

# Porównanie wyników korekcji atmosferycznej danych satelitarnych CHRIS/Proba przeprowadzonych w oprogramowaniach BEAM/Visat oraz ATCOR

*Intercomparison of BEAM/Visat and ATCOR atmospheric correction methods performed on CHRIS/Proba satellite data*

Lech GAWUĆ, Katarzyna OSIŃSKA-SKOTAK

**Słowa kluczowe:** korekcja atmosferyczna, ATCOR, CHRIS/PROBA, BEAM/Visat, dane superspektralne  
**Key words:** atmospheric correction, ATCOR, CHRIS/PROBA, BEAM/Visat, superspectral data

**Otrzymano:** 27 Kwietnia 2012; Zaakceptowano: 25 lipca 2012

**Received:** 27 April 2012; Accepted: 25 July 2012

*A comparison of output of two absolute atmospheric correction methods (ATCOR by R. Richter, 1996, and an algorithm by L. Guanter et al., 2005, implemented in the BEAM/Visat framework) is presented. Analyses are based on satellite data acquired by CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) sensor onboard the PROBA (Project for On-Board Autonomy) satellite. For comparison, a set of in situ spectral measurements obtained by the Norwegian NIVA Institute was taken as reference data. The area of study was the Vistula Lagoon in Northern Poland. All analyses presented here are based on comparison of results of atmospheric correction methods with in situ reference data. Alterations between ground and satellite spectral measurements can be caused by changes of humidity or solar zenith angle, as well as fluctuations of water masses, aerosols and air masses, all of which phenomena occur with time passage. In order to minimize the influence of this element, a set of simultaneous ground and satellite measure-*

*ments was analyzed. Observations were collected on the same day, 18<sup>th</sup> August 2008. The best atmospheric correction was obtained in ATCOR with a ground model calibration, and the mean relative difference in spectral reflectance between the results obtained with this method and the reference data was 0,18%. The drawback of this method is that it requires results from in situ spectral measurements to reinforce the reflectance derivation, while such data is usually unavailable. Hence, only methods independent of ancillary data are treated as authoritative. In this case, the output of two methods – ATCOR without ground model calibration and an algorithm by L. Guanter et al., (2005) implemented in BEAM/Visat framework – were compared against the reference data. The comparison yields 2,30% and 2,10% reflectance mean difference between ATCOR, an algorithm by L. Guanter et al., (2005) and the reference data, correspondingly. This leads to conclusion that an algorithm by L. Guanter et al., (2005), provided better results in our case.*

## Wprowadzenie

Każde zobrazowanie powierzchni Ziemi, wykonane z pułapu satelitarnego lub lotniczego, jest obarczone wpływem atmosfery. Innymi słowy, gdy badamy jakiś wycinek powierzchni Ziemi, wyniki pomiarów odbicia spektralnego dokonanych przez instrumenty umieszczone na pokładzie satelity będą się różniły od wyników pomiarów naziemnych przeprowadzonych w tym samym momencie. Dlatego też wiele zastosowań zdjęć sateli-

tarnych (zwłaszcza ilościowych bezwzględnych, mających na celu określenie wartości określonego parametru, jak np. temperatura obiektu, czy wskaźnika, jak np. NDVI) wymaga przeprowadzenia korekcji atmosferycznej.

Korekcja atmosferyczna jest jednym z etapów korekcji radiometrycznej – wstępnego procesu przetwarzania danych satelitarnych, mającego na celu doprowadzenie do poprawnej radiometrii obrazu (Osińska-Skotak, 2007; Jensen, 1996). Ma ona na celu uzyskanie wartości od-

bicia bądź emisji promieniowania takich, jakie byłyby w przypadku braku występowania atmosfery.

Fale elektromagnetyczne, zanim dotrą do sensorów satelitarnych, podlegają zjawiskom pochłaniania i rozpraszania w trakcie przechodzenia przez atmosferę. Zjawiska te zmieniają nominalną wartość rejestrowanego sygnału (Song i in., 2001). W celu usunięcia efektu pochłaniania i rozpraszania promieniowania potrzebne jest odpowiednie przekształcenie zdjęć satelitarnych. Proces korekcji atmosferycznej staje się niezbędny, gdy celem jest otrzymanie, na podstawie zdjęć satelitarnych, rzeczywistych wartości odbicia bądź emisji promieniowania przez konkretny obiekt. Prawidłowe usunięcie wpływu atmosfery na moc promieniowania elektromagnetycznego zarejestrowanego na zdjęciach satelitarnych umożliwia ich wykorzystanie w wielu zastosowaniach (Sharma i in., 2009), takich jak: szczegółowe badania statystyczne nad użytkowaniem i pokryciem terenu, przewidywanie wielkości plonów, monitorowanie zmian wskaźników roślinności, monitorowanie procesów wylesiania, kalibracja sensorów teledetekcyjnych i inne.

Droga optyczna fal elektromagnetycznych w atmosferze w przypadku prowadzenia naziemnych pomiarów odbicia spektralnego jest nieporównywalnie krótsza niż w przypadku zdjęć satelitarnych. Dlatego też, spektralny pomiar naziemny najlepiej przybliży faktyczne właściwości spektralne obiektu, gdyż w tym przypadku wpływ zjawisk rozpraszania i pochłaniania w atmosferze na promieniowanie elektromagnetyczne jest minimalny. W związku z tym, naziemny pomiar spektralny można uznać za odzwierciedlający rzeczywiste właściwości spektralne obiektu w stosunku do satelitarnych pomiarów odbicia spektralnego.

Metody korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych można podzielić na dwie grupy (za Song i in., 2001; Tachiiri, 2005; Wu i in. 2005; Głowienka, 2008): bezwzględne i względne. Pierwsze wykorzystują modele stanu atmosfery (takie jak MODTRAN, LOWTRAN, 6S) i przybliżają rzeczywiste wartości odbicia spektralnego obiektów. Natomiast druga grupa związana jest z obliczeniem parametrów statystycznych jedynie na podstawie zdjęcia satelitarnego (tzw. image-based methods); są one przydatne do zastosowań jakościowych lub ilościowych względnych (np. klasyfikacja tematyczna, różnica temperatury dla konkretnych jezior w poszczególnych dniach).

Grupa metod bezwzględnych, w przeciwieństwie do względnych, znajduje zastosowanie przy badaniach, gdzie wartość współczynnika odbicia spektralnego danego obiektu musi być możliwie najbliższa wartości rzeczywistej. Przykładami metod bezwzględnych są (za Głowienka, 2008) np. *Atmospheric REMoval program* (ATREM), *Atmospheric CORrection Now* (ACORN), *Fast Line of – sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH).

Problem weryfikacji wyników działania tych metod związany jest z tym, że wymaga dostępu do wyników

pomiarów naziemnych przeprowadzonych na odpowiadającym obszarze z zachowaniem spójności czasowej (pomiarów naziemnych i satelitarnych), które to dane są najczęściej niedostępne (Guanter, 2005; Cracknell, Hayes, 2007). Za wyniki naziemnych pomiarów spektralnych można uznać dane pochodzące z bibliotek krzywych spektralnych (np. udostępnione przez Jet Propulsion Laboratory na stronie internetowej <http://speclib.jpl.nasa.gov/>), zawierające charakterystyki spektralne wielu naturalnych, jak i antropogenicznych materiałów. Jednakże należy pamiętać, iż dane z bibliotek spektralnych mogą się różnić od rzeczywistych właściwości badanych powierzchni, prowadząc do nierzetelności w analizach. Wynika to z faktu, iż odbicie spektralne danego obiektu zmienia się m.in. w zależności od oświetlenia, kąta padania promieni słonecznych, pory roku. W nielicznych przypadkach, gdy odpowiednie dane są dostępne, można skonfrontować wartości odbicia spektralnego uzyskanego na podstawie zdjęć satelitarnych poddanych korekcji atmosferycznej z wynikami naziemnych pomiarów spektralnych. Takie podejście zostało zaprezentowane w niniejszej pracy. Dysponując wynikami naziemnych pomiarów spektralnych i zdjęciem satelitarnym ze skanera CHRIS – znajdującego się na pokładzie satelity PROBA – wykonanym tego samego dnia, przeprowadzono test, mający na celu określenie który z dwóch algorytmów korekcji atmosferycznej da wyniki bliższe naziemnym pomiarom spektralnym. Pierwotnym zamysłem pracy było porównanie czterech algorytmów korekcji atmosferycznej (6S, ATCOR, FLAASH/ENVI, algorytm L. Guantera i in.), jednakże okazało się, iż wykonanie korekcji atmosferycznej obrazów satelitarnych CHRIS w 6S i FLAASH jest niemożliwe ze względu na brak zdefiniowanego sensora.

## Obszar badań i dane źródłowe

Satelita PROBA jest przedstawicielem rodziny tzw. „małych satelitów” i jest zarządzany przez Europejską Agencję Kosmiczną ESA. Rejestracja danego obiektu przez instrument CHRIS odbywa się pod pięcioma kątami – tj. 55°, 36°, 0° – czyli nadirowo, –36° oraz –55°, co daje za każdym razem 5 zdjęć badanego obszaru. Istotną cechą CHRIS jest możliwość przeprogramowania definicji kanałów spektralnych. Standardowo jest to 5 trybów, które różnią się liczbą oraz zakresem rejestrowanych kanałów spektralnych, jak również rozdzielczością przestrzenną. Zdjęcia satelitarne CHRIS użyte w niniejszej pracy obejmowały obszar Zalewu Wiślanego w okolicach Krynicy Morskiej, Tolkmicka i Fromborka.

Zobrazowania CHRIS, jak większość obrazów super- i hiperspektralnych, charakteryzują się silnymi szumami instrumentalnymi. Wynika to głównie ze specyfiki pracy skanerów typu *push-broom* oraz rejestracji bardzo wąskich zakresów spektralnych, co powoduje, iż rejestrowana moc promieniowania jest znacznie niższa niż w przypadku szerokopasmowych skanerów wielospektralnych. Ponadto, na te elementy nakłada się szereg

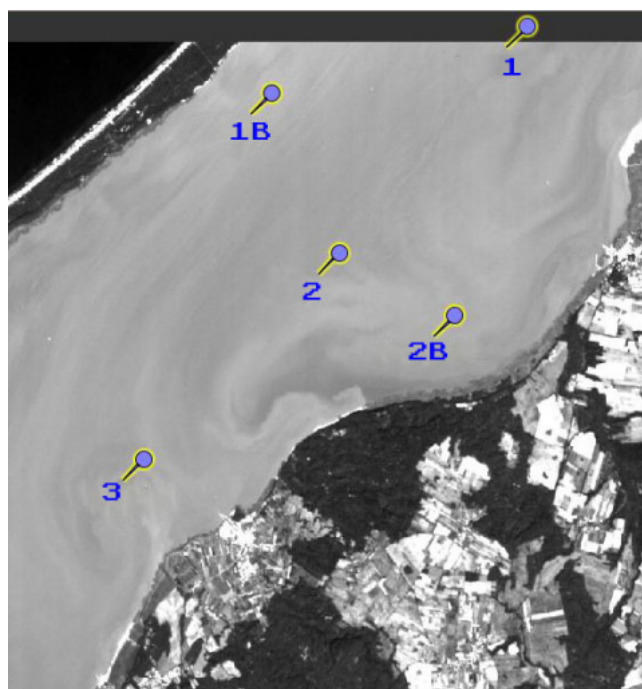
dotychczasowych czynników specyficznych dla danego systemu satelitarnego. Zjawisko występowania szumów na zdjęciach satelitarnych rejestrowanych przez instrument CHRIS jest spowodowane takimi czynnikami jak: błędy konstrukcyjne, zmiana niektórych parametrów instrumentu w wyniku perturbacji podczas startu rakiety, starzenie się instrumentu czy zmiany temperatury podczas pracy na orbicie (Cutter, 2004; Garcia i Moreno, 2004).

Z tego względu konieczne jest ograniczenie lub usunięcie wpływu szumów instrumentalnych. W przypadku danych CHRIS opracowane zostały następujące algorytmy:

- Algorytm autorstwa Garcia i in., (2004);
- Algorytm autorstwa Settle oraz Cutter, który został zaimplementowany w programie HDFClean V2 i udostępniony na stronie internetowej ESA ([https://earth.esa.int/web/guest/content?p\\_r\\_p\\_564233524\\_assetIdentifier=hdfclean-v2-4409](https://earth.esa.int/web/guest/content?p_r_p_564233524_assetIdentifier=hdfclean-v2-4409));
- Algorytm autorstwa Gómez-Chova i in., (2008), który został zaimplementowany w oprogramowaniu BEAM/Visat w narzędziu CHRIS/PROBA Toolbox. Znaczącym jest, iż może on być stosowany również do zdjęć pochodzących z innych sensorów.

W niniejszej pracy przed wykonaniem korekcy atmosferycznej zdjęć satelitarnych CHRIS w celu ograniczenia wpływu szumów instrumentalnych zastosowano algorytm Gómez-Chova i in. (2008), którego zastosowanie jest wymagane przez oprogramowanie BEAM/Visat przed przystąpieniem do wykonania korekcy atmosferycznej. Program BEAM/Visat uniemożliwia przeprowadzenie korekcy atmosferycznej zdjęcia, które nie zostało poddane działaniu algorytmu korekcy szumów.

Naziemne pomiary spektralne zostały przeprowadzone przez Norweski Instytut Badań Wody NIVA podczas kampanii w projekcie VISLA („System of the environmental and spatial information as the background for the sustainable management of the Vistula Lagoon ecosystem”, projekt dofinansowany z Polsko-Norweskiego Funduszu Badań Naukowych). Zarówno pomiary naziemne, jak i satelitarne zostały wykonane w 18 sierpnia 2008 r. Zobrazowanie satelitarne wykonano w trybie „Water” o godz. 9:22 UTC (11:22 czasu lokalnego), natomiast pomiary naziemne prowadzono w godzinach 9–17, a w przypadku punktów wykorzystanych w pracy były to godziny 10–14:30 (tabela 1). Można zatem stwierdzić, iż zachowana jest spójność czasowa przeprowadzenia pomiarów. Różnice w wynikach pomiarów naziemnego i satelitarnego wynikające ze zmienności stanu wody oraz atmosfery w czasie są niewielkie. Co oczywiste, upływ czasu wiąże się ze zmianami położenia i wymieszania mas wody, cząstek powietrza czy aerozoli atmosferycznych, co ma wpływ na wynik pomiaru. Pomiary naziemne zostały przeprowadzone w kilku lokalizacjach Zalewu Wiślanego. Stanowiska „2”, „2B” oraz „3” można było znaleźć na każdym z dostępnych zdjęć satelitarnych (wykonanych pod różnymi kątami), patrz tabela 1 i ryc. 1.



Ryc.1 Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych na wodach Zalewu Wiślanego.

Fig. 1 Location of in situ measurement positions on Vistula Lagoon.

Tabela 1. Tabela 1 Współrzędne geograficzne stanowisk pomiarów naziemnych wykorzystanych w pracy.

Table 1. In situ measurement positions' geographical coordinates.

position	latitude	longitude	time
1	54,40648 N	19,65033 E	11:00
1B	54,40027 N	19,5638 E	12:00
2	54,37063 N	19,56837 E	13:00
2B	54,36638 N	19,61607 E	10:00
3	54,34972 N	19,4843 E	14:30

## Metodyka badań

W niniejszej pracy wykorzystano dwie bezwzględne, złożone metody korekcy atmosferycznej – komercyjnie udostępniany model ATCOR (Richter, 1996) oraz algorytm autorstwa L. Guantera i in. (2005), zaimplementowany w darmowym środowisku BEAM/Visat (<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/>). Oba zastosowane w pracy algorytmy różnią się zarówno w podejściu do rozwiązania problemu korekcy atmosferycznej, jak i w zakresie stosowanych modeli atmosfery.

ATCOR 2, wykorzystany w niniejszej pracy, bazuje na modelu albedo planetarnego układu Ziemia-Słońce. Przy jego wykorzystaniu możliwe jest określenie wielkości rozpraszania Rayleigha. Modele tzw. atmosfer standardowych zostały skompilowane za pomocą kodów transferu radiacyjnego MODTRAN 2 i SENSAT 5 (Richter, 1996).



Genezą powstania algorytmu L. Guantera i in., dedykowanego specjalnie dla obrazów CHRIS, jest kombinacja metod linii empirycznej (wylczenie parametrów atmosfery oraz współczynników kalibracyjnych CHRIS'a) oraz transferu radiacyjnego. Jedną z najważniejszych zalet algorytmu Guantera i in. jest praca całkowicie niezależna od zewnętrznych źródeł danych, takich jak pomiary naziemne (Guanter i in., 2005).

W procesach przetwarzania danych hiperspektralnych stało się regułą stosowanie kodu MODTRAN 4, ze względu na rygorystyczne podejście autorów kodu do procesów absorpcji i rozpraszania atmosferycznego, klarowne rozgraniczenie między atmosferą oraz zależnościami kątowymi odbicia od obiektu, jak również ze względu na jego wysoką rozdzielczość spektralną (do  $1 \text{ cm}^{-1}$ ). Algorytm Guantera i in. używa kodu transferu radiacyjnego 6S dla symulacji modeli atmosferycznych, gdyż jest szybszy a wyjściowa rozdzielczość spektralna jest wystarczająca w przypadku danych CHRIS/PROBA (Guanter i in., 2005).

Algorytm opracowany przez Guantera i in. (2005) został opracowany specjalnie do zobrazowań pochodzących z instrumentu CHRIS. ATCOR jest natomiast bardziej uniwersalnym programem stosowanym dla danych satelitarnych rejestrowanych przez różne instrumenty wielo-, super- i hiperspektralne, standardowa wersja modułu zawiera wiele definicji różnych sensorów satelitarnych (m.in. LANDSAT TM, SPOT, IRS, QUICK-BIRD, IKONOS).

Moduł ATCOR wyróżnia się ponadto możliwością wykonania kalibracji naziemnej modelu. Polega ona na uwzględnieniu współczynnika odbicia powierzchni Ziemi, uzyskanego na podstawie naziemnych pomiarów spektralnych, w równaniach korekcji atmosferycznej. Do przeprowadzenia korekcji atmosferycznej z uwzględnieniem kalibracji naziemnej można wykorzystać dane pomiarowe z jednego lub dwóch stanowisk. W ten sposób można uzyskać skorygowane zdjęcie, wolne od wpływu atmosfery, o wiarygodnych wartościach odbicia spektralnego (zależnych od jakości wprowadzonych danych naziemnych). Obszerniejszy opis działania kalibracji naziemnej w module ATCOR dostępny jest w literaturze dotyczącej ATCOR, m.in. Richter (1996), lub na stronach internetowych ([http://www.rese.ch/products/atcor/atcor\\_paper.html](http://www.rese.ch/products/atcor/atcor_paper.html)).

W celu dokonania analizy możliwości, jakie dają obydwa programy wykonano następujące warianty korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych CHRIS:

- korekcja atmosferyczna w środowisku BEAM/Visat,
- korekcja atmosferyczna w środowisku ATCOR bez kalibracji naziemnej,
- korekcja atmosferyczna w środowisku ATCOR z kalibracją naziemną (pomiar naziemny w jednym punkcie),
- korekcja atmosferyczna w środowisku ATCOR z kalibracją naziemną (pomiar naziemny w dwóch punktach).

## Analiza wyników

Przeprowadzono analizę polegającą na porównaniu wyników pomiarów naziemnych z wynikami korekcji atmosferycznej wykonanej w kilku wariantach w programach BEAM/Visat oraz ATCOR.

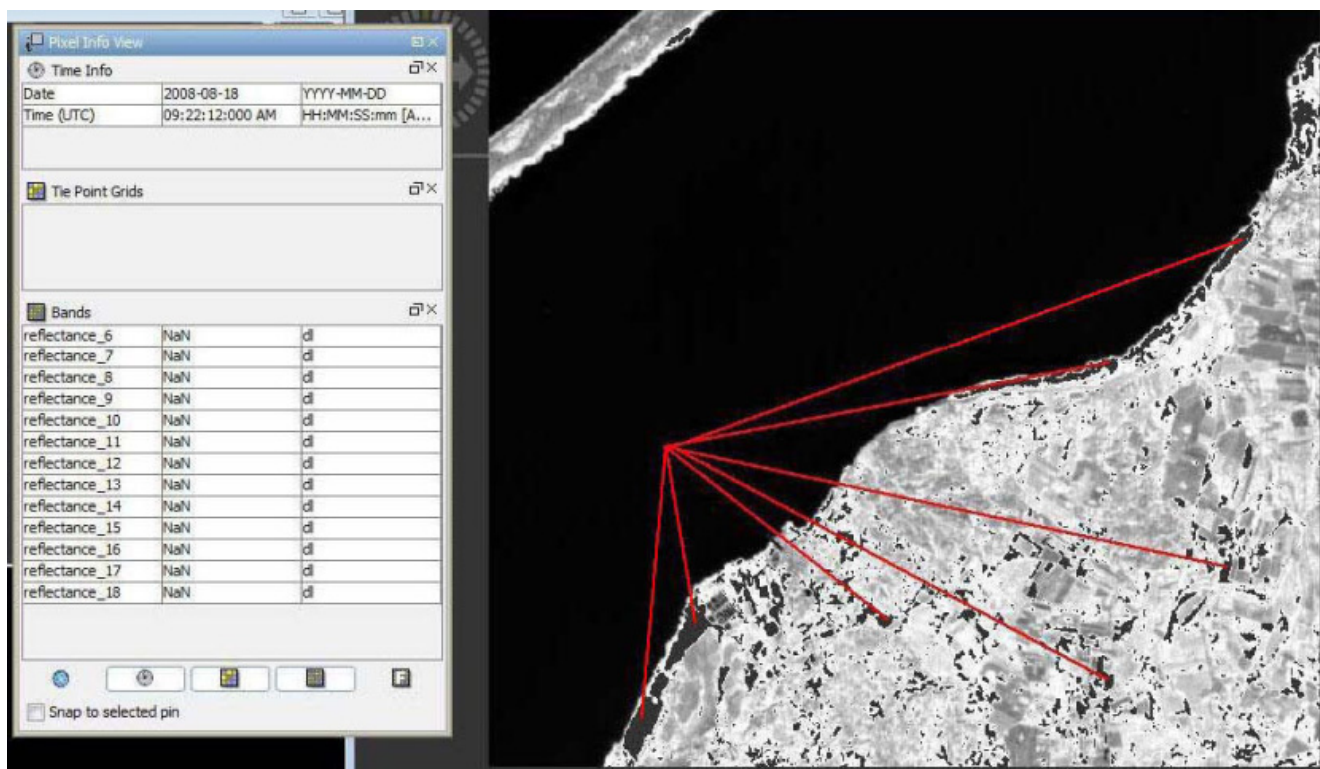
Od początku pracy instrumentu CHRIS konstruktorzy i odbiorcy danych mieli duże problemy z kalibracją spektralną tego sensora. Cutter i Johns (2005) zasugerowali, iż w związku z wprowadzonymi zmianami kalibracji spektralnej w niektórych z 5-ciu trybów obrazowania instrumentu, niektóre piksele mogą być zbyt „nasycone”, tj. ich wartości będą niewłaściwe. W przypadku analizowanej sceny satelitarnej również wystąpiły takie piksele (wykazujące znacząco wyższe wartości radiancji niż piksele otaczające, co miało miejsce w zakresie 781,3–872,7 nm, czyli kanałach 16-17) i zostały oznaczone przez dostawcę danych maską „spectrum saturated”. Pokryte tą maską piksele nie są brane pod uwagę w procesie korekcji atmosferycznej w oprogramowaniu BEAM/Visat. Po jej przeprowadzeniu „nasycone” piksele zostały oznaczone jako „NaN” (Ryc. 2), natomiast pozostałe zostały zapisane w bezwymiarowych wartościach odbicia spektralnego. Mimo, iż część pikseli obrazu nie miała wartości odbicia spektralnego, prawidłowo zapisanych pikseli było wystarczająco dużo, aby przeprowadzić dalsze analizy, ponadto obszar wód Zalewu Wiślanego był wolny od tego rodzaju pikseli. Występowały one tylko na obszarze łąd.

Korekcja atmosferyczna wykonana za pomocą algorytmu ATCOR z kalibracją naziemną uwzględniającą dwa stanowiska pomiarowe również dała obrazy nieprzydatne do dalszych analiz. Kanały spektralne od W2 do W8 nie zostały w ogóle zapisane, natomiast w innych występuje „ramka” (Rys. 3). W związku z powyższym, w analizach wzięto pod uwagę zdjęcie skorygowane w ATCOR z kalibracją naziemną modelu wykorzystującą jedynie jedno stanowisko. Dostępnych było 5 równoważnych stanowisk, losowo wybrano stanowisko o oznaczeniu „2B”.

Najlepszym sprawdzianem efektywności działania obydwu algorytmów jest porównanie wyników korekcji atmosferycznej z danymi pochodzącymi z pomiaru naziemnego. Dlatego też dla wszystkich stanowisk, jakie znalazły się w obszarze zdjęcia wykonano charakterystyki spektralne. Były to dwie krzywe spektralne uzyskane na podstawie zdjęć satelitarnych poddanych:

- Korekcji atmosferycznej przeprowadzonej w module ATCOR bez kalibracji naziemnej (w kolorze niebieskim);
- Korekcji atmosferycznej przeprowadzonej w środowisku BEAM VISAT (w kolorze czerwonym).

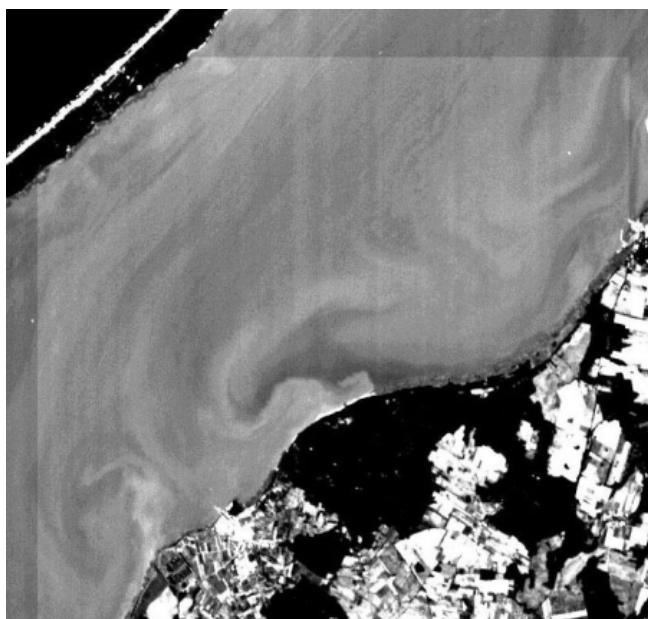
Trzecia krzywa spektralna (naznaczona na zielono) powstała na podstawie pomiarów naziemnych wykonanych przez NIVA. Czwarta krzywa spektralna powstała w wyniku analizy zdjęcia poddanego korekcji atmosferycznej z kalibracją naziemną w module ATCOR i na wykresie została zaznaczona na fioletowo.



Ryc. 2. Ilustracja „maski”, gdzie zamiast wartości odbicia zapisane zostało „NaN”.

Fig. 2 Illustration of „a mask”, where instead of reflectance values annotation „NaN” was recorded.

Naziemne pomiary spektralne z reguły wykonuje się w nadirze, bez uwzględnienia zależności wartości odbicia spektralnego od kąta pomiaru (Guanter i in., 2005), tak też było w przypadku danych wykorzystanych w doświadczeniu.



Ryc. 3. „Ramka” widoczna na zdjęciu po korekcji z kalibracją uwzględniającą dane z dwóch stanowisk naziemnych.

Fig. 3. „Frame” visible on an image after atmospheric correction in ATCOR with model ground calibration based on two in situ positions.

Dla badanego zdjęcia nadirowego przeprowadzono analizę wyników dla pięciu punktów pomiarowych (1, 1B, 2, 2B, 3). W celu dokonania obiektywnej oceny i porównania danych uzyskanych w doświadczeniu z danymi referencyjnymi (pochodzącymi z naziemnych pomiarów spektralnych zebranych przez NIVA) przeprowadzono analizę korelacji liniowej oraz błędów MBE (Mean Bias Error – błąd średni), RMSE (Root Mean Square Error – błąd średniokwadratowy) i MAGE (Mean Absolute Gross Error – średni błąd całkowity), liczonych według następujących wzorów:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dane(i)_{pomiarowe(ATCOR,BEAM)} - dane(i)_{referencyjne(NIVA)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (dane(i)_{pomiarowe(ATCOR,BEAM)} - dane(i)_{referencyjne(NIVA)})^2}$$

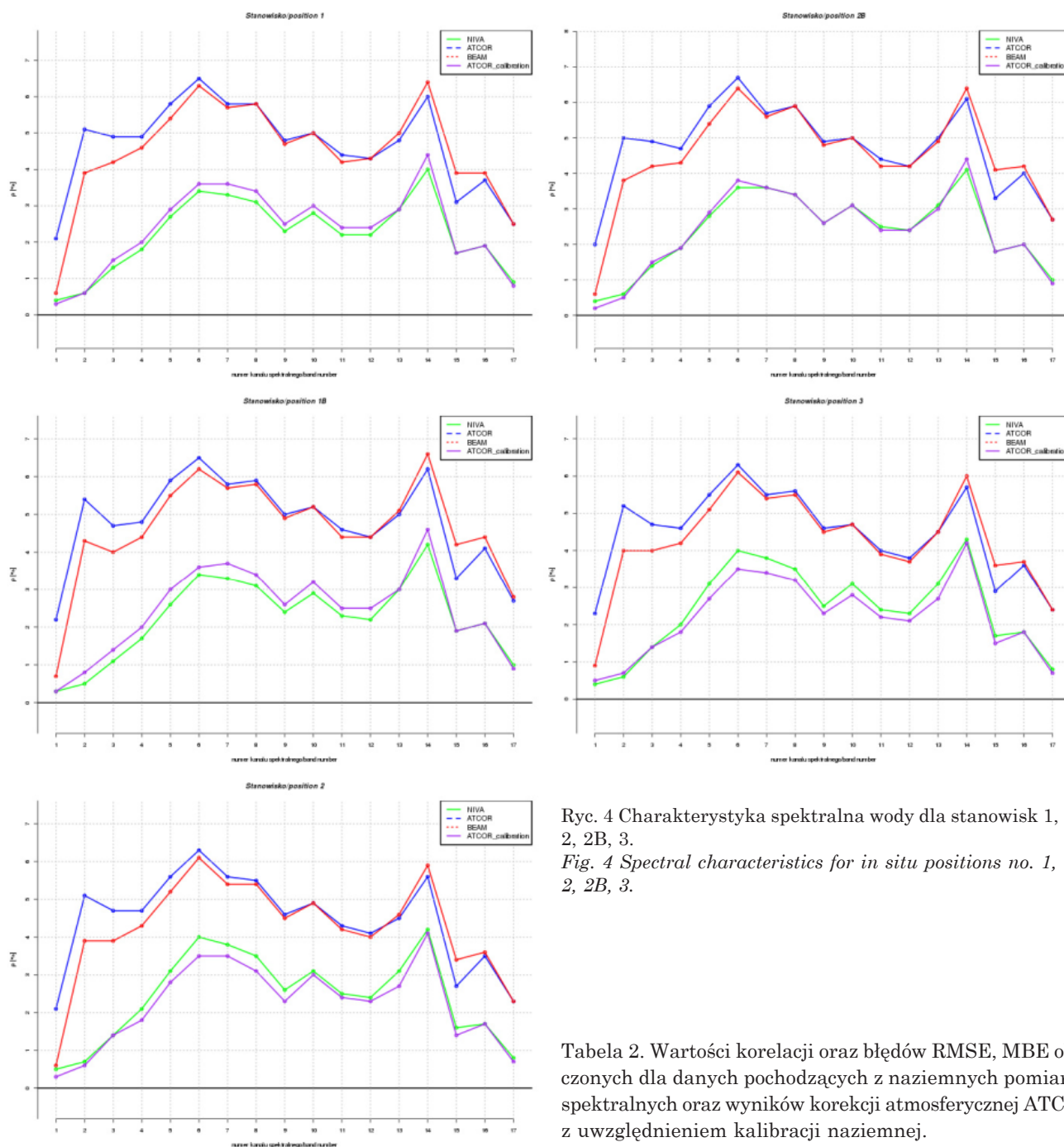
$$MAGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |dane(i)_{pomiarowe(ATCOR,BEAM)} - dane(i)_{referencyjne(NIVA)}|$$

Gdzie:

$n$  – liczba kanałów spektralnych;

$dane(i)_{pomiarowe}$  – wartość odbicia dla danego kanału spektralnego pomierzona na zdjęciu poddanym korekcji atmosferycznej;

$dane(i)_{referencyjne}$  – wartość odbicia spektralnego dla danego kanału spektralnego pomierzona na powierzchni Ziemi (dane z pomiaru spektralnego).



Ryc. 4 Charakterystyka spektralna wody dla stanowisk 1, 1B, 2, 2B, 3.

Fig. 4 Spectral characteristics for in situ positions no. 1, 1B, 2, 2B, 3.

Tabela 2. Wartości korelacji oraz błędów RMSE, MBE obliczonych dla danych pochodzących z naziemnych pomiarów spektralnych oraz wyników korekcji atmosferycznej ATCOR z uwzględnieniem kalibracji naziemnej.

Table 2. MBE, RMSE errors and correlation derived for in situ spectral measurements and results of atmospheric correction performed in ATCOR with ground model calibration.

### Porównanie wyników naziemnych pomiarów spektralnych oraz korekcji atmosferycznej wykonanej w ATCOR z uwzględnieniem kalibracji naziemnej

W przypadku stanowisk 1 i 1B krzywe spektralne reprezentujące dane uzyskane po korekcji atmosferycznej oraz dane uzyskane na podstawie pomiarów referencyjnych NIVA mają bardzo podobny przebieg, tj. dla stanowiska 1 w kanałach 3–12 oraz 14 krzywa spektralna powstała w oparciu o zdjęcie satelitarne poddane korekcji atmosferycznej jest położona wyżej niż krzywa referencyjna NIVA (różnica ok. 0,2%–0,3%

position	ATCOR calibration			
	correlation	MBE	RMSE	MAGE
1	1,00	0,14	0,20	0,16
1b	0,99	0,21	0,26	0,22
2	0,99	-0,21	0,25	0,21
2b	1,00	0,01	0,12	0,08
3	0,99	-0,19	0,26	0,22
min	0,99	-0,21	0,12	0,08
max	1,00	0,21	0,26	0,22
mean	0,99	-0,01	0,22	0,18



odbicia spektralnego), dla stanowiska 1B w kanałach 2–12 oraz 14 krzywa spektralna powstała w oparciu o zdjęcie satelitarne poddane korekcji atmosferycznej jest położona wyżej niż krzywa referencyjna NIVA (różnica ok. 0,2% – 0,4% odbicia spektralnego); na stanowisku 1 w kanale 1 i 17 oraz na stanowisku 1B w kanale 17 krzywa spektralna związana z danymi satelitarnymi poddanymi korekcji atmosferycznej znajduje się niżej niż krzywa spektralna referencyjna. Natomiast w kanałach 13, 15 i 16 krzywe spektralne dla obydwu stanowisk się pokrywają.

Na stanowisku 3 przebieg krzywych spektralnych wygląda następująco: w kanałach 3, 16 krzywa spektralna reprezentująca dane powstałe w wyniku korekcji atmosferycznej zdjęcia satelitarnego w przybliżeniu pokrywa się z krzywą powstałą w oparciu o naziemne dane referencyjne. W kanałach 1 i 2 krzywa spektralna reprezentująca dane satelitarne po korekcji atmosferycznej znajduje się wyżej (ok. 0,1% odbicia spektralnego) niż krzywa związana z pomiarami naziemnymi. W zakresie kanałów od 4 do 13 oraz w kanale 15 i 17 krzywa spektralna powstała w oparciu o wyniki korekcji atmosferycznej zdjęcia satelitarnego jest położona niżej niż referencyjna krzywa spektralna NIVA (różnice ok. 0,2% – 0,4% odbicia spektralnego).

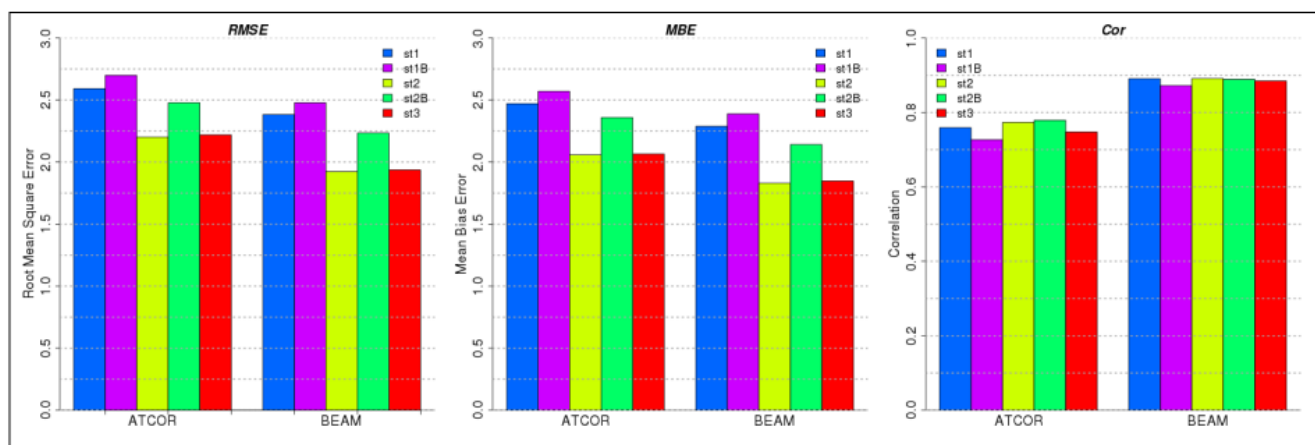
W przypadku stanowiska pomiarowego 2B przebieg krzywej spektralnej powstałej w oparciu o wyniki korekcji atmosferycznej zdjęcia satelitarnego jest najbardziej zbliżony do krzywej spektralnej powstałej na podstawie naziemnych pomiarów referencyjnych. Większe odstępstwa zauważyć można dla kanałów 1, 6 i 14 (różnice ok. 0,1-0,2% odbicia spektralnego), natomiast w przypadku pozostałych kanałów obydwie krzywe się pokrywają (kanały 4, 7–10, 12, 15, 16) lub różnica jest bardzo niewielka, ok. 0,1% odbicia spektralnego (kanały 2, 3, 5, 11, 13, 17).

Na stanowisku 2 w przypadku kanałów 3 i 16 krzywa spektralna powstała w oparciu o wyniki korekcji

atmosferycznej zdjęcia satelitarnego pokrywa się z referencyjną krzywą spektralną NIVA. Natomiast w przypadku pozostałych kanałów krzywa spektralna związana z danymi satelitarnymi poddanymi korekcji atmosferycznej jest położona niżej niż referencyjna krzywa spektralna (różnice od ok. 0,1% do 0,4% odbicia spektralnego).

Korelacja dla wszystkich stanowisk oscyluje w granicach od 0,99 do 1. Świadczy to o niemal doskonałej zależności współliniowej krzywej spektralnej otrzymanej na podstawie zdjęcia poddanego korekcji atmosferycznej ATCOR z kalibracją naziemną oraz krzywej spektralnej powstałej w oparciu o dane referencyjne. Nie oznacza to jednak, że krzywe się w pełni pokrywają, o czym świadczą obliczone błędy MBE i RMSE. Wartości błędów MBE i RMSE (odpowiednio maksymalnie  $\pm 0,21$  oraz 0,26% odbicia spektralnego) są dowodem na bardzo wysoką zgodność danych uzyskanych z korekcji atmosferycznej z kalibracją oraz danych referencyjnych. Ujemny znak średniej arytmetycznej błędu MBE wskazuje na to, iż dane powstałe wyniku korekcji atmosferycznej w ATCOR z kalibracją były średnio minimalnie zaniżone w stosunku do danych referencyjnych. Nie mniej, wariant korekcji atmosferycznej z kalibracją modelu na podstawie danych naziemnych można uznać za niemal bezbłędny. Te przesłanki skłaniają do założenia, iż najprawdopodobniej cała powierzchnia zdjęcia satelitarnego poddanego temu wariantowi korekcji atmosferycznej równie dobrze przybliża wartości odbicia spektralnego, jakie można by zaobserwować *in situ*.

Warto zaznaczyć, iż dla stanowiska 2B obserwujemy najniższe wartości błędów oraz doskonałą korelację w odniesieniu do danych referencyjnych. Jest to zapewne związane z tym, iż przy dokonywaniu korekcji atmosferycznej w module ATCOR, proces kalibracji naziemnej został przeprowadzony przy zastosowaniu danych pomiarowych pochodzących właśnie z tego stanowiska.



Ryc. 5 Wartości korelacji oraz błędów RMSE, MBE obliczonych dla wyników korekcji atmosferycznej wykonanej za pomocą ATCOR oraz algorytmu L. Guantera (BEAM/Visat) dla pięciu stanowisk pomiarowych naziemnych.

Fig. 5 MBE, RMSE errors and correlation derived for five *in situ* spectral measurements and results of atmospheric correction performed in ATCOR and BEAM/Visat framework.

Tabela 3 Wartości korelacji oraz błędów RMSE, MBE obliczonych dla wyników korekcji atmosferycznej wykonanej za pomocą ATCOR oraz algorytmu L. Guantera (BEAM) dla pięciu stanowisk pomiarów naziemnych.

Table 3 MBE, RMSE errors and correlation derived for five in situ spectral measurements and results of atmospheric correction performed in ATCOR and BEAM/Visat framework.

	ATCOR			BEAM		
position	correlation	MBE	RMSE	correlation	MBE	RMSE
1	0,76	2,47	2,59	0,89	2,29	2,38
1b	0,73	2,57	2,70	0,87	2,39	2,48
2	0,77	2,06	2,20	0,89	1,83	1,92
2b	0,78	2,36	2,48	0,89	2,14	2,23
3	0,75	2,06	2,22	0,88	1,85	1,94
min	0,73	2,06	2,20	0,87	1,83	1,92
max	0,78	2,57	2,70	0,89	2,39	2,48
mean	0,76	2,30	2,44	0,89	2,10	2,19

### Porównanie wyników naziemnych pomiarów spektralnych oraz korekcji atmosferycznej wykonanej w ATCOR bez kalibracji naziemnej modelu i za pomocą algorytmu L. Guantera i in. (BEAM/Visat)

Krzywe spektralne powstałe na podstawie danych satelitarnych poddanych działaniu dwóch metod korekcji atmosferycznej, tj. algorytmu L. Guantera i in. oraz modułu ATCOR bez kalibracji naziemnej w przypadku każdego stanowiska pomiarowego wykazują zbliżone następujące zachowanie: największe rozbieżności od danych referencyjnych obserwujemy w kanałach 2, 3, 4, 5 i 6 (442,6–561,5 nm) dla obydwu metod, zaś najmniejsze w 1, 14 i 15 dla ATCOR oraz 1, 12, 13 i 17 dla BEAM. W pozostałych kanałach, odchylenia krzywych – powstałych w oparciu o dane satelitarne poddane działaniu dwóch metod korekcji atmosferycznej od krzywej referencyjnej wynoszą od ok. 2% do ok. 2,7% odbicia spektralnego.

Najwyższą korelację zanotowano dla algorytmu L. Guantera i in. (BEAM/Visat), średnio wyniosła ona 0,89. Nieco niższe wartości korelacji notujemy dla wyników korekcji atmosferycznej w ATCOR, średnio 0,76. Takie wartości korelacji świadczą o dużej sile współliniowości danych uzyskanych w wyniku korekcji atmosferycznej wykonanej za pomocą algorytmu L. Guantera i in. lub w ATCOR oraz danych referencyjnych. Wartości błędów MBE oscylowały w granicach 2,06–2,57 (średnia 2,30% odbicia spektralnego) dla ATCOR oraz 1,83–2,39 dla BEAM (średnia 2,10 odbicia spektralnego). Natomiast błędy RMSE przybrały wartości od 2,20 do 2,70 (średnio 2,44% odbicia spektralnego) dla ATCOR oraz od 1,92 do 2,48 (średnio 2,19% odbicia spektralnego) dla BEAM.

Wartości każdej statystyki, dla każdego z pięciu stanowisk pomiarowych są korzystniejsze dla wyników korekcji atmosferycznej wykonanej za pomocą algorytmu L. Guantera i in. Dowodzi to, że w przypadku zdjęcia nadirowego algorytm korekcji atmosferycznej L. Guantera i in. lepiej przybliżył refleksyjność słupa wody, dając wartości bliższe referencyjnym.

Dla wyników obydwu metod korekcji atmosferycznej można zauważyć analogię. Najgorzej wymodelowane są wartości odbicia spektralnego na stanowisku 1B, natomiast najlepiej na stanowiskach 2 i 3. Być może wynika to ze szczytkowego szumu instrumentalnego, jaki pozostał, mimo zastosowania algorytmu ograniczającego jego wpływ.

### Wnioski

1. Najlepsze wyniki korekcji atmosferycznej uzyskano za pomocą algorytmu ATCOR z uwzględnieniem kalibracji modelu wykorzystującej naziemne pomiary spektralne. Uśrednione odchylenie (błąd średni całkowity MAGE) w stosunku do danych referencyjnych na wszystkich stanowiskach naziemnych dla wszystkich kanałów spektralnych wyniosło zaledwie 0,18% odbicia spektralnego;
2. Po przeanalizowaniu przebiegu krzywych spektralnych na wszystkich analizowanych stanowiskach należy stwierdzić, iż algorytm L. Guantera i in. daje lepsze wyniki niż algorytm ATCOR bez uwzględnienia kalibracji naziemnej modelu. W przypadku zdjęcia na-

Tabela 4. Różnice między statystykami uzyskanymi dla metod korekcji atmosferycznej w module ATCOR oraz algorytmu L. Guantera a w BEAM/Visat.

Table 4. Differences in statistics obtained for atmospheric correction methods ATCOR and L. Guantera et al., (2005) algorithm.

position	correlation	MBE	RMSE
1	-0,13	-0,18	-0,21
1b	-0,15	-0,18	-0,22
2	-0,12	-0,23	-0,28
2b	-0,11	-0,22	-0,24
3	-0,14	-0,22	-0,28
min	-0,15	-0,23	-0,28
max	-0,11	-0,18	-0,22
mean	-0,13	-0,21	-0,25



diowego średnie błędów RMSE wyniosły odpowiednio 2,44 i 2,19, średnie błędów MBE odpowiednio 2,30 i 2,10, natomiast korelacja 0,76 i 0,89. Świadczy to o przewadze algorytmu L. Guantera i in. nad algorytmem ATCOR w przypadku analizowanych danych;

3. Należy stwierdzić, że mimo występujących sporadycznie dużych różnic między danymi referencyjnymi a wynikami korekcji atmosferycznej w przypadku obydwu metod, po uśrednieniu odchyłeń dla wszystkich stanowisk i kanałów spektralnych obydwa algorytmy dają wyniki niewiele odbiegające od danych referencyjnych. Wyniki algorytmu L. Guantera i in. zaimplementowanego w programie BEAM od danych referencyjnych NIVA odbiegają średnio o 2,10%, natomiast wyniki uzyskane za pomocą algorytmu ATCOR od danych NIVA odbiegają średnio o 2,30% odbicia spektralnego;

Odchylenie od wartości referencyjnych w granicach 2,10 – 2,30% odbicia są stosunkowo małe. Można przypuszczać, że podobną wydajność korekcji atmosferycznej za pomocą modułu ATCOR czy algorytmu L. Guantera i in. można uzyskać w przypadku innych zdjęć, niż przeanalizowane w niniejszej pracy, ale obecnie algorytm Guantera i in. jest przystosowany jedynie do zdjęć rejestrowanych przez skaner CHRIS.

Wieloaspektowe badania nad oceną dostępnych algorytmów korekcji atmosferycznej oraz możliwościami ich dostosowania do różnych sensorów satelitarnych są jednym z istotniejszych tematów w zakresie teledetekcji satelitarnej ze względu na wpływ prawidłowo wykonanej korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych na dalsze wyniki analiz, prowadzonych na ich podstawie.

## Literatura

- Cracknell A. P., Hayes L., 2007, *Introduction to remote sensing, second edition*, Boca Raton, CRC Press, Taylor&Francis Group, str. 159 – 202
- Cutter M., 2004, *Review of aspects associated with the CHRIS calibration*, Proceedings of 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Włochy
- Cutter M., Johns L., 2005, *CHRIS data products – latest issue*, Proceedings of 3rd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Włochy
- Garcia J.C., Moreno J., 2004, *Removal of noises in CHRIS/Proba images: Application to the SPARC Campaign data*, Proceedings of 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Włochy
- Głowienka E., 2008, *Porównanie metod korekcji atmosferycznej dla danych z sensorów hiperspektralnych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 18, str. 121 – 130
- Gómez-Chova L., Alonso L., Guanter L., Camps-Valls G., Calpe J., Moreno J., 2005, *Correction of systematic spatial noise in push-broom hyperspectral sensors: application to CHRIS/PROBA images*, Applied Optics, vol. 47, no. 28
- Guanter L., Alonso L., Moreno J., 2005, *A Method for the Surface Reflectance Retrieval From PROBA/CHRIS Data Over Land: Application to ESA SPARC Campaigns*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 12
- Jensen R., *Introductory Digital Image Processing – A Remote Sensing Perspective*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, second edition,
- Osińska-Skotak K., 2007, *Znaczenie korekcji atmosferycznej w procesie przetwarzania zdjęć satelitarnych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 17b, str. 577 – 590
- Richter R., 1996, *Spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm*, International Journal of Remote Sensing, vol. 17, str. 56 – 64
- Sharma A.R., Badarinath K.V.S., Roy P.S., 2009, *Comparison of ground reflectance measurement with satellite derived atmospherically corrected reflectance: A case study over semi-arid landscape*, Advances in Space Research, vol. 43.1 str. 56 – 64
- Song C., Woodcock C. E., Seto K. C., Lenney M. P., Macomber S A., 2001, *Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?*, Remote Sensing Of Environment, vol. 75, str. 230 – 240
- Tachiiri K., 2005, *Calculating NDVI for NOAA/AVHRR data after atmospheric correction for extensive images using 6S code: A case study in the Marsabit District, Kenya*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 59, str. 103 – 114
- Wu J., Wang D, Bauer M. E., 2005, *Image-based atmospheric correction of QuickBird imagery of Minnesota Cropland*, Remote Sensing of Environment, vol. 99. str. 315 – 325



**Mgr inż. Lech GAWUĆ** jest doktorantem Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Tematem pracy dyplomowej magisterskiej była „Analiza metod korekcji atmosferycznej”. Zajmuje się badaniem antropogenicznych strumieni ciepła na podstawie zdjęć satelitarnych oraz zastosowaniem teledetekcji do oceny sprawdzalności modelu meteorologicznego GEM AQ.



**Dr hab. inż. Katarzyna OSIŃSKA-SKOTAK** jest absolwentką Wydziału Geodezji i Kartografii (spec. Fotogrametria i Kartografia) oraz Wydziału Inżynierii Środowiska (spec. Ochrona Atmosfery i Meteorologia Techniczna) Politechniki Warszawskiej. W 2001 r. uzyskała z wyróżnieniem stopień doktora, a w roku 2011 stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej geodezja i kartografia (spec. teledetekcja i fotogrametria). Obecnie jest kierownikiem Zakładu Fotogrametrii, Teledetekcji i SIP na Wydziale Geodezji i Kartografii i Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zaawansowanymi technikami teledetekcji i GIS, w szczególności w zakresie ich wykorzystania w badaniach środowiska (m.in. w badaniach jakości wód śródlądowych, w planowaniu przestrzennym, w badaniach zjawiska miejskiej wyspy ciepła). Posiada duże doświadczenie w zakresie przetwarzania obrazów satelitarnych i korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych, opracowała m.in. metodę korekcji atmosferycznej jednokanałowych zdjęć termalnych, metodę obliczania temperatury powierzchni Ziemi na podstawie jednokanałowych zdjęć termalnych oraz zaproponowała metodykę przetwarzania zdjęć superspektralnych do oceny stanu wód śródlądowych. Odbyła staże naukowe, m.in. w ramach programu TEMPUS w Belgii na Uniwersytecie w Gent (1996) oraz we Francji w GDTA w Toulouse (1997), w ramach stypendium Fundacji im. Nowickiego i Fundacji DBU w Niemczech na Uniwersytecie we Freiburgu (1998-1999) oraz w Niemieckim Centrum Kosmicznym w Oberpfaffenhofen k. Monachium (1999), w Szwecji na KTH (1999). Współzałożycielka Stowarzyszenia „Środowisko dla Środowiska”. Członek zespołu specjalistów przy Sekcji Teledetekcji Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych przy Prezydium PAN oraz członek Sekcji Fotogrametrii i Teledetekcji Komitetu Geodezji przy Prezydium PAN.