

PORÓWNANIE METOD KOREKCJI ATMOSFERYCZNEJ DLA DANYCH Z SENSORÓW HIPERSPEKTRALNYCH

COMPARISON OF ATMOSPHERIC CORRECTION METHODS FOR HYPERSPETRAL SENSOR DATA

Ewa Głowienka

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: korekcja atmosferyczna, promieniowanie, odbicie, krzywa spektralna
FLAASH

STRESZCZENIE: Dane teledetekcyjne zarejestrowane przez systemy lotnicze lub satelitarne nie mogą być od razu porównywane z krzywymi bibliotek spektralnych ze względu na wpływ atmosfery. Rejestrowana wartość promieniowania musi zostać przeliczona do bezwymiarowej wartości współczynnika odbicia spektralnego. W artykule przedstawiono porównanie wyników korekcji atmosferycznej obrazu HYPERION (357÷2576 nm). Korekcję przeprowadzono metodami empirycznymi (*Flat Field*, *Internal Average Relative Reflectance*, *Empirical Line*) oraz metodą FLAASH, opartą na modelu atmosfery MODTRAN. Jako dane referencyjne wykorzystane zostały krzywe spektralne z pomiaru spektrometrycznego *in situ*. Pomiar przeprowadzono spektrometrem *FieldSpec HH Analytical Spectral Devices* (ASD) (350÷1075 nm). Miarą oceny dokładności dopasowania krzywych spektralnych był średni błąd kwadratowy oraz odchylenie standardowe liczone na podstawie różnic współczynnika odbicia dla krzywych obrazowych i referencyjnych. Najmniejszą dokładność dopasowania krzywych otrzymano dla metod opartych tylko na parametrach obliczonych z obrazu. Zadowalający wynik dopasowania krzywych w zakresie VNIR uzyskano dla metody *Empirical Line*, gdzie średni błąd kwadratowy wynosił 0.020, natomiast odchylenie standardowe 0.019. Najlepszy wynik korekcji atmosferycznej w całym zakresie spektralnym rejestrowanym przez HYEPRIONA uzyskano dla metody bezwzględnej FLAASH.

1. WPROWADZENIE

W niniejszym artykule zamieszczono porównanie metod korekcji atmosferycznej obrazów hiperspektralnych. Korekcja atmosferyczna stanowi jeden z etapów przetwarzania danych, które w całości zostało opisane w innym artykule niniejszego Archiwum (Głowienka, 2008). Etap korekcji atmosferycznej należy uznać za kluczowy dla wstępnego przetwarzania danych hiperspektralnych, szczególnie, jeśli w drugim etapie, ekstrakcji tematycznej, planujemy porównywać krzywe spektralne pomierzone *in situ* z obrazowymi krzywymi spektralnymi lub analizować krzywe spektralne uzyskane z obrazów zarejestrowanych przez różne sensory, w różnych okresach.

Ograniczenie transmisji promieniowania elektromagnetycznego wynikające z rozpraszania i pochłaniania w atmosferze, powoduje, że informacja o obiektach

powierzchni ziemi zostaje zniekształcona (Richter, 2006). Rejestrowana wartość promieniowania musi zostać przeliczona do bezwymiarowej wartości współczynnika odbicia spektralnego. Korekcja atmosferyczna może być przeprowadzona dwiema metodami. Pierwsza z nich oparta jest na obliczeniu parametrów statystycznych. Parametry mogą być uzyskane bezpośrednio z obrazu (np. metody *Dark-Object-Subtraction Model* (DOS) (Chavez, 1988), *Flat Field* (FF), *Internal Average Relative Reflectance* (IARR) (Greek, Craig, 1985) lub ze spektrometrycznego pomiaru terenowego np. metodą *Empirical Line* (Conel *et al.*, 1987). Metody te nie uwzględniają rzeczywistych warunków atmosfery, jakie panują podczas rejestracji obrazu oraz dodatkowych czynników tj. np. kierunku oświetlenia, topografii powierzchni i nazywane są empirycznymi metodami korekcji atmosferycznej (Aspinall *et al.*, 2002).

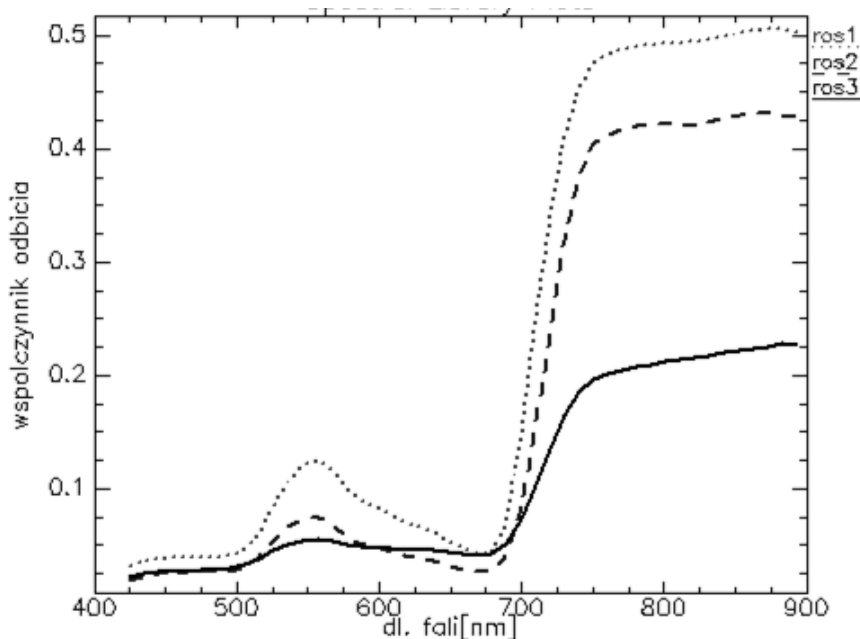
Druga grupa, stosowanych algorytmów do korekcji atmosferycznej oparta jest na fizycznej charakterystyce rzeczywistych warunków atmosfery (Kruse, 2004) i wykorzystuje modele transferu radiacyjnego takie jak LOWTRAN, MODTRAN (Berk *et al.*, 1989), 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Vermote *et al.*, 1997). Z takich modeli, korzystają zaawansowane algorytmy do korekcji atmosferycznej: ATCOR (Richter, 1996), *Atmospheric REMoval program* (ATREM) (Gao, Goetz, 1990), *Atmospheric CORrection Now* (ACORN) (Green, 2001), *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (Adler-Golden *et al.*, 1999). Wymienione algorytmy wykorzystywane są w metodach bezwzględnych (Aspinall *et al.*, 2002).

W literaturze można znaleźć przykłady stosowania metod korekcji atmosferycznej, zarówno empirycznych, jak i zaawansowanych modeli atmosfery, które są wykorzystywane w transformacji wartości promieniowania do wartości współczynnika odbicia/emisyjności (Dwyer. *et al.*, 1995, Kruse, 2004, Hejmanowska, Głowienka, 2004, Osińska-Skotak, 2005). Prezentowane metody są powszechnie znane jako implementacje algorytmów realizujących zadanie korekcji atmosferycznej, zatem przedstawiony w tym artykule zakres opracowania ma głównie charakter testu.

2. DANE

Do przetestowania i porównania skuteczności metod korekcji atmosferycznej wykorzystano dane z satelitalnego sensora hiperspektralnego HYPERION. Dane obrazowe zostały poddane wstępnej korekcji zakłóceń obrazowych, w wyniku, której wyeliminowano efekt *smile* i efekt prążkowania tzw. *striping* (Głowienka, 2008).

Jako dane referencyjne wykorzystane zostały krzywe z pomiaru spektrometrycznego *in situ* (Hejmanowska *et al.*, 2006), reprezentujące charakterystyki spektralne między innymi dla takich obiektów jak: roślinność (Rys.1), teren „zabetonowany”, teren odkryty, składowisko żużlu, woda (Zbiornik Dobczycki). Do niniejszych testów wybrane zostały krzywe spektralne roślinności trawiastej, które po wstępnym przetworzeniu (Hejmanowska *et al.*, 2006) mieściły się w zakresie od 400 nm do 900 nm (Rys.1). Ponadto, wykorzystano krzywe spektralne roślinności z biblioteki spektralnej JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), która udostępniona jest na stronie internetowej NASA (<http://asterweb.jpl.nasa.gov>).



Rys.1. Krzywe spektralne roślinności z pomiaru terenowego

3. METODYKA

Wszystkie metody korekcji atmosferycznej zastosowane w ramach niniejszych badań są zaimplementowane w środowisku oprogramowania ENVI (*Environment for Visualizing Images*). Z uwagi na fakt, że dysponowano referencyjną biblioteką spektralną (pomiar *in situ*) tylko z zakresu VNIR, to dokładną analizę porównawczą dopasowania krzywych spektralnych przeprowadzono właśnie dla tego zakresu. Dokładność dopasowania krzywych określono na podstawie średniego błędu kwadratowego oraz odchylenia standardowego, liczonych na podstawie różnic wartości współczynnika odbicia dla danej długości fali dla krzywej obrazowej i spektrometrycznej. Natomiast krzywe uzyskane dla średniej podczerwieni (SWIR) zostały porównane do krzywych spektralnych z biblioteki JPL, na podstawie wizualnej oceny zgodności przebiegu. Porównanie uzyskanych wyników w obydwu przypadkach przeprowadzono dla krzywej roślinności trawiastej.

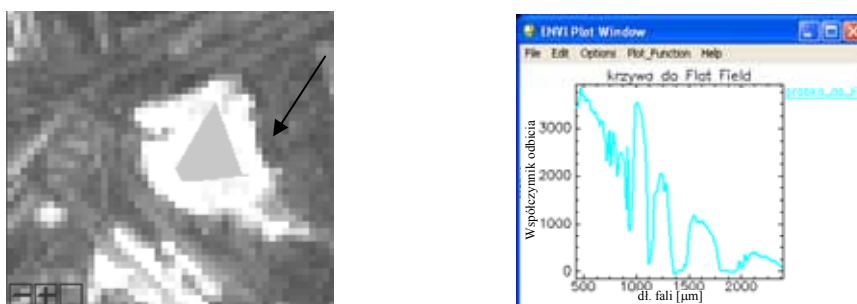
3.1. Korekcja metodami empirycznymi (względny)

Korekcję metodami empirycznymi wykonano w oparciu o 3 algorytmy: *Flat Field* (FF), *Internal Average Relative Reflectance* (IAAR) i *Empirical Line* (EL).

Flat Field (FF) i Internal Average Relative Reflectance (IARR)

Metoda *Flat Field* normalizuje obraz do wartości obszaru o znanej wartości rzeczywistego współczynnika odbicia spektralnego (np. woda lub teren odkryty) (Greek, Craig, 1985). W algorytmie należy wybrać grupę pikseli, charakteryzującą się jednorodnym współczynnikiem odbicia. Dla zdefiniowanego obszaru (Rys. 2) obliczana jest średnia z wartości pikseli w każdym z kanałów i tworzona jest uśredniona krzywa spektralna dla tego obszaru (Rys. 2). Następnie wszystkie piksele we wszystkich kanałach korygowanego obrazu zostają podzielone przez uzyskaną średnią

Metoda IARR polega na obliczeniu średniej ze wszystkich wartości jasności pikseli dla danego kanału i podzieleniu jasności każdego piksela przez tę średnią (Kruse, 1988). Procedura normalizująca wykonywana jest dla każdego kanału spektralnego.



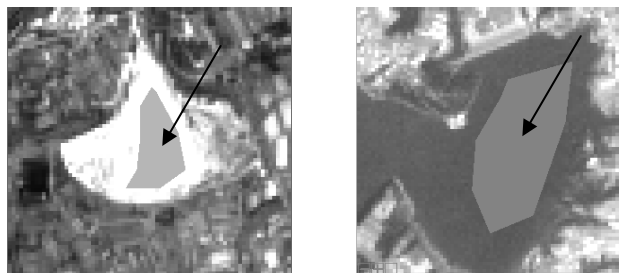
Rys. 2. Zdefiniowany obszar pikseli o jednorodnym współczynnikiem odbicia w metodzie FF (po lewej) oraz uśredniona krzywa spektralna dla tego obszaru (po prawej)

Empirical Line (EL)

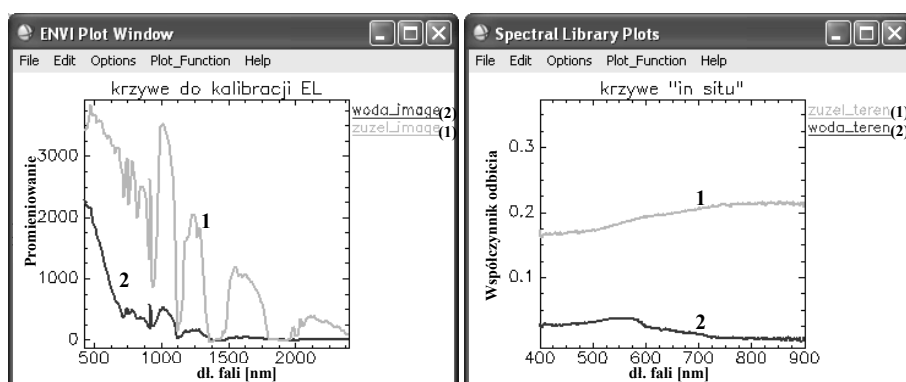
W metodzie *Empirical Line* wartości promieniowania obiektów zarejestrowane na obrazie i wartości współczynnika odbicia dla tych samych obiektów, uzyskane z pomiaru terenowego, umożliwiają przeliczenie wartości promieniowania do wartości współczynnika odbicia przy użyciu regresji liniowej (1).

$$\text{Współczynnik odbicia} = \text{gain} * \text{promieniowanie} + \text{offset} \quad (1)$$

Na podstawie obiektów referencyjnych, dla których znane są wartości współczynnika odbicia i mocy promieniowania, wyznacza się wartości *gain* i *offset* (RSI, 2003). Do poprawnego przeprowadzenia korekcji metodą EL należy przygotować odpowiedni zestaw krzywych spektralnych z obrazu oraz krzywych referencyjnych z pomiaru terenowego (Conel *et al.*, 1987). Powinny to być krzywe spektralne reprezentujące obszary o zróżnicowanej odpowiedzi spektralnej. Należy wybrać, co najmniej dwa obszary o skrajnych wartościach zarejestrowanego promieniowania (np. woda i teren odkryty) (Rys. 3). Dla analizowanego obrazu HYPERION, jako próbkę o maksymalnych wartościach pikseli wybrano obszar składowiska żużlu (Rys. 3). Natomiast fragment obrazu, reprezentujący Zbiornik Dobczycki (Rys. 3), wykorzystano, jako próbkę pikseli o minimalnych wartościach jasności.



Rys. 3. Próbkki pikseli wykorzystane do korekcji atmosferycznej EL reprezentujące wartości maksymalne - składowisko żużlu (po lewej) oraz wartości minimalne – Zbiornik Dobczycki (po prawej)



Rys. 4. Krzywe spektralne wykorzystane w metodzie *Empirical Line* a) krzywe obrazowe przed korekcją b) krzywe z pomiaru *in situ*

3.2. Korekcja metodą bezwzględną - Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)

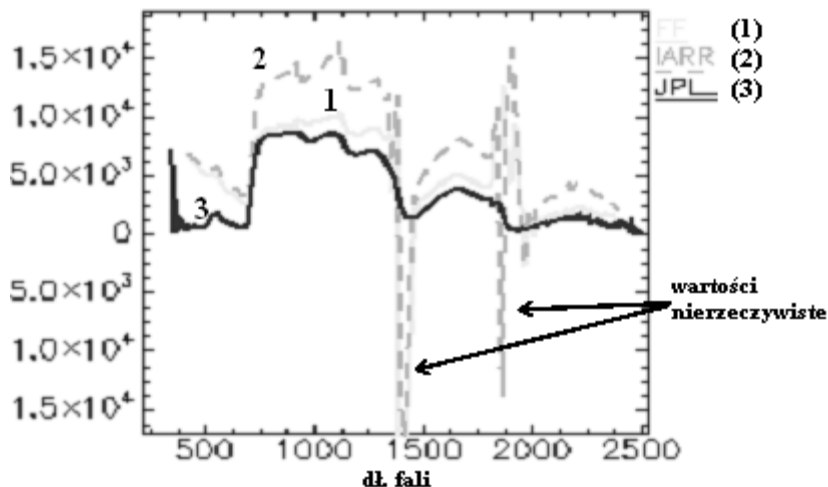
Korekcję metodą bezwzględną opartą na fizycznej charakterystyce rzeczywistych warunków atmosfery, przeprowadzono za pomocą algorytmu *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) w ramach przetwarzania wstępnego obrazu HYPERION (Głowienka, 2008).

4. WYNIKI

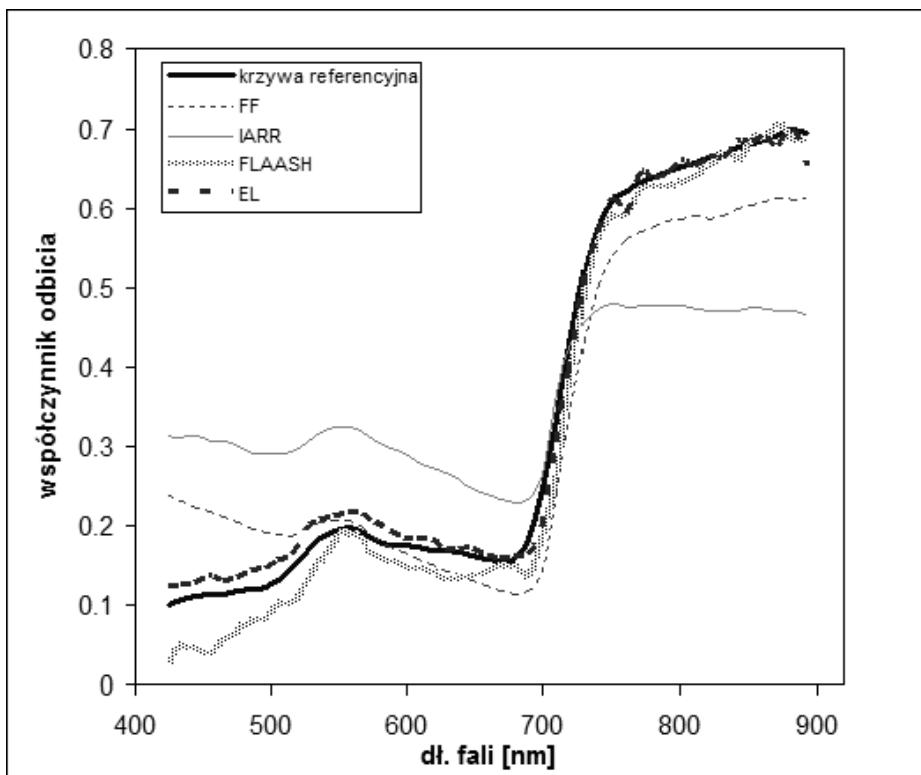
W wyniku korekcji metodami empirycznymi FF i IARR uzyskano obrazowe krzywe spektralne, których ogólny przebieg (w zakresie VNIR i SWIR) jest zbliżony do krzywej roślinności z biblioteki spektralnej JPL (Rys. 5). W niektórych kanałach SWIR, dla krzywych spektralnych po korekcji metodami FF i IARR, otrzymano nierzeczywiste wartości współczynnika odbicia, które występują, jako piki absorpcyjne dla długości fal: 1400 nm, 1900 nm (Rys. 5). Są to zaburzenia charakterystyki spektralnej spowodowane występowaniem cząsteczek H₂O i CO₂. Kanały obciążone tym zakłóceniem należało wyłączyć z dalszej analizy. Dla kanałów z przedziału 400÷500 nm

obrazowe krzywe spektralne po korekcji IARR i FF wykazują znacznie wyższe wartości współczynnika odbicia w stosunku do jego wartości w tym zakresie dla krzywej referencyjnej. Oznacza to, że w zakresie promieniowania niebieskiego pozostał nie do końca usunięty efekt atmosfery. W przypadku obu analizowanych krzywych spektralnych w przedziale 500÷600 nm występuje widoczny pik, wskazujący na obecność chlorofilu. Dla zakresu promieniowania czerwonego (600÷700 nm) zaznacza się właściwy dla roślin spadek wartości odbicia.

Analizując przebieg obrazowych krzywych spektralnych uzyskanych metodami IARR i FF można stwierdzić, iż w zakresach niebieskim, zielonym, czerwonym mają one bardzo podobny przebieg, natomiast występuje różnica co do wartości współczynnika odbicia. Wartość ta jest wyższa dla krzywych uzyskanych po przeprowadzeniu korekcji IARR, zarówno w stosunku do wartości współczynnika odbicia dla referencyjnej krzywej spektralnej roślinności, jak i obrazowej krzywej spektralnej uzyskanej w wyniku korekcji metodą FF. Dla kanałów z zakresu podczerwonego przebieg i kształt krzywej spektralnej roślinności po korekcji FF jest bardzo zbliżony do przebiegu i kształtu referencyjnej krzywej spektralnej. Największe różnice wartości współczynnika odbicia występują dla długości fal ok. 700 nm, natomiast najmniejsze różnice dla przedziału długości fal 750÷810 nm. W przypadku krzywej spektralnej uzyskanej po korekcji IARR, wartości współczynnika odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni, są znacznie niższe niż wartości współczynnika odbicia z pomiaru terenowego. Błąd RMS dla krzywej po korekcji metodami IARR i FF w zakresie VNIR wyniósł odpowiednio 0.16 i 0.07, natomiast odchylenie standardowe 0.15 i 0.07 (Tab.1).



Rys. 5. Zestawienie obrazowych krzywych spektralnych roślinności po korekcji wykonanej metodami FF i IARR z krzywą spektralną roślinności z biblioteki JPL



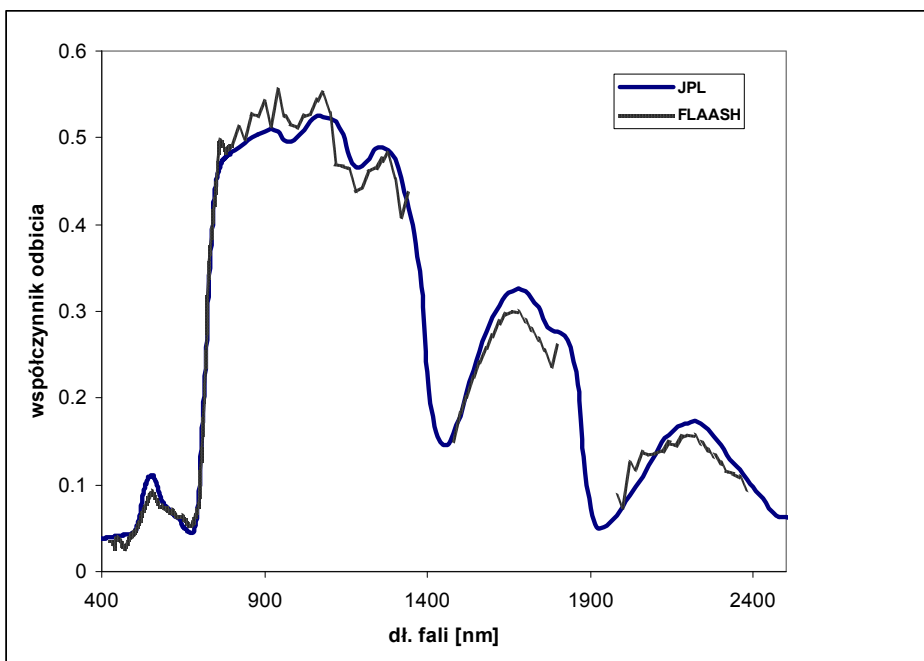
Rys. 6. Zestawienie obrazowych krzywych roślinności po korekcji atmosferycznej wykonanej metodami FF, IARR, FLAASH i EL z krzywą referencyjną roślinności dla zakresu VNIR

Dla metody EL otrzymano regularne obrazowe krzywe spektralne roślinności, które w zakresie VNIR zarówno swoim kształtem jak i przebiegiem pokrywały się z krzywymi referencyjnymi (Rys. 6). Po przeprowadzeniu analizy dokładnościowej otrzymano bardzo dużą zgodność dopasowania obrazowych krzywych spektralnych roślinności uzyskanych po korekcji metodą EL z referencyjnymi krzywymi spektralnymi roślinności (Tab.1). Obliczony średni błąd kwadratowy wynosił 0.02, a odchylenie standardowe 0.019. Otrzymane wartości współczynnika odbicia są najbardziej zbliżone do krzywych spektralnych pomierzonych w terenie.

Bardzo dobry wynik korekcji atmosferycznej dla zakresu VNIR otrzymano również dla metody bezwzględnej FLAASH, gdzie algorytm korekcji bazował na fizycznym modelu atmosfery. Analiza dokładnościowa wykazała mniejszą zgodność z krzywymi referencyjnymi niż w przypadku metody EL. Uzyskano błąd RMS równy 0.037 i odchylenie standardowe równe 0.023. W zakresie SWIR dokonano próby wpasowania do krzywej z biblioteki JPL (Rys. 7), wybierając najbardziej prawdopodobną charakterystykę reprezentującą roślinność (w tym wypadku trawy).

Tabela 1. Zestawienie błędów uzyskanych po porównaniu krzywej referencyjnej roślinności z obrazowymi krzywymi spektralnymi roślinności po korekcji atmosferycznej

	FF	IARR	FLAASH	EL
Odchylenie Standardowe	0.067	0.154	0.023	0.019
RMS	0.072	0.160	0.037	0.020



Rys. 7. Zestawienie obrazowych krzywych spektralnych roślinności po korekcji wykonanej metodą FLAASH z krzywą spektralną roślinności z biblioteki JPL

5. PODSUMOWANIE

Jakość korekcji atmosferycznej można oceniać porównując krzywe spektralne pomierzone *in situ* z krzywymi uzyskanymi z obrazu satelitarnego. W przypadku prezentowanych badań do analizy dokładności dopasowania obu krzywych wykorzystano średni błąd kwadratowy, który w zależności od metody korekcji atmosferycznej wynosił od 0.02 do 0.16 dla metod względnych oraz 0.037 dla metody bezwzględnej. Uzyskany rezultat potwierdza wyniki znane z literatury (Kruse, 2004, Griffin, Burke, 2003).

Najlepsze wyniki korekcji w zakresie VNIR uzyskano dla metody *Empirical Line*, która w algorytmie wykorzystuje krzywe spektralne pomierzone w terenie. Poprawny wynik korekcji jest związany z prawidłowo dobranymi krzywymi referencyjnymi z pomiaru terenowego i próbkami pikseli z obrazu wykorzystanymi w algorytmie

korekcji. Należy zaznaczyć, iż w przypadku omawianej sceny pomiar krzywych referencyjnych był planowany pod kątem pozyskania danych do kalibracji właśnie metodą *Empirical Line*.

Bardzo dobry rezultat otrzymano również po zastosowaniu metody bezwzględnej FLAASH, dla której nie jest konieczna znajomość dokładnych parametrów

Zdecydowanie najslabszą dokładność dopasowania krzywych otrzymano dla metod opartych tylko na parametrach obliczonych na podstawie wartości pikseli obrazowych tj. *Flat Field i Internal Average Relative Reflectance*.

6. LITERATURA

Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S.C., Acharya, P. K., Anderson, G. P., Felde, G., Gardner, J., Hike, M., Jeong, L. S., Pukall, B., Mello, J., Ratkowski, A., Burke, H.H. 1999. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4. *SPIE Proc. Imaging Spectrometry*, 3753: s. 61-69.

Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., 1989. MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7. *Spectral Sciences*, Inc. Burlington, Massachusetts.

Aspinall R. J., Marcus, A., & Boardman, J. W. 2002. Considerations in collecting, processing, and analyzing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations. *Journal of Geographical Systems*, 4, s. 15–29.

Chavez, P. S., 1988. An improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, s. 459-479.

Conel JE, Green RO, Vane G, Bruegge CJ, Alley RE, Curtiss B. 1987. Airborne Imaging Spectrometer-2: Radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere. *Proceedings SPIE*, 834, s. 140–157

Goetz, A.F.H., Boardman, J.W. 1997. Atmospheric Corrections: On Deriving Surface Reflectance from Hyperspectral Imagers. In Descour, Michael R. and Shen, S.S. (eds.), *Imaging Spectrometry III: Proceedings of SPIE*, 3118, s. 14-22.

Gao B., Goetz, A., 1990. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, nr. D4, s. 3549-3564.

Głowienka E., 2008. Przetwarzanie wstępne danych z hiperspektralnego sensora satelitarnego HYPERION. Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe *Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb*. Międzyzdroje, 15 - 17 października 2008.

Green, A., Craig, M.D., 1985. Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals. Proceedings, AIS workshop, 8-10 April, 1985, *JPL Publication* 85-41, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, s. 111-119.

Green R., 2001. *Atmospheric Correction Now (ACORN)*, developed by ImSpec LLC, available from Analytical Imaging and Geophysics LLC, http://www.aigllc.com/imspec_transition.htm.

Griffin M., Burke H., 2003. Compensation of Hyperspectral Data for Atmospheric Effects. *Lincoln Laboratory Journal* vol. 14, nr 1.

Hejmanowska B., Drzewiecki W., Głowienka E., Mularz S., Zagajewski B., Sanecki J., 2006. Próba integracji satelitarnych obrazów hiperspektralnych z nieobrazowymi naziemnymi danymi spektrometrycznymi na przykładzie Zbiornika Dobczyckiego. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 16 Stare Jabłonki 2006.

Hejmanowska B., Głowienka E. 2004. Wstępne wyniki pomiarów spektrometrycznych i klasyfikacji obrazów hiperspektralnych rekultywowanego obszaru Tarnobrzесьkiego Zagłębia Siarkowego" *Geoinformatica, Polonica*, T.6.

Kruse F.A., 1988. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sensing of Environment* 24(1), s. 31–51.

Kruse F.A., 2004. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, Colorado. *Proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Laboratory.

Osińska-Skotak K., 2005. Influence of atmospheric correction on determination of lake water quality parameters based on CHRIS/PROBA images. *25th EARSeL Symposium*.

Richter R., 1996. Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data. *Computers & Geosciences* 22, s. 785-793.

Richter R., 2006. Atmospheric/Topographic Correction for Airborne Imagery http://www.rese.ch/pdf/atcor4_manual.pdf

Research Systems Inc (RSI), 2003. ENVI User's Guide, Research Systems.

Vermote E., Tanrè D., Deuze J., Herman M., Morcette J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview, IEEE trans. *On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35.

COMPARISON OF ATMOSPHERIC CORRECTION METHODS FOR HYPERSPETRAL SENSOR DATA

KEY WORDS: atmospheric correction, radiance, reflectance, spectral curve, FLAASH.

SUMMARY: Because of the influence of the atmosphere, remote sensing data recorded by airborne or satellite sensors cannot be directly compared with spectral library curves. The value of recorded radiance has to be transformed to dimensionless value of reflectance. This paper presents a comparison of atmospheric correction results for the Hyperion's image (357÷2576 nm). The atmospheric correction was performed with the following empirical methods: *Flat Field*, *Internal Average Relative Reflectance*, *Empirical Line*, and the FLAASH method based on the MODTRAN atmospheric model. Spectral curves from *in situ* measurements were used as reference data. Field measurements were taken by means of the *FieldSpec HH Analytical Spectral Devices* (ASD) spectrometer (350 nm÷1075 nm). The accuracy of curve matching was calculated based on the RMS error and the standard deviation, which were calculated based on differences of value for image and reference reflectance. The lowest accuracy of curve matching was obtained for methods based only on parameters derived from images. A satisfactory result of correction for the VNIR range was achieved with the *Empirical Line* method, whereby the RMS error was 0.020 and the standard deviation was 0.019. The best result of atmospheric correction in the entire HYPERION range was obtained with the absolute FLAASH method.

mgr inż. Ewa Głowienka
e-mail: eglo@agh.edu.pl
tel. 012 617 22 88
fax: 012 617 39 93