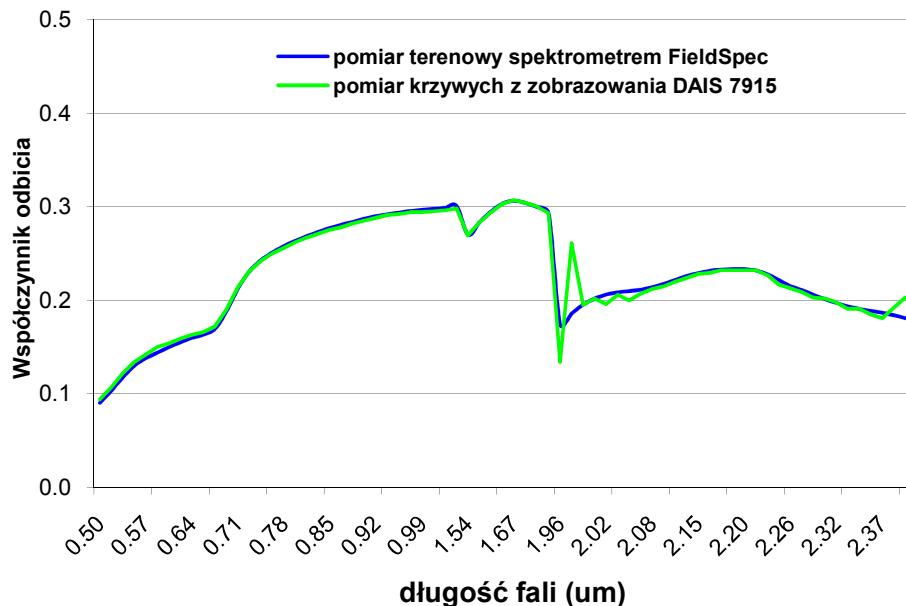
Rycina 7.1 Schemat kolejnych przekształceń obrazów cyfrowych (Habermeier i in. 2001<sup>39</sup>)

## 7.1 Korekcja radiometryczna

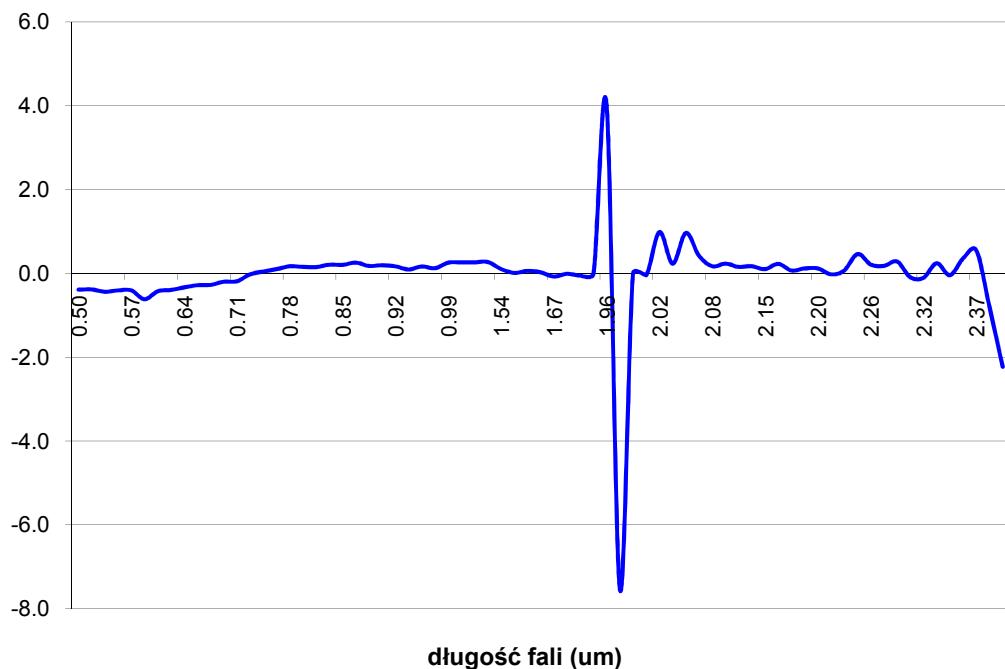
Promieniowanie elektromagnetyczne, które jest rejestrowane przez sensor, a następnie zapisywane, jest zaburzane przez wiele elementów. Na sygnał ma wpływ zróżnicowanie jasności Słońca, zachmurzenie, topografia, właściwości atmosfery, czyli absorpcja i rozproszenie promieniowania w niej, a także kierunkowość odbicia lub emisji promieniowania od powierzchni Ziemi (Jakomulska, Sobczak, 2001, Adamczyk, Będkowski, 2005). Poza tym na sygnał oddziaływują także właściwości systemów teledetekcyjnych. Z tego powodu należy wykonywać modyfikacje sygnału (korekcję radiometryczną), które jak najbardziej zbliżą go do rzeczywistego (Ryciny 71.1-71.3). Korekcja radiometryczna obejmuje początkową kalibrację detektorów, a następnie korekcje: atmosferyczną (zmniejszającą wpływ atmosfery), słoneczną (niwelującą zmiany oświetlenia) oraz topograficzną. W ten sposób z obrazu, który rejestruje jasność pikseli, powstaje obraz wyświetlający wartość współczynnika odbicia.



Rycina 71.1. Porównanie luminancji energetycznej pomierzonej dla ścierniska owsa z poziomu naziemnego oraz jaskrawości piksela dla tej samej powierzchni pozyskanej z poziomu lotniczego DAIS 7915 (Szymbark, lipiec 2002 r). Różnice pomiędzy krzywymi wynikają z obecności atmosfery.



Rycina 71.2. Porównanie charakterystyk spektralnych owsa z pomiaru naziemnego i lotniczego po korekci atmosferycznej obiektów przedstawionych na Rycinie 71.1



Rycina 71.3. Współczynnik zmienności (%) pomiaru naziemnego i lotniczego DAIS 7915 po korekcií atmosferycznej (z Rycin 71.2)

## 7.2 Korekcja atmosferyczna

Jednym z ważniejszych etapów przygotowania obrazów teledetekcyjnych, a już w szczególności hiperspektralnych jest ich korekcja radiometryczna. Jej celem jest wyodrębnienie z obrazu fizycznych parametrów charakteryzujących powierzchnię terenu, takich jak współczynnik odbicia czy temperatura (Richter i Schläpfer 2001).

Jednym z podstawowych programów służących do korekcji atmosferycznej jest ATCOR<sup>6</sup>, służy on do przeprowadzania zarówno korekcji atmosferycznej jak i normalizacji topograficznej. Model użyty w tym programie stosuje do obliczeń takie parametry jak: promieniowanie ścieżki (path radiance), przepuszczalność atmosfery (atmospheric transmittance) oraz bezpośrednie i rozproszone promieniowanie słoneczne (direct and diffuse solar flux), obliczane w wyniku zastosowania programów analizujących transfer promieniowania (radiative transfer codes). Wyboru odpowiednich wartości dokonuje się poprzez porównanie charakterystyk spektralnych wybranych obiektów pomierzonych w terenie z charakterystykami tych samych obiektów pobranymi z obrazu i poddanymi transformacji z użyciem wspomnianych wyżej parametrów. W kodzie programu znajduje się wiele predefiniowanych bibliotek atmosfer, ale wszystkie parametry mogą też zostać niezależnie określone przez użytkownika. W przypadku zgodności przebiegu obu krzywych spektralnych, wybrane parametry stosuje się do całego obrazu. Charakterystyki dotyczące powierzchni terenu są natomiast pobierane z Numerycznego Modelu Terenu.

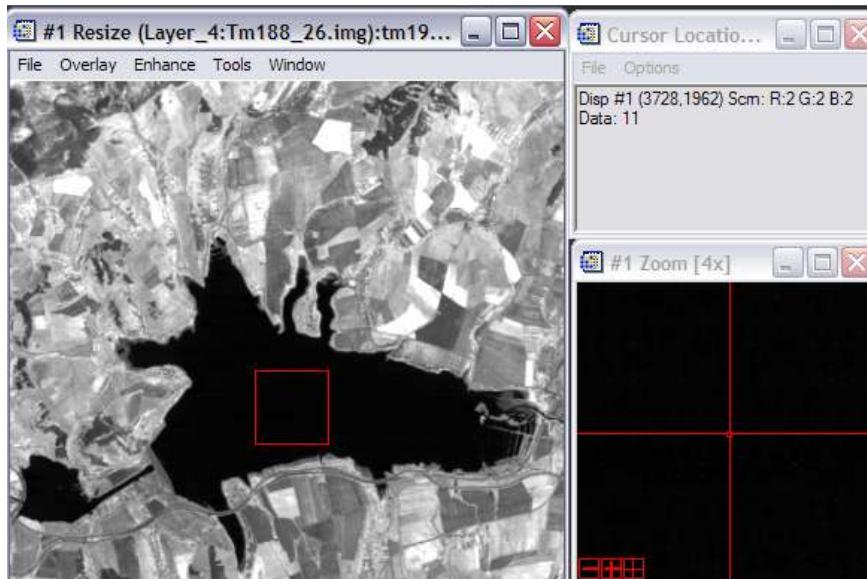
W pierwszym etapie tworzone są, zależne od geometrii sensora, tablice przeglądowe (Look-Up Tables) obliczane na podstawie programu do analizy transferu promieniowania - MODTRAN. Wyniki tych obliczeń składają się na stałą, spektralną bazę danych, która zostaje następnie przerobiona w taki sposób, aby uwzględniała charakterystyki jedynie konkretnego sensora. W

<sup>6</sup> Niekomercyjnym programem dostępnym w internecie może być moduł 6S

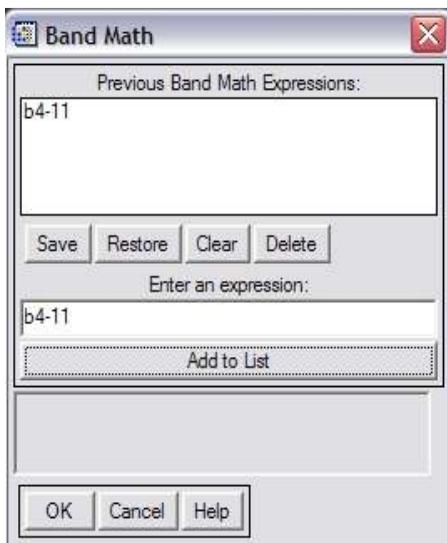
kolejnym etapie przeprowadzana jest właściwa korekcja atmosferyczna i topograficzna przy użyciu modułu ATCOR, bazującego przede wszystkim na obrazach po ortorektyfikacji. Rezultatem jest obraz zawierający współczynniki odbicia dla poszczególnych pikseli, a także temperaturę powierzchni obliczaną na podstawie kanałów termalnych. Jako dodatkowe dane wyjściowe mogą zostać utworzone obrazy zawierające takie parametry jak: wskaźniki roślinności (np. NDVI), albedo, powierzchnia projekcyjna liści (LAI), frakcja zaabsorbowanego, fotosyntetycznie czynnego promieniowania (fAPAR), itp. (Richter i Schläpfer 2002).

Korekcja atmosferyczna odbywa się na dwa sposoby. Pierwszy z nich obejmuje metody bezwzględne, które oceniają stan atmosfery w momencie wykonywania zdjęcia, a korekcja wykonywana jest na podstawie standartowych modeli rodzajów atmosfery. Przy użyciu metod względnych porównuje się wartości na obrazie analizowanym do innego obrazu lub pomiaru terenowego, wykonanego w tym samym czasie i w tych samych zakresach.

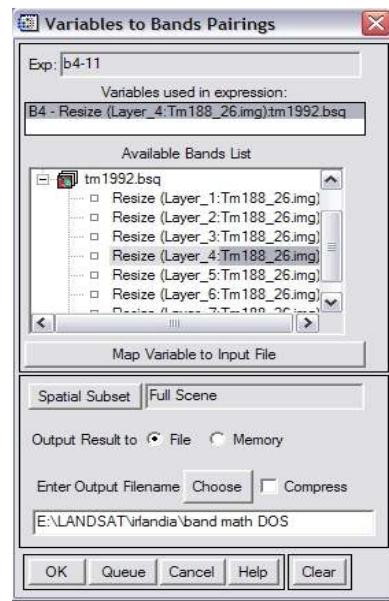
Metody korekcji względnej mogą bazować na informacji zawartej w obrazie. Zalicza się do nich metoda **Dark Object Subtraction** (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Opiera się ona na znalezieniu na obrazie obiektu jak najbardziej zbliżonego do ciała doskonale czarnego, które pochłania promieniowanie (np. głęboka, czysta woda lub głęboki cień). Wartość tego piksela powinna być równa 0, bo w tym miejscu pochłaniane jest całe promieniowanie. Następnie sprawdzana jest wartość współczynnika odbicia dla tego obiektu za pomocą **Cursor Location/Value** w menu podręcznym (ryc. 72.1). Odczytaną wartość należy odjąć od wartości pikseli na całym obrazie za pomocą funkcji. Aby odjąć wartości należy użyć funkcji **BandMath** z menu **Basic Tools**. Po wpisaniu formuły (z oznaczeniem wartości piksela na obrazie pierwotnym za pomocą symbolu, np. b4) w okno dodaje się je do listy – **Add to List** (ryc. 72.2). Następnie definiuje się poszczególne symbole (b4) jako kolejne kanały i zapisuje plik wyjściowy (ryc. 72.3).



Rycina 72.1 Pobieranie wartości współczynnika odbicia dla obiektu doskonale czarnego

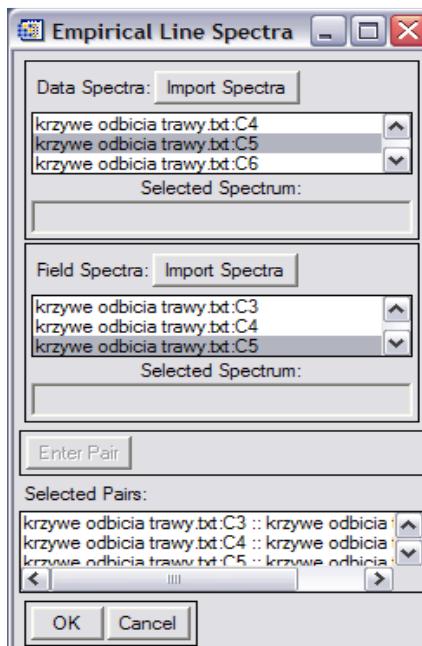


Rycina 72.2 Wpiswanie formuły przeliczającej wartość pikseli w kanale 4 (b4)



Rycina 72.3 Definiowanie b4 - kanalu 4 i nadawanie nazwy nowemu kanałowi

Druga metoda – **Empirical Line** – wykorzystuje pomiary terenowe. Jest ona stosowana do obrazów hiperspektralnych. Konieczny jest wybór charakterystycznych i łatwych do identyfikacji obiektów terenowych, gdzie pobiera się krzywe odbicia spektralnego w momencie wykonywania zobrazowania. Następnie porównywane są krzywe spektralne z obu źródeł. Dla prawidłowej korekcji konieczne są co najmniej trzy analizowane punkty. Aby wykonać korekcję należy najpierw pobrać z obrazu krzywe odbicia spektralnego w miejscach, gdzie zostały pobrane dane terenowe. Konieczna jest bardzo dokładna lokalizacja. Korekcja wykonywana jest za pomocą opcji **Basic Tools->Preprocessing->Calibration Utilities->Empirical Line->Compute Factors And Calibrate**. Wybierany jest obraz do korekcji, a w oknie dialogowym wczytywany jest plik z krzywymi pobranymi z obrazu, z krzywymi terenowymi oraz łączone one są w pary (ryc. 72.4). Wczytanie krzywych wymaga zainportowania pliku i zaznaczenia krzywych. Następnie definiowany jest plik wynikowy oraz plik kalibracyjny.



Rycina 7.2.4 Okno dialogowe do korekcji atmosferycznej metodą Empirical Line

### 7.3 Korekcja geometryczna

Hiperspektralne zdjęcia lotnicze są pozyskiwane głównie z poziomu lotniczego oraz satelitarnego (np. Hyperion). W skanerach występują dwa rodzaje mechanizmów: mechaniczno-optyczny system skanujący oraz element światłoczuły w postaci układu ze sprzężeniem ładunkowym, zwany matrycą CCD (ang. *Charge Coupled Device*), bądź linijką detektorów. Każda linia obrazu jest rejestrowana niezależnie, dlatego też geometria takiego obrazu jest zupełnie inna niż w przypadku zdjęć lotniczych wykonanych tradycyjną kamerą fotogrametryczną. Wpływa to na konieczność zastosowania innych algorytmów korekcji geometrycznej obrazów.

Tradycyjne metody korekcji geometrycznej, stosowane do zdjęć lotniczych czy obrazów satelitarnych, polegające na zastosowaniu transformacji wielomianowej wyliczonej na podstawie korelacji współrzędnych obrazu punktów na zdjęciu z odpowiadającymi im współrzędnymi kartograficznymi pomierzonymi w terenie. Algorytmy te nie mogą być stosowane do obecnie pozyskiwanych danych hiperspektralnych. Jest to spowodowane specyfiką rejestracji tych danych. W przeciwnieństwie do zwykłych zdjęć lotniczych, obrazy hiperspektralne są rejestrowane liniami, piksel po pikselu (tzw. skaner przemiatający). Pozycja i orientacja skanera może się zatem zmieniać wielokrotnie w obrębie jednego obrazu.

Aby zniwelować błędy powstałe w trakcie rejestracji całej sceny, konieczne jest zastosowanie odpowiedniej korekcji do każdego piksela. Staje się to możliwe dzięki zastosowaniu korekcji parametrycznej (parametric geocoding), w której parametrami są elementy określające położenie i orientację skanera w trakcie rejestracji danej linii, a także wysokość terenu obrazowanego przez dany piksel.

Do rektyfikacji danych ze skanera DAIS 7915 wykorzystano program PARGE (PARametric Geocoding), opracowany przez Remote Sensing Laboratories (RSL) na Uniwersytecie w Zurychu (Schläpfer i Richter 2002). Program ten w precyzyjny sposób analizuje geometryczne zależności pomiędzy pozycją samolotu (skanera) a powierzchnią terenu, stosując następnie transformację pozwalającą uzyskać obraz w rzucie ortogonalnym. Dzięki wykorzystaniu danych nawigacyjnych, takich jak Inercyjny System Nawigacyjny (INS - Inertial Navigation System) oraz Globalny

System Pozycjonowania (GPS - Global Positioning System), możliwe jest znaczne zmniejszenie liczby wymaganych do poprawnej geometryzacji punktów kontrolnych, w porównaniu z innymi metodami korekcji. Zwiększa się jednocześnie dokładność dopasowania, która może sięgać wielkości rzędu jednego piksela.

W pierwszym etapie przygotowywane są dane wejściowe: oryginalny obraz, Numeryczny Model Terenu oraz dane pomocnicze. Nieprzetworzone dane wejściowe są konwertowane do postaci sekwencji kanałów (BSQ - band sequential) ułatwiającej i jednocześnie przyspieszającej wykonywanie kolejnych procesów. Numeryczny Model Terenu służy, oprócz źródła wysokości, jako element definiujący ostateczną rozdzielcość danych wyjściowych, zatem jest on ponownie próbowany z rozdzielcością niewiele wyższą niż nominalna rozdzielcość danych obrazu. Dodatkowe dane wejściowe, parametry położenia sensora (yaw, pitch, roll, heading, X, Y, Z), są wizualnie oceniane i w razie potrzeby filtrowane w celu złagodzenia nagłych skoków wartości. Do oceny poprawności nawigacyjnych danych wejściowych konieczne jest użycie kilku punktów kontrolnych o znanych współrzędnych. W praktyce często zdarza się, że dane nawigacyjne są niekompletne lub też zupełnie uszkodzone. W takim przypadku można pokusić się o odtworzenie parametrów lotu na podstawie większej liczby punktów kontrolnych.

Kolejnym etapem jest główny proces geometryzacji polegający na przypisaniu każdemu pikselowi obrazu odpowiadających mu wartości współrzędnych z Numerycznego Modelu Terenu. Wynikiem jest plik określający wzajemne relacje położenia między oryginalnymi, surowymi danymi a obrazem zgeometryzowanym.

Ostatnim etapem jest generowanie obrazu wyjściowego, skorygowanego. Możliwe jest początkowe utworzenie tylko 3 kanałów (RGB) w celu oceny poprawności całego procesu. W przypadku akceptacji wyniku przetwarzane zostają również pozostałe kanały.

Dodatkowymi elementami wyjściowymi procesu geometryzacji są pliki obrazowe (tzw. scan angle file) wykorzystywane w procesie korekcji atmosferycznej, opisujące parametry względnego położenie skanera i obserwowanego piksela. Pliki te mogą zostać bezpośrednio odczytane przez program ATCOR służący do przeprowadzania korekcji radiometrycznej.

Korekcja geometryczna (rektyfikacja) prowadzi więc do usunięcia błędów topologicznych obrazu oraz jego dowiązanie do określonego układu współrzędnych (Kurczyński, Wolniewicz, 2002<sup>40</sup>).

Istnieją trzy układy współrzędnych: płaskich, geograficznych oraz lokalnych.

Współrzędne płaskie to odwzorowanie kartograficzne, które przedstawia powierzchnię Ziemi na płaszczyźnie. Układ współrzędnych geograficznych ma współrzędne elipsoidalne, a opisywany jest przez długość i szerokość geograficzną. Lokalne współrzędne składają się z linii i kolumn i są zgodne z układem macierzy obrazu rastrowego.

Wyróżniają się trzy podstawowe **metody rektyfikacji**. Metoda parametryczna usuwa błędy w obrazie, który ma określoną geometrię sensora, a dla obrazu dane jest odniesienie geometryczne. Metoda polega na określeniu parametrów orientacji urządzenia skanującego. Jest to model charakteryzujący zależności między sensorem, rzeczywistością a obrazem.

Rektyfikacja nieparametryczna jest przeprowadzana, kiedy nie można stosować korekcji parametrycznej, ponieważ nie ma wystarczającej ilości danych. Wykorzystuje się inny obraz lub mapę jako dane do porównania, które dostarczają parametrów do przekształceń. Jako pomoc w identyfikacji i porównaniu dwóch źródeł (obrazu wejściowego oraz używanego do porównania) używa się terenowych punktów kontrolnych (Ground Control Point – GCP).

Do dalszych przekształceń możliwe jest wybranie kilku formuł transformacji. Na ogół stosowane są wielomiany, a ich stopień zależy od rodzaju zniekształcenia obrazu. Transformacja wielomianowa pierwszego stopnia nazywana jest transformacją liniową lub afinyczną. Stosuje się ją do nadawania obrazowi odwzorowania lub jego zmiany. Transformacje wielomianowe drugiego lub wyższych stopni są nielinowe i stosuje się je do materiałów obarczonych błędami, np. po skanowaniu, zdjęcia

lotnicze, materiały uszkodzone, itp.. Do każdego stopnia transformacji wymagana jest minimalna liczba punktów referencyjnych (tzw. paserów). Oblicza się ją ze wzoru (19)

$$i = \frac{(t+1)(t+2)}{2} \quad (19)$$

Gdzie:

$i$  – minimalna liczba punktów odniesienia (GCP, TIC, paserów)

$t$  – stopień transformacji wielomianu.

**Określenie parametrów transformacji** opiera się na określaniu położenia punktów GCP, na podstawie których definiowane są zależności między nowym a starym układem odniesienia. GCP są punktami na obrazie wejściowym, które zostają zaznaczone na obrazie służącym do porównania (np. mapie topograficznej). Ich położenie określane jest najczęściej na podstawie sytuacji terenowej. Punkty muszą być lokalizowane bardzo dokładnie, ponieważ wpływa to na dokładność rektyfikacji.

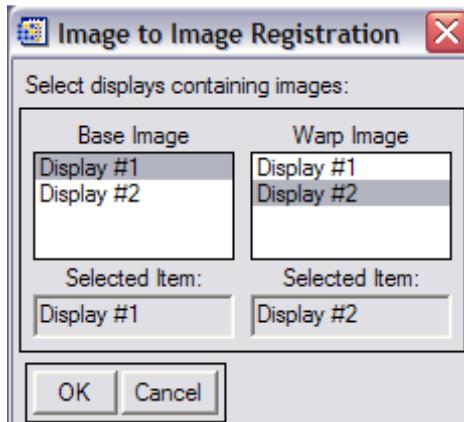
**Określenie poprawności parametrów transformacji**, czyli lokalizowania punktów GCP, definiowane jest przez błąd średniokwadratowy (RMS error). Jest to odległość dwóch punktów kontrolnych na obrazie wejściowym i wzorcowym. Określa dopasowanie wybranego stopnia wielomianu do zniekształceń na obrazie. Błąd nie powinien przekroczyć połowy wielkości przetwarzanego piksela

Ostatnim etapem rektyfikacji jest **przepróbkowywanie (resampling)**, które powoduje utworzenie nowej macierzy pikseli. Powstaje nowy obraz wyjściowy z nowymi wartościami pikseli. Wyróżniane są trzy metody przepróbkowywania: najbliższego sąsiada, transformacji bilinearnej oraz splotu sześciennego.

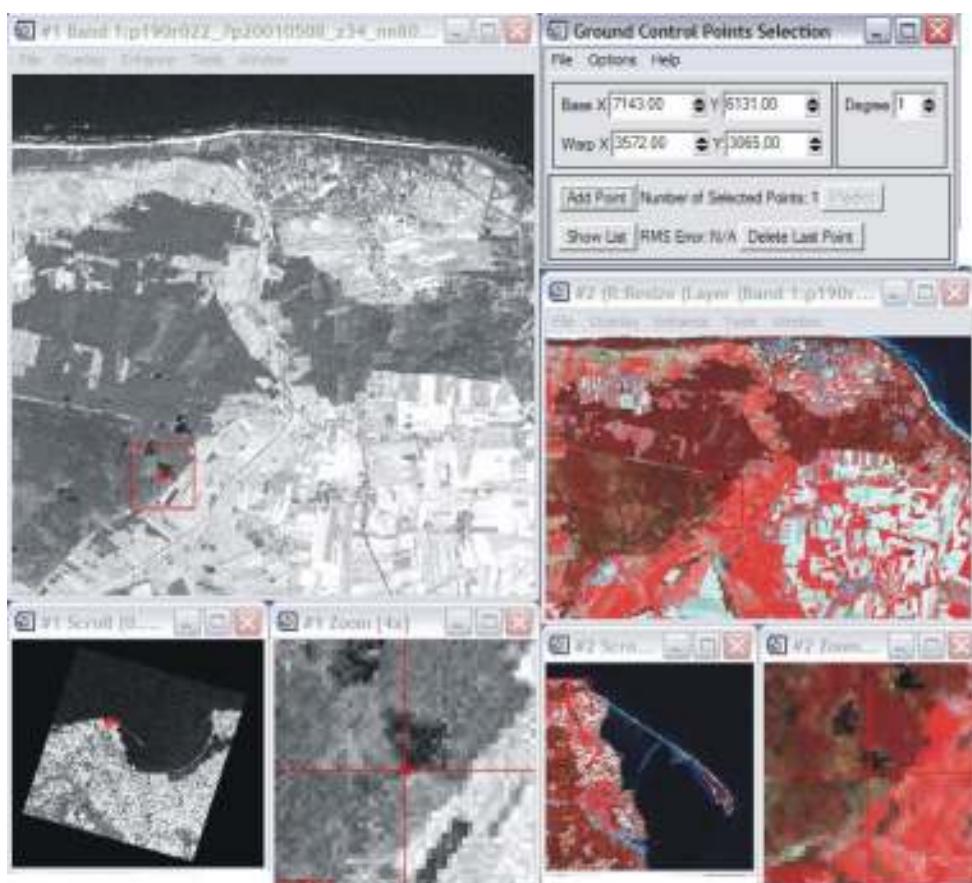
- Metoda najbliższego sąsiada (nearest neighbour) jest najprostsza. Nowa wartość określona jest na podstawie piksela najbliższego w obrazie wejściowym. Transformacja nie uśrednia wartości, a tym samym nie powoduje utraty wartości skrajnych. Nie wprowadza także zniekształceń w pikselach. Minusem metody jest możliwość pominięcia lub powielenia niektórych pikseli.
- W metodzie transformacji bilinearnej (bilinear transformation) nowe piksele obliczane są na podstawie średniej ważonej z czterech najbliższych pikseli, sąsiadujących z transformowanym piksem obrazu wejściowego. Metodę stosuje się, gdy ulega zmianie rozmiar komórek. Metoda daje efekt dużo łagodniejszej transformacji. Zmieniane są oryginalne wartości pikseli. Usuwane są wartości ekstremalne i wygładzane krawędzie obrazu, co jest niewskazane przy dalszych przetworzeniach, np. klasyfikacji.
- W metodzie splotu sześciennego (cubic convolution) nowa wartość piksela obliczana jest na podstawie średniej ważonej z 16 pikseli obrazu oryginalnego dookoła nowej lokalizacji. Stosowana jest wtedy, gdy znacznie zmienia się wielkość piksela. Dzięki takiej metodzie wygładzane są szумy i wyostrzane krawędzie obrazu. Wadą są zmiany wartości pikseli i czasochlonność metody.

W programie ENVI możliwa jest rejestracja obrazu za pomocą kilku metod. Opcje rektyfikacji znajdują się w menu programu w zakładce Map->Registration. Opcja **Image to Image** polega na dopasowaniu jednego obrazu za pomocą punktów GCP do obrazu referencyjnego lub mapy (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Początkowo wybierany jest obraz bazowy oraz ten poddawany korekcji (ryc. 73.1). Następnie pojawia się okno dialogowe z wyborem punktów GCP (ryc. 73.2). Lokalizowane są te same punkty terenowe na dwóch obrazach (referencyjnym i korygowanym), a następnie dodawane są GCP. Po wczytaniu wszystkich punktów należy z menu Options wybrać **Wrap Displayed Band** (dla rektyfikacji wyłącznie wyświetlonych kanałów) lub **Wrap File** (dla

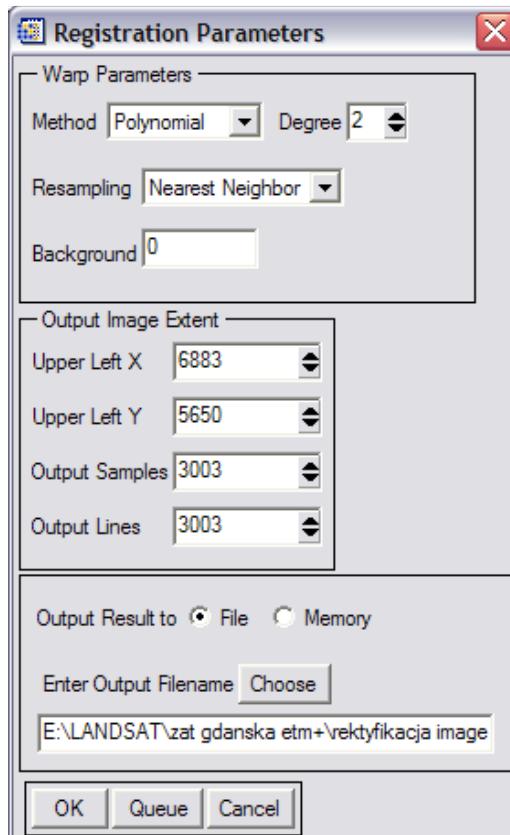
rektyfikacji całego pliku). Należy wybrać plik, a w oknie dialogowym metodę, np. wielomianową, stopień wielomianu, metodę przepróbkowywania oraz rozmiar pliku (ryc. 73.3). Obraz wynikowy ma nadane odwzorowanie i współrzędne geograficzne.



Rycina 73.1 Wybór obrazu bazowego i korygowanego do korekcji geometrycznej metodą Image to Image

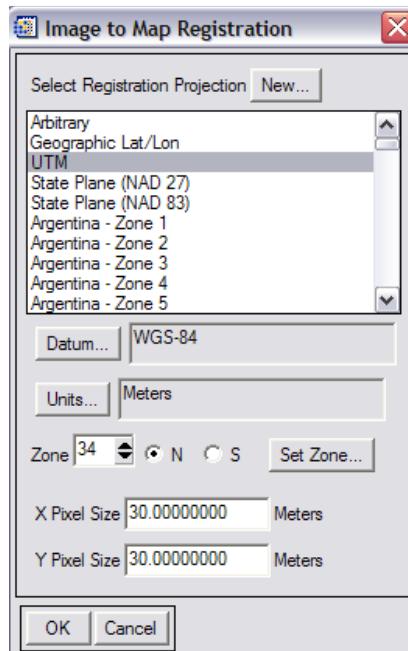


Rycina 73.2 Wczytywanie GCP na obrazie bazowym i korygowanym metodą Image to Image

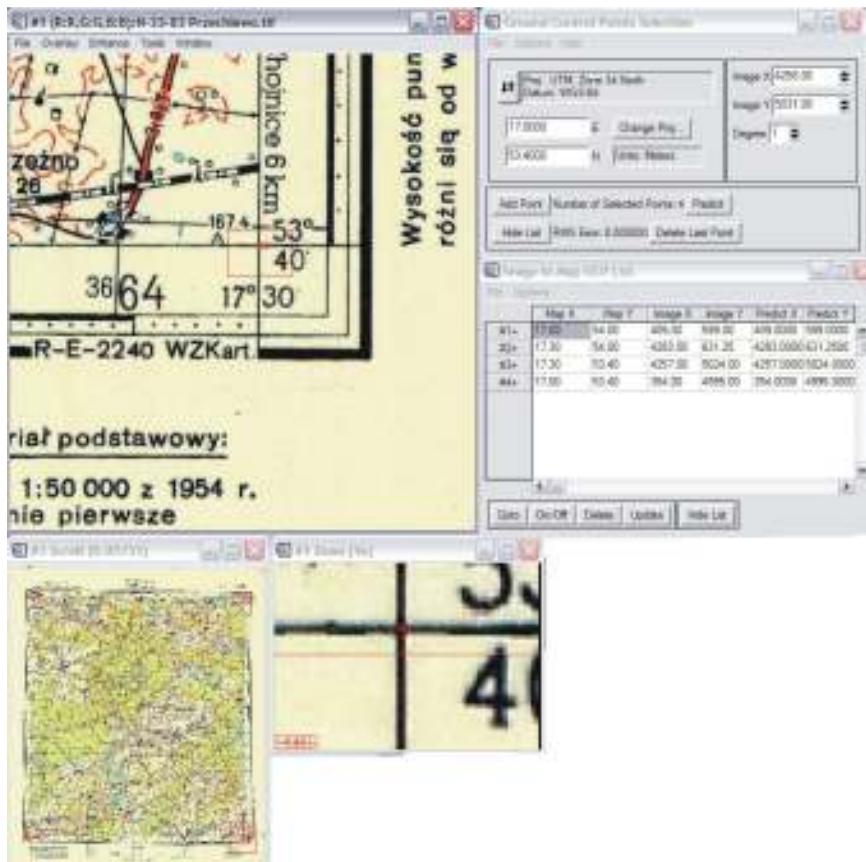


**Rycina 73.3 Określanie parametrów rejestracji metodą Image to Image (transformacja wielomianowa, jej stopień, metoda przepróbkowywania; wielkość wynikowego obrazu oraz nazwa pliku wyjściowego)**

Drugą opcją jest rejestracja **Image to Map**, gdzie obraz jest dopasowywany do mapy, czyli do danych współrzędnych (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). W oknie dialogowym należy wybrać rodzaj odwzorowania, jednostki oraz rozmiar piksela (ryc. 73.4). Następnie definiowane są punkty GCP i wpisywane są współrzędne punktów (ryc. 73.5). Ostatnim etapem, tak samo jak w poprzednim przypadku, należy wybrać opcję **Wrap File** i zapisać obraz po korekcji.

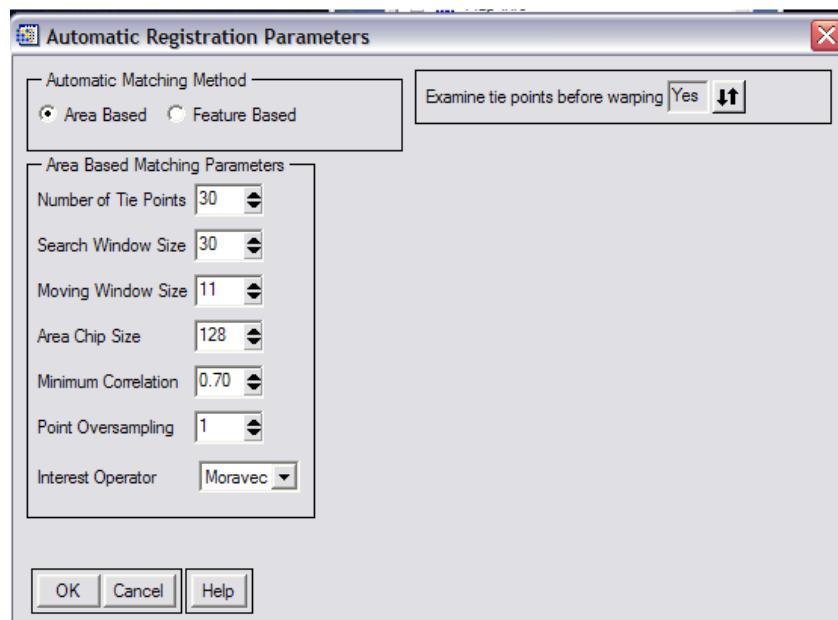


Rycina 73.4 Określenie odwzorowania w rejestracji mapy metodą Image to Map

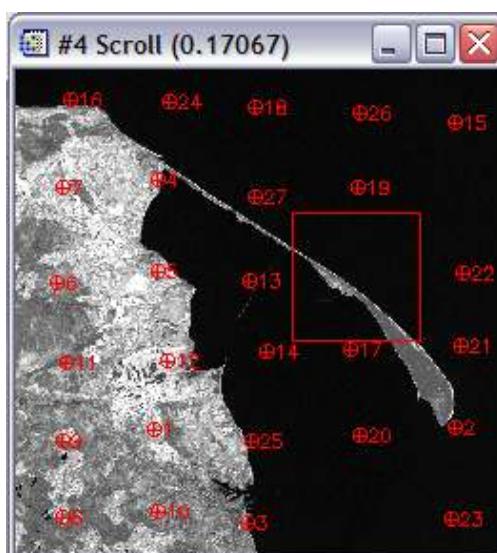


Rycina 73.5 Wybór punktów GCP przy rejestracji mapy na podstawie współrzędnych (obraz z zaznaczonym punktem i wpisane współrzędne)

Możliwa jest także automatyczna rejestracja obrazów za pomocą opcji Map->Registration->Automatic Registration: Image to Image. Wybierany jest kanał bazowy obrazu referencyjnego, do którego będzie dopasowywany obraz rektyfikowany. W kolejnym oknie dialogowym określany jest obraz do rektyfikacji. Wybierany jest kanał, który posłuży do wyboru punktów GCP, a następnie określone są parametry automatycznej rejestracji: metoda dopasowania punktów, ilość punktów, wielkość okna poszukiwującego i poruszającego się itd. (ryc. 73.6). Punkty GCP są generowane automatycznie na obu obrazach, można je następnie usuwać lub generować od nowa (ryc. 73.7). Dalsze postępowanie jest takie same, jak w poprzednich przypadkach.



Rycina 73.6 Określanie parametrów rejestracji automatycznej



Rycina 73.7 Wygenerowane automatycznie punkty GCP

## 8 Klasyfikacja obrazów wielo- i hiperspektralnych

Hiperspektralne dane obrazowe charakteryzują się szczególnymi właściwościami powodującymi, że zastosowanie tradycyjnych metod klasyfikacji nadzorowanej staje się niewystarczające. Dlatego też, wraz z pojawiением się tego rodzaju danych, pojawiła się również konieczność opracowania nowych algorytmów klasyfikacyjnych, które w pełni wykorzystywałyby potencjał leżący w obrazach hiperspektralnych. W niniejszym rozdziale omówione zostaną główne metody zaawansowanej klasyfikacji: Spectral Angle Mapper (SAM), Linear Spectral Unmixing (LSU), Matched Filtering (MF) oraz Mixture-Tuned Matched Filtering (MTMF). Przedstawione zostaną również wyniki otrzymane dzięki ich zastosowaniu.

Wszystkie z wymienionych metod wykorzystują spektrometryczne pomiary terenowe wykonane dla poszczególnych gatunków roślinnych i innych typów obiektów obecnych na terenie badań. Pomiary te, zebrane w postaci biblioteki spektralnej, są wykorzystywane przez każdą z tych metod w nieco odmienny sposób, tym niemniej ich zastosowanie opiera się na wspólnej koncepcji pikseli mieszanych.

Koncepcja pikseli mieszanych zakłada, że sygnał rejestrowany przez sensor w obrębie jednego piksela jest tworzony przez kilka obiektów znajdujących się w jego polu widzenia, a jego wartość jest wypadkową wartości odbicia promieniowania od poszczególnych obiektów uzależnioną także od zajmowanej przez dany obiekt powierzchni.

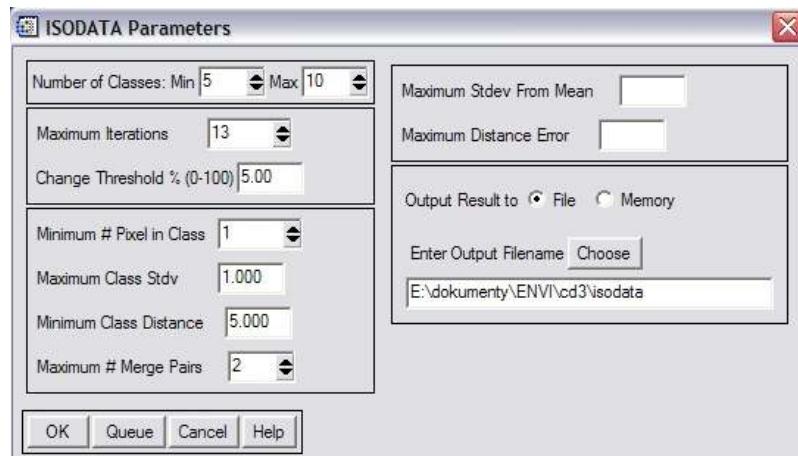
Klasyfikacja obrazów służy wyodrębnieniu różnych obiektów terenowych i zjawisk, czyli realizuje jedno z ważniejszych zadań teledetekcji (Adamczyk, Będkowski, 2005<sup>Error! Bookmark not defined.</sup>). Polega ona na określeniu przynależności piksela do określonej, zdefiniowanej grupy obiektów. Podstawą są wartości liczbowe pikseli zapisane w kanałach spektralnych. Wynikiem jest jednokanałowy obraz z zapisanymi klasami obiektów i zjawisk. Klasyfikacja obrazów za pomocą analizy spektralnej pikseli może odbywać się w sposób nadzorowany i nienadzorowany. Wyróżniane są także metody klasyfikacji, które biorą pod uwagę także strukturę i teksturę obrazu – klasyfikacja obiektowa.

### 8.1 Klasyfikacja nienadzorowana

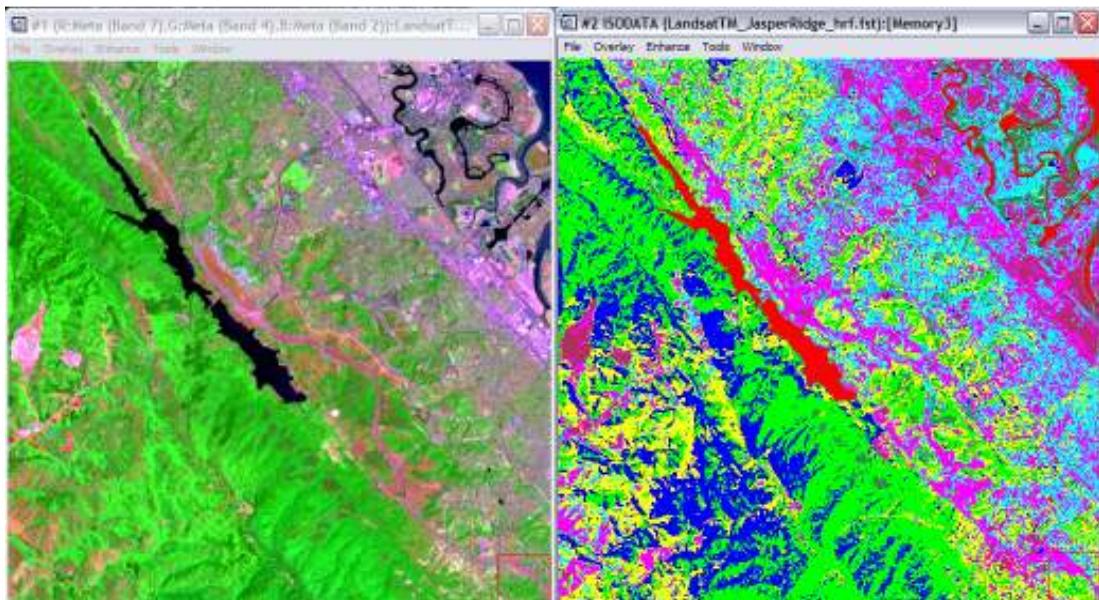
Klasyfikacja nienadzorowana jest zupełnie zautomatyzowana (Adamczyk, Będkowski, 2005<sup>Error! Bookmark not defined.</sup>, Ciołkosz, Jakomulska, 2004<sup>36</sup>). W czasie jej przeprowadzania odszukiwane są skupiska punktów o podobnych cechach w wielowymiarowej przestrzeni (przestrzeń cech). Jest to przestrzeń abstrakcyjna definiowana przez jednostki. W tym przypadku kolejne osie przestrzeni cech oznaczają kanały i wartości odbicia w nich zaznaczone dla każdego piksela. Do przeprowadzenia tego typu klasyfikacji nie jest konieczne posiadanie żadnych informacji o terenie. Często jest ona wykonywana jako procedura wstępna. Klasyfikacja nienadzorowana za pomocą algorytmu **ISODATA** (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) jest używana w większości programów teledetekcyjnych (np. ERDAS i ENVI). Proces klasyfikacji powtarza się wielokrotnie i odbywa się w przestrzeni cech, gdzie wyróżniane są klasy na podstawie podobieństwa spektralnego pikseli. Pierwsza iteracja (przebieg) to wyznaczenie w przestrzeni cech wartości minimalnej i maksymalnej oraz podział na równe klasy i obliczenie ich środków. W czasie kolejnych iteracji statystyczne oblicza się nowe środki klas. Piksele przypisywane są powtórnie do klas, gdzie odległość spektralna od środka klasy do punktu jest najmniejsza. W ten sposób zmieniają się granice klas. Proces powtarza się do momentu, kiedy procent pikseli zmieniających klasę jest niewielki (wartość określana przez użytkownika) lub do osiągnięcia określonej liczby przebiegów. Najlepsze rezultaty występują, gdy kanały są ze sobą nieskorelowane. Po procesie konieczne jest nadanie wartości logicznych poszczególnym klasom.

Zaletami klasyfikacji jest to, że na nie ma na nią wpływu geograficzne położenie pikseli, nie ma także znaczenia początkowy rozkład klas, bo proces przebiega wielokrotnie. Wadą jest czasochłonność procesu.

W programie ENVI 4.3. klasyfikacja nienadzorowana ma następujący przebieg (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Należy wybrać **Classification->Unsupervised->IsoData** i wprowadzić plik wejściowy. Następnie określana jest w oknie dialogowym maksymalna i minimalna liczba klas, a także parametry ograniczające liczbę przebiegów: maksymalna liczbę iteracji (im większa ich liczba tym lepsza klasyfikacja) i granica zbieżności, czyli maksymalny procent pikseli, które zmieniają klasę (ryc. 81.1). Następnie można modyfikować parametry, np. minimalną liczbę pikseli w klasie, odchylenie standartowe klas, odległość w przestrzeni cech oraz błąd. Wynikiem jest obraz z wyznaczonymi klasami, którym można nadawać nazwy itd. (ryc. 81.2).



Rycina 81.1 Parametry klasyfikacji nienadzorowanej metodą ISODATA



Rycina 81.2 Obraz wejściowy i wynik klasyfikacji nienadzorowanej ISODATA

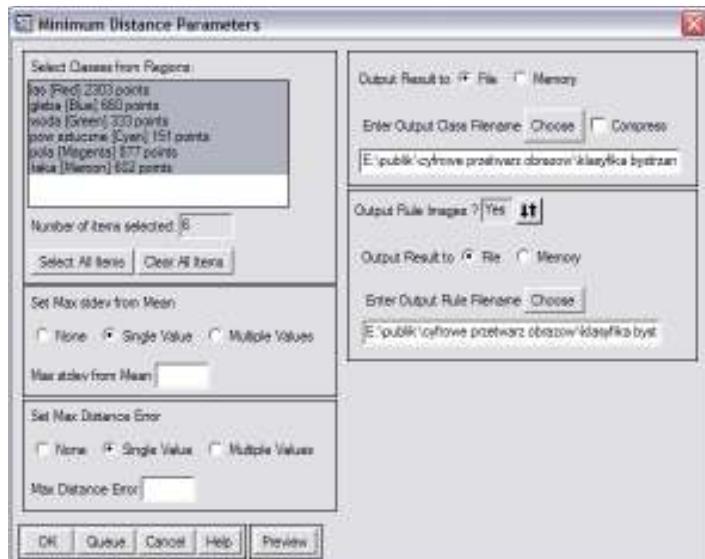
## 8.2 Klasyfikacja nadzorowana

Przy takiej klasyfikacji konieczne jest posiadanie wiadomości o terenie i występujących tam obiektach. Procedura klasyfikacji wymaga wyboru pól treningowych, które są dobrze znane i jednoznacznie odpowiadają poszczególnym formom, które są przedmiotem klasyfikacji. Na ich podstawie tworzenie sygnatur, a następnie grupowanie pikseli. Przyporządkowywanie obiektów do klas odbywa się na zasadzie podobieństwa. Pierwszym etapem klasyfikacji jest wyznaczenie obszarów testowych, których granice są digitalizowane. Następnie przekształcane są w sygnatury, które mają jednoznacznie wskazywać na daną klasę. Jest to obszar najbardziej charakterystyczny dla klasy.

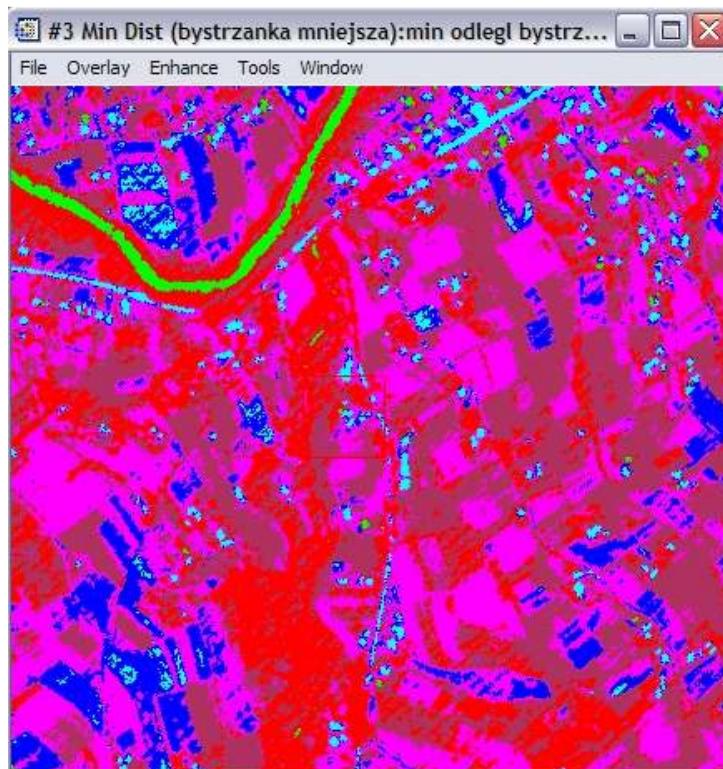
**Obszary testowe** (pola treningowe) powinny być na tyle duże, żeby potem wyznaczyć z nich klasy. Minimalna liczba pikseli w polu powinna być dziesięciokrotnie większa niż liczba kanałów obrazu (Adamczyk, Będkowski, 2005<sup>Error! Bookmark not defined.</sup>). Dla jednej klasy może być wyznaczony obszar testowy w wielu miejscowościach. Kolejnym etapem jest przekształcenie pól testowych w sygnatury parametryczne lub nieparametryczne. Sygnatury parametryczne bazują na parametrach statystycznych pikseli w próbce (obliczane są wartości statystyczne w klasie: średnie, minimalne i maksymalne wartości oraz odchylenie standartowe). Sygnatury nieparametryczne oparte są na wielowymiarowej przestrzeni cech, gdzie oblicza się wszystkie statystyki. W programie ENVI sygnatury wyznaczane są za pomocą Region Of Interest, które były omówione wcześniej.

Występują trzy rodzaje algorytmów podziału pikseli na klasy na podstawie sygnatur. Różnią się one przyjętą regułą określającą przynależność do poszczególnych klas. Wszystkie trzy należą do reguł parametrycznych. Algorytmy klasyfikacji w środowisku ENVI znajdują się w zakładce Classification->Supervised. Początkowo należy podać plik wejściowy z obrazem, a następnie plik z sygnaturami (ROI).

**Metoda najmniejszych odległości** (Minimum distance) bierze pod uwagę odległość danego piksela od środka klasy w przestrzeni cech (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Najpierw wyznaczana jest średnia jasność pikseli w klasie w każdym kanale na podstawie sygnatur. W ten sposób wyznaczane są środki klas. Następnie sprawdza się w wielowymiarowej przestrzeni cech odległość każdego piksela od środków wszystkich klas i przydzielane są one do najbliższej. Algorytm nie wymaga złożonych obliczeń, umożliwia klasyfikowanie dużych zbiorów w dość krótkim czasie. Nie występują także piksele niesklasyfikowane. Metoda ta nie uwzględnia zmienności w obrębie klas, co może prowadzić do niedoszacowania ilości elementów występujących w klasach o dużym zróżnicowaniu, np. w mieście. Algorytm jest zalecany, w przypadku sygnatur o niewielkiej ilości pikseli lub niereprezentatywnych. Przy wykonywaniu tej klasyfikacji w programie ENVI należy wybrać ze wspomnianego menu opcję **Minimum Distance**, a następnie w oknie dialogowym zaznaczyć ROI, które mają służyć za wzór klasy, nazwać plik wyjściowy oraz statystyk (ryc. 82.1). Można także zmienić parametry odchylenia standartowego. Przykładowy wynik klasyfikacji przedstawiony został na rycinie 82.2.



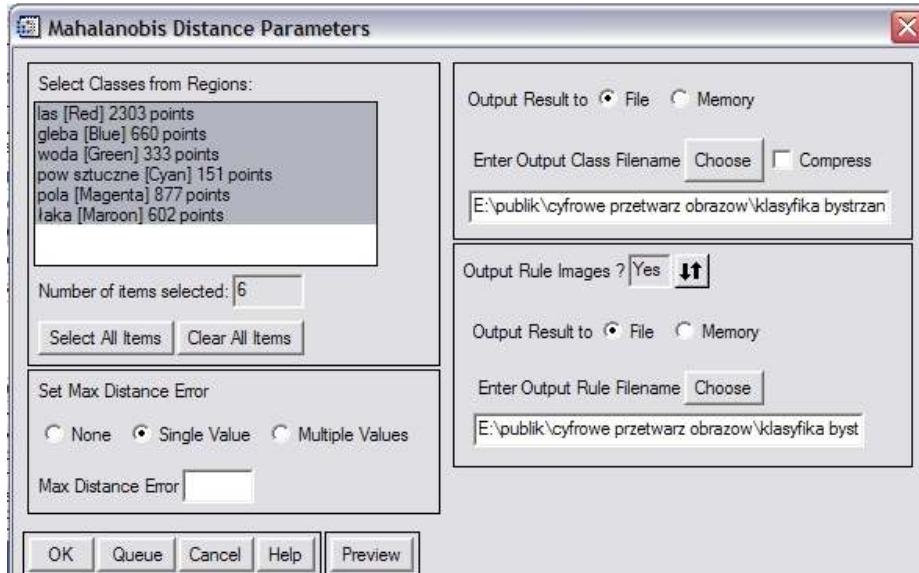
Rycina 82.1 Parametry klasyfikacji nadzorowanej metodą najmniejszych odległości



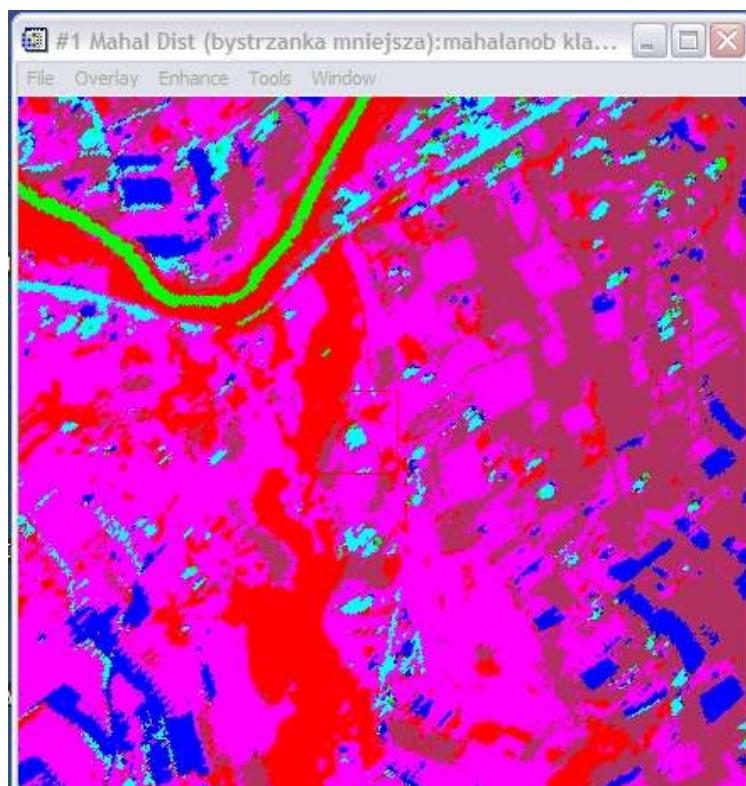
Rycina 8.2.2 Wynik klasyfikacji nadzorowanej metodą najmniejszych odległości

**Metoda odległości Mahalanobisa** (*Mahalanobis distance*) podobna jest do algorytmu najmniejszych odległości, ale bierze pod uwagę miarę rozproszenia wewnętrz klasy (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Wykorzystywane są w obliczeniach macierze kowariancji. Miara rozproszenia – odchylenie standartowe, obliczana jest na podstawie poligonów testowych. Sygnatury o dużej zmienności będą dawały klasy o podobnej zmienności. Metoda może być bardziej przydatna niż metoda najmniejszych odległości wtedy, gdy muszą być brane pod uwagę kryteria statystyczne. Wadami algorytmu jest tendencja do przeklasyfikowania sygnatur o dużych wartościach

rozproszenia i długi czas klasyfikacji. Proces w programie ENVI jest wykonywany w podobny sposób jak najmniejszych odległości (ryc. 82.3) (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Obraz wynikowy klasyfikacji przedstawia rycina 82.4.



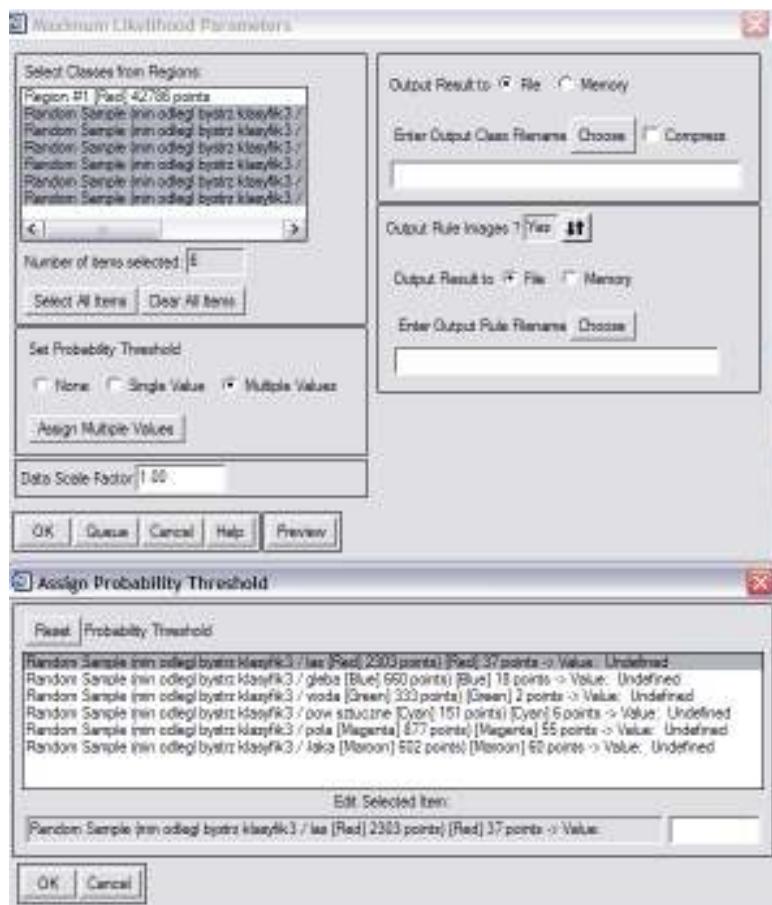
Rycina 82.3 Parametry klasyfikacji nadzorowanej metodą odległości Mahalanobisa



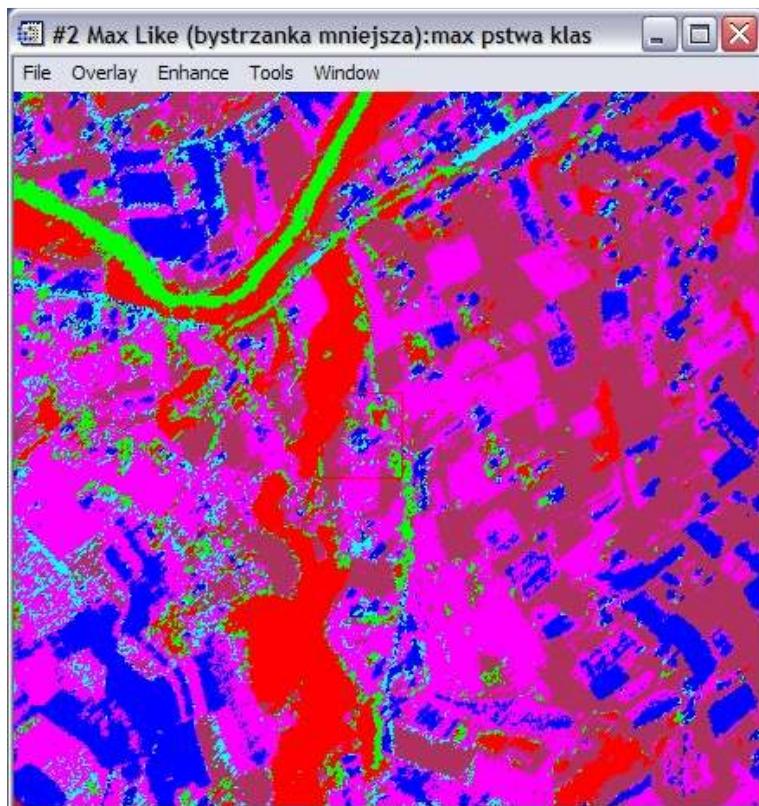
Rycina 82.4 Wynik klasyfikacji nadzorowanej metodą odległości Mahalanobisa

**Metoda największego prawdopodobieństwa** (*maximum likelihood*) polega na porównaniu wartości funkcji prawdopodobieństwa, które opisują histogramy rozkładu pikseli z poszczególnych

klas. Brana jest pod uwagę macierz kowariancji (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Wielowymiarowa funkcja prawdopodobieństwa, obliczona z sygnatur, określa prawdopodobieństwo wystąpienia pikseli o określonej jasności w każdej z klas. Zakłada się, że możliwość wystąpienia klas na terenie jest jednakowe, ale, w przypadku znajomości terenu, możliwe jest nadanie poszczególnym klasom odpowiednich wag. W oknie dialogowym klasyfikacji należy zaznaczyć wykorzystywane ROI, można ustawić próg prawdopodobieństwa wspólny dla wszystkich klas lub różny dla poszczególnych klas (ryc. 82.5). Na podstawie obliczonego łącznego prawdopodobieństwa, odległości od środka klasy oraz miary rozproszenia piksele przydzielane są do klas. Metoda daje dobre rezultaty w przypadku, gdy wartości pikseli w sygnaturach mają rozkład normalny. Zaletą jest uwzględnienie miar statystycznych, natomiast wadą – długi czas wykonywania obliczeń. Wynik operacji przedstawia rycina 82.6.



**Rycina 82.5 Parametry klasyfikacji nadzorowanej metodą największego prawdopodobieństwa razem z oknem, gdzie określane są progi prawdopodobieństwa dla poszczególnych klas**

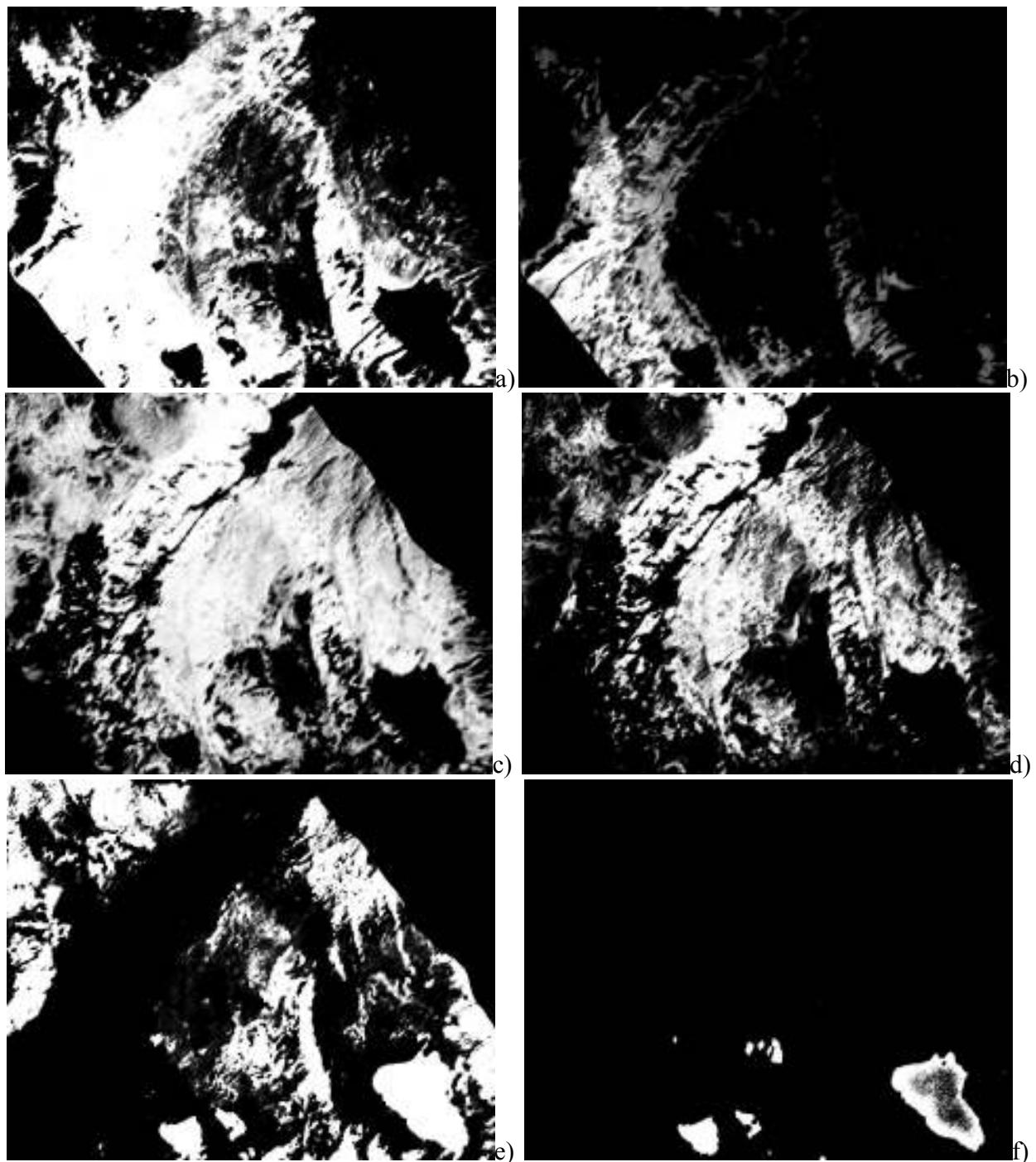


Rycina 82.6 Wynik klasyfikacji nadzorowanej metodą największego prawdopodobieństwa

### 8.3 Klasyfikacja Spectral Angle Mapper (SAM)

Klasyfikacja SAM to automatyczna metoda polegająca na porównaniu wektorów spektralnych każdego piksela na analizowanym obrazie z wektorami spektralnymi odpowiadającymi obiektom czystym spektralnie, tzw. endmemberom (ang. endmembers), które będą reprezentować wynikowe klasy. Obliczany jest kąt spektralny (bądź też odległość spektralna) pomiędzy każdą parą wektorów i na tej podstawie tworzone są obrazy, dla każdej klasy oddzielnie, przedstawiające ową odległość dla każdego piksela. Analizując obrazy będące wynikiem tej klasyfikacji należy kierować się wartościami poszczególnych pikseli świadczącymi o ich podobieństwie do danej klasy reprezentowanej przez obraz wynikowy. Im niższa wartość danego piksela, tym to podobieństwo jest większe, a więc większe jest również prawdopodobieństwo, że ów piksel zostanie przydzielony do danej klasy.

Rycina 83.1 przedstawia wyniki przeprowadzenia klasyfikacji metodą ‘Spectral Angle Mapper’ dla obszaru okolic Doliny Gąsienicowej w Tatrach. Rycina 83.1 a, c i e przedstawiają bezpośrednie wyniki otrzymane dzięki zastosowaniu algorytmu SAM dla odpowiednio kosmatki brunatnej, kosodrzewiny oraz stawów. Na Rycinie 83.1 b, d i f przedstawione są natomiast odpowiednio dla tych samych obiektów modyfikacje tych obrazów polegające na wyznaczeniu minimalnego progu, od którego piksele będą traktowane jako należące do danej klasy. Efektem jest uzyskanie obrazów lepiej charakteryzujących przestrzenne rozmieszczenie danych obiektów.



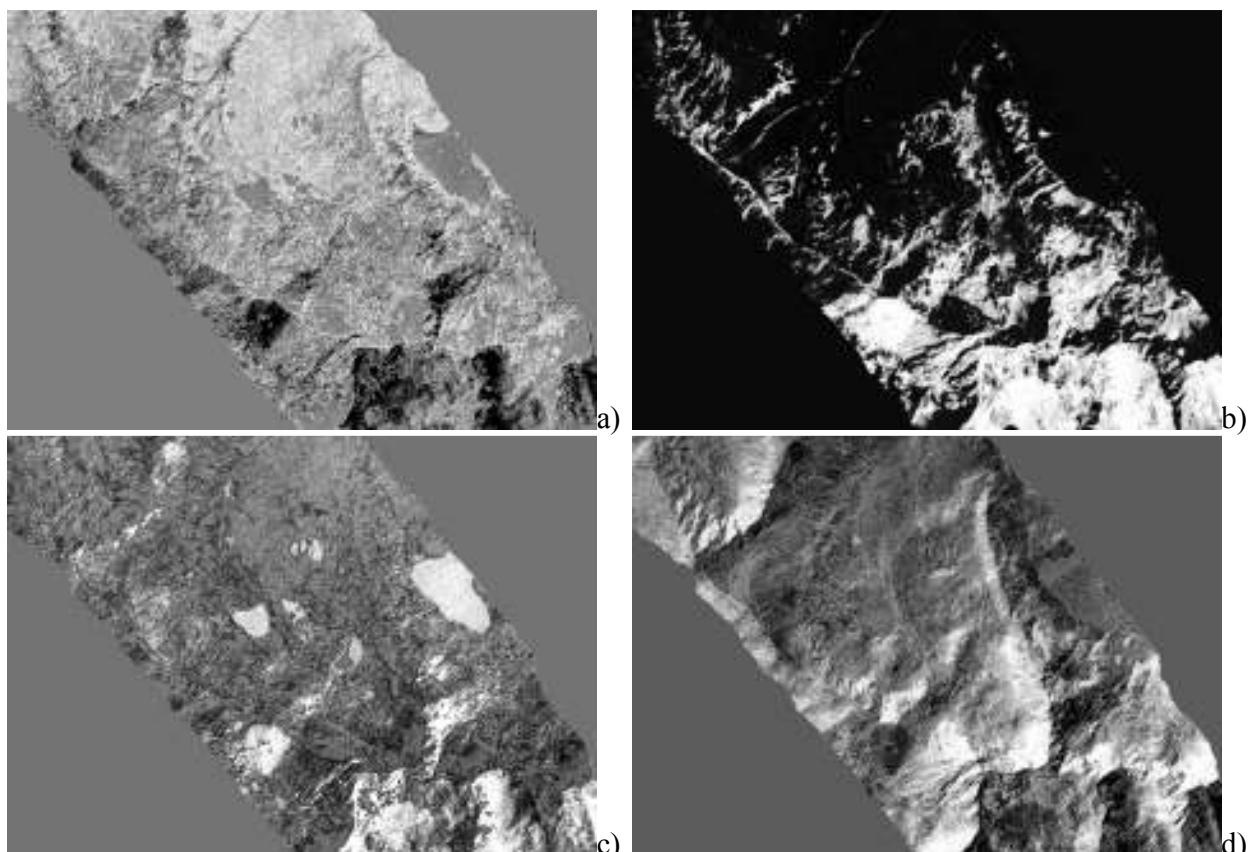
Ryc. 83.1: Wynik klasyfikacji metodą „spectral angle mapper” dla kosmatki brunatnej (a i b), kosodrzewiny (c i d) oraz stawów (e i f). Objaśnienia w tekście. (Sobczak i in., 2005)

#### 8.4 Metoda Linear Spectral Unmixing (LSU)

W metodzie tej wartość współczynnika odbicia dla każdego piksela jest przyjmowana jako liniowa kombinacja współczynników odbicia każdego z materiałów tworzących dany piksel. Zatem mając wartość tego współczynnika dla konkretnego piksela i jednocześnie znając, na podstawie spektralnych badań terenowych bądź wartości odczytanych z obrazu, charakterystyki spektralne

poszczególnych elementów tworzących ten piksel, możliwe jest obliczenie procentowego udziału każdego z tych elementów w tworzeniu wartości analizowanego piksela. Zastosowana metoda wymaga, aby liczba kanałów użytych do przeprowadzenia klasyfikacji była większa niż liczba elementów tworzących wartości na obrazie (obiektów czystych spektralnie). Dodatkowo, podczas analizy muszą być użyte wszystkie elementy pierwotne obecne na obrazie.

Wyniki otrzymane dzięki zastosowaniu liniowego spektralnego rozmieszczania pikseli jest w dużej mierze zależna od zastosowanych charakterystyk spektralnych obiektów uznanych za spektralnie czyste. W niniejszych badaniach do tego celu wykorzystano dane zebrane w lokalnej bibliotece spektralnej stworzonej dla potrzeb całego projektu w trakcie badań terenowych, za wyjątkiem odpowiedzi spektralnej cienia, która została pobrana bezpośrednio z obrazu. Na ryc. 84.1 przedstawione są rezultaty uzyskane dla kosodrzewiny, skał (reprezentowanych głównie przez skały granitowe), wód oraz cienia.

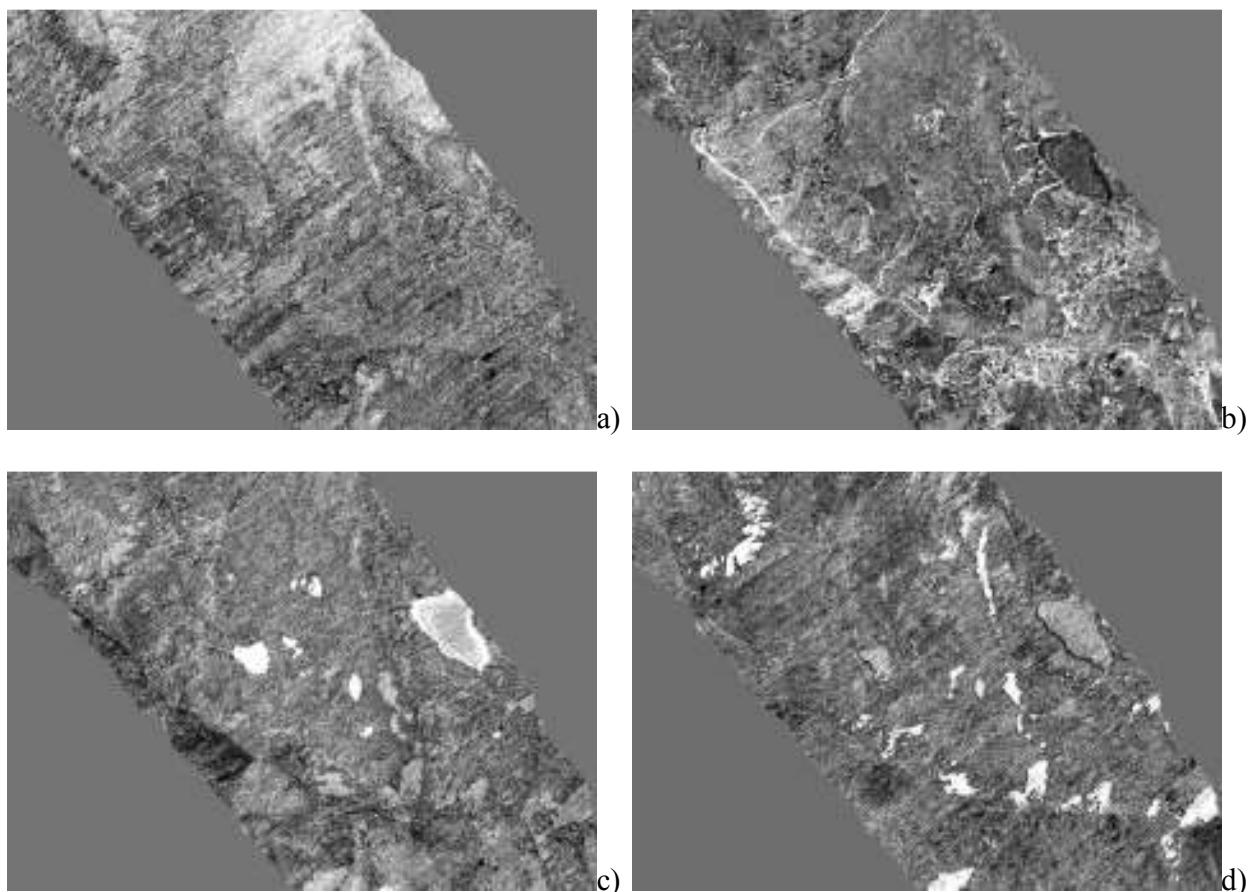


Ryc 84.1: Wyniki zastosowania metody ‘linear spectral unmixing’ na obrazie DAIS. Procentowy udział w tworzeniu wartości piksela dla: a) kosówka b) skał c) wody d) cienia (jaśniejszy odcień oznacza wyższy udział) (Sobczak i in. 2005)

Wartości przedstawione na poszczególnych obrazach reprezentują udział danego obiektu w tworzeniu wartości odbicia spektralnego w każdym z pikseli. Jaśniejsze odcienie odpowiadają większym wartośćom piksela, a więc również większemu udziałowi procentowemu.

## 8.5 Metoda Matched Filtering (MF)

Jest to metoda, która nie wymaga od użytkownika wiedzy o wszystkich spektralnie czystych obiektach występujących na badanym obszarze. Dzięki temu możliwa jest szybka identyfikacja wybranych obiektów, bez konieczności obliczania udziałów procentowych dla wszystkich obiektów znajdujących się na terenie badań i tworzących wartości odbicia spektralnego pikseli. Algorytm tej klasyfikacji maksymalizuje odpowiedzi znanych obiektów tłumiąc jednocześnie odpowiedzi spektralne tzw. tła, a więc pochodzące od obiektów nieuwzględnionych w bibliotece spektralnej. Ryc. 85.1 przedstawia serię wynikowych obrazów dla czterech typów obiektów (kosodrzewiny, skał, wody oraz cienia). Obrazy te reprezentują stopień względnego dopasowania każdego piksela do referencyjnej krzywej odbicia spektralnego reprezentowanej przez obiekty czyste spektralnie, jednocześnie wskazując na względny udział tego obiektu w tworzeniu wartości piksela.

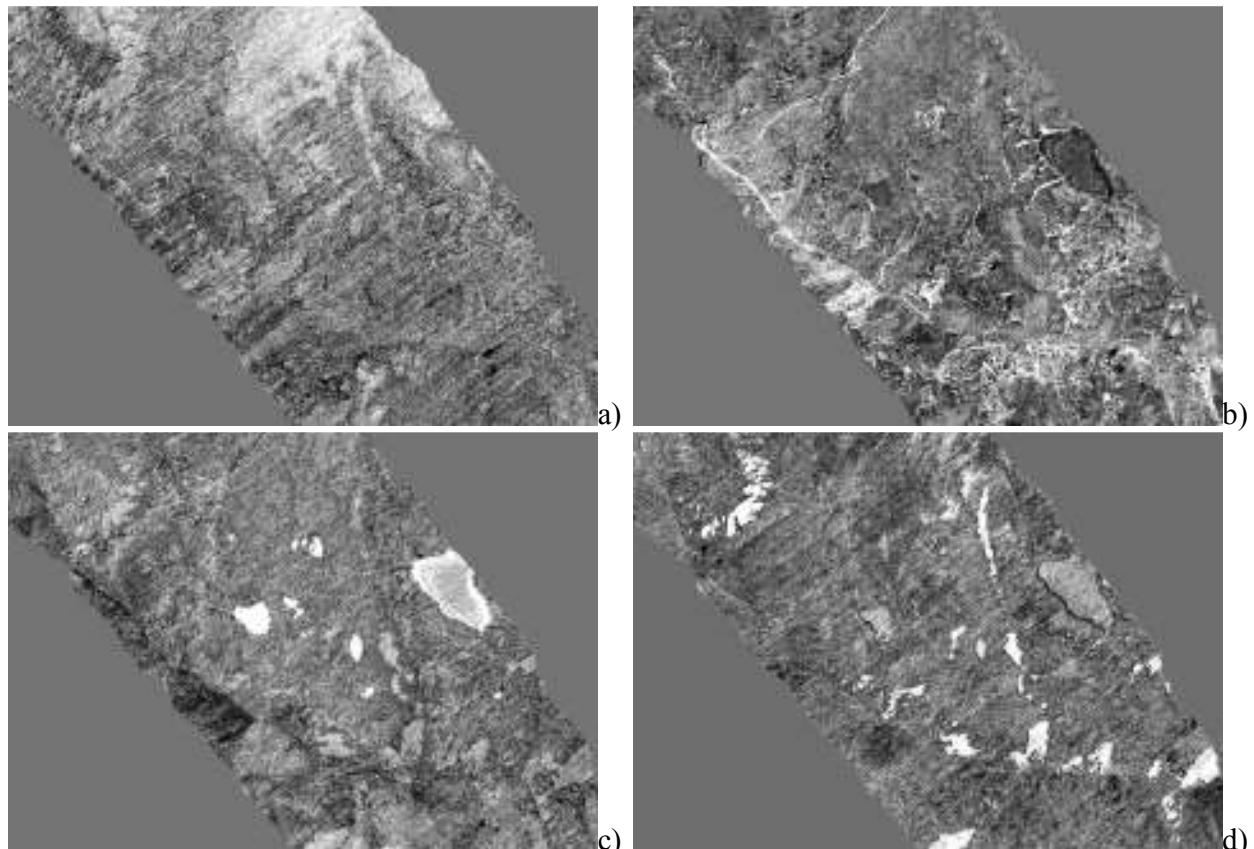


Ryc. 85.1: Wynik zastosowania metody ‘matched filtering’ dla: a) kosówki b) skał c) wody d) cienia (jaśniejszy odcień oznacza wyższy udział) (Sobczak i in. 2005)

## 8.6 Metoda Mixture-Tuned Matched Filtering (MTMF)

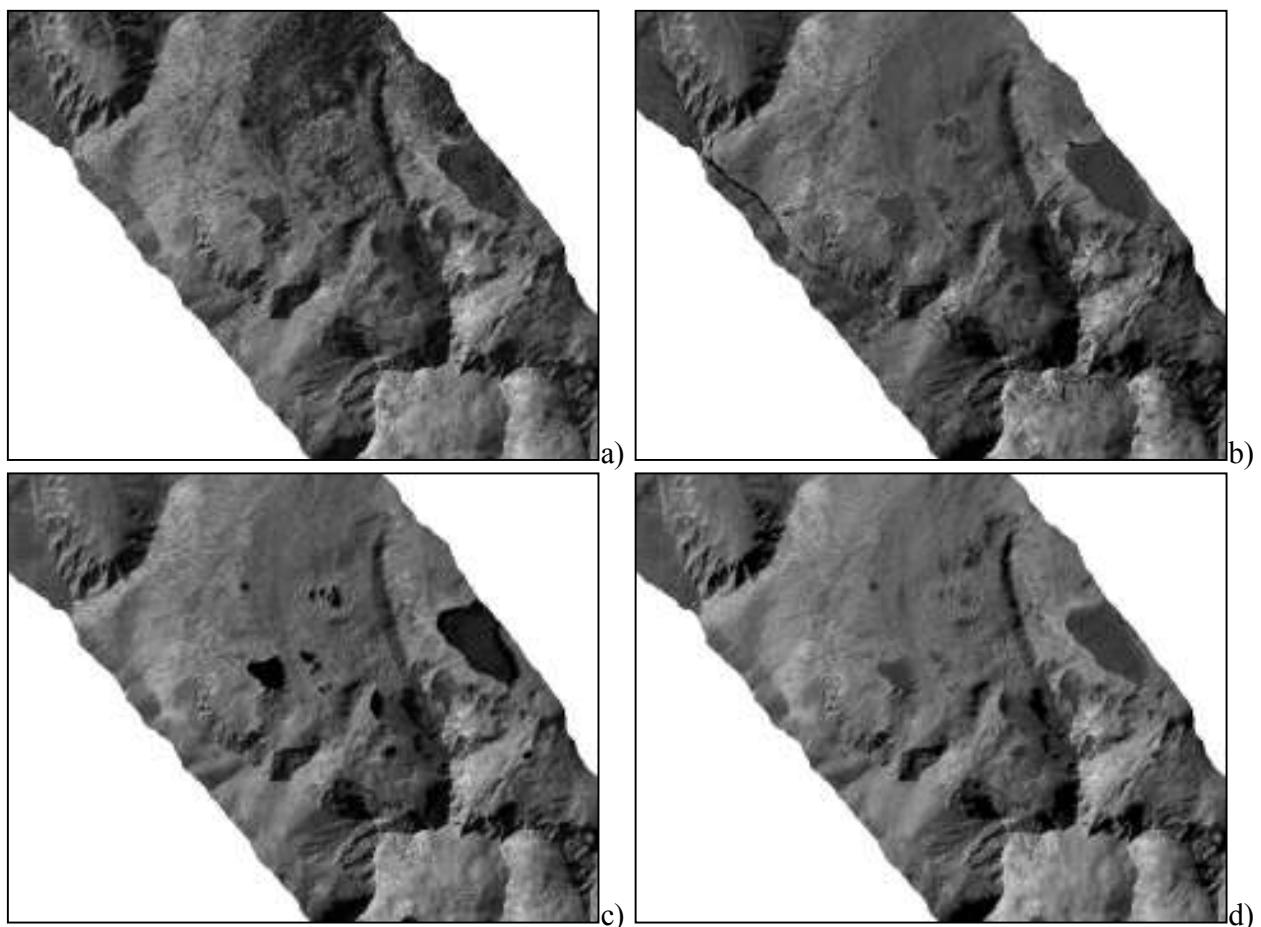
Algorytm klasyfikacji zastosowany w metodzie MTMF jest bardzo zbliżony do algorytmu stosowanego w metodzie MF. Różnica polega na zwiększeniu możliwości rozpoznawania „fałszywych pozytywów” (ang. ‘false positives’), które mogą pojawić się na obrazie będącym wynikiem zastosowania metody MF w przypadku rzadko występujących materiałów. „Fałszywe pozytywy” to piksele na obrazie wynikowym posiadające wysokie wartości (a więc wskazujące na

dość obfite występowanie danego obiektu), jednak w rzeczywistości nie występujące w tym miejscu w takiej ilości. W trakcie przeprowadzania klasyfikacji metodą MTMF do każdego obrazu generowany jest dodatkowy obraz reprezentujący „niewykonalność” czy też „nieprawdopodobieństwo” (ang. ‘infeasibility’) istnienia danego rozwiązania.



Ryc. 86.1: Wynik zastosowania metody ‘mixture-tuned matched filtering’ dla: a) kosówki b) skał c) wody d) cienia (jaśniejszy odcień oznacza wyższy udział) (Sobczak i in. 2005)

Wyniki przedstawiające wzajemny udział czterech obiektów (kosodrzewiny, skał, wody i cienia) w powierzchni reprezentowanej przez każdy piksel umieszczone są na ryc. 86.1. Są one bardzo zbliżone do obrazów uzyskanych po przetworzeniu za pomocą algorytmu MF, jednak dodatkowo do dyspozycji są obrazy przedstawiające wspomnianą „niewykonalność” (ryc. 86.2). Podczas analizy wyników bierze się pod uwagę oba obrazy. Piksele, które w dużym stopniu zawierają dany element czysty spektralnie, będą miały wysoką wartość na obrazie MTMF oraz niską wartość na obrazie przedstawiającym „niewykonalność”.



Ryc. 86.2: „Niewykonalność” klasyfikacji (ang. infeasibility) dla: a) kosówka b) skał c) wody d) cienia (jaśniejszy odcień oznacza większe wartości) (Sobczak i in. 2005)

### 8.7 Ocena dokładności klasyfikacji

Dokładność klasyfikacji oceniana jest na podstawie uzyskanych wyników oraz materiałów referencyjnych, którymi mogą być badania terenowe lub inne mapy weryfikacyjne

W przypadku klasyfikacji przeprowadzanych zaawansowanymi metodami przeznaczonymi do obrazów o bardzo wysokiej rozdzielczości spektralnej, wynikowe obrazy nie stanowią jednoznacznego przyporządkowania pikseli do poszczególnych klas pokrycia terenu, ale raczej określają procentowy udział danego typu pokrycia terenu w tworzeniu wartości każdego piksela. Ten fakt sprawia, że ocena dokładności przeprowadzonej klasyfikacji musi zostać poprzedzona etapem przygotowania. Etap ten polega na określeniu progu (bądź kilku progów) będącego graniczną wartością, od której dany piksel będzie uznawany za należący bądź nie należący do danej klasy. Po zastosowaniu takiego progu generowany jest obraz przedstawiający obszary zaklasyfikowane do danej klasy. W kolejnym kroku sprawdzana jest zgodność wyznaczonych obszarów z mapą referencyjną, w tym przypadku z mapą roślinności rzeczywistej. W przypadku niezadowalającego wyniku należy przeprowadzić modyfikację progu i następnie przeprowadzić całą procedurę jeszcze raz aż do osiągnięcia najlepszego wyniku. Taki proces postępowania został zastosowany również w przypadku tych badań.

Wyniki uzyskanie w trakcie oszacowania dokładności przeprowadzonych klasyfikacji wskazują zarówno na dużą skuteczność nowoczesnych metod klasyfikacji obrazów hiperspektralnych w

rozróżnianiu głównych typów pokrycia terenu, jak również pozwalają dostrzec wiele problemów związanych ze szczegółową identyfikacją poszczególnych gatunków objętych analizą w niniejszej pracy (głównie roślinności trawiastej). Uzyskane wartości liczbowe, mówiące o skuteczności zastosowanej klasyfikacji, wykazują bardzo podobne tendencje w przypadku wszystkich metod wykorzystujących zaawansowane algorytmy klasyfikacji cyfrowych danych hiperspektralnych. Bardzo dobre wyniki uzyskane zostały we wszystkich metodach dla dobrze wyróżniających się spektralnie typów pokrycia terenu.

Razem ze sklasyfikowanym plikiem dla każdej klasy tworzony jest plik odległości (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Jest to wykres, gdzie każdy piksel przedstawia jego odległość spektralną od środka klasy. Dzięki temu można usunąć z klasy piksele, które znajdują się bardzo daleko od jej środka i prawdopodobnie są źle zaklasyfikowane.

Weryfikacja wyników klasyfikacji odbywa się przez porównanie obrazu sklasyfikowanego z danymi bezbłędnymi. Przykładowo do porównania można użyć losowo rozrzuconych punktów. Minimalna ilość dla oszacowania błędu do 5% jest 250. Określana jest przynależność punktów do klas, a następnie porównuje się wyniki z obrazem sklasyfikowanym. Na tej podstawie tworzony jest raport z dokładności klasyfikacji, a tym samym jej ocena (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>; Adamczyk, Będkowski, 2005<sup>Error! Bookmark not defined.</sup>). Otrzymywana jest macierz błędów, gdzie określa się, jak piksele z poszczególnych klas zostały zaklasyfikowane. Oblicza się z nich charakterystyki liczbowe dokładności:

- Dokładność całkowita – stosunek pikseli dobrze zaklasyfikowanych do łącznej liczby pikseli na obrazie
- Dokładność użytkownika dla danej klasy – liczba pikseli zaklasyfikowanych poprawnie w stosunku do wszystkich pikseli zaklasyfikowanych do danej klasy
- Dokładność producenta dla danej klasy – ilość pikseli zaklasyfikowanych do klasy w stosunku do liczby pikseli, jaka powinna być w tej klasie
- Błąd przeszacowania dla danej klasy
- Błąd niedoszacowania dla danej klasy
- Współczynnik Kappa – wyznacza proporcjonalną redukcję błędów powstających w czasie klasyfikacji w stosunku do błędu klasyfikacji realizowanej przypadkowo, czyli informuje o ile lepsza jest wykonana klasyfikacja od przypadkowej

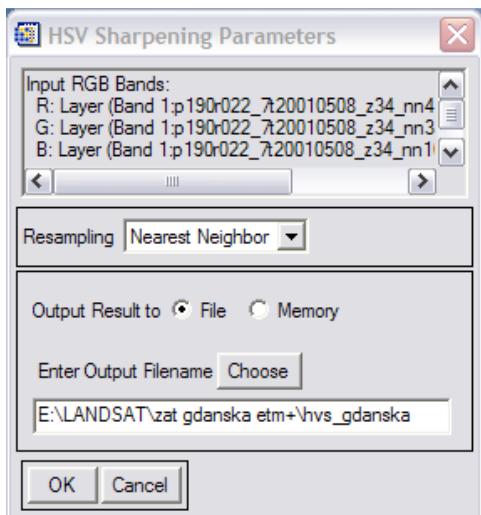
## 9 Wzmocnienie przestrzenne obrazu

Wzmocnienie przestrzenne obrazu jest możliwe w obrazach wielospektralnych za pomocą połączenia rozdzielczości kanałów wielospektralnych z kanałem panchromatycznym posiadającym większą rozdzielczość (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Wynikiem takiej operacji jest obraz wielospektralny o wyższej rozdzielczości. Wzmocnienie stosuje się, aby zwiększyć możliwości odróżniania i rozpoznawania obiektów i zjawisk, a także lepszej wizualizacji danych. Można wyróżnić metody, które mogą być zastosowane jedynie do kanałów obecnie wyświetlanym oraz do wszystkich kanałów.

Do trzech kanałów wyświetlanych stosuje się metodę HVS oraz Colour Normalized Brovey'a. Takie przekształcenia służą do prezentacji danych, bo zwiększają ich czytelność, rzadko natomiast do klasyfikacji, bo biorą pod uwagę jedynie trzy kanały spektralne.

W metodzie **HVS** trzy kanały wyświetlane przekształcane są z przestrzeni RGB (red, green, blue) do przestrzeni HVS (Human Visual System – odcień, nasycenie, wartość). Składowa określana jako „wartość” jest zastępowana przez kanał panchromatyczny, a następnie obraz ponownie jest przekształcany do zapisu RGB, ale o wzmacnionej rozdzielczości przestrzennej.

W programie ENVI 4.3 należy wybrać z menu opcję Transform->Image Sharpening->HVS (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Następnie należy wybrać źródło, skąd ma być wczytany obraz wielospektralny (trzy kanały). Do wyboru jest wyświetlane okno lub lista otwartych kanałów. Po wczytaniu kompozycji, należy w kolejnym oknie wczytać kanał panchromatyczny o podwyższonej rozdzielczości. Następnie wybiera się metodę przepróbkowywania oraz wpisuje nazwę pliku (ryc. 9.1). Obraz oryginalny i trzykanałowy obraz o podwyższonej rozdzielczości przedstawiony został na rycinie 9.2.



Rycina 9.1 Okno dialogowe wzmocnienia przestrzennego HVS (wybrane trzy kanały obrazu wielospektralnego, wybrana metoda przepróbkowywania, nadana nazwa pliku wyjściowego)



Rycina 9.2 Obraz oryginalny (po lewej) oraz o podwyższonej rozdzielczości przez metodę HVS (po prawej)

W metodzie **Colour Normalized Brovey'a** używane jest matematyczne połączenie kanałów wielospektralnych z panchromatycznym (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Stosowany jest do przekształceń następujący wzór (przykładowo dla kanału pierwszego):

$$W1 = k1 \times \frac{PAN}{k1+k2+k3}$$

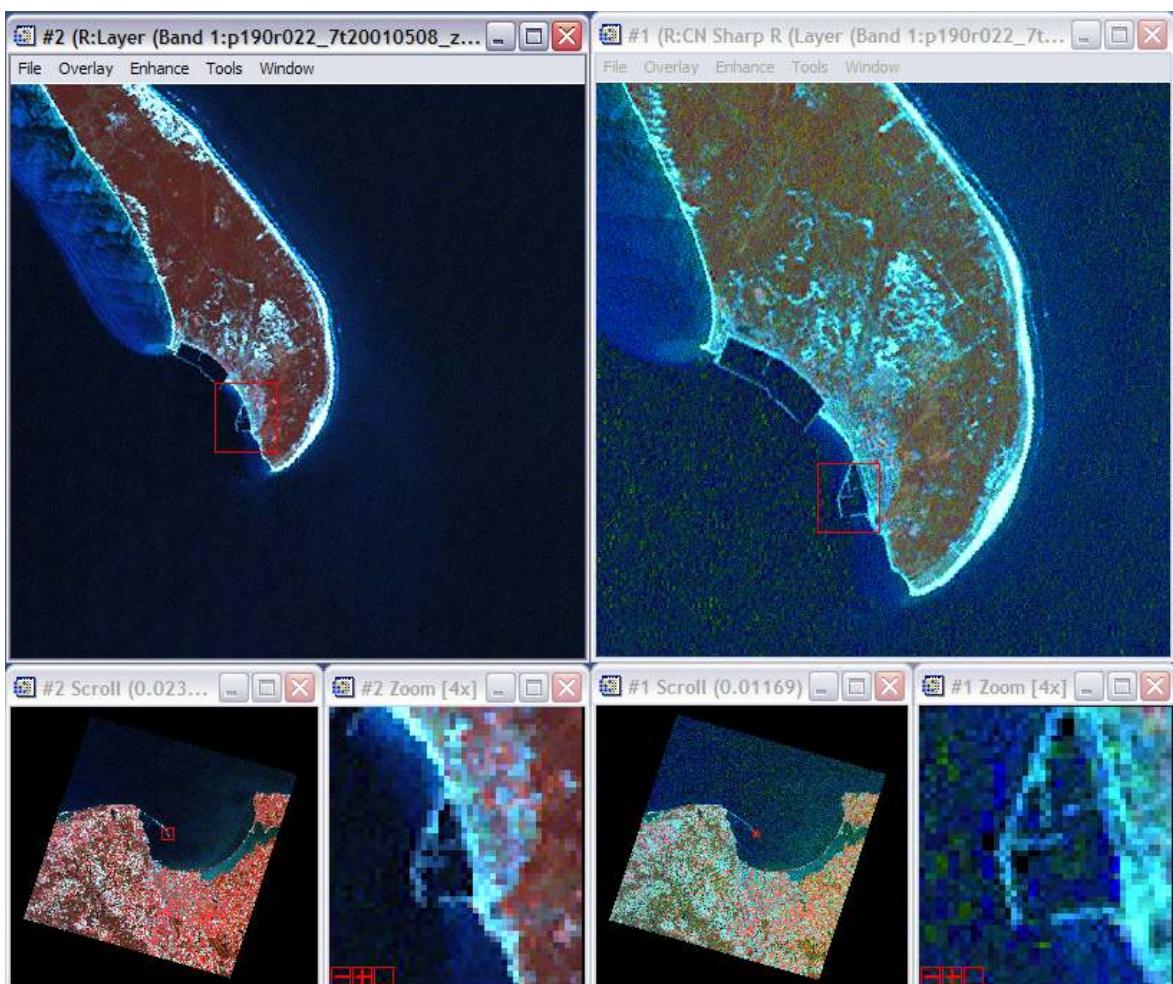
W1 – kanał wyjściowy nr 1

k1 – kanał wejściowy nr 1

k2, k3 – kanały wejściowe nr 2 i 3

PAN – kanał panchromatyczny

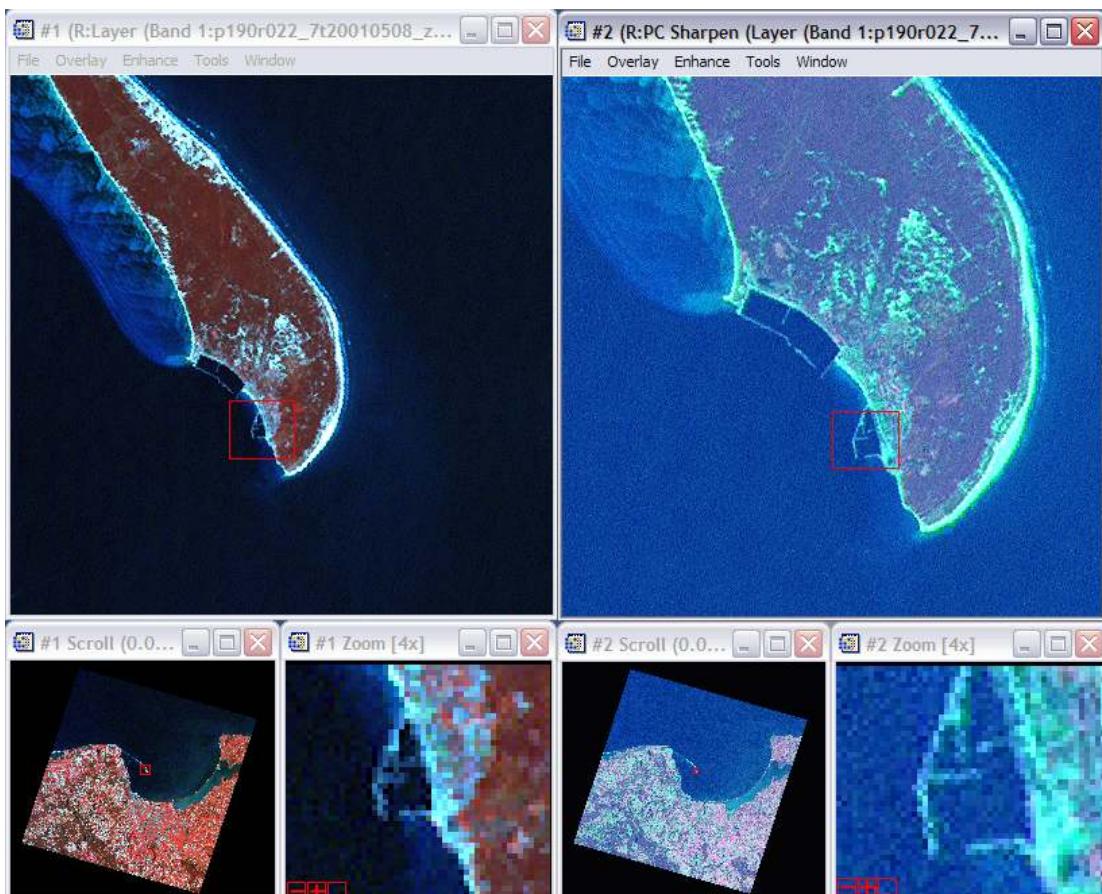
Tak jak w przypadku powyższej transformacji, w programie ENVI należy wybrać opcję **Transform->Image Sharpening->Color Normalized (Brovey)**, a następnie wczytać obraz trzykanałowy wielospektralny i o wyższej rozdzielczości (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). W oknie dialogowym wybierana jest metoda przepróbkowywania oraz nadawana nazwa obrazu. Powstaje trzykanałowy obraz o podwyższonej rozdzielczości (ryc. 9.3).



Rycina 9.3 Obraz oryginalny oraz przekształcony sposobem Colour Normalize (Brovey)

Do wszystkich kanałów stosuje się dwie metody wzmacniania przestrzennego (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Pierwsza z nich to **PC Spectral Sharpening**, gdzie cały obraz

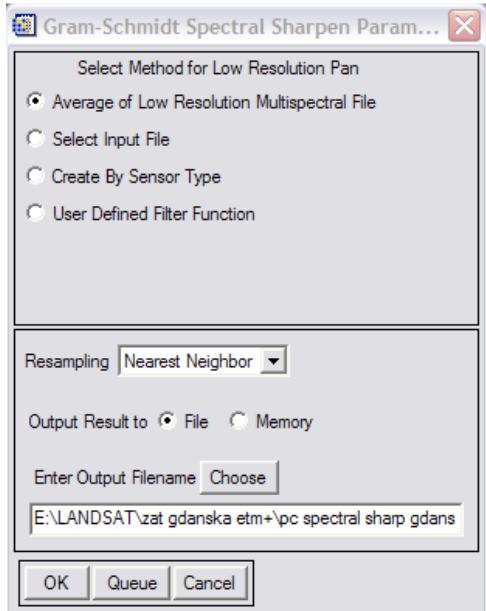
transformowany jest do przestrzeni PCA. W tej przestrzeni pierwszy kanał jest najbardziej zbliżony do panchromatycznego, dlatego pierwsza składowa główna (PC1) zamieniana jest z kanałem panchromatycznym. Następnie obraz ponownie transformowany jest do przestrzeni normalnej. Tak samo, jak przy poprzednich transformacjach w programie ENVI należy wybrać z menu **Transform->Image Sharpening->PC Spectral Sharpening** (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Kolejnym krokiem jest wybór obrazu wielospektralnego o niższej rozdzielczości, a w kolejnym oknie dialogowym kanał o wyższej rozdzielczości. Następnie wybierany jest cały obraz wielokanałowy o niskiej rozdzielczości, a nie tak, jak w poprzednich przypadkach, jedynie trzy kanały. Wczytywany jest kanał panchromatyczny o wyższej rozdzielczości. W oknie dialogowym wybierana jest metoda przepróbkowywania oraz nadawana nazwa. Powstaje obraz wielokanałowy o podwyższonej rozdzielczości (ryc. 9.4).



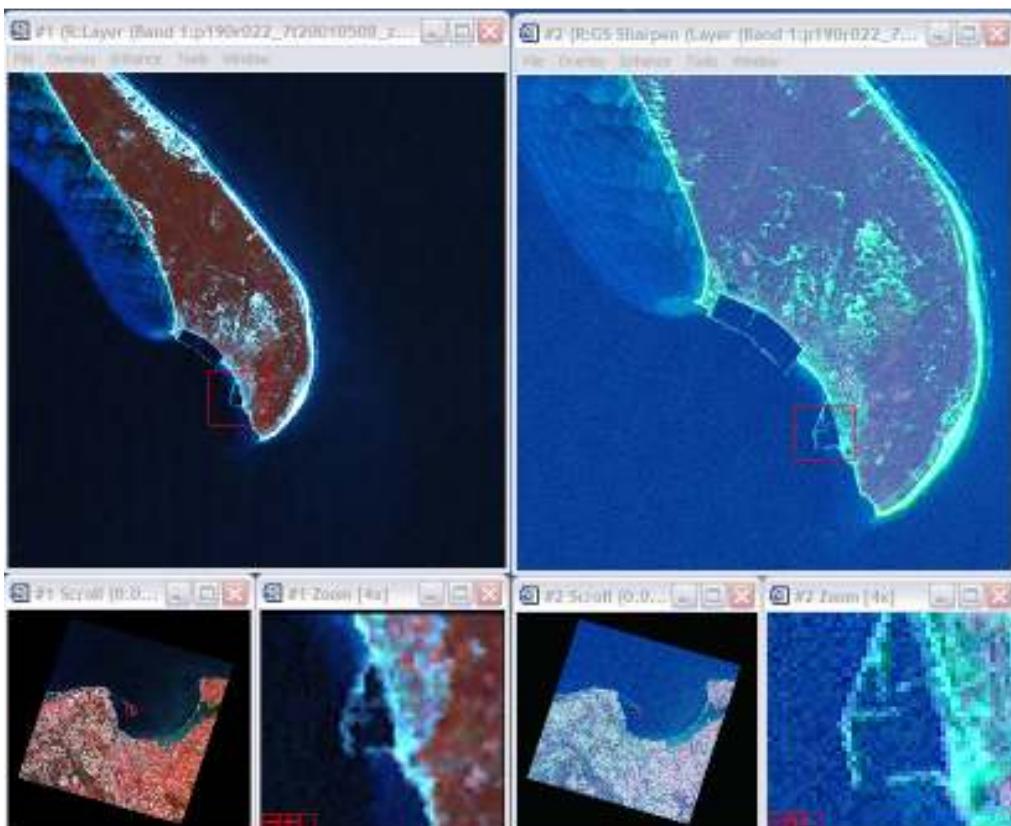
Rycina 9.4 Obraz oryginalny wielospektralny i przekształcony metodą PC Spectral Sharpening

Drugą metodą stosowaną do wszystkich kanałów jest **Gram-Schmidt Spectral Sharpening**. Tworzony jest sztuczny kanał wysokorozdzielczy (metoda symulacji jest do wyboru), a następnie zamieniany z panchromatycznym i łączony z wielospektralnym (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). W programie ENVI, aby przeprowadzić tą transformację, należy wybrać z menu **Transform** opcję **Image Sharpening** i **Gram-Schmidt Spectral Sharpening**. Wczytywany jest obraz wielokanałowy, a następnie kanał o podwyższonej rozdzielczości. Następnie w oknie dialogowym należy wybrać, w jaki sposób tworzony jest panchromatyczny kanał o niskiej rozdzielczości, który następnie jest zamieniany z kanałem o wyższej rozdzielczości (ryc. 9.5). Można utworzyć go na podstawie średniej z kanałów wielospektralnych, wczytać z pliku zewnętrznego, wybrać na

podstawie typu sensora lub zdefiniować za pomocą funkcji. Definiowana jest także metoda przepróbkowywania oraz nadawana nazwa. Powstaje obraz wielokanałowy o podwyższonej rozdzielczości (ryc. 9.6).



Rycina 9.5 Wybór metody tworzenia kanału panchromatycznego niskorozdzielczego, metody przepróbkowywania i nadawanie nazwy obrazu w metodzie Gram-Schmidt Spectral Sharpening

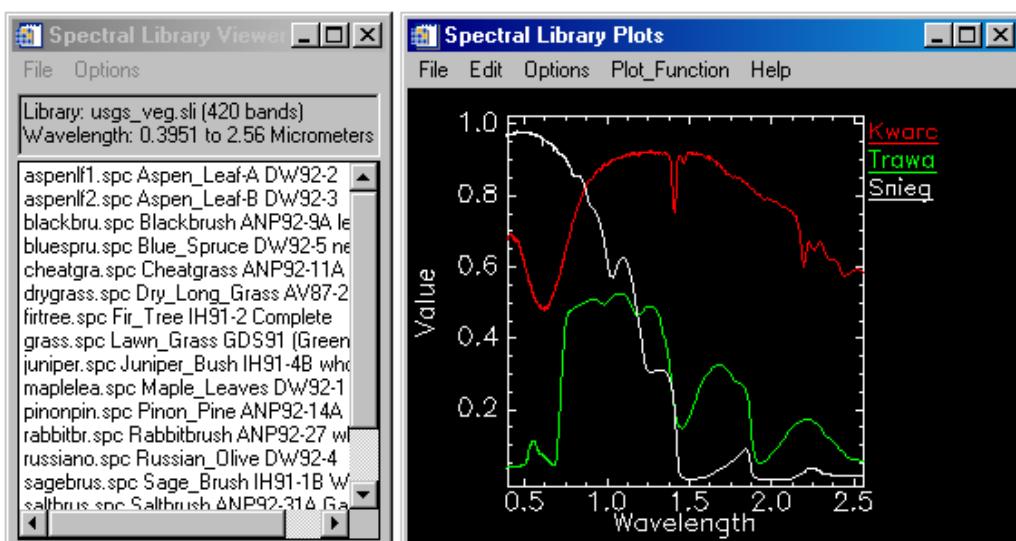


Rycina 9.6 Obraz oryginalny (po lewej) i obraz po wzmacnieniu przestrzennym metodą Gram-Schmidt Spectral Sharpening (po prawej)

## 10 Pozyskiwanie charakterystyk spektralnych

Wysoka liczba wąskich kanałów spektralnych pozwala na uzyskanie „ciągły” wykresów (krzywych) odbicia spektralnego, które różnią się między sobą, ponieważ każdy element środowiska ma inne właściwości bio-fizyko-chemiczne określające zdolności do reflektancji (odbijania) lub pochłaniania konkretnych zakresów promieniowania elektromagnetycznego (Rycina 10.1).

Pozyskiwane dla poszczególnych elementów środowiska krzywe odpowiedzi spektralnej mogą tworzyć zbiory nazywane bibliotekami spektralnymi (spectral library). Aby zapoznać się z bibliotekami spektralnymi (pochodzenie danych opisane jest w plikach readme.txt w katalogu źródłowym) z przykładowego zestawu danych programu ENVI należy otworzyć z głównego panelu ENVI zakładkę Spectral, a następnie Spectral Libraries -> Spectral Library Viewier. W oknie Spectral Library Input File wybrać Open -> Spectral Library i otworzyć z odpowiedniego katalogu plik z rozszerzeniem \*.sli zatwierdzając przyciskiem OK. W pojawiającym się oknie Spectral Library Viewer zawarta jest lista dostępnych krzywych spektralnych, które po kliknięciu wizualizowane są w Spectral Library Plots (ryc. 10.1).



Rycina 10.1. Okna wyboru i wizualizacji przykładowych krzywych spektralnych. Krzywe spektralne utworzone są za pomocą nieobrazujących (pozyskiwanych dane punktowe) spektrometrów naziemnych. Pierwszy lotniczy skaner hiperspektralnych GERS (Geophysical Environmental Research Scanner, zbudowany na początku lat 80 ubiegłego wieku) także bazował na pomiarach punktowych, wykonując je co 20 m. Drugim sposobem pozyskiwania charakterystyk spektralnych poszczególnych elementów środowiska jest tworzenie ich na podstawie pikseli z poszczególnych kanałów obrazu hiperspektralnego.

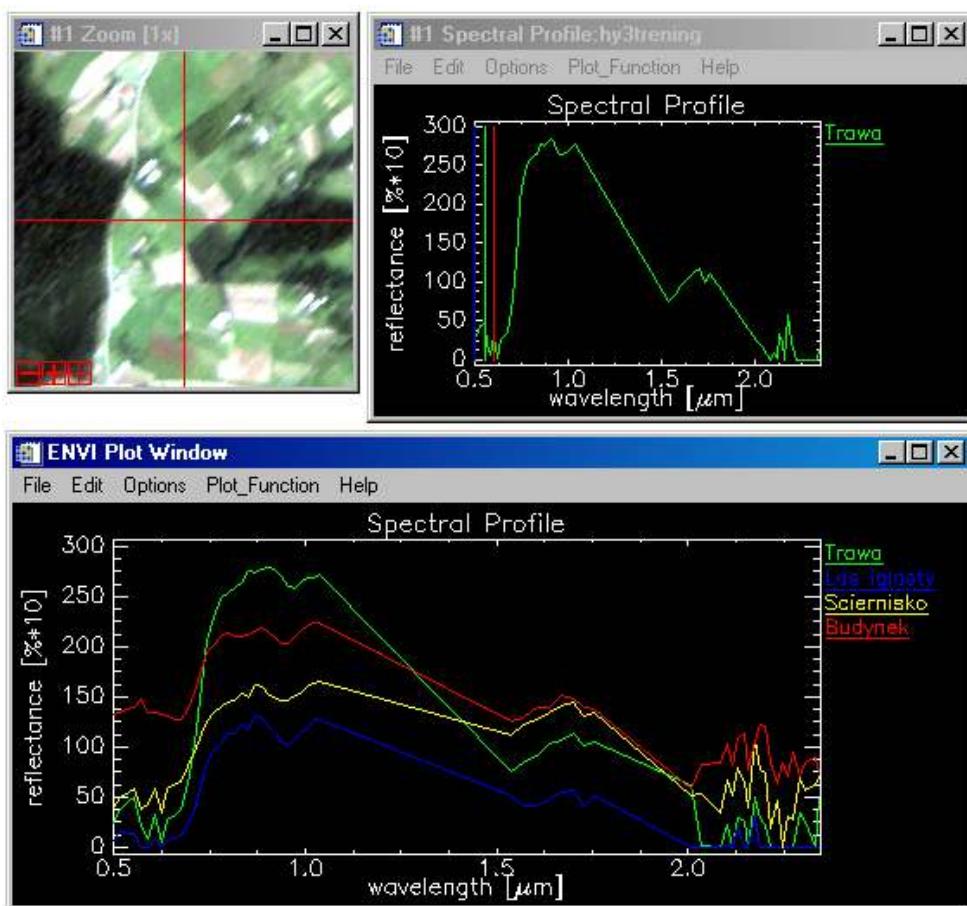
Do wyświetlenia legendy w oknie Spectral Library Plots służy opcja Plot Key z zakładki Options. Zmian nazewnictwa legendy, kolorystyki oraz formatu czcionki i linii wykresów dokonuje się za pomocą okna Data Parameters z zakładki Edit. Poprzez tą zakładkę otwierane jest także okno Plot Parameters służące do formatowania pozostałych elementów wykresu.

W oknie Spectral Library Viewer widoczny jest opis biblioteki: nazwa: usgs\_veg.sli, liczba kanałów: 420, zakres: 0,3951-2,56 μm. Biblioteka ta pochodzi z U.S. Geological Survey i utworzona została z wykorzystaniem laboratoryjnego (nieobrazującego) spektrometru typu

Beckman rejestrującego w widzialnym zakresie widma promieniowania (ok. 0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) z rozdzielcością spektralną 0,5 nm i w bliskiej podczerwieni (0,71-2,5  $\mu\text{m}$ ) – 0,2 nm. Laboratoryjnie utworzone profile spektralne poszczególnych elementów środowiska przedstawiają „czystą” odpowiedź spektralną tych obiektów, ponieważ wyeliminowany jest zakłócający przebieg promieniowania, na drodze skaner->obiekt, wpływ pary wodnej i innych składników zawartych w atmosferze (problem ten występuje w przypadku rejestrowania widma odbitego od powierzchni Ziemi z poziomu lotniczego lub satelitarnego).

## 10.1 Pozyskiwanie charakterystyk spektralnych z obrazów hiperspektralnych

Aby pozyskać krzywą spektralną z obrazu należy kliknąć na nim prawym klawiszem i wybrać z listy Z Profile (Spectrum). Uzyskuje się w ten sposób wykres spektralny dla wskazanego piksela w oknie Spectral Profile. Nawigując wskaźnikiem na obrazie można wyselekcjonować i zapisać pojedyncze krzywe spektralne dla wybranych obiektów przez zakładkę File -> Save Plot As -> Spectral Library z okna Spectral Profile (rycina 101.1). Do skołekcjonowania zestawu profili spektralnych (biblioteki spektralnej) wykorzystuje się okno Plot Window (zakładka Window z głównego panelu ENVI -> Start New Plot Window). Za pomocą tego okna można otwierać wcześniej zapisane profile przez File -> Input Data -> Spectral Library, lub „przeciągać” z okna Spectral Profile poszczególne krzywe trzymając lewym klawiszem myszki za ich nazwę z legendy.



Rycina 101.1. Pozyskanie i utworzenie biblioteki profili spektralnych z obrazu.

Rycina 10.1.1 ilustruje tworzenie biblioteki spektralnej na podstawie obrazu hiperspektralnego ze skanera lotniczego DAIS 7915 rejestrującego m.in. 32 kanały w zakresie 0,4-1,0  $\mu\text{m}$ , 8 kanałów w paśmie 1,5-1,8  $\mu\text{m}$  oraz 32 kanały z przedziału 2,0-2,5  $\mu\text{m}$ . Brak danych dla pozostałego zakresu widma widoczny jest na profilach w postaci prostoliniowych linii łączących kolejne kanały obrazu. Dlatego też zaprezentowana w przykładzie nr 1 „ciągłość” krzywych spektralnych nie byłaby wymagana do późniejszej analizy (klasyfikacji) obrazów DAIS 7915, ponieważ wartości profili z nierejestrowanego przez dany skaner obrazowy są zbędne. Z tego powodu wymagana jest ich transformacja z użyciem opcji Spectral Library Resampling z zakładki Spectral -> Spectral Library, w której po otworzeniu wskazanej krzywej/biblioteki wstępnie określa się dane, względem których ulegnie ona transformacji (resamplingu) wybierając w oknie Spectral Resampling Parameters obraz wejściowy (Input Data File), plik ASCII (Input ASCII File), funkcję zdefiniowaną przez użytkownika (User Defined Filter Function) lub specyfikację określonego sensora (wybieraną z listy po zaznaczeniu Pre Defined Filter Function). Klikając następnie OK wskazujemy dane o docelowej charakterystyce (nie wymagane przy opcji Pre Defined Filter Function), względem której przetworzony zostanie profil/biblioteka.

Porównując wykresy na rycinach 10.1 i 101.1 widać odmienne wartości osi pionowej. Jest to związane ze sposobem zapisu danych. Zakres wartości krzywych spektralnych w przykładzie nr 10.1 mieści się w przedziale 0-1 co przedstawia współczynnik odbicia, czyli procentowy stosunek promieniowania padającego do odbitego przez dany obiekt, gdzie 0 to maksimum pochłaniania, a 1 maksimum odbicia. Profile spektralne z ryciną 101.1 przedstawiają wartości pikseli kanałów obrazu, z którego zostały utworzone.

## 11 Metody wyboru i kompresji danych

Informacja obrazowa może być obarczona błędami wynikającymi m.in. z zakłóceń technologicznych podczas rejestracji danych, lub też niedostatecznej ilości promieniowania docierającego do sensora (stosunek signal to noise). Zła jakość bądź nadmiar (wysoka korelacja pomiędzy kanałami) informacji mogą utrudniać i fałszować proces automatycznej klasyfikacji identyfikacji składowych elementów środowiska, dlatego też ważny jest wstępna selekcja i/lub kompresja danych hiperspektralnych. Podstawowa metoda wyboru danych do dalszej interpretacji to ocena wizualna kanałów z wykorzystaniem histogramu, czyli rozkładu wartości pikseli.

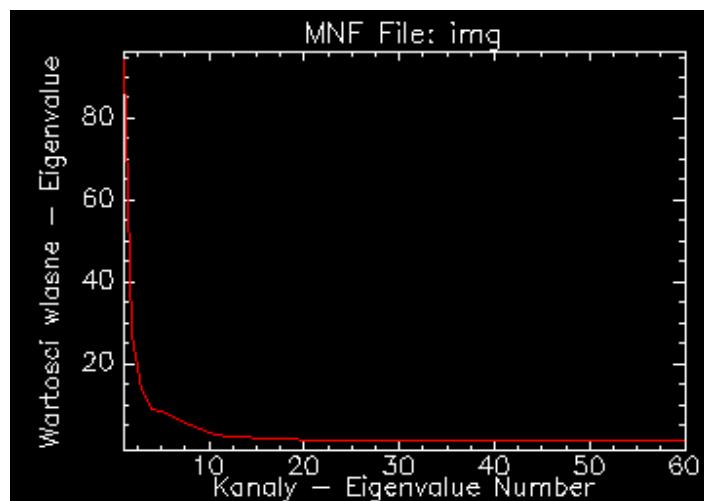
### 11.1 Principal Component Analysis (PCA) – analiza głównych składowych

Metoda PCA umożliwia kompresję najbardziej przydatnej, w późniejszym w procesie klasyfikacji, informacji zawartych w obrazie przez utworzenie zmiennych nazywanych składowymi głównymi (Principal Components). Wyznaczenie w procesie PCA głównych składowych polega na wyznaczeniu nowej osi głównej układu współrzędnych spektralnych wzduł najwięcej wariancji danych przez rzutowanie wartości pikseli obrazu w przestrzeni wielowymiarowej. Następnie wyznaczane są prostopadłe osie do pierwszej także według maksymalnej wariancji (najistotniejszej statystycznie informacji). W ten sposób powstają nowe kanały zawierające wzajemnie nieskorelowane dane.

## **11.2 Minimum Noise Fraction (MNF) – redukcja wymiarów przestrzeni spektralnej**

Transformacja MNF służy do redukcji wymiarów przestrzeni spektralnej (kompresji danych), i składa się z dwóch kaskadowych transformacji PCA. Pierwszy etap polega na dekorelacji szumu (wykorzystując macierz kowariancji), a drugi to standardowa transformacja PCA przeprowadzona na danych po oddzieleniu szumu. W rezultacie powstają nowe kanały, które uszeregowane są od największej do najmniejszej wariancji przez co do dalszych prac mogą być wykorzystane najbardziej przydatne informacje.

Wybór obrazu do przeprowadzenia transformacji MNF odbywa się przez zakładkę **Spectral -> MNF Rotation -> Forward MNF -> Estimate Noise Statistics from Data**. Następnie w oknie **Forward MNF Transform Parameters** wpisuje się w polu **Output Noise Stats Filename** nazwę pliku, w którym zawarte zostaną informacje o zdekorelowanym szumie, a w polu **Output MNF Stats Filename** definiowana jest nazwa pliku z danymi statystycznymi transformacji MNF. Proces transformacji MNF zatwierdza się po wpisaniu nazwy pliku wyjściowego, czego rezultatem jest obraz z uszeregowanymi od największej do najmniejszej wariancji informacji kanałami oraz wykres przedstawiający ich wartości własne (rycina 112.1).



Rycina 112.1. Wykres wartości własnych poszczególnych kanałów

Wartości własne kanałów reprezentują zawartość informacji obliczonej w trakcie całej transformacji MNF na podstawie macierzy kowariancji (niezależności informacji). Liczba kanałów po przekształceniu MNF równa się liczbie kanałów obrazu wejściowego, jednak zgodnie z założeniami do dalszego przetwarzania powinny być wybrane dane (kanały) najistotniejsze statystycznie. Selekcji kanałów dokonuje się na podstawie wykresu, a następnie wycina używając okna Resize Data z zakładki Basic Tools.

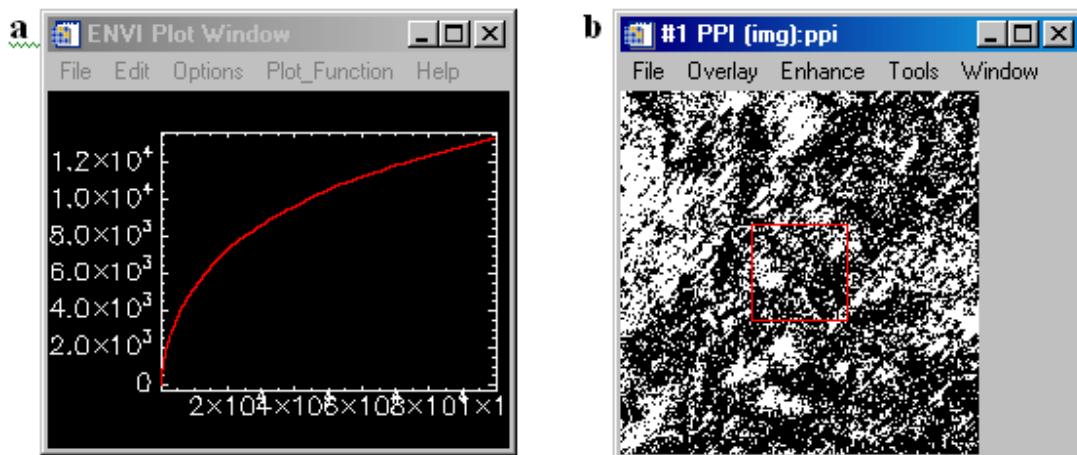
## **11.3 Wybór pikseli czystych spektralnie, tzw. endmembers**

### **11.3.1 Pixel Purity Index (PPI) – wskaźnik czystości piksela**

PPI stosuje się wyszukiwania ze zbioru danych zobrazowania hiperspektralnego pikseli o ekstremalnym położeniu, czyli pikseli spektralnie czystych (endmembers). Index czystości piksela

wyznaczany jest przez iteracyjne odwzorowywanie ich wartości na niezależne n-wymiarowe wektory przestrzeni spektralnej. W wyniku tej procedury powstaje obraz, którego pikselom przypisywana jest wartość stanowiąca krotność, z jaką dany piksel został zarejestrowany jako ekstremalny. Informacje o „czystości” poszczególnych pikseli wykorzystuje się następnie do wyznaczenia endmemberów dla każdej z klasyfikowanej klasy pokrycia terenu.

Przystępując do wyznaczenia PPI dla pikseli danego obrazu, należy otworzyć odpowiadający mu plik przez opcję **New Output Band** z zakładki **Spectral -> Pixel Purity Index**. W pojawiającym się oknie **Pixel Purity Index Parameters** definiujemy parametry operacji, na które składają się: **Number of Iterations** – liczba iteracji (odwzorowywania wartości pikseli na niezależne n-wymiarowe wektory); **Iterations per Block** – liczba iteracji w blokach procesu; **Threshold Factor** – próg znakowania pikseli jako czyste spektralnie względem pikseli o ekstremalnym położeniu (standardowo 2-3). Po rozpoczęciu procesu PPI pojawia się wykres, którego oś Y stanowi krotność zarejestrowanych endmemberów, a oś X liczbę iteracji (ryc. 113.1a). Stopniowe wygładzanie wykresu wskazuje na spadek liczby przypadków wyznaczania pikseli czystych spektralnie (w głównej mierze zależy to od liczby iteracji), co można uznać za poprawne przeprowadzenie operacji. Podstawowym produktem procesu PPI jest obraz, którego pikselom przypisywana jest wartość stanowiąca krotność, z jaką dany piksel został zarejestrowany jako ekstremalny (ryc. 113.1 b).

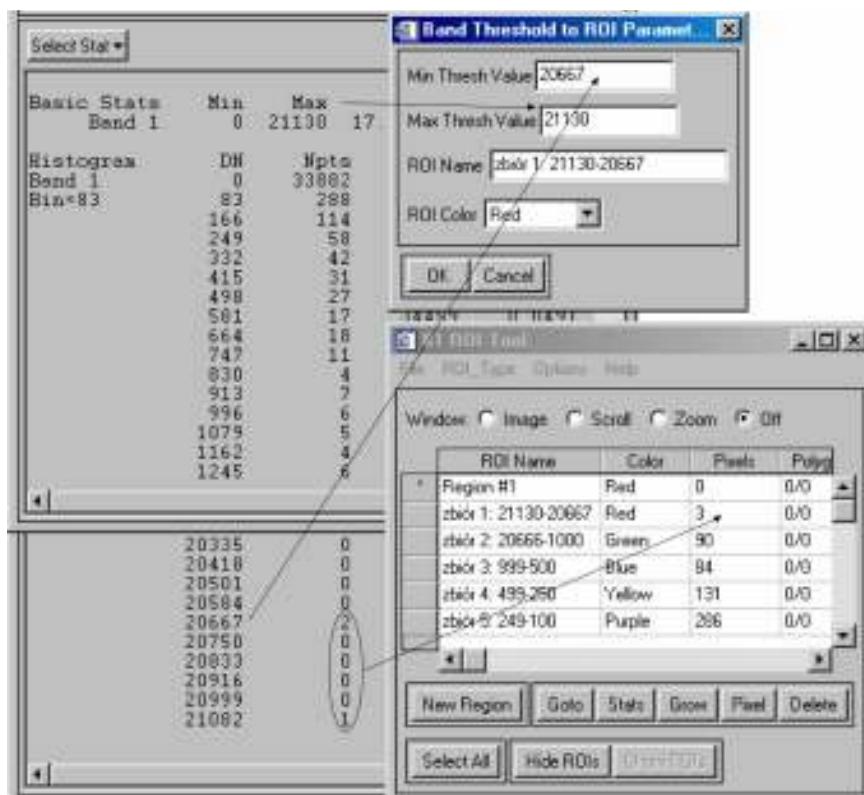


Rycina 113.1 a) Wykres PPI. b) Obraz pikseli wyznaczonych w PPI jako ekstremalne

Wartości pikseli można odczytać używając opcji **Cursor Location/Value** z zakładki **Tools** w oknie obrazu, lub z listy po kliknięciu na obrazie prawym klawiszem. Do określania dokładnego położenia pikseli (współrzędnych) służy opcja **Pixel Locator**, która działa na zasadzie interaktywnego wskaźnika. W celu zapoznania się ze statystycznym rozkładem wartości pikseli używa się **Quick Stats** z listy po kliknięciu prawym klawiszem na obrazie. Okno statystyki obrazu (**Statistics Results**) pomocne jest w określeniu reprezentantów spektralnych dla poszczególnych klas pokrycia terenu.

Do przeprowadzenia pierwszego etapu procesu wyboru endmemberów dla poszczególnych klas potrzebne są okna **Statistics Results** oraz **ROI Tool** otworzone dla obrazu PPI. Dysponując m.in. informacją o maksymalnej wartości pikseli (**Basic Stats – Max**), a także listą wszystkich wartości oraz liczbą pikseli z daną jednostką istnieje możliwość stworzenia ich zbiorów przez wyznaczenie przedziałów dla danego zakresu wartości. W tym celu używane jest polecenie **Band Threshold** to **ROI** z zakładki **Options** w oknie **ROI Tool**. Po wyborze obrazu PPI pojawia się okno, w którym

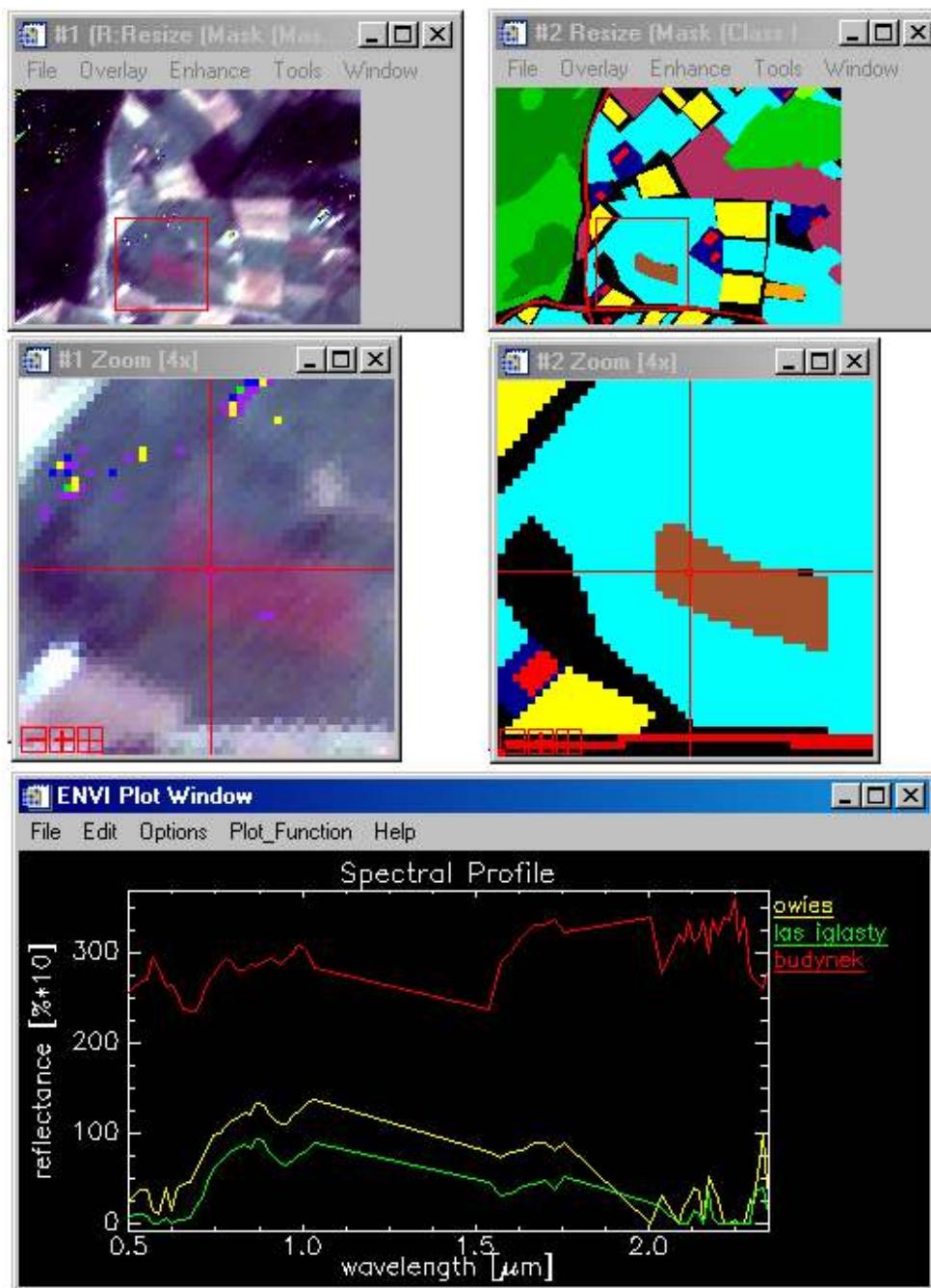
podawane są granice przedziału zbioru wartości pikseli według Statistics Results. Przykład wyznaczania zbiorów pikseli wyznaczonych w procesie PPI jako czyste spektralnie przedstawia rycinę 1131.2. Ilustruje ona zdefiniowany w oknie Band Threshold to ROI Parameters przedział wartości, gdzie jako wartość maksymalną podano 21130, a minimalną 20667, co w rezultacie doprowadziło do utworzenia obiektu ROI z 3 pikselami.



Rycina 1131.2. Fragment okna statystyki obrazu oraz wyznaczenie zbiorów pikseli według przedziałów wartości za pomocą opcji Band Threshold to ROI.

Po wyznaczeniu z całego zbioru pikseli obrazu PPI obiektów ROI łatwo zidentyfikować można piksele najczystsze spektralnie dla poszczególnych klas pokrycia terenu wykorzystując w tym celu, w zależności od złożoności struktury danego obszaru, interpretację wizualną, informacje z wywiadu terenowego lub mapą. W poniższym przykładzie obiekty ROI nałożone zostaną na obraz oryginalny i użyta zostanie mapa pokrycia terenu.

Utworzone w poprzednim ćwiczeniu zbiory o zadanym przedziale krotności, z jaką piksele zakwalifikowane zostały w procesie PPI jako ekstremalne, należy zapisać do pliku (File -> Save ROIs) i otworzyć w oknie ROI Tool dla obrazu oryginalnego za pomocą opcji Restore ROIs. W tym przykładzie wykorzystywana jest również mapa pokrycia terenu, która zlinkowana została z obrazem przez funkcję Geographic Link z zakładki Tools -> Link. Następnie używając wskaźnika (Pixel Locator) pobierane są profile spektralne z pikseli określonych jako endmembery przez zimportowane obiekty ROI i tworzona jest biblioteka spektralna tak jak w przykładzie nr 1.1. Na rycinie 1131.3 pokazano pozyskanie charakterystyki spektralnej dla poligona oznaczonego na mapie pokrycia terenu jako owies.

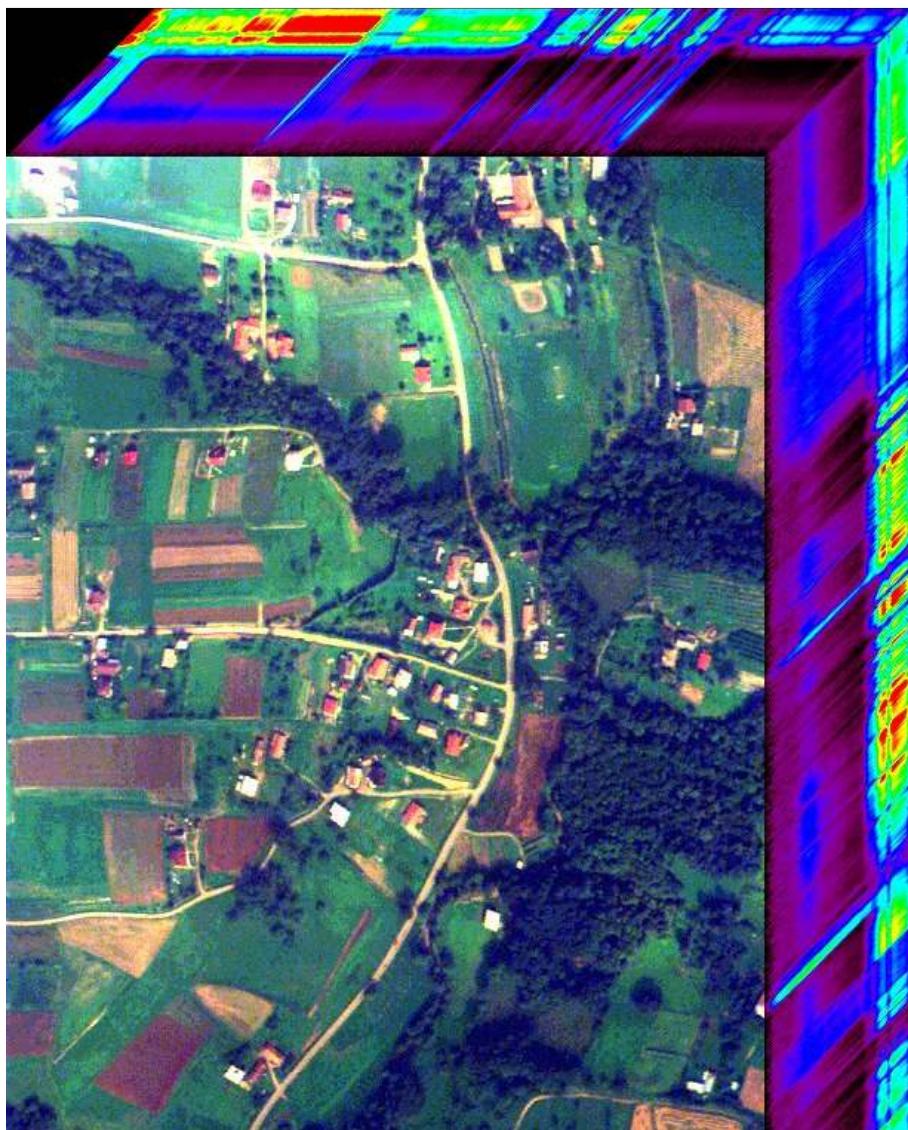


Rycina 1131.3. Utworzenie biblioteki spektralnej na podstawie pikseli wyznaczonych w procesie PPI jako czyste spektralnie.

### 11.3.2 N – wymiarowa wizualizacja (n – dimensional visualization)

Wizualizacja obrazów hiperspektralnych w przestrzeni wielowymiarowej pozwala na ogólną analizę prezentowanych danych w aspekcie zarówno przestrzennym jak i spektralnym. Powszechnie stosowana n-wymiarowa wizualizacja tworzona jest za pomocą tzw. "data cube" pozwala prześledzić zmienność przestrzenną w trzech dowolnie wybranych kanałach spektralnych kompozycji RGB. Jednocześnie, górna oraz prawa krawędź prezentowanego obrazu przedstawiają

zmiennosć spektralną wzdłuż wyznaczonych przez nie linii (rycina 1132.1). Odpowiednio dobrana lokalizacja przestrzenna tych krawędzi pozwala na zauważenie istotnych różnic współczynników odbicia spektralnego między poszczególnymi elementami pokrycia terenu, co może posłużyć jako cenna wskazówka do dalszej interpretacji obrazu. Opisane działania mogą być wykonywane stosunkowo szybko dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii komputerowych w znacznym stopniu przyspieszających przeprowadzanie niezbędnych obliczeń.

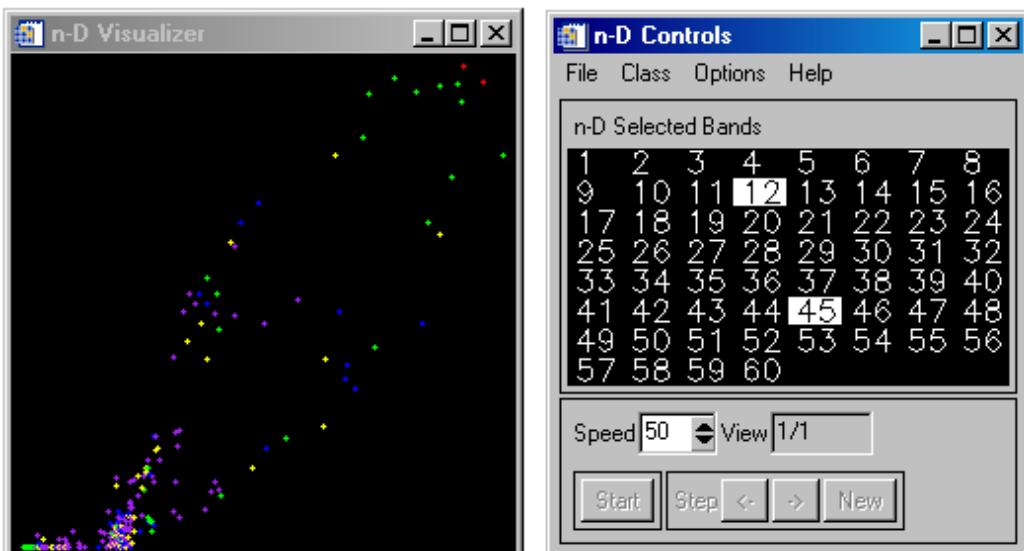


Rycina 1132.1. Data cube fragmentu zobrazowania ROSIS wykonanego dla poligonu Szymbark

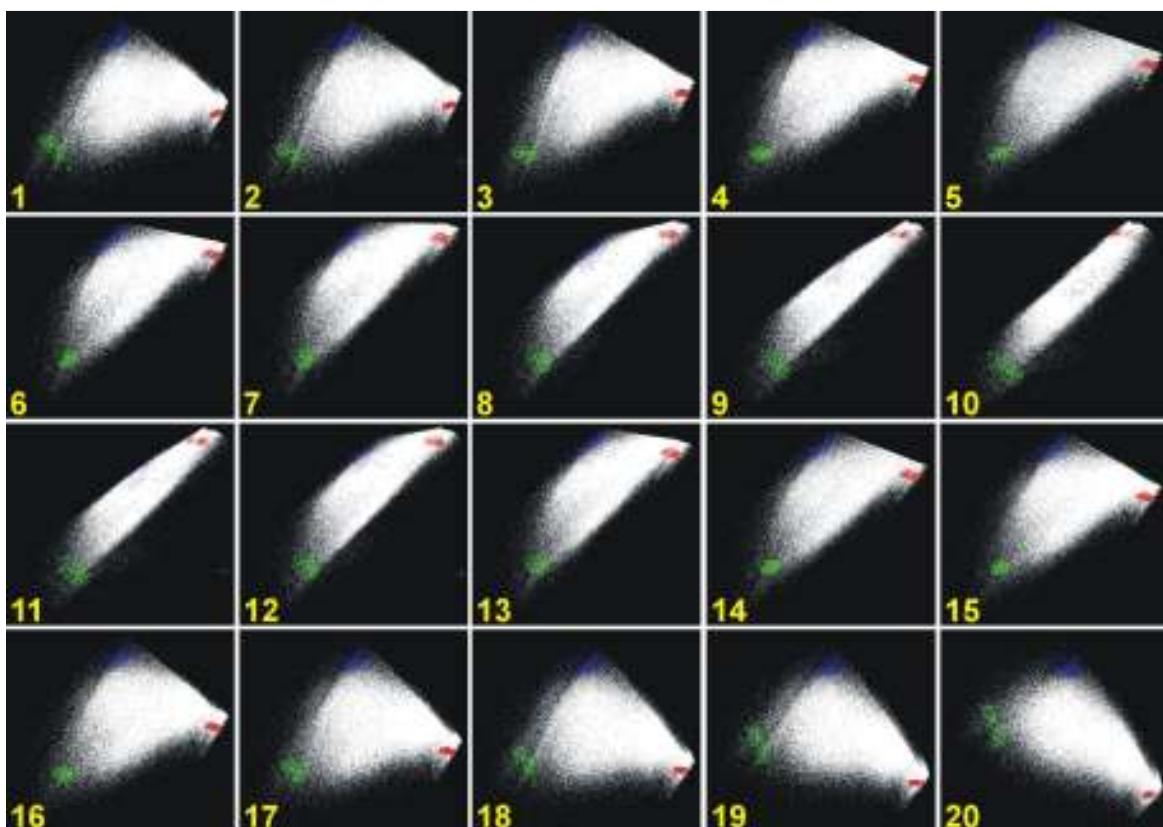
Funkcja ta pozwala na analizę danych w aspekcie przestrzennego rozkładu, np. rozdzielności spektralnej endmemberów lub poligonów testowych utworzonych dla klasyfikowanych elementów środowiska. N-wymiarową wizualizację możemy uzyskać w postaci „data cube” lub n-wymiarowym układzie przestrzennym definiowanym przez wartości pikseli i zakres widma promieniowania.

Innym rodzajem n-wymiarowej wizualizacji jest wielowymiarowa wizualizacja danych przestrzeni spektralnej (rycina 1132.2 i 1132.3). Dzięki specjalnym narzędziom zawartym w pakiecie

oprogramowania ENVI-IDL możliwa była analiza położenia punktów (pixeli) w n-wymiarowej przestrzeni definiowanej przez poszczególne kanały spektralne i ich zakresy wartości. Spektrum elektromagnetyczne jest tu definiowane jako n-wymiarowy wykres rozproszenia, w którym n oznacza liczbę kanałów spektralnych. Analiza położenia punktów w tak zdefiniowanej przestrzeni pozwala na wyznaczenie obszarów o względnie jednorodnej charakterystyce spektralnej. Po przeniesieniu z przestrzeni spektralnej do przestrzeni współrzędnych kartograficznych obszary te zostały wykorzystane do określenia i oceny pól treningowych w procesie klasyfikacji nadzorowanej. Rycina 47 przedstawia przykładową wielowymiarową przestrzeń spektralną widzianą z różnych stron. Dla celów poglądowych zostały tu użyte tylko 3 kanały tworzące przestrzeń 3-wymiarową. Dodatkowo oznaczono różnymi kolorami (czerwony, zielony i niebieski) trzy skrajne położenia w prezentowanej przestrzeni spektralnej. Na kolejnych obrazkach (od 1 do 20) układ współrzędnych tej przestrzeni jest obracany, dzięki czemu jest ona widoczna za każdym razem z innej strony, umożliwiając w ten sposób identyfikację obszarów jednolitych spektralnie. Rycina 8 przedstawia n – wymiarową wizualizację obiektów ROI z poprzedniego przykładu. Narzędzie to otwierane jest przez polecenie Export ROIs to n-D Vizualizer z zakładki File w oknie ROI Tool.



Rycina 1132.2. Okna narzędzia n-D Vizualizer.



Rycina 11.3.2.3. Prezentacja danych w 3-wymiarowej przestrzeni spektralnej. Poszczególne obrazy reprezentują widok stopniowo przekręcanego układu współrzędnych (Sobczak i in., 2005).

## 12 Analizy stanu roślinności

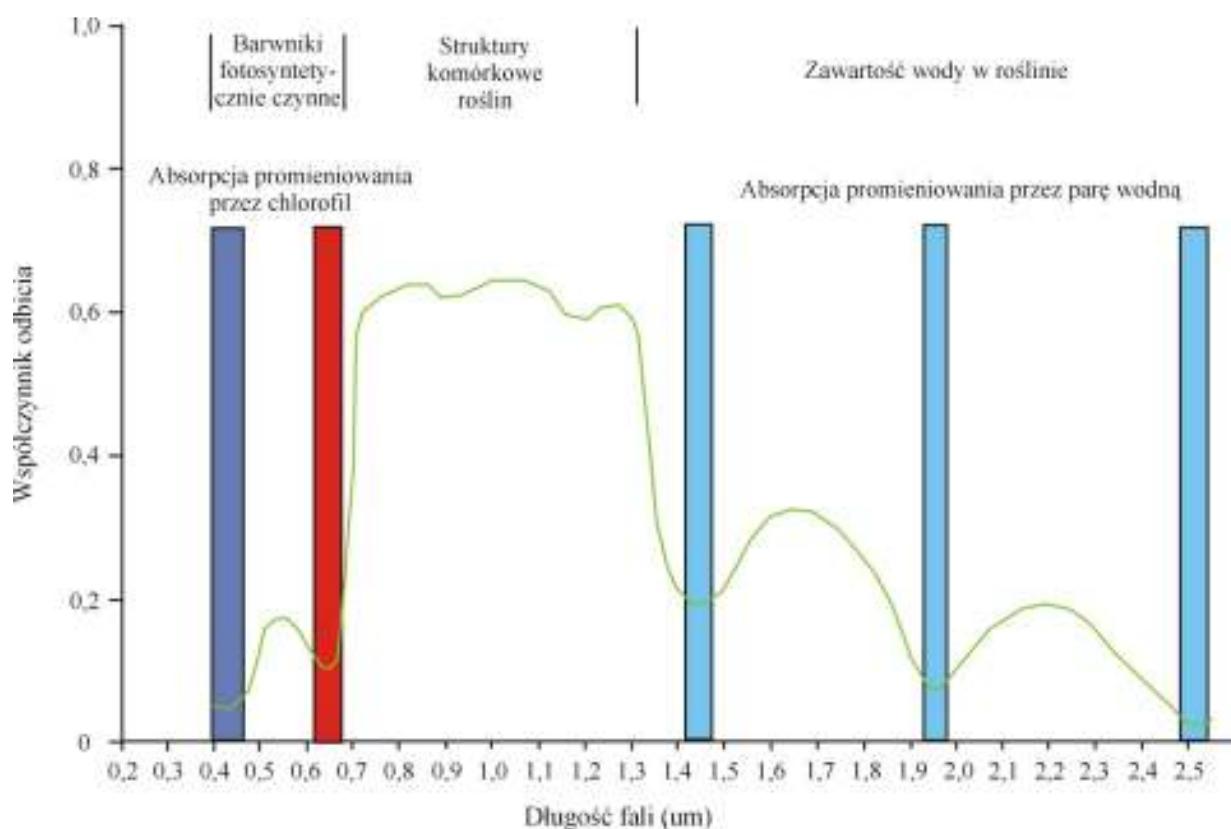
Analizowanie roślin, ich stanu może odbywać się przy pomocy analizy obrazów. Patrząc na krzywą odbicia spektralnego dowolnej rośliny zielonej (ryc. 12.1) wyraźnie daje się zaobserwować różnicę w odbiciu promieniowania pomiędzy zakresem widzialnym i bliską podczerwienią, wynika to z faktu, iż w podczerwieni absorpcja promieniowania jest stosunkowo niewielka, a odbicie determinowane jest budową strukturalną komórek (ryc. 12.2). W przypadku roślin iglastych dominującym rodzajem miękiszu (warstwa pomiędzy górną a dolną warstwą epidermy blaszki liściowej) budującego liść jest miękisz palisadowy, jest on dokładnie upakowany w postaci wydłużonych i regularnie przylegających do siebie struktur, a ilość wolnych przestrzeni jest ograniczona, w tej części liścia stosunkowo dużo występuje woda, która silnie absorbuje promieniowanie podczerwone. W przypadku roślin, u których ułożenie miękiszu jest bardziej luźna, występuje znacząca ilość wolnych przestrzeni wypełnionych powietrzem (miękisz gąbczasty) występuje wtedy większe odbicie, sięgające nawet 80 % w NIR (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001<sup>32</sup>).

Jak już zostało powyżej wspomniane odbicie i transmisja promieniowania elektromagnetycznego w bliskiej podczerwieni jest duże, wynika to z budowy wewnętrznej liścia. Pomiędzy górną, a dolną epidermą (warstwą otaczającą liść) znajduje się miękisz asymilujący (mezofil). W zdecydowanej większości przypadków występują dwie jego postacie: gąbczasty i palisadowy (najczęściej występuje on w postaci jednej, dwóch warstw pod górną epidermą, jest on bogaty w chloroplasty i cechuje się dużym upakowaniem komórek, z niewielkimi przestrzeniami z powietrzem). Miękisz gąbczasty, natomiast luźno wypełnia spodnią przestrzeń liścia, tworząc luźne

przestrzenie, szczególnie w okolicach aparatów szparkowych. W przypadku dużych wolnych przestrzeni wypełnionych powietrzem mówi się o arenchymie. W wielu przypadkach (np. trawy, rośliny wodne, nagozałóżkowe) nie obserwuje się dużego zróżnicowania mezofilu na mięksiz gąbczasty i palisadowy (Zurzycki, Michniewicz, 1985<sup>42</sup>). Z punktu widzenia odbicia promieniowania ważniejsza jest liczba przestrzeni, niż ich objętość, gdyż obniża to możliwość infiltracji przez wodę, wzmacniając odbicie promieniowania (Buschmann, Nagel, 1993<sup>43</sup>).

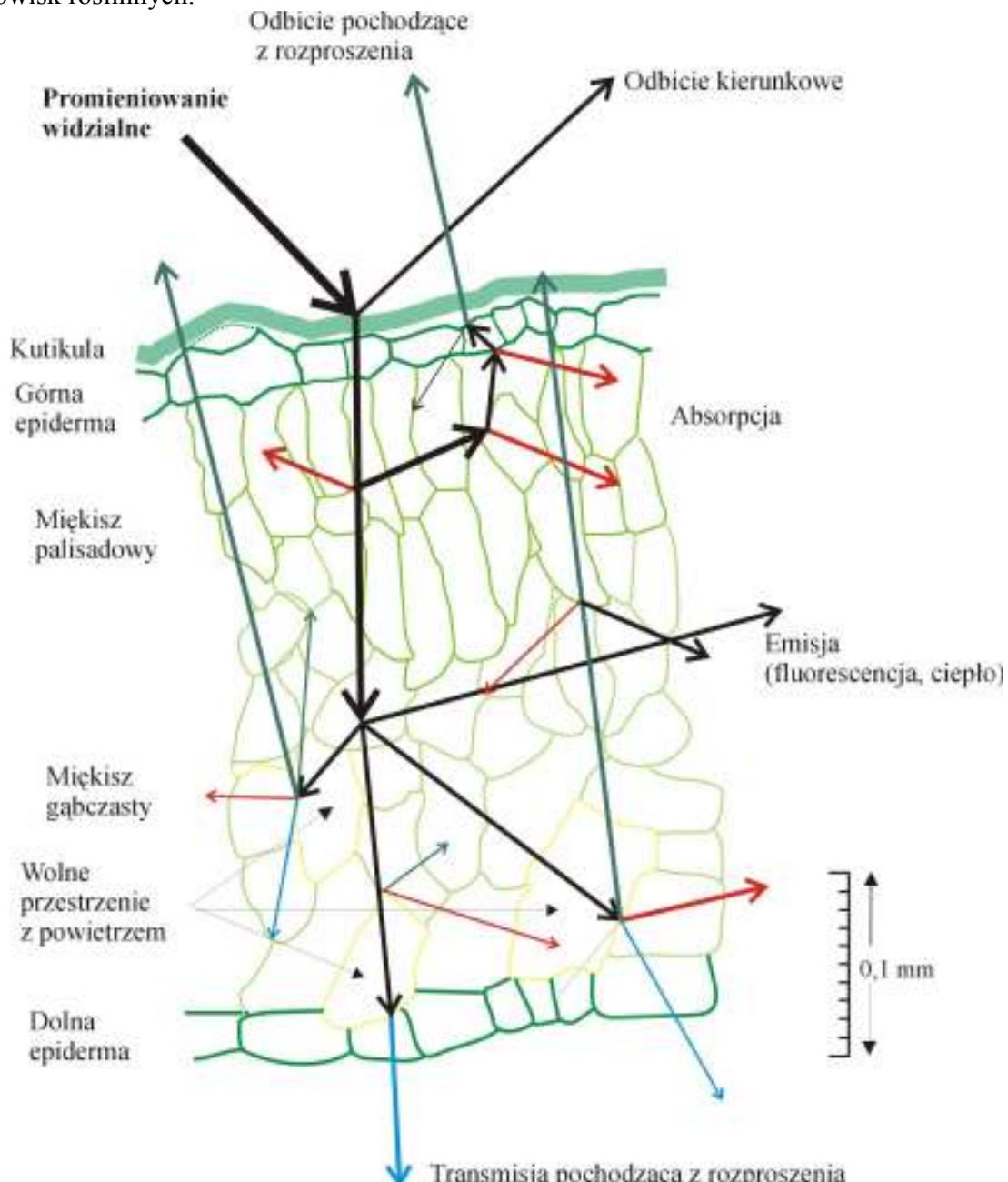
H.W. Gausman (1985<sup>44</sup>) wykazał, że w podczerwieni fala elektromagnetyczna, ze względu na długość, cechuje się stosunkowo niewielką energetyczną, jak na potrzeby reakcji fotochemicznej chloroplastów i liście pomarańczy absorbują tylko 5% energii z zakresu bliskiej podczerwieni, 55% ulega odbiciu, a 40 % przechodzi przez koronę ku powierzchni ziemi. Ponadto znaleźli korelację między absorpcją, odbiciem, transmitancją w siedmiu zakresach spektralnych, a grubością liścia, ilością wody zawartej w liściu i wewnętrznej budowy liścia dla kilkunastu różnych gatunków (Gausman, Allen, Wiegand, Escobar, Rodriguez, 1971<sup>45</sup>)

W średniej podczerwieni odbicie determinowane jest zawartością wody, która silnie absorbuje promieniowanie. Silna absorpcja promieniowania przekłada się także na sąsiednie zakresy, co w przypadku technik hiperspektralnych może być zauważalne. Zwiększoną zawartość wody w tkankach nie tylko obniża odbicie w przedziałach absorpcji wodnej, ale także w innych zakresach, gdyż promieniowanie z tego zakresu oddziaływa z molekułami wody poprzez vibracje I rotacje molekuł (Belward, 1991<sup>46</sup>). Z innych substancji obniżających odbicie należy wymienić ligninę, celulozę, skrobię, białko. Minima, te nie są aż tak duże, jak w przypadku wody, jednakże w przypadku suchych liści można je bez problemu zarejestrować.



Rycina 12.1 Czynniki determinujące kształt i wielkość odbicia spektralnego roślinności

Różnorodność poszczególnych kombinacji substancji biochemicznych oraz przestrzennych sposobów ułożenia liści w baldachimie roślinnym sprawia, że w praktyce rejestruje się mnóstwo sygnałów pochodzących od roślinności. Technika hiperspektralna jak rzadko która część teledetekcji jest predysponowana do prowadzenia badań nad monitoringiem stanu, kondycji i identyfikacji zbiorowisk roślinnych.



Rycina 12.2 Schematyczny przekrój poprzeczny przez liść wraz z lokalizacją odbicia, rozpraszania i absorpcji promieniowania (źródło: Gates, Keegan, Schleter, Weidner, 1965<sup>47</sup>, zmodyfikowane)

## 12.1 Transformacja Tasseled Cap

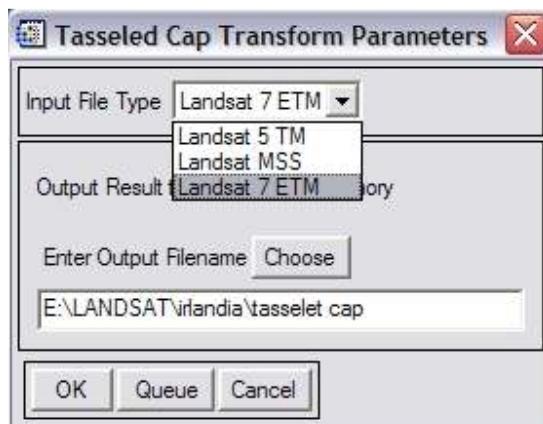
Transformacja Tasseled Cap jest stosowania do wzmacniania spektralnego danych przy obserwacji roślinności (Schrader S., Pouncey R., 1997<sup>41</sup>). Polega na wyciąganiu z obrazu informacji przydatnych do interpretacji. Dzięki empirycznym próbom określono trzy osie struktury danych, które definiują zawartość danych związanych z roślinnością. Za pomocą kombinacji liniowych i obrotów przestrzenni danych tworzone są dla obrazu nowe osie. Powstają kanały interpretacyjne, inne dla każdego sensora, stworzone zostały według opracowań empirycznych. Dla różnych sensorów tworzone są na ogół trzy osie struktury:

- Jasność – suma ważona wszystkich pasm, odbicie od gleby
- Zieloność – prostopadła do jaskrawości, analizuje kontrast między bliską podczerwienią a pasmem widzialnym, wykrywa zieloną roślinność
- Wilgotność – dotyczy pokrywy roślinnej i wilgotności gleby, określa duże natężenie wilgotności

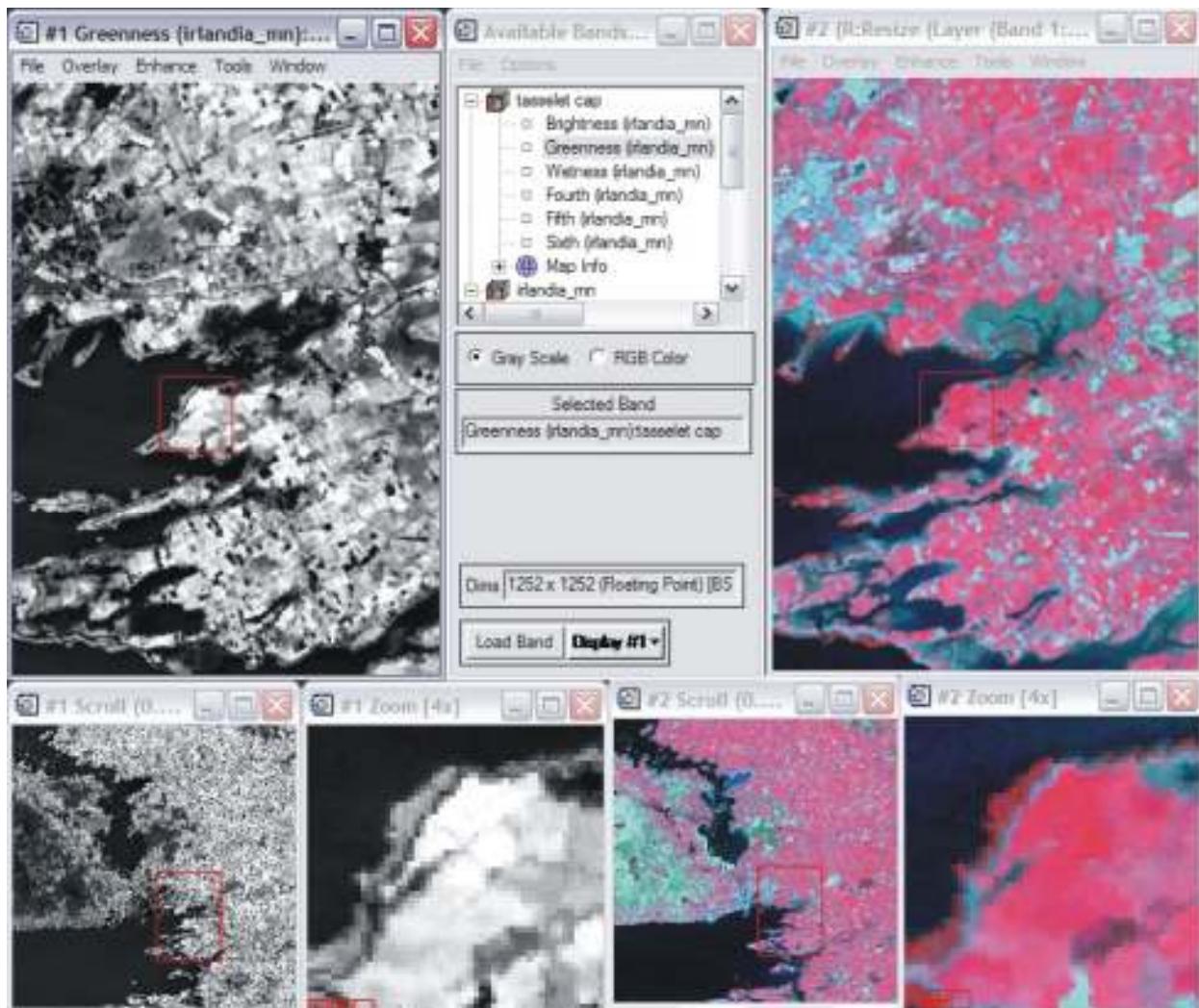
Przykładowe kanały dla skanera MSS to:

- Soil Brightness (jasność obrazu)
- Green Vegetation Index (zieloność)
- Yellow Staff Index (obumarła roślinność)
- Non Such Index (bliżej nieokreślony kanał związany z efektami atmosferycznymi)

W programie ENVI transformacja Tasseled Cap tworzona jest za pomocą opcji **Transform->Tasseled Cap** (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Najpierw wybierany jest obraz wejściowy, a następnie rodzaj sensora (ryc. 121.1). Wynikiem np. dla skanera ETM+ jest 6 kanałów, w tym 4 interpretowalne (ryc. 121.2).



Rycina 121.1 Okno dialogowe przy transformacji Tasseled Cap: wybór sensora i nazwanie pliku



Rycina 121.2 Wynik transformacji Tasseled Cap wraz z obrazem wejściowym. Obrazy pokazują te same fragmenty. Kanał Greeness wskazuje na obecność roślinności zielonej

## 12.2 Wskaźniki roślinności

Charakterystyki wegetacyjne obejmują szereg teledetekcyjnych wskaźników roślinności. Są to miary bazujące na krzywych odbicia spektralnego roślinności służące do badania szaty roślinnej. Łączą dane teledetekcyjne z biofizycznymi charakterystykami powierzchni roślin. Służą do ilościowej i jakościowej oceny stanu roślinności (Zhang i in., 1997<sup>48</sup>; Ustin i in., 2004<sup>49</sup>; Wang i in., 2004<sup>50</sup>). Możliwa jest analiza zewnętrznych cech roślinności, a także charakterystyk wegetacji – zawartość chlorofilu lub innych barwników, struktura wewnętrzna, biomasa, zawartość wody w roślinach oraz wilgoci w glebie czy temperatura powierzchni roślin. Do analiz roślinności najczęściej wykorzystuje się pasmo widzialne promieniowania, bliską i średnią podczerwień, czyli zakres od około 350 do 2600nm i w tym zakresie operują wskaźniki (Jensen, 1983<sup>51</sup>; Hall i in., 1995<sup>52</sup>). W programie ENVI wyróżniono kilka rodzajów wskaźników (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>): Broadband Greeness – wskaźniki najprostsze do pomiaru ogólnej wielkości wegetacji i vigoru roślin, do liczeniabrane są pod uwagę kanały z zakresu VIS i NIR. Do tych wskaźników należy np. NDVI, który służy do badania vigoru roślin i ich stanu rozwojowego, zbierania informacji o

fotosyntezie, szacowania ilości chlorofilu z roślinach, określania pokrycia gleby przez rośliny, prognozowania plonów, oraz wykrywania zmiany w ilości biomasy (Rouse i in., 1973<sup>53</sup>). Im wyższa wartość, tym większe jest odbicie w paśmie podczerwonym i mniejsze w czerwonym, a tym samym rośliny są bardziej zielone. Drugim wskaźnikiem jest Sum Green Index, który wykrywa zmiany w roślinności. Indeks jest wyrażony poprzez średnie odbicie w zakresie od 500 do 600 nm podzielone przez liczbę kanałów.

Narrowband Greenness – wskaźniki wrażliwe na koncentrację chlorofilu, powierzchnię liści, ich zwartość i strukturę (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Szacują łączną ilość i jakości materiału fotosyntetycznego, który pozwala określić stadium wegetacji. Do ich tworzenia wykorzystywany jest zakres między 690 a 740nm. Przykładem jest Red Edge Normalized Difference Vegetation Index, który bierze pod uwagę promieniowanie w okolicach 705 i 750nm oraz wychwytuje zmiany w koncentracji chlorofilu (Gitelson, Merzlyak, 1994<sup>54</sup>).

Light Use Efficiency – wskaźniki przeznaczone do mierzenia ilości światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Pozwala to na oszacowanie przyszłych plonów. Obliczane są za pomocą stosunku odbicia w zakresie VIS w zależności od pigmentu, jaki pochłania światło. Przykładem takiego wskaźnika jest Photochemical Reflectance Index wskazujący na zmiany karetonoidów w żywym listowiu (Gamon i in., 1992<sup>55</sup>). Wykorzystuje się go w badaniach zdrowotności roślin na obszarach wiecznie zielonych zaroślach i lasów oraz terenów użytkowanych rolniczo.

Canopy Nitrogen – wskaźnik mierzący zawartość nitrogenu – istotny składnik chlorofilu, ma wysoką koncentrację, gdy roślinę cechuje szybki wzrost (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Do takich pomiarów służy Normalized Difference Nitrogen Index (Fourty i in., 1996<sup>56</sup>).

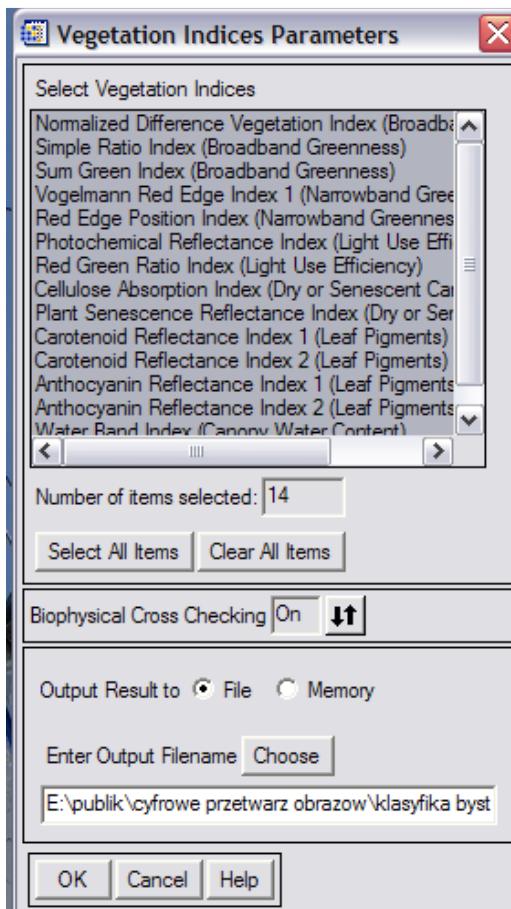
Dry or Senescent Carbon – wskaźniki do szacowania ilości węgla w suchej masie ligniny i celulozy, z których zbudowane są suche części roślin (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Analizują obecność materii łatwopalnej, czyli zagrożenie pożarowe. Przykładem jest Cellulose Absorption Index – określa wielkość powierzchni zawierającej suchy materiał, wykorzystuje promieniowanie w okolicach 2000 i 2200nm (Daughtry, 2001<sup>57</sup>). Wskaźnik używany jest do monitorowania pozostałości po uprawach, podatność na ogień ekosystemów.

Leaf Pigments – przeznaczone do pomiaru zawartości pigmentów, związanych ze stremem roślin, między innymi karotenoidów (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). W analizie nie jest uwzględniany chlorofil. Przykładem jest Carotenoid Reflectance Index, który mierzy zawartość karotenoidów (Gitelson i in., 2002<sup>58</sup>). Bada relatywną różnicę w absorpcji, co wskazuje na zmiany w koncentracji karotenoidów.

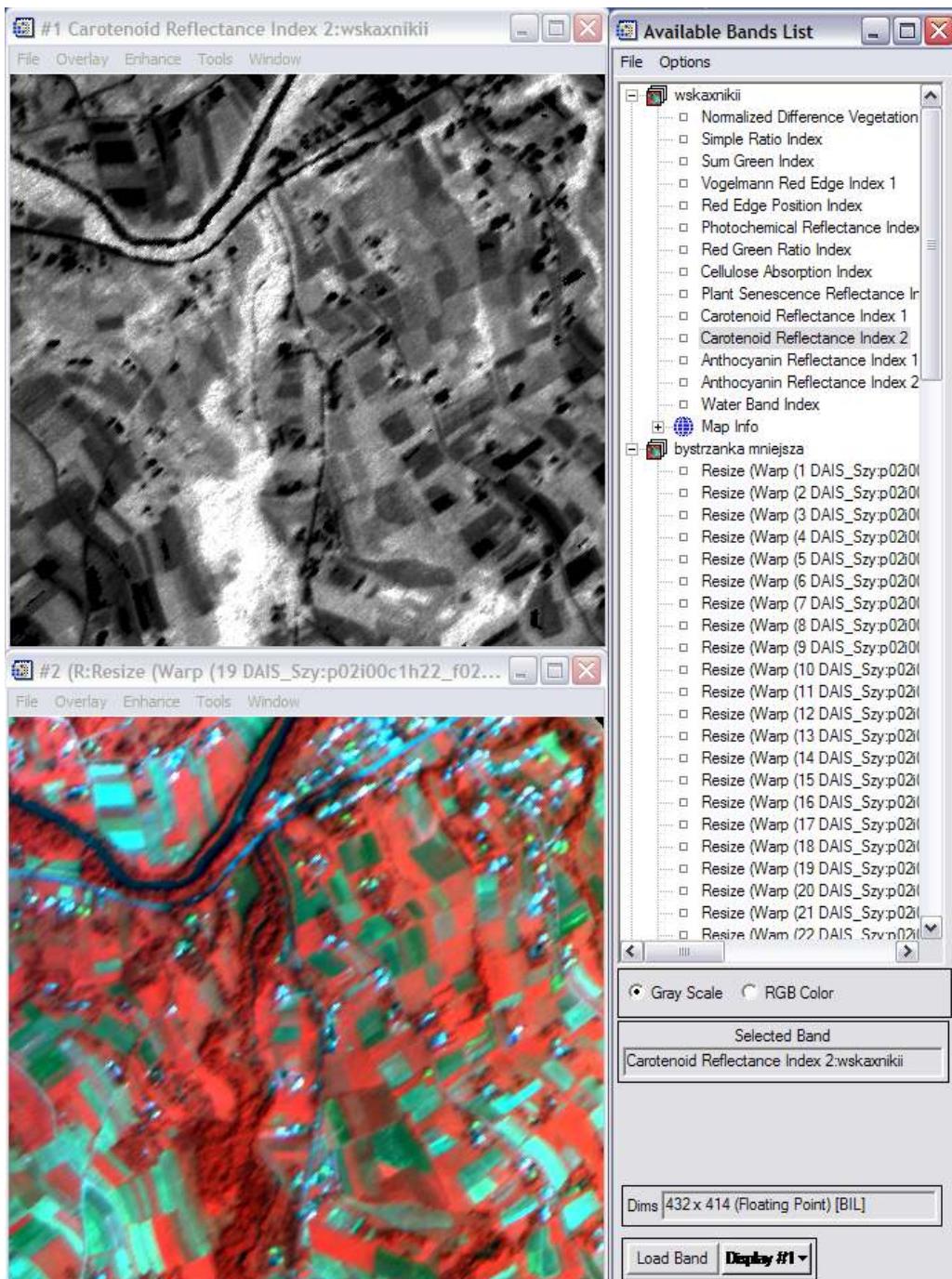
Water Canopy Content – wskaźniki określające zawartość wody w pokrywie roślinności, co ma związek z wegetacją i odpornością na ogień (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Przykładem jest Water Band Index, mierzący zmiany zawartości wody w roślinie (Peñuelas i in., 1995<sup>59</sup>). Bierze pod uwagę promieniowanie w zakresie 900 i 970nm.

Najbardziej rozpowszechniony wskaźnik NDVI można obliczyć za pomocą opcji **Transform->NDVI**.

Inne wskaźniki oblicza się za pomocą aplikacji kalkulatora wskaźników, który znajduje się w menu **Spectral->Vegetation Analysis->Vegetation Index Calculator** (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Najpierw konieczne jest wczytanie pliku wejściowego. Ograniczeniem jest konieczność posiadania pliku ze zdefiniowanymi długościami fali w każdym z kanałów, ponieważ na tej podstawie program wybiera wskaźniki, jakie może obliczyć. Następnie w oknie dialogowym wybierane są wskaźniki i nazywany plik wyjściowy (ryc. 122.1). Wynikiem jest wielokanałowy obraz ze wskaźnikami roślinności (ryc. 122.2).



Rycina 122.1 Wybór wskaźników roślinności, jakie zostaną obliczone w analizach wegetacyjnych oraz nazwanie pliku



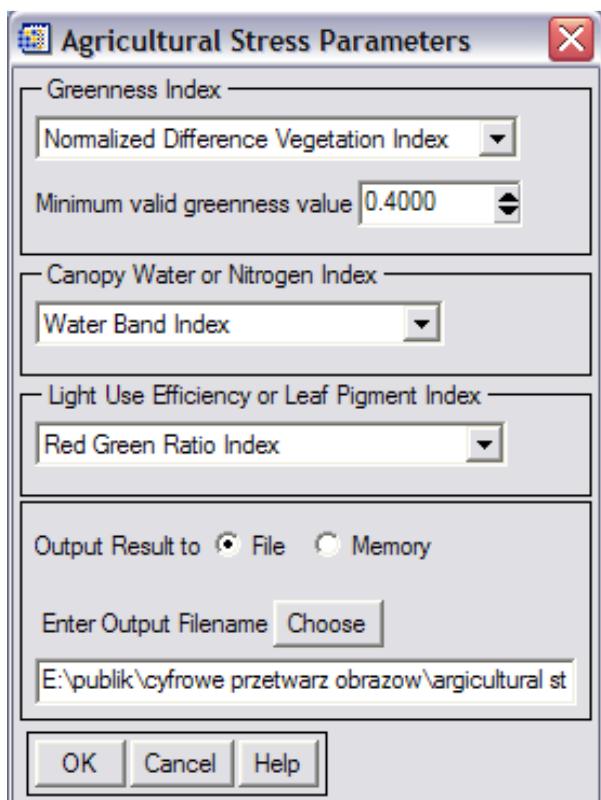
Rycina 122.2 Obraz wynikowy obliczonego wskaźnika - Carotenoid Reflectance Index 2 (na górze), wraz z obrazem wejściowym (na dole)

### 12.3 Złożone analizy vegetacyjne

Złożone analizy vegetacyjne wykorzystują obliczone wcześniej teledetekcyjne wskaźniki roślinności. Wyróżniane są trzy rodzaje analiz badające następujące zagadnienia: stres roślin uprawnych, zagrożenie pożarowe oraz stan kondycyjny lasów (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). W każdym przypadku wykorzystywane są trzy grupy wskaźników, a z każdej grupy wybierany jest jeden do dalszych obliczeń. Następnie dla każdego piksela kalkulowana jest jedna wartość na

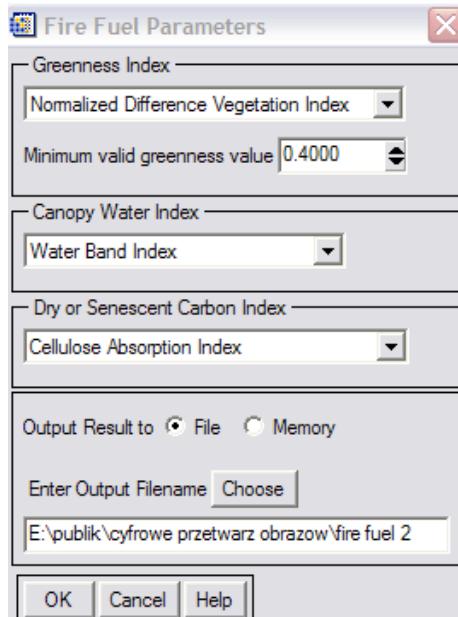
podstawie trzech wybranych wskaźników. Uzyskany obraz jest klasyfikowany na 9 klas, do których przypisywane są odpowiednie kolory: od fioletowego przez niebieski, które oznaczają dobre warunki, zielony (warunki neutralne) do żółtego i czerwonego (złe warunki, wysoki poziom stresu). Najlepsze efekty występują, gdy wymaskowane zostaną obszary, które nie są badane. W programie ENVI analizy można uzyskać za pomocą zakładki: **Spectral->Vegetation Analysis**, gdzie następnie należy wybrać odpowiednią opcję.

Stopień **stresu roślin uprawnych** (Agricultural Stress) obliczany jest za pomocą trzech wskaźników (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Pierwszą grupą, z której wybiera się wskaźnik, jest ogólny wskaźnik zieloności (np. NDVI, Simple Ratio Index), który określa, czy na danym terenie występuje roślinność, oraz to, w jakim jest ona stanie. W tej grupie konieczny jest także wybór progu, który określa, od jakich wartości piksel określany jest jako roślinność. Kolejną grupą jest wskaźnik zawartości wody lub azotu (np. Water Band Index, Nitrogen Index). Określa, czy rośliny mają wystarczająco dużo wody lub odpowiednią zawartość pierwiastka. Ostatni wskaźnik analizuje wykorzystanie światła lub zawartość barwnika (chlorofilu) w roślinie (np. Photochemical Reflectance Index, Red Green Ratio Index, Carotenoid Ratio Index). Aby wykonać mapę należy w menu **Vegetation Analysis** wybrać **Agricultural Stress** (ryc. 123.1). Uzyskany obraz pokazuje poziom stresu roślin uprawnych. Kolory fioletowy i niebieski oznaczają brak stresu i dobre warunki, zielony – neutralne warunki, natomiast żółty i czerwony oznaczają stres średni lub wysoki (ryc. 123.4).



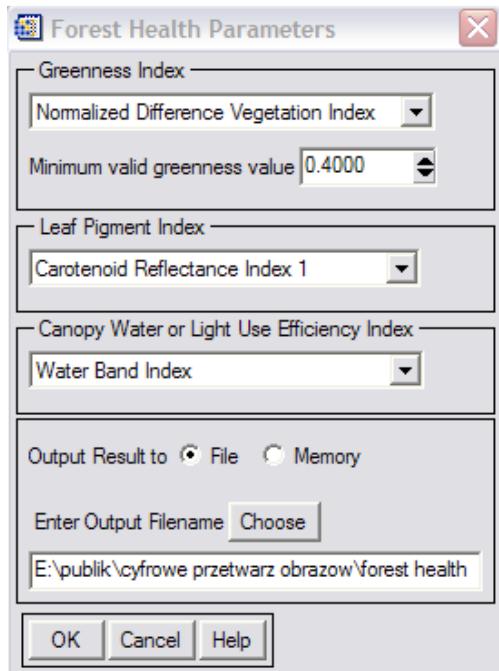
Rycina 123.1 Okno dialogowe przy określaniu parametrów stresu u roślin rolniczych (wybór trzech wskaźników, w tym określenie progu, od którego należy traktować powierzchnię jako roślinność, oraz nadanie nazwy obrazowi)

**Zawartość łatwopalnej materii** oznaczana jest za pomocą opcji Fire Fuel (ryc. 123.2). Pierwsza grupa to także wskaźnik zieleni, który wykrywa obszary pokryte przez roślinność (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Tu także konieczne jest określenie progu zieloności. Drugi wskaźnik (Water Band Index) określa zawartość wody w roślinach, czyli pokazuje, czy są one wysuszone. Trzecia grupa wskaźników oznacza, jaką jest zawartość suchych części rośliny. Są to Cellulose Absorption Index lub Plant Sensescence Reflectance Index. Uzyskana mapa jest w takich samych kolorach co poprzednia (ryc. 123.4). Kolory fioletowy i niebieski określają bardzo niskie i niskie prawdopodobieństwo wystąpienia pożarów, zielony warunki neutralne, a żółty i czerwony średnie oraz duże zagrożenie pożarowe.

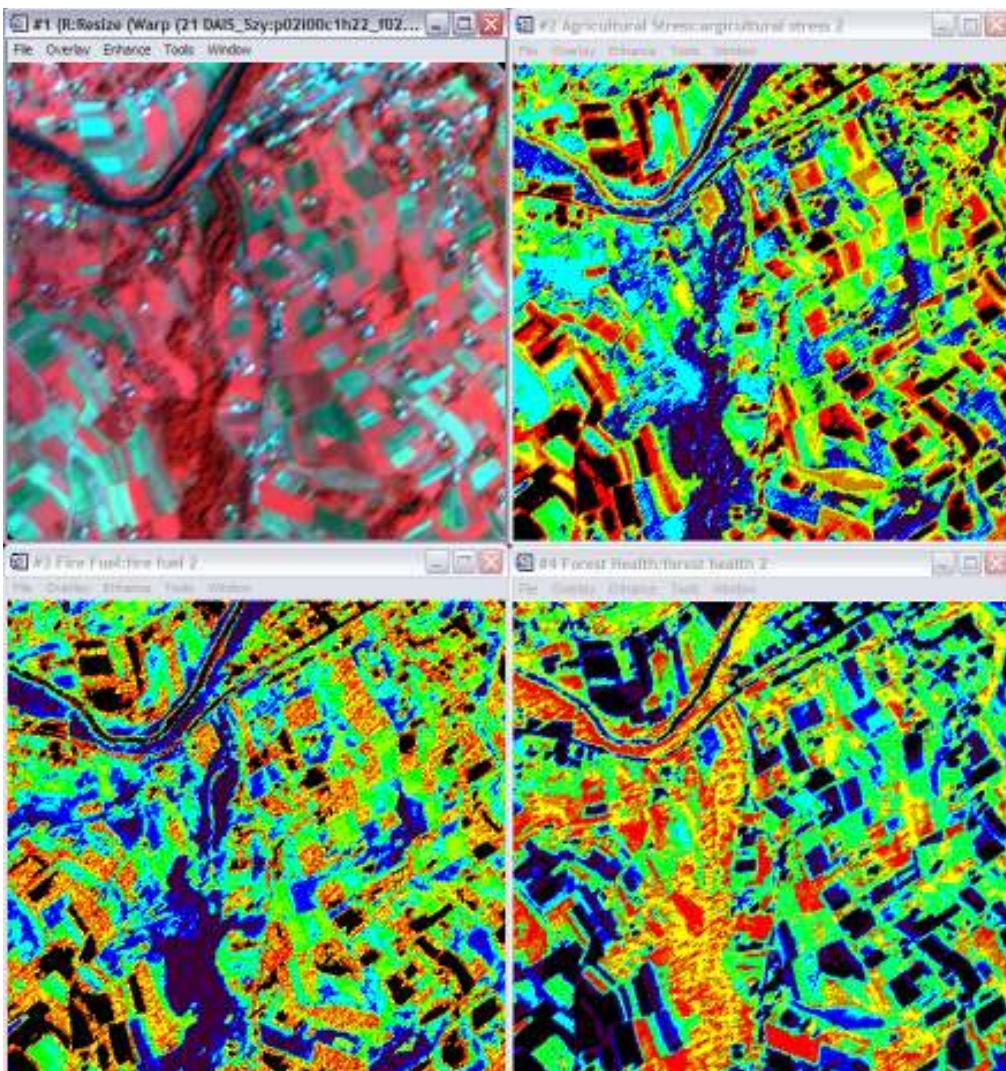


**Rycina 123.2 Okno dialogowe przy określaniu parametrów zawartości materii łatwopalnej (wybór trzech wskaźników, w tym określenie progu, od którego należy traktować powierzchnię jako roślinność, oraz nadanie nazwy obrazowi)**

Ostatnim badanym zagadnieniem są **warunki zdrowotne lasów** – opcja Forest Health (ryc. 123.3). Jak w powyższych analizach pierwszą grupą jest zieloność określana wraz z progiem, który ma być brany pod uwagę (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Druga grupa określa zawartość pigmentu – np. karotenoidów (przykładowe wskaźniki to Carotenoid Reflectance Index, Anthocyanin Reflectance Index). Trzecia grupa bierze pod uwagę zawartość wody lub efektywność użytkowania światła. Wynikiem jest obraz 9-klasowy (ryc. 123.4), który jest interpretowany w taki sam sposób, jak poprzednie: najlepsze warunki zaznaczone są na kolor fioletowy i niebieski, najgorsze natomiast na czerwono.



**Rycina 123.3 Okno dialogowe przy określaniu parametrów zdrowotności lasów (wybór trzech wskaźników, w tym określenie progu, od którego należy traktować powierzchnię jako roślinność, oraz nadanie nazwy obrazowi)**



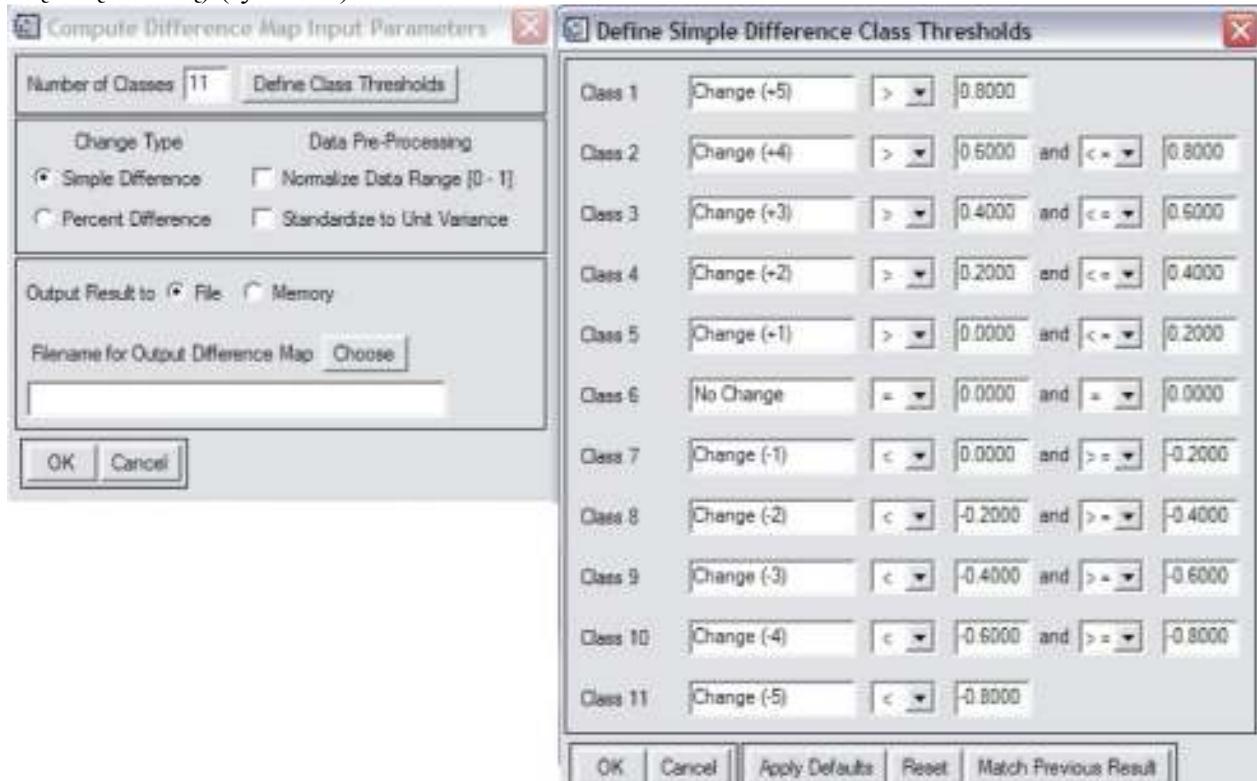
Rycina 123.4 Obraz wejściowy i wynikowe analiz wegetacyjnych: Agricultural Stress (po prawej na górze), Fire Fuel (po lewej na dole) i Forest Health (po prawej na dole). Barwy chłonne (fioletowe do niebieskiego) oznaczają dobre warunki, zielone – warunki neutralne, a barwy ciepłe (żółte do czerwonego) – warunki złe, występowanie stresu

## 13 Detekcja zmian

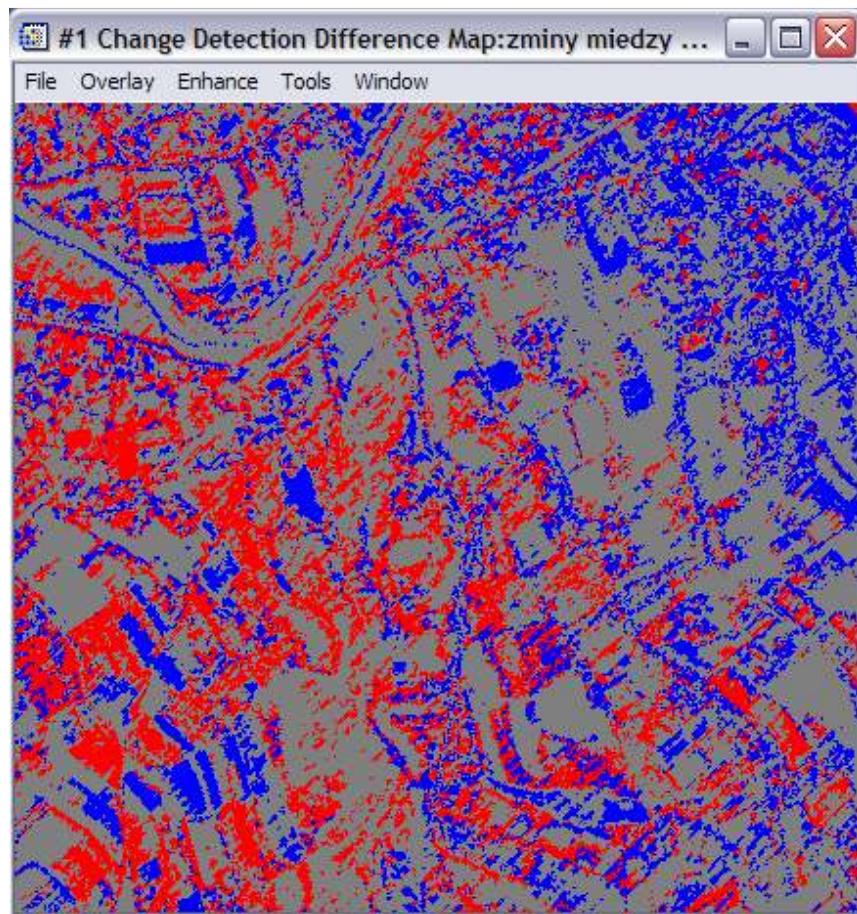
Analiza zmian pozwala na wyróżnienie różnic pomiędzy dwoma obrazami. Wykrywa, opisuje i mierzy zmiany ilościowe oraz jakościowe, jakie zaszły w analizowanym czasie lub pomiędzy dwoma zjawiskami na tym samym terenie (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Niekoniecznie taki sam teren musi być na obu zdjęciach, ale konieczne jest przynajmniej częściowe pokrycie. Obrazy muszą być zgeometryzowane, powinny mieć tę samą rozdzielcość przestrzenną i spektralną. Można porównywać pojedyncze kanały, całe obrazy lub wyniki klasyfikacji.

Przy porównywaniu surowych obrazów (jednego lub wielu kanałów) możliwe są dwa sposoby porównania: odejmowanie lub dzielenie. W przypadku odejmowania wartości pikseli na obrazie: wartości pikseli na jednym obrazie odejmowane są od wartości na drugim. W ten sposób powstaje obraz o wartościach zgromadzonych wokół 0 (które oznacza brak zmian). W przypadku dzielenia, miejsca bez zmian mają wartości zbliżone i równe 1.

W obu przypadkach należy wybrać z menu programu **Basic Tools** opcję **Change Detection->Compute Difference Map**. Za pomocą tego narzędzia tworzona jest mapa różnic między obrazami. W oknie dialogowym należy wczytać pierwszy obraz (z początkowego okresu), a w kolejnym drugi obraz. Następnie należy zdefiniować liczbę klas i nazwać plik (ryc. 13.1). W tym momencie możliwa jest także modyfikacja legendy, czyli zmiana progów poszczególnych klas. Wynikiem jest mapa z klasami zdefiniowanymi za pomocą wspomnianych progów. Zmiany dodatnie oznaczone są za pomocą pikseli w odcieniu czerwieni (im większa zmiana, tym bardziej intensywny kolor), zmiany ujemne są wyznaczone kolorem niebieskim (intensywniejszy oznacza większą zmianę) (ryc. 13.2).

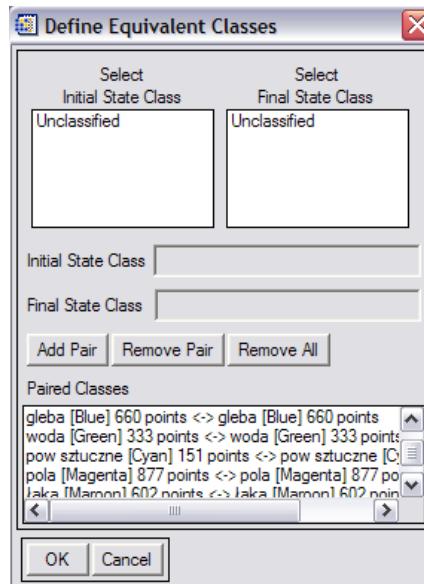


Rycina 13.1 Okno dialogowe do tworzenia mapy zmian: definiowanie progów dla poszczególnych klas



**Rycina 13.2 Mapa zmian. Zmiany dodatnie zaznaczone są na kolor czerwony, zmiany ujemne za pomocą odcieni niebieskiego**

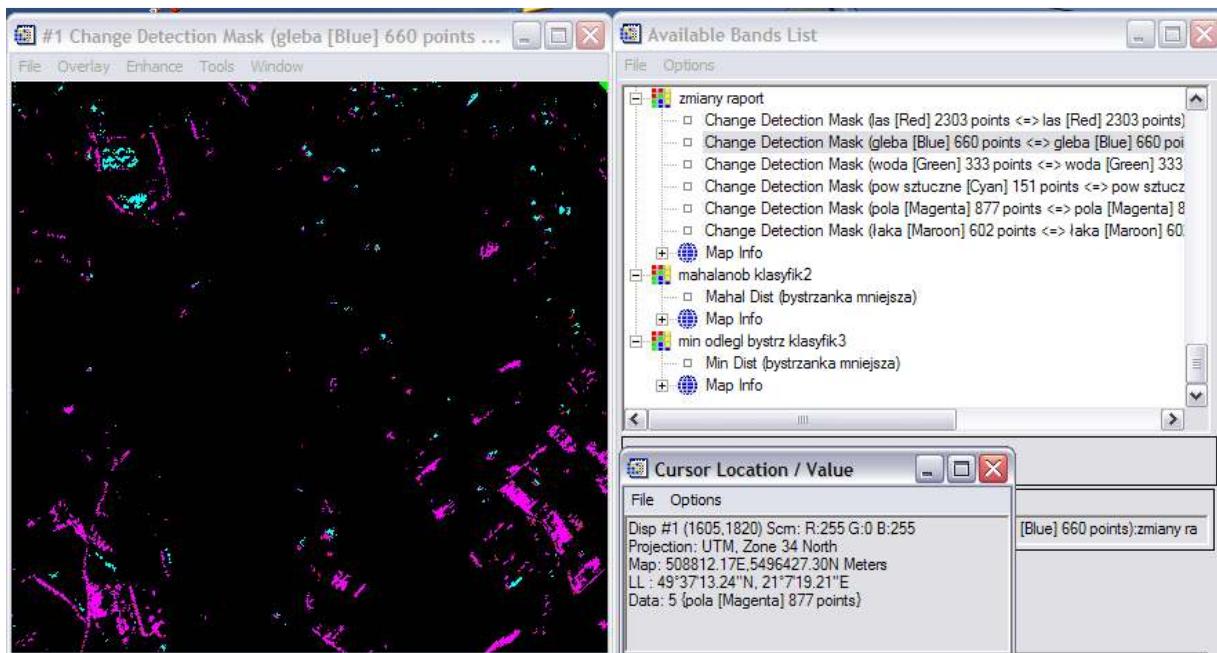
Możliwe jest także utworzenie pliku ze statystykami zmian za pomocą zakładki Basic Tools->Change Detection->Change Detection Statistics (*ENVI User's Guide*, 2001<sup>38</sup>). Możliwe jest to dla obrazów sklasyfikowanych. Tak samo, jak przy tworzeniu mapy, najpierw należy wczytać obraz pierwszy (z okresu początkowego), a następnie drugi (z okresu końcowego). W oknie dialogowym należy utworzyć pary, łącząc na pierwszym i drugim obrazie klasy, które reprezentują te same wartości (ryc. 13.3). Ostatnim etapem jest wybranie typu raportu (w liczbie pikseli, w procentach lub w jednostkach powierzchni) oraz zapisanie pliku. Wynikiem jest plik z tabelą, która pokazuje, jak początkowe klasy przechodzą w inne (ryc. 13.4) oraz obrazy, na jakie zmieniły się klasy początkowe (ryc. 13.5).



Rycina 13.3 Okno dialogowe tworzenia pliku ze statystykami do analizy zmian (Change Detection Statistic), połaczenie w pary klas z dwóch terminów

Change Detection Statistics (Initial State: mahalanob klasyfik2, Final State: min odlegl bystrz klasyfik3)								
	File	Options	Help					
	Pixel Count	Percentage	Area (Square Meters)	Reference				
Initial State								
Final State	Ils [Red] 2303 points	gleba [Blue] 660 points	woda [Green] 333 points	pow sztuczne [Cyan] 151 points	jola [Magenta] 877 points	jeziora [Maroon] 602 points	Row Total	Class Total
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	68.658	0.607	20.363	7.144	10.418	12.591	100.000	100.000
	gleba [Blue] 660 points	0.150	58.590	0.000	15.527	11.015	2.464	100.000
	woda [Green] 333 points	0.669	0.299	76.255	0.352	0.001	0.164	100.000
	pow sztuczne [Cyan] 151 points	0.026	0.436	0.000	21.079	4.141	0.358	100.000
	pola [Magenta] 877 points	6.116	32.003	2.455	38.088	51.300	14.419	100.000
	jeziora [Maroon] 602 points	24.180	2.066	0.336	17.811	23.124	89.007	100.000
	Class Total	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
	Class Changes	31.142	41.410	23.745	78.921	48.700	36.993	
	Image Difference	20.783	55.829	-10.983	-28.886	-28.480	25.019	

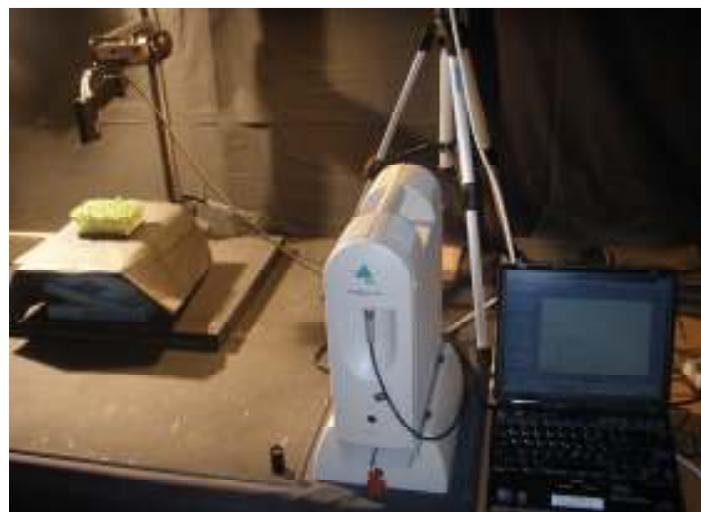
Rycina 13.4 Tabela wynikowa analizy zmian, która pokazuje procentowo, jakie początkowo klasy przechodzą w inne



Rycina 13.5 Obraz z zaznaczonym obszarem, który zmienił wartości od początkowego analizowanego okresu do końcowego

## 14 Korekcja pomiarów spektrometrycznych za pomocą AS Tools

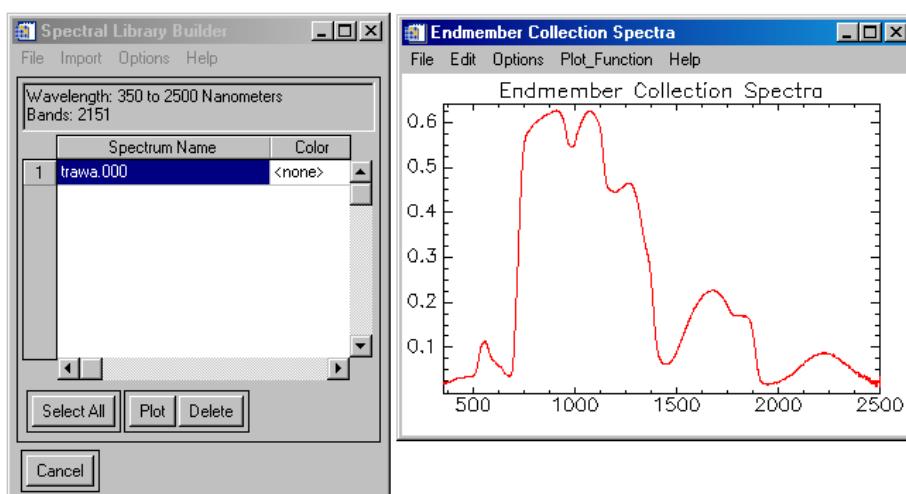
AS Tools to nakładka do ENVI stworzona w Centrum Danych Teledetekcyjnych Niemieckiej Agencji Kosmicznej (DFD DLR). Program ten zawiera zestaw rutynowych operacji wstępnego przetwarzania (korekcji), którym powinny być poddane naziemne punktowe pomiary spektrometryczne (krzywe spektralne) przed wykorzystaniem do dalszych analiz. Opcjonalne ustawienia AS Tools zdefiniowane są pod kątem specyfiki spektrometrów hiperspektralnych firmy Analytical Spectral Devices (ASD). Zaprezentowane w skrypcie pomiary spektrometryczne pozyskane zostały w warunkach laboratoryjnych (ryc. 14.1) za pomocą urządzenia ASD FieldSpec Pro rejestrującego 2151 kanałów. Spektrometr ten wyposażony jest w trzy oddzielne detektory rejestrujące promieniowanie widzialne w zakresie 350-1000 nm (VIS), bliską podczerwień w przedziale promieniowania od 1001 do 1830 nm (NIR), oraz średnią podczerwień w paśmie 1831-2500 nm (SWIR).



Rycina 14.1. Laboratoryjny pomiar spektrometryczny roślinności zielonej za pomocą ASD FieldSPec Pro

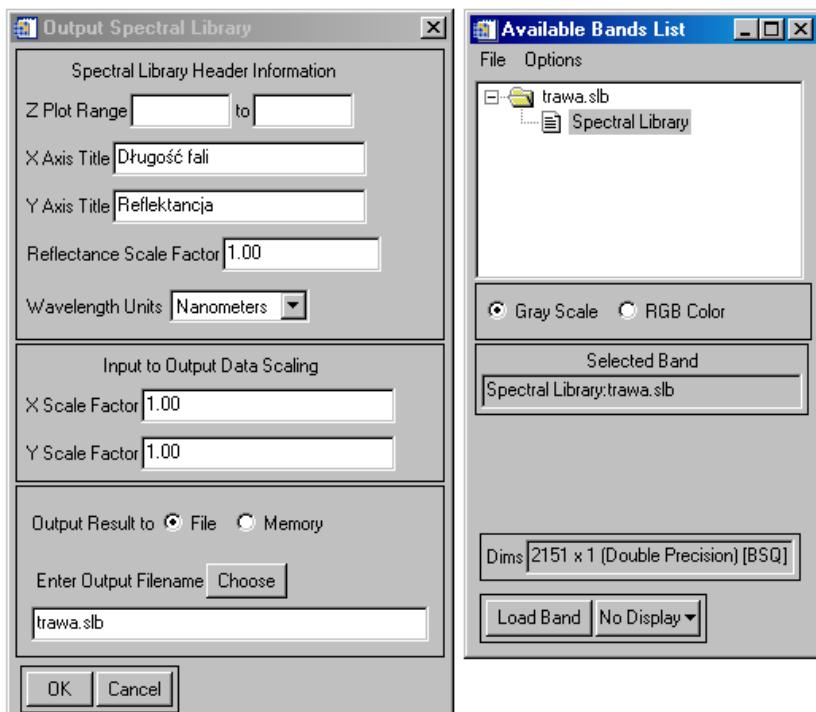
#### 14.1 Tworzenie bibliotek spektralnych z danych pozyskanych za pomocą ASD

Użytkownicy spektrometrów firmy ASD, mają możliwość zapisywania pozyskiwanych danych w formacie binarnym lub tekstowym (ASCII). Aby odczytać pomiary z ASD i utworzyć biblioteki spektralne za pomocą programu ENVI, należy z zakładki Spectral wybrać Spectral Libraries -> Spectral Library Builder. Następnie w zależności od typu posiadanych danych zatwierdzić jedną z trzech opcji importu. Wybierając opcję Data File lub ASCII File nastąpi od razu konieczność wskazania plików z uprzednio zdefiniowanymi informacjami dotyczącymi liczbą kanałów i zakresu zarejestrowanego widma elektromagnetycznego. Dlatego też posiadając „surowe” dane należy wybrać First Input Spectrum, a w kolejnym oknie otworzyć zakładkę Import i wskazać format zapisu (najczęściej from ASD binary file) oraz ścieżkę dostępu do plików, które chcemy zimportować. Po zimportowaniu danych, w oknie Spectral Library Builder wyświetlona jest informacja na temat zakresu spektralnego oraz liczby kanałów (ryc. 14.2), a po kliknięciu opcji Plot pojawia się wykres wybranej krzywej spektralnej.



Rycina 14.2. Okno importu i wizualizacji krzywych spektralnych

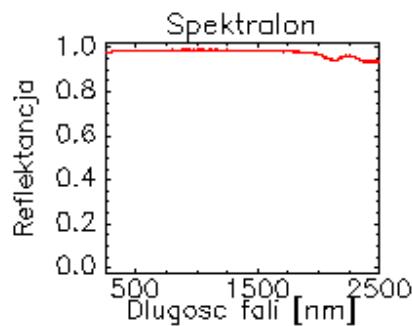
Wykres krzywej spektralnej w oknie Endmember Collection Spectra należy zapisać do pliku z rozszerzeniem \*.slb (format zapisu biblioteki spektralnej programu ENVI). W tym celu z zakładki File należy wybrać opcje Save Plot As -> Spectral Library i wskazać żądanym pomiar. Następnie w oknie Output Spectral Library możliwe jest zdefiniowanie nazw osi X i Y, jednostki danych – Wavelength Units, oraz podanie nazwy biblioteki, którą należy zapisać z rozszerzeniem \*.slb (standardowo współczynnik skali reflektancji – Reflectance Scale Factor, oraz przeskalowanie danych wyjściowych względem wejściowych – Input to Output Data Scaling powinien wynosić 1). Po zatwierdzeniu, zapisana biblioteka pojawi się w oknie Available Bands List (ryc. 14.3).



Rycina 14.3. Okna zapisu i dostępności bibliotek spektralnych

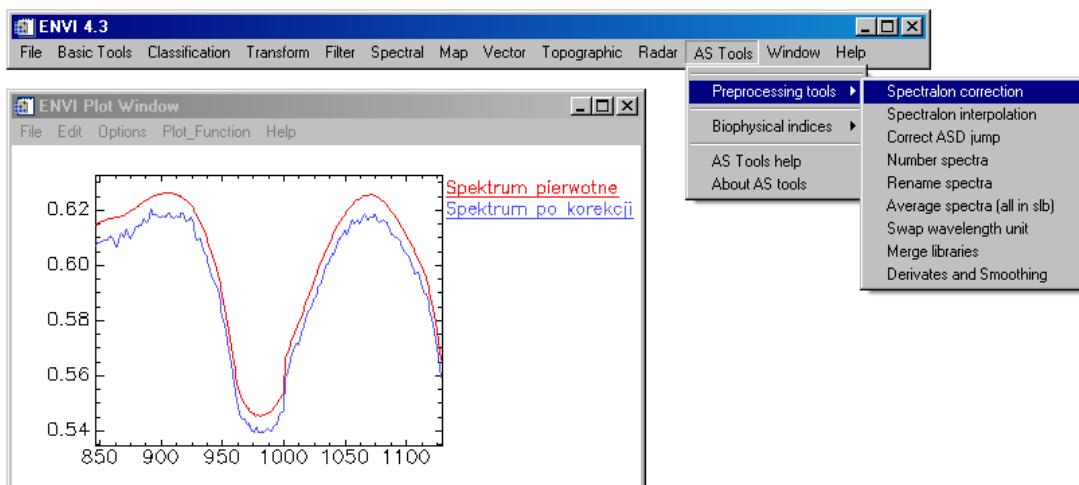
## 14.2 Kalibracja ASD FieldSpec Pro i korekcja pomiarów spektralnych

Wykonywanie pomiarów spektrometrycznych za pomocą ASD FieldSpec Pro odbywa się za pomocą skonfigurowanego z urządzeniem oprogramowania ASD RS3, które może być zainstalowane na dowolnym komputerze (ryc. 1). Przed właściwymi pomiarami badanych obiektów należy upewnić się (szczególnie podczas pomiarów terenowych) czy do sensora dociera wymagana ilość energii promieniowania elektromagnetycznego (światła), oraz dokonać kalibracji urządzenia rejestrującego. Do kalibracji spektrometrów używany jest zewnętrzny wzorzec bieli – najczęściej spektralon, który w przeciwieństwie do „ciała doskonale czarnego”, powinien charakteryzować się stuprocentowym współczynnikiem odbicia (reflektancją) promieniowanego elektromagnetycznego. Spektrometr uważa się za skalibrowany, jeśli w trakcie tego procesu reflektancja spektralonu zawiera się w całym zakresie rejestrów długosci fali w zakresie od 90 do 100 % (ryc. 14.4).



Rycina 14.2. Wykres (na czerwono) wzorcowej odpowiedzi spektralnej spektralonu

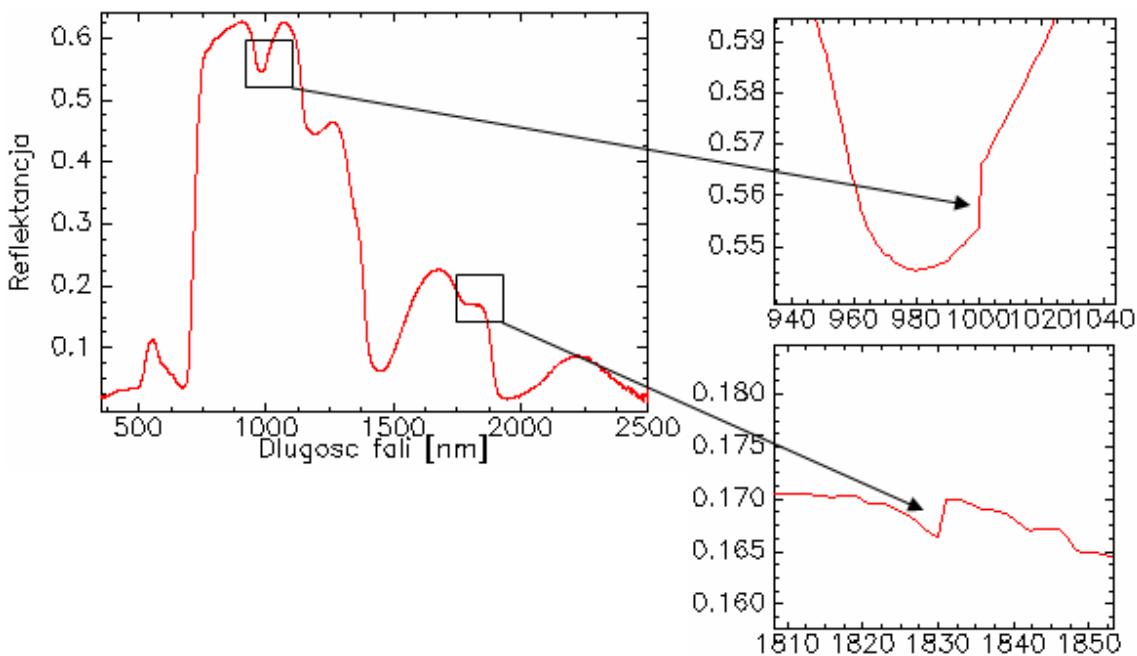
W przypadku wykonywania pomiarów spektrometrycznych na podstawie niewzorcowo skalibrowanego urządzenia, co może być uwarunkowane niedostatecznym oświetleniem bądź wpływem związków zawartych w atmosferze, można dokonać późniejszej korekcji posiadanych krzywych spektralnych. W tym celu z zakładki AS Tools -> Preprocessing tools należy wybrać opcję Spectralon Correction i wskazać bibliotekę spektralną oraz odpowiedź spektralną wzorca bieli, która posłuży do korekcji pomiarów (ryc. 14.5). AS Tools umożliwia także korekcję krzywych na podstawie interpolacji reflektancji spektralonu (Spectralon interpolation) pozyskanych bezpośrednio przed i po właściwych pomiarach (jeśli występują różnice).



Rycina 14.3. Korekcja krzywej spektralnej na podstawie wzorca bieli (spektralonu)

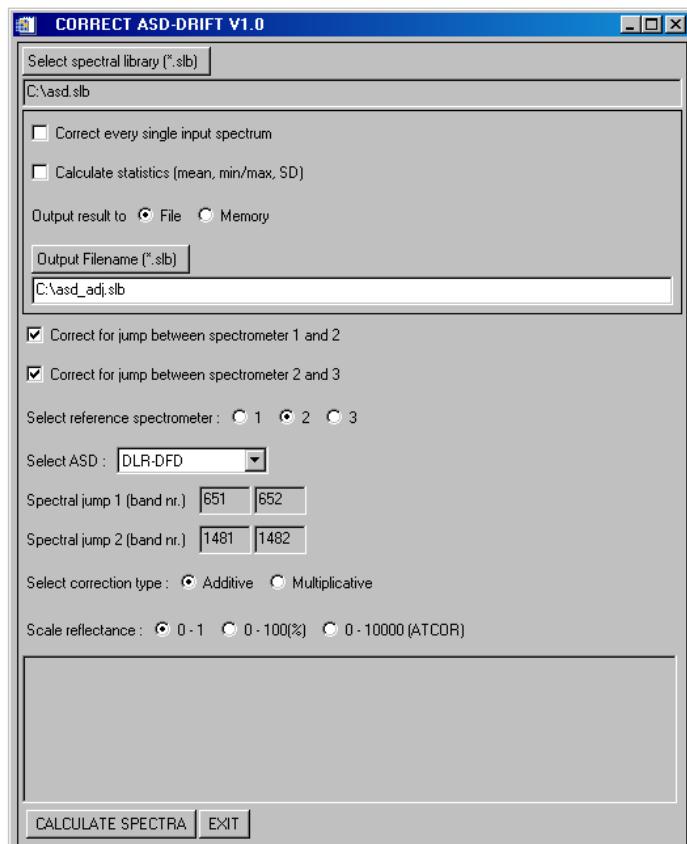
### 14.3 AS Tools – funkcja Correct ASD jump

Funkcja Correct ASD jump z zakładki AS Tools służy do ujednolicenia przebiegu krzywej spektralnej w całym zakresie spektrum, które w przypadku ASD FieldSpec Pro rejestrowane jest przez trzy oddzielne detektory. W przypadku spektrometru ASD FieldSpec Pro różnice w kalibracji poszczególnych detektorów widoczne są na krzywych spektralnych pomiędzy kanałami 651-652 oraz 1481-1482, co odpowiada rejestrowaniu kolejno pasma widzialnego, bliskiej oraz średniej podczerwieni (ryc. 14.6).

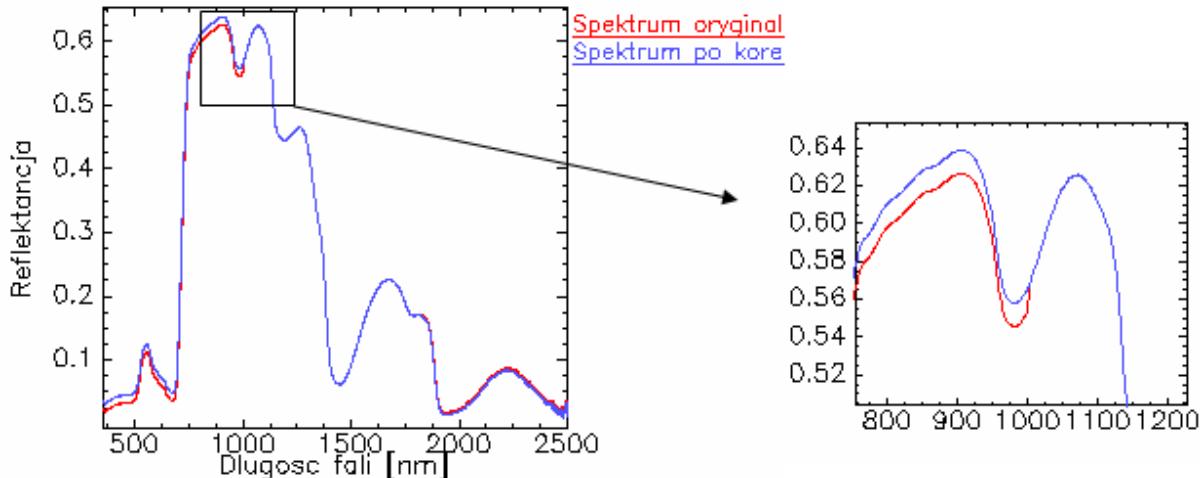


Rycina 14.4. “Dryfujący” przebieg krzywej spektralnej

Rycina nr 14.7 przedstawia okno funkcyjne narzędzia Correct ASD jump. Polecenie **Correct every single input spectrum** powinno być zaznaczone, jeżeli przetwarzana biblioteka spektralna składa się z więcej niż jednej krzywej spektralnej. W przypadku, gdy biblioteka spektralna zawiera pomiary odnoszące się do obiektu tej samej klasy, za pomocą funkcji **Calculate statistics** (mean, min/max, SD) istnieje możliwość uzyskania na ich podstawie krzywych spektralnych reprezentujących wartości uśrednione, maksymalne, minimalne oraz odchylenie standardowe. Funkcje **Correct for jump between spectrometer 1 and 2** oraz ...**2 and 3** służą do zdefiniowania zależności korekcji wartości krzywej spektralnej rejestrowanej w trzech „częściach” przez poszczególne detektory. Najczęściej korekcja pomiędzy wszystkimi trzema detektorami możliwa jest jedynie w przypadku pomiarów laboratoryjnych, ponieważ pomiary terenowe w zakresie widma około 1800-1900 nm obarczone są zakłóceniami wynikającymi z absorpcji promieniowania przez parę wodną. Po zdefiniowaniu zależności korekcji między poszczególnymi detektorem należy wybrać jedną z części krzywej spektralnej (**Select reference spectrometer**), którą uważa się za referencyjną, i w stosunku do której przetworzone zostaną pozostałe części. Następnie z listy **Select ASD** należy wskazać spektrometr, którym wykonywane były przetwarzane pomiary, lub wybrać **Not listed** i podać w oknach **Spectral jump 1 (band nr.)** oraz **Spectral jump 2 (band nr.)** numery granicznych kanałów rejestrowanych przez kolejne detektory. Końcowym etapem przeprowadzenia korekcji jest wybór metody przetworzenia danych – **Additive** lub **Multiplicative**. Rezultat korekcji przedstawiono na rycinie nr 14.8.



Rycina 14.7. Parametryzacja funkcji Correct ASD jump



Rycina 14.8. Rezultat korekcji krzywej spektralnej metodą Additive

## Spis literatury

- Adamczyk J., Będkowski K., 2005. Metody cyfrowe w teledetekcji, Wydawnictwo SGGW, Warszawa
- Belward A.S., 1991. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. W: Belward A.S., Valenzuela C.R., (red). Remote sensing and Geographic Information Systems for resource management in developing countries. Kluwer, Netherlands. Ss. 508
- Bogusz W., Garbarczyk J., Krok F., 1997. Podstawy fizyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. Ss. 569
- Buschmann C., Nagel E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. International Journal of Remote Sensing 14. Ss. 711-722.
- Cahalan R. Sun&Earth Radiation. Solar spectrum, Earth spectrum. NASA. Aktualność danych 14.10.2007 r. <http://climate.gsfc.nasa.gov/~cahalan/Radiation/>
- CIE International Lighting Vocabulary, 1987. Glossary of the International Commission of Illumination. International Lighting Vocabulary (<http://www.satel-light.com/guide/glosatod.htm>). Aktualność 2007.05.01
- Ciołkosz A., Jakomulska A., 2004. Przetwarzanie cyfrowych zdjęć satelitarnych. Symulacja pracy komputera za pomocą papieru i ołówka. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski.
- Ciołkosz A., Kęsik A., 1989. Teledetekcja satelitarna. PWN, Warszawa
- Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J., 2003. USGS Digital Spectral Library splib05a. U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395 (<http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/ofr-03-395.html>)
- Daughtry, C.S.T., 2001. Discriminating Crop Residues from Soil by Short-Wave Infrared Reflectance, Agronomy Journal 93:125-131.
- de Jong S.M., van der Meer F.D., (red.) 2004. Remote Sensing Image Analysis. Including the Spatial Domain. Remote sensing and digital image processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Ss. 360
- Elvidge C.D. 1990. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. International Journal of Remote Sensing, 10, 1775-1795
- ENVI User's Guide, 2001, Research Systems A Kodak Company.
- Fourty, T., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck, and J. Verdebout, 1996. Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. Remote Sensing of Environment 56:104-117.
- Gamon, J. A., Peñuelas J., Field C. B., 1992. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency, Remote Sensing of Environment, nr. 41, 35-44.
- Gates D.M., 1965. Energy, plants and ecology. Ecology, 46. Ss. 1-13
- Gates D.M., Keegan H.J., Schleter J.C., Weindner V.R., 1965. Spectral properties of plants. Applied Optics 4(1). Ss. 11-20

Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2009. Metody i techniki badań geoinformatycznych

- Gausman H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near infrared light. Graduate Studies 29, Texas Technical University. Ss. 78
- Gausman H.W., Allen W.A., Wiegand C.L., Escobar D.E., Rodriguez R.R., 1971. Leaf light reflectance, transmittance, absorptance, and optical and geometrical parameters for eleven plant genera with different leaf mesophyll arrangements. Proceedings of International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan; May 17-21, 1971. Ss. 1599-1625
- Gitelson, A. A., Merzlyak M. N., 1994. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of Aesculus Hippocastanum L. and Acer Platanoides L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. Journal of Plant Physiology, nr. 143, 286-292.
- Gitelson, A.A., Y. Zur, O.B. Chivkunova, and M.N. Merzlyak, 2002. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy, Photochemistry and Photobiology 75:272-281.
- Glossary of remote sensing technology. Committee on Earth Observations Satellites CNES (CEOS 2000).  
<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/glossary/gloss.htm>
- Goode P.R., Qiu J., Yurchyshyn V., Hickey J., Chu M-C., Kolbe E., Brown C.T., Koonin S. E., 2001. Earthshine observations of the Earth's reflectance. Geophysical Research Letters, Volume 28, Issue 9. Ss. 1671-1674
- Hall F. G., Shimabukuro Y. E., Huemmrich K. F., 1995. Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models, Ecological Applications, t. 5, nr. 4, 993-1013.
- Jakomulska A., Sobczak M., 2001. Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych – metodyka i przykłady. Teledetekcja Środowiska Tom 32. KTŚ PTG, Warszawa. Ss. 152 – 171
- Jensen J. R., 1983. Biophysical Remote sensing – Review Article, Annals of the Associations of American Geographers, t. 73, nr 1, 111-132.
- Kimes D.S., Kirchner J.A., 1982. Irradiance measurements errors due to the assumption of a lambertian reference panel. Remote Sensing of Environment, 12. Ss. 141-149
- Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2001. Imaging Spectrometry and Vegetation Science. W: van der Meer F.D., de Jong S.M. (red.). Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications. Kluwer Academic. Ss., 405
- Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002. Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych, Geodeta, nr 11 (90), <http://www.atomnet.pl/~geodeta/2002/90text1.htm>.
- Liou K.N., 2002. An introduction to atmospheric Radiation. 2nd edition. International Geophysics Series, Volume 84, Academic Press, San Diego. Ss. 583
- Markowicz K., 2005. Procesy radiacyjne w atmosferze. Wykłady. Instytut Geofizyki UW. Warszawa ([www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html](http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html))
- Meyer-Arendt J.R., 1979. Wstęp do optyki. PWN, Warszawa. Ss. 470

Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2009. Metody i techniki badań geoinformatycznych

- Peñuelas, J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano, and R. Save, 1995. The Reflectance at the 950-970 Region as an Indicator of Plant Water Status, International Journal of Remote Sensing 14:1887-1905.
- Petty G.W., 2006. A first course in atmospheric radiation. 2nd edition. Sundog Publishing, Madison, Wisconsin. Ss. 458
- Petykiewicz J., 1986. Optyka falowa. Wydanie 2 zmienione. PWN, Warszawa. Ss. 278
- Rataj M., 2000. Zajęcia instruktażowe – pomiary radiometryczne. W: Olędzki J.R. (red.) Zintegrowane techniki pomiarowe – teledetekcja. Materiały do zajęć terenowych dla II roku Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska. Międzywydziałowe Studia Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa. Ss. 27-41.
- Ross J., 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. 1st edition. Springer. Ss. 420
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr. E73-106393, 93. (NTIS No. E73-106393
- Rozpraszanie światła, Wikipedia, ([http://pl.wikipedia.org/wiki/Rozpraszanie\\_%C5%9Bwiat%C5%82a](http://pl.wikipedia.org/wiki/Rozpraszanie_%C5%9Bwiat%C5%82a), 15.12.2008.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M., Dangel S., Painter Th., Martonchik J., 2005. The importance of reflectance terminology in imaging spectroscopy. W: Zagajewski B., Sobczak M., (red). Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies. EARSeL&Warsaw University Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw. Ss. 39-52
- Schrader S., Pouncey R., 1997, ERDAS Field Guide, Fourth Edition, ERDAS Inc., Atlanta
- Sitek Z., 1992. Zarys Teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Część I – Pozyskiwanie danych, Część II – Przetwarzanie danych. Skrypty uczelniane, nr 1239. Wydawnictwa AGH, Kraków. Ss. 304
- Sitek Z., 2000. Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Wydanie drugie poprawione i rozszerzone. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków. Ss. 354
- Słownik Geoinformatyczny PAU, 2001. Wielojęzyczny Interdyscyplinarny Terminologiczny Słownik i Leksykon Geoinformatyczny. Dział fotogrametria i teledetekcja. Wersja internetowa.  
<http://slownik.fotogrametria.agh.edu.pl/index.php>. Aktualność na dzień 28.03.2007
- Strobl P, Müller A, Fries J, Böhl R, Schaepman M, 1998. Calibration monitoring using laboratory and vicarious approaches on the DAIS 7915. In: Schaepman M, Schlüfer D, Itten K (red), 1998. 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy (materiały pokonfencyjne), ss. 119-127
- Strug B., 2004. Grafika komputerowa. Modele oświetlenia. Instytut Informatyki UJ. Kraków
- Suits G.H., 1983. The nature of electromagnetic radiation. W: Colwell R.N., (red). Manual of remote sensing. Vol. 1. ASPRS, Falls Church, Virginia, USA.
- Swain P.H., Davis S.M., 1978. Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGraw-Hill Inc. Ss. 396
- Targowski P., Ziętek B., 2003. Fotometria – Pomiary spektroskopowe. Instytut Fizyki UMK, Toruń. Ss. 34

Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2009. Metody i techniki badań geoinformatycznych

- Ustin S. L., Roberts D. A., Gamon J. A., Asner G. P., Green R. O., 2004. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties, Bioscience, t. 54, nr. 6, 523-534.
- Vanderbilt V.C., Grant L., 1986 Polarization Photometer To Measure Bidirectional Reflectance Factor  $R(55',0'; 55',180')$  of leaves. Optical Engineering, 25(4). Ss. 566-571
- Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle W. D., 2004. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains, International Journal of Remote Sensing, t. 25, nr. 16, 3127-3138.
- Zagajewski B., Sobczak M., Wrzesień M., Kozłowska A., Krówczyńska M., 2006. Kartowanie górskich zbiorowisk roślinnych z użyciem zobrazowań hiperspektralnych DAIS7915. W: Mirek Z., Godzik B., (red.). Tatrański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych. Tom II. Nauki biologiczne. TPN, PTPNoZ - Oddział Krakowski. Zakopane. Ss. 137-150
- Zhang M., Ustin S. L., Rejmankova E., Sanderson E. W., 1997. Monitoring Pacific coast salt marshes using remote sensing, Ecological Applications, t. 7, nr. 3, s. 1019-1053.
- Zurzycki J., Michniewicz M., 1985. Fizjologia roślin. PWRiL Warszawa, Ss. 726.

Kolejność cytowanej literatury z odniesieniem elektronicznym do tekstu

---

<sup>1</sup> Sitek Z., 1992. Zarys Teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Część I – Pozyskiwanie danych, Część II – Przetwarzanie danych. Skrypty uczelniane, nr 1239. Wydawnictwa AGH, Kraków. Ss. 304

<sup>2</sup> Sitek Z., 2000. Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Wydanie drugie poprawione i rozszerzone. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków. Ss. 354

<sup>3</sup> Słownik Geoinformatyczny PAU, 2001. Wielojęzyczny Interdyscyplinarny Terminologiczny Słownik i Leksykon Geoinformatyczny. Dział fotogrametria i teledetekcja. Wersja internetowa.

<http://slownik.fotogrametria.agh.edu.pl/index.php>. Aktualność na dzień 28.03.2007

<sup>4</sup> Glossary of remote sensing technology. Committee on Earth Observations Satellites CNES (CEOS 2000).  
<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/glossary/gloss.htm>

<sup>5</sup> Ciołkosz A., Kęsik A., 1989. Teledetekcja satelitarna. PWN, Warszawa. Ss. 294

<sup>6</sup> de Jong S.M., van der Meer F.D., (red.) 2004. Remote Sensing Image Analysis. Including the Spatial Domain. Remote sensing and digital image processing. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Ss. 360

<sup>7</sup> Rataj M., 2000. Zajęcia instruktażowe – pomiary radiometryczne. W: Olędzki J.R. (red.) Zintegrowane techniki pomiarowe – teledetekcja. Materiały do zajęć terenowych dla II roku Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska. Miedzywydziałowe Studia Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa. Ss. 27-41.

<sup>8</sup> Targowski P., Ziętek B., 2003. Fotometria – Pomiary spektroskopowe. Instytut Fizyki UMK, Toruń. Ss. 34

<sup>9</sup> CIE International Lighting Vocabulary, 1987. Glossary of the International Commission of Illumination. International Lighting Vocabulary (<http://www.satel-light.com/guide/glosatod.htm>). Aktualność 2007.05.01

- 
- <sup>10</sup> Schaepman-Strub G., Schaepman M., Dangel S., Painter Th., Martonchik J., 2005. The importance of reflectance terminology in imaging spectroscopy. W: Zagajewski B., Sobczak M., (red). Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies. EARSeL&Warsaw University Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw. Ss. 39-52
- <sup>11</sup> Goode P.R., Qiu J., Yurchyshyn V., Hickey J., Chu M-C., Kolbe E., Brown C.T., Koonin S. E., 2001. Earthshine observations of the Earth's reflectance. Geophysical Research Letters, Volume 28, Issue 9. Ss. 1671-1674
- <sup>12</sup> Markowicz K., 2005. Procesy radiacyjne w atmosferze. Wykłady. Instytut Geofizyki UW. Warszawa ([www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html](http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html))
- <sup>13</sup> Jakomulska A., Sobczak M., 2001. Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych – metodyka i przykłady. Teledetekcja Środowiska Tom 32. KTŚ PTG, Warszawa. Ss. 152 – 171
- <sup>14</sup> Meyer-Arendt J.R., 1979. Wstęp do optyki. PWN, Warszawa. Ss. 470
- <sup>15</sup> Belward A.S., 1991. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. W: Belward A.S., Valenzuela C.R., (red). Remote sensing and Geographic Information Systems for resource management in developing countries. Kluwer, Netherlands. Ss. 508
- <sup>16</sup> Gausman H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near infrared light. Graduate Studies 29, Texas Technical University. Ss. 78
- <sup>17</sup> Zagajewski B., Sobczak M., Wrzesień M., Kozłowska A., Krówczyńska M., 2006. Kartowanie górskich zbiorowisk roślinnych z użyciem zobrazowań hiperspektralnych DAIS7915. W: Mirek Z., Godzik B., (red.). Tatrzanski Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych. Tom II. Nauki biologiczne. TPN, PTPNoZ - Oddział Krakowski. Zakopane. Ss. 137-150
- <sup>18</sup> Zurzycki J., Michniewicz M., 1985. Fizjologia roślin. PWRiL Warszawa, Ss. 726.
- <sup>19</sup> Vanderbilt V.C., Grant L., 1986 Polarization Photometer To Measure Bidirectional Reflectance Factor R(55',0'; 55',180') of leaves. Optical Engineering, 25(4). Ss. 566-571
- <sup>20</sup> Markowicz K., 2005. Procesy radiacyjne w atmosferze. Wykłady. Instytut Geofizyki UW. Warszawa ([www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html](http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/wyklad.html))
- 21 Strug B., 2004. Grafika komputerowa. Modele oświetlenia. Instytut Informatyki UJ. Kraków
- 22 Petty G.W., 2006. A first course in atmospheric radiation. 2nd edition. Sundog Publishing, Madison, Wisconsin. Ss. 458
- 23 Petykiewicz J., 1986. Optyka falowa. Wydanie 2 zmienione. PWN, Warszawa. Ss. 278
- 24 Bogusz W., Garbarczyk J., Krok F., 1997. Podstawy fizyki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. Ss. 569
- 25 Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2001. Imaging Spectrometry and Vegetation Science. W: van der Meer F.D., de Jong S.M. (red.). Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications. Kluwer Academic. Ss., 405
- 26 Swain P.H., Davis S.M., 1978. Remote Sensing: The Quantitative Approach. McGraw-Hill Inc. Ss. 396
- 27 Suits G.H., 1983. The nature of electromagnetic radiation. W: Colwell R.N., (red). Manual of remote sensing. Vol. 1. ASPRS, Falls Church, Virginia, USA.
- 28 Gates D.M., 1965. Energy, plants and ecology. Ecology, 46. Ss. 1-13

- 29 Ross J., 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. 1st edition. Springer. Ss. 420
- 30 Elvidge C.D.1990. Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. International Journal of Remote Sensing, 10, 1775-1795
- 31 Cahalan R. Sun&Earth Radiation. Solar spectrum, Earth spectrum. NASA. Aktualność danych 14.10.2007 r.  
<http://climate.gsfc.nasa.gov/~cahalan/Radiation/>
- 32 Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2001. Imaging Spectrometry and Vegetation Science. W: van der Meer F.D., de Jong S.M. (red.). Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications. Kluwer Academic. Ss., 405
- 33 Kimes D.S., Kirchner J.A., 1982. Irradiance measurements errors due to the assumption of a lambertian reference panel. Remote Sensing of Environment, 12. Ss. 141-149
- 34 Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J., 2003. USGS Digital Spectral Library splib05a. U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395 (<http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/ofr-03-395.html>)
- 35 Liou K.N., 2002. An introduction to atmospheric Radiation. 2nd edition. International Geophysics Series, Volume 84, Academic Press, San Diego. Ss. 583
- 36 Ciołkosz A., Jakomulska A., 2004. Przetwarzanie cyfrowych zdjęć satelitarnych. Symulacja pracy komputera za pomocą papieru i ołówka. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski.
- 37 Glossary of remote sensing technology. Committee on Earth Observations Satellites CNES (CEOS 2000).  
<http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/science/glossary/gloss.htm>
- 38 ENVI User's Guide, 2001, Research Systems A Kodak Company.
- <sup>39</sup> Habermeyer M., Strobl P., Mueller A., 2001. Interfacing airborne scanner data to a generic archiving and processing environment: a case study for the DAIS7915. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Airborne Remote Sensing Conference. San Francisco, USA, September 17-20, 2001
- 40 Kurczyński Z., Wolniewicz W., 2002. Korekcja geometryczna wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych, Geodata, nr 11 (90), <http://www.atomnet.pl/~geodata/2002/90text1.htm>.
- 41 Schrader S., Pouncey R., 1997, ERDAS Field Guide, Fourth Edition, ERDAS Inc., Atlanta
- 42 Zurzycki J., Michniewicz M., 1985. Fizjologia roślin. PWRiL Warszawa, Ss. 726.
- 43 Buschmann C., Nagel E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. International Journal of Remote Sensing 14. Ss. 711-722.
- 44 Gausman H.W., 1985. Plant leaf optical properties in visible and near infrared light. Graduate Studies 29, Texas Technical University. Ss. 78
- 45 Gausman H.W., Allen W.A., Wiegand C.L., Escobar D.E., Rodriguez R.R., 1971. Leaf light reflectance, transmittance, absorptance, and optical and geometrical parameters for eleven plant genera with different leaf mesophyll arrangements. Proceedings of International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7th, University of Michigan; May 17-21, 1971. Ss. 1599-1625
- <sup>46</sup> Belward A.S., 1991. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. W: Belward A.S., Valenzuela C.R., (red). Remote sensing and Geographic Information Systems for resource management in developing countries. Kluwer, Netherlands. Ss. 508

- 
- <sup>47</sup> Gates D.M., Keegan H.J., Schleter J.C., Weindner V.R., 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4(1). Ss. 11-20
- <sup>48</sup> Zhang M., Ustin S. L., Rejmankova E., Sanderson E. W., 1997. Monitoring Pacific coast salt marshes using remote sensing. *Ecological Applications*, t. 7, nr. 3, s. 1019-1053.
- <sup>49</sup> Ustin S. L., Roberts D. A., Gamon J. A., Asner G. P., Green R. O., 2004. Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties, *Bioscience*, t. 54, nr. 6, 523-534.
- <sup>50</sup> Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle W. D., 2004. Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains, *International Journal of Remote Sensing*, t. 25, nr. 16, 3127-3138.
- <sup>51</sup> Jensen J. R., 1983. Biophysical Remote sensing – Review Article, *Annals of the Associations of American Geographers*, t. 73, nr 1, 111-132.
- <sup>52</sup> Hall F. G., Shimabukuro Y. E., Huemmrich K. F., 1995. Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models, *Ecological Applications*, t. 5, nr. 4, 993-1013.
- <sup>53</sup> Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr. E73-106393, 93. (NTIS No. E73-106393
- <sup>54</sup> Gitelson, A. A., Merzlyak M. N., 1994. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus Hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *Journal of Plant Physiology*, nr. 143, 286-292.
- <sup>55</sup> Gamon, J. A., Peñuelas J., Field C. B., 1992. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency, *Remote Sensing of Environment*, nr. 41, 35-44.
- <sup>56</sup> Fourty, T., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck, and J. Verdebout, 1996. Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. *Remote Sensing of Environment* 56:104-117.
- <sup>57</sup> Daughtry, C.S.T., 2001. Discriminating Crop Residues from Soil by Short-Wave Infrared Reflectance, *Agronomy Journal* 93:125-131.
- <sup>58</sup> Gitelson, A.A., Y. Zur, O.B. Chivkunova, and M.N. Merzlyak, 2002. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy, *Photochemistry and Photobiology* 75:272-281.
- <sup>59</sup> Peñuelas, J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano, and R. Save, 1995. The Reflectance at the 950-970 Region as an Indicator of Plant Water Status, *International Journal of Remote Sensing* 14:1887-1905.