

Badanie wrażliwości modelu korekcji atmosferycznej 6S na zmianę parametrów wejściowych

The analysis of sensibility to the change of the input parameters in the 6S model

Jędrzej BOJANOWSKI

The input data necessary to correct the atmospheric effect are often of a very difficult access and their precision is quite small. For this reason, it is rather significant to know how each of the input parameters influences the atmospheric correction process and the output image.

In the present study there has been conducted an analysis of sensibility to the change of the input parameters in the 6S model (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), which is one of the atmospheric correction algorithms. There have been analysed four input parameters characterizing atmospheric conditions depending on when and where the image was taken:

- 1) atmospheric model including air temperature, pressure, water vapor density and ozone density on 34 levels,
- 2) aerosol model – volumic percentage of different types of molecules,
- 3) meteorological visibility,
- 4) ground altitude.

To carry out this research, the Landsat ETM+ image has been used, on which six testing fields have been marked with different kind of land cover.

Investigating the sensibility of the model to the change of the input parameters depending on the test field and the spectral band required carrying out the correction on various sets of parameters. 72.000 atmospheric corrections have been used on the input parameters, the parameters being all possible combinations of the used:

- 1) atmospheric models – standard midlatitude summer, three atmospheric profiles from radiosonde data, no gaseous absorption,
- 2) aerosols models – no aerosols, continental, maritime, urban,
- 3) visibilities [km] – 10, 20, 23, 30, 38, 40, 50, 75, 100, 200,
- 4) ground altitudes [m] – 0, 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000,
- 5) spectral bands of Landsat ETM+ – 1, 2, 3, 4, 5, 7,
- 6) test fields – water, coniferous forest, leafy forest, grassland, bare soil, build-up area.

Next, on the basis of the images that were the result of the atmospheric corrections, for each test field and spectral band a regression model has been created, the independent variables of which were the input parameters of the 6S algorithm: discrete – atmospheric and aerosol models, as well as continuous – visibility and ground altitude, and the dependent variable – the arithmetic mean of the spectral reflectance of the test field. In order to define the importance of the parameters, the *eta squared* and *partial eta squared* ratios have been used, calculated on the basis of the regression models.

Thus the importance of the input parameters in the function of wavelength and digital number of the input image were obtained. The main conclusions could be put down as follows:

- 1) The importance of the input parameters depends above all on wavelength, and, not as significantly, on the digital number.
- 2) The significance of the aerosol models is inversely proportional to wavelength.
- 3) The significance of the inclusion of gasses in the atmospheric models is directly proportional to wavelength.
- 4) The influence of visibility is small, and it is biggest in the channels four and five.
- 5) Ground altitude between 0 and 2000 m is of no influence to the model.
- 6) The mistake that can be made erroneously introducing the input parameters may cause the greatest differences in spectral reflectance for pixels with big digital numbers – for bare soil, up to 25%.
- 7) In average, the most significant error occurs if the wrong atmospheric profile is introduced (4–10%), slightly less for aerosol models (up to 6%).
- 8) The standard deviation of the spectral reflectance of test fields is mostly influenced by the atmosphere, then aerosols and visibility.

Wstęp

Złożoność wpływu gazów i aerozoli w atmosferze na przechodzącą falę elektromagnetyczną powoduje, że algorytmy do przeprowadzania korekcji atmosferycznych są skomplikowane i wymagają wielu parametrów wejściowych dotyczących stanu atmosfery w miejscu i chwili wykonywania zdjęcia. Dostęp do tych danych jest często bardzo trudny, a ich dokładność niewielka. Z tego powodu interesujące jest, w jakim stopniu dany parametr wpływa na proces korekcji. Taka informacja potrzebna jest w przypadku, kiedy nie dysponuje się dokładnymi wynikami pomiarów aerometrycznych i korzysta się z wartości uśrednionych – dostępnych zazwyczaj jako standardowe opisy warunków atmosferycznych. Ponadto, pozwoli ona na oszacowanie, jakiego rzędu błąd może spowodować niepodanie któregoś z parametrów wejściowych.

W pracy przedstawione jest oszacowanie wrażliwości modelu korekcji atmosferycznej na zmianę parametrów wejściowych, m.in. koncentracji gazów, zawartości aerozoli i widoczności. Do analiz wykorzystywany jest udostępniany bezpłatnie model 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum). Mimo że dostępny jest kod źródłowy tego programu¹ oraz jego obszerny opis (Vermote, 1997), algorytm potraktowany jest jako model czarnej skrzynki i badany jest za pomocą analizy statystycznej zestawienia parametrów wejściowych i obrazów wynikowych. Korekcję atmosferyczną wykonuje się zazwyczaj dla całego zdjęcia, jednak w tej pracy analizy prowadzone są wyłącznie na obszarach poligonów testowych, w celu uszczegółowienia informacji o wrażliwości modelu o zależność z wartościami jaskrawości pikseli obrazu wejściowego.

Teren badań

Do badania wrażliwości modelu 6S wykorzystano poligony testowe utworzone przez J. Bojanowskiego i St. Lewińskiego (Bojanowski, Lewiński, 2006) na zdjęciu z satelity Landsat ETM+ z 6 maja 2002 roku. Zestawienie średnich arytmetycznych i odchyłeń standardowych pól przedstawia tabela 1. Do analiz wykorzystano kanały 1, 2, 3, 4, 5, 7.

Parametry wejściowe modelu 6S

J. Bojanowski i St. Lewiński (Bojanowski, Lewiński, 2006) szczegółowo omawiają zestawy parametrów wejściowych wymagane przez model 6S. Zaznaczają również, iż istnieje możliwość wyboru modeli standardowych lub definiowania własnych. Poniżej zostaną scharakteryzowane modele utworzone przez autora tego artykułu na podstawie danych pochodzących z pomiarów oraz te z modeli standardowych, które zostały wykorzystane w pracy, a ich poznanie jest konieczne do interpretacji wyników dalszych analiz.

Parametry niezmiennie

Parametry wejściowe modelu 6S dotyczące geometrii układu Ziemia – Słońce – satelita, detektora oraz typu wprowadzanych danych były identyczne dla wszystkich przeprowadzonych korekcji. Informacje o nich znajdują się zawsze w metadanych dołączonych do obrazu. Zatem analizowanie wrażliwości modelu na ich zmianę jest niepotrzebne.

Modele atmosfery

W pracy wykorzystano następujące modele atmosfery:

Brak absorpcji gazowej

Jest to standardowy model atmosfery dostępny w 6S. Zakłada on brak pary wodnej i ozonu w atmosferze. Wykorzystano go do analizy wrażliwości modelu oraz sprawdzenia wpływu innych czynników, które osłabiają promieniowanie.

Model standardowy szerokości umiarkowanych – letni

Ten model został użyty jako najlepszy opis stanu atmosfery w chwili i miejscu wykonywania zdjęcia, który można wybrać w 6S jako standard dla tego położenia geograficznego i pory roku. Wykonując korekcję 6S zdjęcia, nie dysponując danymi o stanie atmosfery, powinno się użyć tego właśnie modelu atmosfery.

Modele własne

W pracy wykorzystano trzy pochodzące z pomiarów balonowych profile atmosfery, wykonane 6 maja 2002 roku o godzinie 12:00 w Legionowie, Łebie i Wrocławiu. Zakłada się, że pomiar dokonany w Legionowie jest reprezentatywny dla całego analizowanego obszaru. Użyto go w zestawie parametrów wejściowych do najlepszej, jaką autor mógł wykonać, korekcji 6S – zwanej dalej optymalną.

Pozostałe dwa modele, z Łeby i Wrocławia, użyto do badania czułości algorytmu 6S na zmianę parametrów wejściowych. Cenną informacją będzie odpowiedź na pytanie, jak dużą różnicę w korekcji obrazu uzyskanoby, nie posiadając pomiarów balonowych z Legionowa, przez co konieczne byłoby zastosowanie profili atmosfery z odległych o kilkaset kilometrów stacji pomiarowych.

Najważniejsze dla korekcji atmosferycznej są zawartości gazów w atmosferze. Rysunek 1 przedstawia zawartości pary wodnej w czterech użytych profilach do wysokości 8 kilometrów. Powyżej tej wysokości, zawartość pary wodnej jest bliska 0 g/m³ dla wszystkich czterech profili.

Modele aerozoli

W badaniu wykorzystano cztery standardowe – dostępne w 6S – modele aerozoli: brak aerozoli, model kontynentalny, model morski oraz model miejski. Prawdopodobnie najlepszym opisem stanu faktycznego jest mo-

¹ <http://www.ltid.inpe.br/dsr/mauro/6s>

Tabela 1. Średnie arytmetyczne X i odchylenia standardowe σ jaskrawości pikseli w obrębie poligonów testowych.
 Table 1. Arithmetical averages (X) and standard deviations (σ) of digital numbers in test fields.

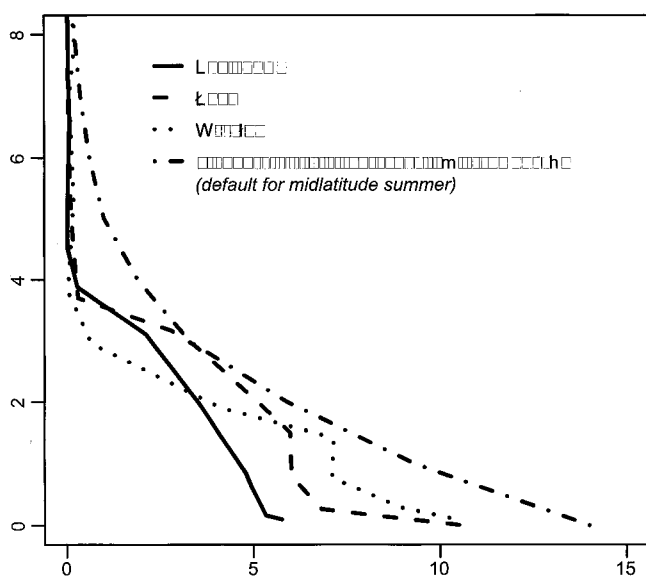
Pole testowe Test field	TM1		TM2		TM3		TM4		TM5		TM7	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
Woda Water	74,5	1,7	50,2	1,2	39,8	1,7	17,4	0,7	14,3	1,1	12,7	1,6
Las iglasty Coniferous forest	74,7	1,8	52,7	1,4	43,2	2,1	49,4	1,7	50,6	2,9	30,1	2,5
Teren zabudowany Build-up area	89,9	5,9	71,2	6,5	70,0	11,0	61,2	8,8	80,1	11,8	62,3	12,7
Las liściasty Deciduous forest	74,6	1,6	56,8	1,5	41,9	1,8	80,0	3,6	71,0	2,9	35,7	1,9
Łąka Meadow	78,2	2,0	62,9	1,7	48,5	2,8	114,8	8,0	85,7	4,4	40,6	3,4
Odkryta gleba Bare soil	110,4	2,8	101,5	3,7	122,4	6,2	84,0	2,9	170,7	7,7	155,7	9,0

del kontynentalny lub model zakładający brak aerozoli. Pozostałe dwa wykorzystano w celu sprawdzenia wiarygodności modelu na zmianę tego parametru.

Widoczność

Przy dobrej widoczności – ponad 20 km – parametr ten na stacjach meteorologicznych określany jest z dość małą dokładnością. W związku z tym, w pracy wykorzystano możliwość wprowadzenia do 6S grubości optycznej aerozolu dla fali o długości 550 nm. Wyniki takich pomiarów zaczerpnięto z sieci AERONET.

Pomiar zawartości aerozoli metodą teledetekcji naziemnej AERONET (Aerosol Robotic Network) jest najbardziej rozwiniętą, globalną siecią monitoringu zawartości aerozoli. Jej głównym twórcą jest NASA, ale przy współpracy z instytucjami z całego świata. Spójność całego systemu zapewnia sieć identycznych, automatycznie podążających za Słońcem radiometrów, będących w posiadaniu instytucji biorących udział w całym programie.



Ryc. 1. Zawartość pary wodnej w atmosferze w zależności od wysokości n.p.m dla czterech zastosowanych profili.

Fig. 1. Water vapour density depending on altitude for four used atmospheric profiles.

Pomiary ze wszystkich stacji spływają do GSFC (NASA's Goddard Space Flight Center), gdzie są przetwarzane, archiwizowane i dystrybuowane. Dane z pomiarów ze wszystkich stacji są dostępne na stronie internetowej projektu: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

Na wszystkich stacjach naziemnych biorących udział w monitoringu aerozoli atmosferycznych wykorzystywany jest radiometr CIMEL (CIMEL Electronique 318A). Dokonuje on dwóch podstawowych pomiarów: na Słońce i pod jednym zadanym kątem obok Słońca. Pomiar Słońca rejestruje promieniowanie w ośmiu długościach fali: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 i 1020 nm. Długość 940 nm wykorzystywana jest do określania zawartości pary wodnej w atmosferze.

Grubość optyczna wyznaczana jest na podstawie ekstynkcji bezpośredniego promieniowania słonecznego w każdej mierzonej długości fali. Następnie, odejmuje się wpływ rozpraszania Rayleigh'a oraz absorpcji gazowej – szacowanych na podstawie innych źródeł – ekstrahując w ten sposób grubość optyczną aerozolu (AOT – Aerosol Optical Thickness).

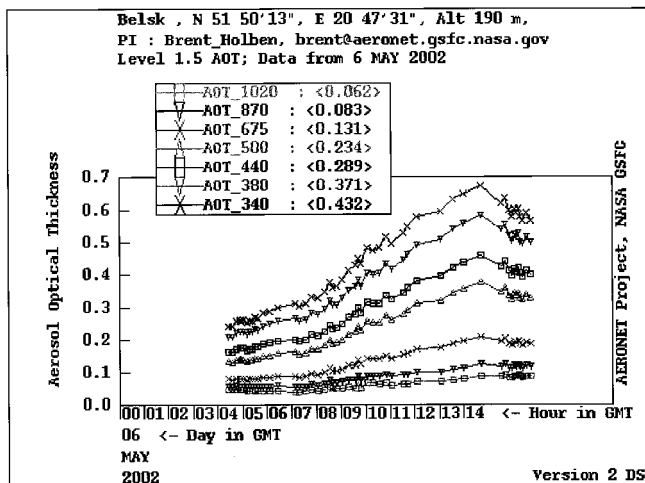
Oprócz rejestrowania bezpośredniego promieniowania słonecznego, wykonywany jest również pomiar na niebo, pod zadanym kątem od Słońca, w czterech długościach fali: 440, 660, 870 i 1020 nm. Pozwala to na wyznaczenie kątów rozpraszania promieniowania na cząsteczkach aerozoli. Na tej podstawie szacuje się funkcje fazowe² i rozkład cząsteczek aerozoli o różnych wielkościach.

Co 30 lub 60 minut, wyniki pomiarów ze wszystkich stacji naziemnych, są transmitowane za pomocą satelitów GOES, METEOSAT lub GMS, do głównej stacji odbiorczej, gdzie następuje ich przetworzenie i archiwizacja.

Wyznaczenie widoczności meteorologicznej

Wykres pomiarów z Belska z dnia wykonywania zdjęcia przedstawia ryc. 2. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono grubość optyczną aerozolu dla godziny 9:14. Wyniosła ona 0,15. W kodzie algorytmu 6S znajduje się wzór, według którego, dla gęstości optycznej aerozolu dla 550 nm (τ_{550}), widoczność meteorologiczna v wynosi:

² Funkcja fazowa – funkcja opisująca zależność natężenia promieniowania rozproszonego na cząstce i kąta pod jakim promieniowanie jest rozproszone (według American Meteorological Society <http://amsglossary.allenpress.com>).



Ryc. 2. Grubość optyczna aerozolu AOT dla poszczególnych długości fali, pomierzona w dniu wykonywania zdjęcia w Belsku, dostępna w sieci AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Fig. 2. Aerosol optical thickness for each wavelength, measured on the day of the acquisition of the image in Belsk, available in the AERONET network.

$$v = \exp(-\log(\tau_{550}/2.7628)/0.79902)$$

Dla $\tau_{550} = 0,15$, widoczność wynosi: $v = 38$ km. Taką widoczność przyjęto za reprezentatywną dla całego zdjęcia.

Metodyka badania

Korekcje atmosferyczne

Zbadanie wrażliwości modelu 6S na zmianę parametrów wejściowych wymagało przeprowadzenia korekcji na różnych zestawach parametrów wejściowych. Zmianom podlegały: model atmosfery, model aerozoli, widoczność oraz wysokość nad poziom morza. Wykorzystane typy modeli oraz zakresy wysokości i widoczności zawarte są w tabeli 2. Wykonano korekcje dla wszystkich możliwych kombinacji tych parametrów – pięciu modeli atmosfery, czterech modeli aerozoli, dziesięciu wartości widoczności oraz

Tabela 2. Parametry wejściowe 6S użyte do badania wrażliwości modelu 6S.

Table 2. Input parameters of 6S model used to analyse the sensibility of 6S model.

Modele atmosfery <i>Atmospheric models</i>	Standardowy umiarkowany letni <i>Midlatitude summer</i> Pomiary balonowe – Legionowo <i>Atmospheric sounding</i> Pomiary balonowe – Łeba <i>Atmospheric sounding</i> Pomiary balonowe – Wrocław <i>Atmospheric sounding</i> Brak absorpcji gazowej <i>No gaseous absorption</i>
Modele aerozoli <i>Aerosols models</i>	Brak aerozoli <i>No aerosols</i> Kontynentalny <i>Continental</i> Morski <i>Maritime</i> Miejski <i>Urban</i>
Widoczności [km] <i>Visibilities</i>	10, 20, 23, 30, 38, 40, 50, 75, 100, 200
Wysokości [m] <i>Altitudes</i>	0, 100, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000

dziesięciu wysokości. Liczba kombinacji wynosi $5 \times 4 \times 10 \times 10 = 2000$, co dla sześciu kanałów spektralnych daje dwaście tysięcy korekcji. Zważywszy na to, że analizowano zmiany w obrębie sześciu poligonów testowych, wykonano $12000 \times 6 = 72\ 000$ korekcji atmosferycznych 6S.

Wszystkie korekcje wykonano za pomocą programu działającego w systemie DOS dostępnego na stronie <http://www.ltid.inpe.br/dsr/mauro/6s>. Następnie, obrazy po korekcji zostały wczytane do programu statystycznego R³. Utworzono listę⁴ obejmującą siedemdziesiąt dwa tysiące pozycji. Każda z tych pozycji zawierała – numer kanału, numer pola testowego, parametry użyte do korekcji oraz macierz będącą obrazem pola testowego. Uznano, że interesującą informacją z macierzy obrazów jest ich średnia arytmetyczna oraz odchylenie standardowe. Zatem punktem wyjścia analizy statystycznej jest macierz zawierająca nr pola, nr kanału, kody parametrów wejściowych, średnią oraz odchylenie standardowe wartości pikseli tworzących pola testowe. Pierwsze dziesięć z siedemdziesięciu dwóch tysięcy wierszy tej macierzy przedstawia tabela 3.

Modele regresyjne

Na podstawie macierzy, dla każdego pola treningowego oraz kanału (trzydzieści sześć kombinacji), utworzono model regresyjny, według wzoru regresji wielokrotnej (równanie 4), gdzie zmiennymi niezależnymi były: dyskretne – model atmosfery i model aerozoli, ciągłe – widoczność i wysokość nad poziom morza, a zmienną zależną – średnia arytmetyczna obrazu pola treningowego.

$$Y = \alpha + \underbrace{\gamma_{at}^1 \delta_{at}^1 + \gamma_{at}^2 \delta_{at}^2 + \gamma_{at}^3 \delta_{at}^3 + \gamma_{at}^4 \delta_{at}^4}_{\text{model atmosfery}} + \underbrace{\gamma_{ae}^1 \delta_{ae}^1 + \gamma_{ae}^2 \delta_{ae}^2 + \gamma_{ae}^3 \delta_{ae}^3}_{\text{model aerozoli}} + \underbrace{\beta_{wid} X_{wid}}_{\text{widoczność}} + \underbrace{\beta_{wys} X_{wys}}_{\text{wysokość}} + \varepsilon$$

gdzie:

Y – średnia wartość pikseli

α – wyraz wolny

δ_{at}^j – zmienna zerojedynkowa reprezentująca j-tą kategorię klasyfikacji modeli atmosfery

δ_{ae}^k – zmienna zerojedynkowa reprezentująca k-tą kategorię klasyfikacji modeli aerozoli

γ – współczynniki regresji odpowiadające zmiennym zerojedynkowym

β – współczynniki regresji odpowiadające zmiennym ciągłym

X_{wys} – wysokość n.p.m.

X_{wid} – widoczność

ε – błąd losowy

Tak skonstruowane modele regresyjne, oddzielnie dla każdego pola testowego i kanału, posłużyły do opisu całej macierzy danych przedstawionej w tabeli 3. Badanie wrażliwości modelu 6S opierało się wyłącznie o analizę statystyczną tych modeli.

³ <http://www.r-project.org>

⁴ Lista jest jedną ze struktur danych używanych w R.

Tabela 3. Pierwsze dziesięć wierszy macierzy wyników korekcji atmosferycznych.
 Table 3. First ten rows of the matrix with the results of atmospheric corrections.

Lp.	Atmosfera <i>Atmospheric</i>	Aerozole	Widoczność	Wysokość	Kanał <i>Channel</i>	Pole	Średnia	Odchylenie
1	0	0	10,00	0,00	1	1	25,72	1,35
2	2	0	10,00	0,00	1	1	26,41	1,48
3	71	0	10,00	0,00	1	1	26,56	1,47
4	72	0	10,00	0,00	1	1	26,49	1,37
5	73	0	10,00	0,00	1	1	26,72	1,35
6	0	1	10,00	0,00	1	1	14,20	2,10
7	2	1	10,00	0,00	1	1	15,20	2,10
8	71	1	10,00	0,00	1	1	24,37	1,57
9	72	1	10,00	0,00	1	1	22,48	1,74
10	73	1	10,00	0,00	1	1	23,46	1,68
–								
72000								

Analiza wariancji

Do określenia rozmiaru efektu, jaki każda ze zmiennych wywiera na rezultat korekcji 6S, użyto analizy wariancji (ANOVA) (przyp. ang. *Analysis of Variance*). Jedną z miar służącą do opisu siły związku zmiennej zależnej i zmiennej niezależnej jest stosunek korelacyjny η^2 , definiowany jako stosunek rozproszenia zmiennej zależnej wyjaśnionego przed dany czynnik (zmienną niezależną) do łącznego rozproszenia (Pierce, 2004 [za:] Cohen, 2003). Wartości η^2 są w przedziale od 0 do 1. W klasycznej analizie wariancji, stosunek korelacyjny wyznacza się jako (Pierce, 2004, Ferguson, 1997):

$$\eta^2 = SS_{\text{factor}} / SS_{\text{total}}$$

gdzie:

SS_{factor} – rozproszenie wyjaśnione przez czynnik (międzygrupowa suma kwadratów odchyłeń),

SS_{total} – łączne rozproszenie (całkowita suma kwadratów odchyłeń).

Łatwo zauważyć, że suma η^2 dla wszystkich efektów równa się R^2 tego modelu. Można więc napisać, że $\eta^2 \times 100\%$ oznacza procent wyjaśnionego rozproszenia przez dany parametr.

Cząstkowy stosunek korelacyjny η_p^2 różni się mianownikiem od η^2 – jest stosunkiem rozproszenia zmiennej zależnej wyjaśnionego przez czynnik do sumy tego rozproszenia i rozproszenia niewyjaśnionego przez dany z czynników (Pierce, 2004 [za:] Kennedy, 1970, Hase, 1983):

$$\eta_p^2 = SS_{\text{factor}} / (SS_{\text{factor}} + SS_{\text{error}})$$

gdzie: SS_{error} jest rozproszeniem niewyjaśnionym przez model. Ta modyfikacja powoduje, że wpływ każdej zmiennej niezależnej określany jest abstrahując od wielkości efektów pozostałych zmiennych. $SS_{\text{factor}} + SS_{\text{error}}$ jest zawsze mniejsze bądź równe SS_{total} zatem $\eta_p^2 \geq \eta^2$.

Różnica pomiędzy η^2 i η_p^2 powoduje, że oba wskaźniki stosuje się w innych sytuacjach. η^2 służy do porównywania modeli między sobą – np. porównania wpływów jednego parametru w kilku różnych modelach. Natomiast η_p^2 jest pomocny przy porównywaniu wpływu kilku parametrów w jednym modelu. Zgodnie z tymi założeniami wykorzystano obie te wielkości.

Błędem nazywamy część rozproszenia zmiennej zależnej, której nie wyjaśniają zmienne niezależne użyte w modelu. Zatem całkowity błąd modelu wyznaczamy jako $1 - R^2$. Nie wyjaśnienie części rozproszenia spowodowane jest błędem losowym ϵ lub nieuwzględnieniem w równaniu regresyjnym czynników, które mają wpływ na zmienną zależną.

Istnieje również błąd w związku z wyjaśnianiem rozproszenia zmiennej zależnej przez jeden czynnik. Przykładowo, jeśli predyktor wyjaśnia 40% zróżnicowania zmiennej zależnej, to błąd wynosi 100–40%, czyli 60%. Nieistotne jest przy tym, ile wynosi R^2 całego modelu, tzn. jakie jest znaczenie pozostałych predyktorów.

Wyniki

Wskaźniki η^2 i η_p^2 zostały policzone dla wszystkich zmiennych niezależnych – modeli atmosfery, modeli aerozoli, widoczności i wysokości terenu, oddzielnie dla każdego z trzydziestu sześciu modeli. Wynik przedstawia tabela 4. Łatwo można zauważyć, że R^2 jest różny w zależności od modelu. Oznacza to, że łączny wpływ wszystkich parametrów na wynik korekcji jest inny dla różnych pól testowych i kanałów spektralnych.

Wpływ długości fali i jaskrawości pikseli na wrażliwość modelu 6S

Interesująca jest korelacja pomiędzy numerem kanału i R^2 oraz między typem pola testowego i R^2 . Wartości tych zmiennych zawarte są w kolumnach tabeli 4: pierwszej – pole, drugiej – kanał, i jedenastej – R^2 . Zmienne pole i kanał są dyskretne, zatem nie można posłużyć się klasycznym współczynnikiem korelacji.

Utworzono więc model regresyjny, gdzie zmiennymi niezależnymi były: kanał i pole, a zmienną zależną – R^2 . Wtedy, w celu sprawdzenia czy istotniejszy jest wpływ wartości pikseli obrazu wejściowego (pola testowe) czy długości fali (kanały), można policzyć współczynnik η^2 dla zmiennych pole i kanał.

Dla zmiennej niezależnej kanał – $\eta^2 = 0,82$, podczas gdy dla zmiennej pole tylko $\eta^2 = 0,09$. Oznacza to, że kanał wyjaśnia 82% a pole 0,9% wariancji R^2 dla trzydziestu sześciu modeli, które są reprezentowane przez wiersze tabeli 4.

Tabela 4. Wartości współczynnika η^2 i η_p^2 dla każdego z parametrów wejściowych i R^2 dla wszystkich modeli. Pola testowe: 1 – woda, 2 – las liściasty, 3 – las iglasty, 4 – łąka, 5 – teren zabudowany, 6 – odsłonięta gleba.Table 4. Values of η^2 i η_p^2 for every input parameters and R^2 for all models. Test fields: 1 – water, 2 – deciduous forest, 3 – coniferous forest, 4 – meadow, 5 – build-up area, 6 – bare soil.

Pole Field	Kanał Band	Widoczność Visibility		Atmosfera Atmosphere		Aerozole Aerosols		Wysokość Altitude		R^2
		η^2	η_p^2	η^2	η_p^2	η^2	η_p^2	η^2	η_p^2	
1	1	0,0032	0,0082	0,041	0,096	0,565	0,591	1,70E-33	4,36E-33	0,61
1	2	0,0140	0,0476	0,353	0,558	0,354	0,559	2,21E-33	7,92E-33	0,72
1	3	0,0344	0,0967	0,326	0,503	0,318	0,498	3,83E-33	1,19E-32	0,68
1	4	0,0644	0,1533	0,206	0,366	0,375	0,513	5,61E-36	1,58E-35	0,64
1	5	0,0463	0,1034	0,136	0,253	0,416	0,509	1,22E-34	3,05E-34	0,60
1	7	0,0293	0,1307	0,355	0,646	0,421	0,684	5,81E-34	2,99E-33	0,81
2	1	0,0031	0,0080	0,041	0,095	0,565	0,591	9,13E-34	2,34E-33	0,61
2	2	0,0014	0,0050	0,320	0,542	0,408	0,601	5,61E-34	2,07E-33	0,73
2	3	0,0264	0,0780	0,331	0,515	0,331	0,515	2,33E-33	7,49E-33	0,69
2	4	0,0326	0,0986	0,282	0,486	0,387	0,565	1,95E-35	6,56E-35	0,70
2	5	0,0232	0,1133	0,543	0,749	0,252	0,581	2,06E-33	1,13E-32	0,82
2	7	0,0003	0,0068	0,904	0,952	0,049	0,519	4,60E-34	1,00E-32	0,95
3	1	0,0030	0,0076	0,040	0,093	0,566	0,592	2,21E-34	5,64E-34	0,61
3	2	0,0058	0,0205	0,333	0,547	0,385	0,582	1,61E-35	5,82E-35	0,72
3	3	0,0218	0,0666	0,336	0,524	0,336	0,523	1,17E-33	3,83E-33	0,69
3	4	0,0146	0,0518	0,309	0,536	0,409	0,605	7,43E-33	2,78E-32	0,73
3	5	0,0135	0,0709	0,558	0,759	0,251	0,585	2,37E-33	1,34E-32	0,82
3	7	0,0002	0,0032	0,870	0,935	0,069	0,530	3,93E-33	6,45E-32	0,94
4	1	0,0002	0,0005	0,023	0,056	0,577	0,591	6,85E-35	1,72E-34	0,60
4	2	0,0003	0,0009	0,292	0,506	0,422	0,596	4,02E-33	1,41E-32	0,71
4	3	0,0077	0,0265	0,334	0,541	0,375	0,569	1,07E-33	3,77E-33	0,72
4	4	0,0395	0,1142	0,268	0,467	0,386	0,558	1,05E-32	3,43E-32	0,69
4	5	0,0300	0,1414	0,541	0,748	0,247	0,575	2,82E-32	1,55E-31	0,82
4	7	0,0007	0,0196	0,924	0,963	0,040	0,531	2,41E-33	6,85E-32	0,96
5	1	0,0049	0,0117	0,007	0,016	0,575	0,581	2,22E-34	5,36E-34	0,59
5	2	0,0053	0,0172	0,254	0,456	0,439	0,593	3,71E-33	1,23E-32	0,70
5	3	0,0061	0,0204	0,252	0,463	0,449	0,605	3,18E-33	1,09E-32	0,71
5	4	0,0240	0,0806	0,308	0,529	0,395	0,590	7,56E-33	2,76E-32	0,73
5	5	0,0274	0,1310	0,541	0,749	0,250	0,579	2,76E-32	1,52E-31	0,82
5	7	0,0025	0,0950	0,937	0,975	0,036	0,600	4,84E-33	2,00E-31	0,98
6	1	0,0183	0,0413	0,023	0,051	0,533	0,556	3,21E-35	7,56E-35	0,57
6	2	0,0233	0,0638	0,195	0,364	0,440	0,563	2,65E-33	7,75E-33	0,66
6	3	0,0318	0,0851	0,185	0,350	0,442	0,563	1,18E-33	3,44E-33	0,66
6	4	0,0352	0,1061	0,284	0,489	0,385	0,565	2,13E-33	7,18E-33	0,70
6	5	0,0336	0,1468	0,521	0,727	0,250	0,561	4,95E-33	3,53E-32	0,80
6	7	0,0042	0,1408	0,934	0,973	0,037	0,591	1,17E-33	4,60E-32	0,97
Średnia Average		0,0176	0,0642	0,364	0,516	0,354	0,570	3,76E-33	2,61E-33	0,74

Widać więc, że zakres spektralny ma znaczący wpływ na to, jaką część zróżnicowania wyjaśnia dany model. Zależność kanału i R^2 przedstawia rysunek 3. Widać na nim, że im wyższy numer kanału, tym większa część zróżnicowania jest wyjaśniana przez analizowane: model atmosfery, model aerzoli, widoczność i wysokość nad poziom morza. Można to uzasadnić tym, że korekcja atmosferyczna ma większy wpływ dla fal podczerwonych, w związku z absorpcją gazową. Dla fal krótszych wpływ ten jest mniejszy. Jednak najniższe średnie R^2 , modeli dla kanału pierwszego, wynosi 0,59, zatem nawet dla fal widzialnych parametry wejściowe wyjaśniają prawie 60% zróżnicowania.

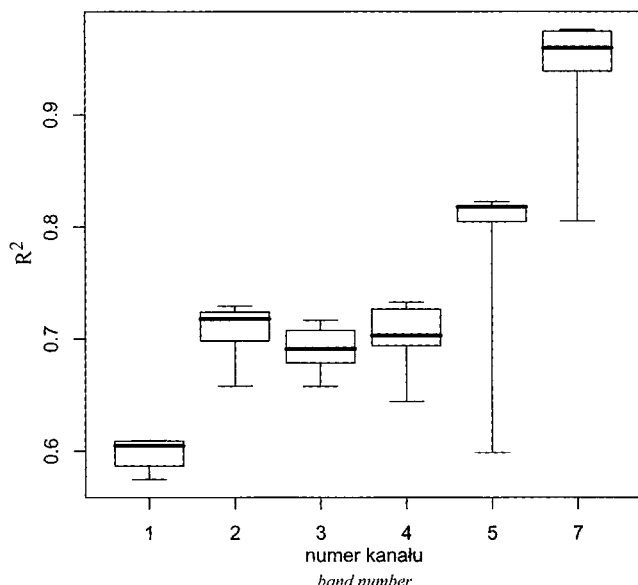
Istotność parametrów wejściowych modelu 6S

Interesujące jest, który z parametrów – widoczność, model atmosfery, model aerzoli czy wysokość terenu – mają największy wpływ, a więc na który z tych parametrów 6S jest najbardziej wrażliwy. W tabeli 4 są wartości parametru η^2 i η_p^2 dla każdego z tych parametrów dla wszystkich modeli. Łatwo zauważyć, że oba wskaźniki dla wysokości, niezależnie od kanału czy pola tre-

ningowego, są bardzo niskie. Oznacza to, że wysokość ma minimalny wpływ na model. Czyli niezależnie od tego, jaką wysokość w przedziale od 0 do 2000 metrów wprowadzono do algorytmu 6S, średnia pikseli obrazów po korekcji była prawie taka sama.

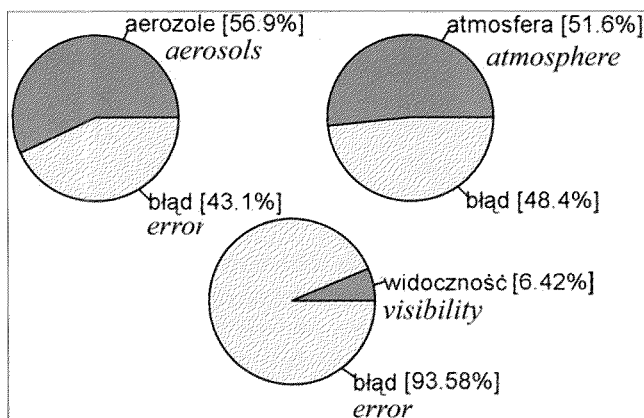
Jeśli policzymy średnią η_p^2 dla każdego parametru ze wszystkich trzydziestu sześciu modeli otrzymamy uśredniony wpływ predyktorów na zmienną zależną, łącznie dla wszystkich pól i kanałów. Przedstawia to ostatni wiersz tabeli 4. Można to graficznie pokazać za pomocą diagramów kołowych (ryc. 4). Niewyjaśnione pozostaje średnio 26,5% zmienności, co obliczamy jako $1 - R^2$.

Należy wykorzystać teraz fakt, że wszystkie korekcje analizowane są w obrębie poligonów testowych oraz że zdjęcia zostały wykonane w kilku kanałach spektralnych. Pozwoli to na uszczegółowienie informacji o wrażliwości 6S na parametry wejściowe o zależność od długości fali i jaskrawości piksela. Rycina 5 prezentuje trzydzieści sześć diagramów kołowych dla wszystkich kombinacji pole \times kanał. Każdy diagram prezentuje wpływy poszczególnych parametrów oraz część niewyjaśnioną przez model (błąd).



Ryc. 3. Wykres pudełkowy R^2 w zależności od numeru kanału, w którym wykonano zdjęcie. Dolny bok prostokąta wyznaczany jest przez pierwszy kwartył, zaś górny bok przez trzeci kwartył. Linia pozioma wewnątrz prostokąta określa wartość mediany. Dolny odcinek wyznacza najmniejszą wartość w zbiorze, natomiast górny koniec wartość największą.

Fig. 3. Boxplot of R^2 depending on band number. Lower side of box assign first quartile, upper side assign third quartile. Horizontal line inside the box is median. Lower segment assign the lowest value of set whereas upper segment assign the biggest value.



Ryc. 4. Średni udział procentowy analizowanych parametrów wejściowych 6S w wyjaśnieniu rozproszenia średniego odbicia pól testowych.

Fig. 4. Average percentage variance of test fields reflectance explained by 6S model input parameters.

Przykładowo, w celu utworzenia diagramu w lewym górnym rogu wykresu, odczytano z tabeli 4 wartości η^2 dla widoczności (0,0032), atmosfery (0,041), aerozoli (0,565) i wysokości (1,70E-33) w wierszu dla pola testowego wody i kanału pierwszego. Następnie wartości η^2 pomnożono przez 100% i utworzono diagram kołowy. Brakująca część to błąd, którego nie wyjaśnia żadna z analizowanych czterech zmiennych niezależnych (widoczność, model atmosfery, model aerozoli, wysokość nad poziom morza).

Na wykresie widać wyraźnie kilka zależności. Wszystkie pola testowe poza wodą, charakteryzują się istotnym

wpływem aerozoli i atmosfery. Wpływ widoczności jest niewielki. Największy w kanale TM4 – maksymalnie 4% dla łąki. Wpływ atmosfery jest odwrotnie proporcjonalny do wpływu aerozoli. Udział atmosfery rośnie wraz z długością fali i pochłanianiem przez gazy atmosferyczne, dla miasta od 0,6% w kanale TM1, do 94% w kanale TM7. Dla pozostałych pól rozpiętość jest od 2 do 93%. Aerozole wpływają silnie dla fal krótkich i ich znaczenie maleje wraz z długością fali. W kanale TM1 aerozole odpowiadają za 55% rozproszenia, w kanale TM7 jest to ok.3%.

Tak wyraźne tendencje nie występują dla pola testowego wody. W jego obrębie, dla wszystkich kanałów najważniejszy jest wpływ aerozoli. Największy w kanałach: TM1 – 56% i TM5, TM7 – 42%. Wpływ widoczności jest mały, ale większy niż w pozostałych polach – dochodzi do 6% w czwartym kanale. Atmosfera najbardziej oddziałuje w kanałach trzecim, czwartym i siódmym – około 35%.

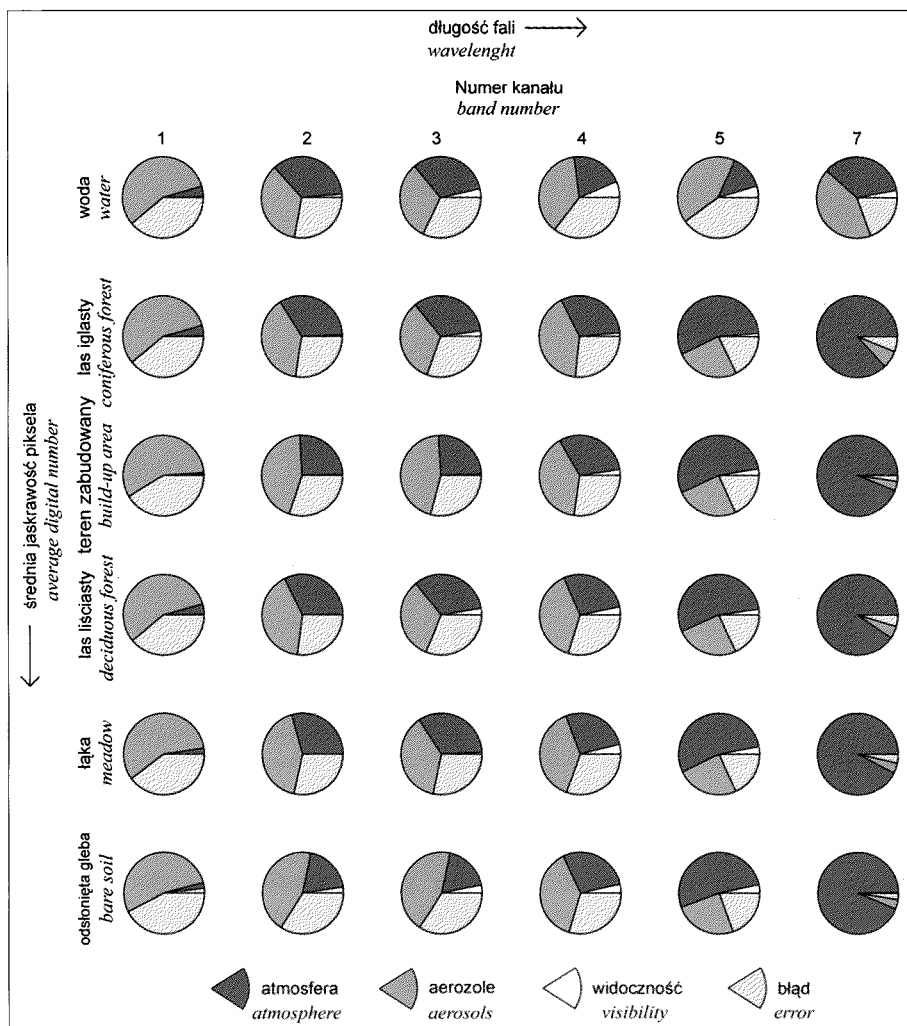
Różnice średniego odbicia pól testowych i ich odchylenia standardowego w zależności od użytych parametrów wejściowych

Wiedząc już jaki jest procentowy udział widoczności, modeli atmosfery, modeli aerozoli i wysokości terenu w wyjaśnianiu zmienności współczynnika odbicia obrazów po korekcji 6S, należy oszacować, w jakim stopniu te parametry wpływają na zmianę wartości pikseli. W tym celu zbadano modele atmosfery, modele aerozoli i widoczność dla wszystkich kombinacji pole \times kanał. Dla każdego z tych parametrów utworzono macierz, będącą podzbiorem macierzy z tabeli 3, taką, żeby wszystkie parametry poza badanym miały wartość jak do korekcji optymalnej. Następnie obliczono maksymalną różnicę pomiędzy średnimi obrazów oraz między ich odchyleniami standardowymi.

Przykładowo, dla widoczności, kanału pierwszego i pola nr 1 (woda), maksymalna różnica współczynnika odbicia wyniosła 1,04 a odchylenia standardowego 0,2. Oznacza to, że robiąc korekcję obrazu pola testowego wody, w kanale pierwszym, na parametrach optymalnych, zmieniając tylko widoczność od 10 do 200 km, uzyskalibyśmy maksymalnie różnicę średniej wartości pikseli – 1,04 a odchylenia standardowego – 0,2. Takie rozumowanie przeprowadzono dla modeli atmosfery, aerozoli i widoczności. Wyniki przedstawiają: rycina 6 – dla średniej arytmetycznej pikseli pól testowych i rycina 7 – dla ich odchylenia standardowego.

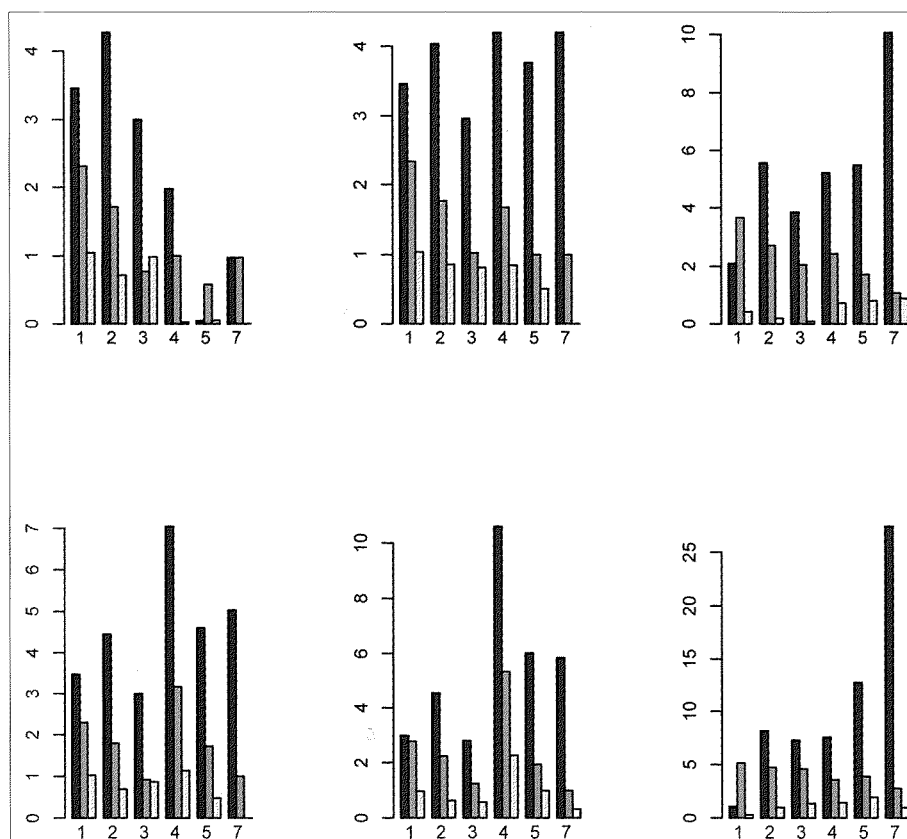
Na wykresach widać, że największy błąd, wykonując korekcję atmosferyczną, można popełnić dla odkrytej gleby, w kanale siódmym, błędnie wprowadzając model atmosfery. Może to skutkować różnicą we współczynniku odbicia 25% i w odchyleniu standardowym – 2. Generalnie widać, że największe różnice współczynnika odbicia może powodować właśnie model atmosfery.

Błędne wprowadzenie modelu aerozoli daje maksymalnie różnicę 4–5% w kanałach pierwszym i drugim. Widoczność najistotniejsza jest w kanale czwartym dla łąk. Dla kanału TM7, niezależnie od pola, wpływ widoczności jest bardzo mały lub równy 0.



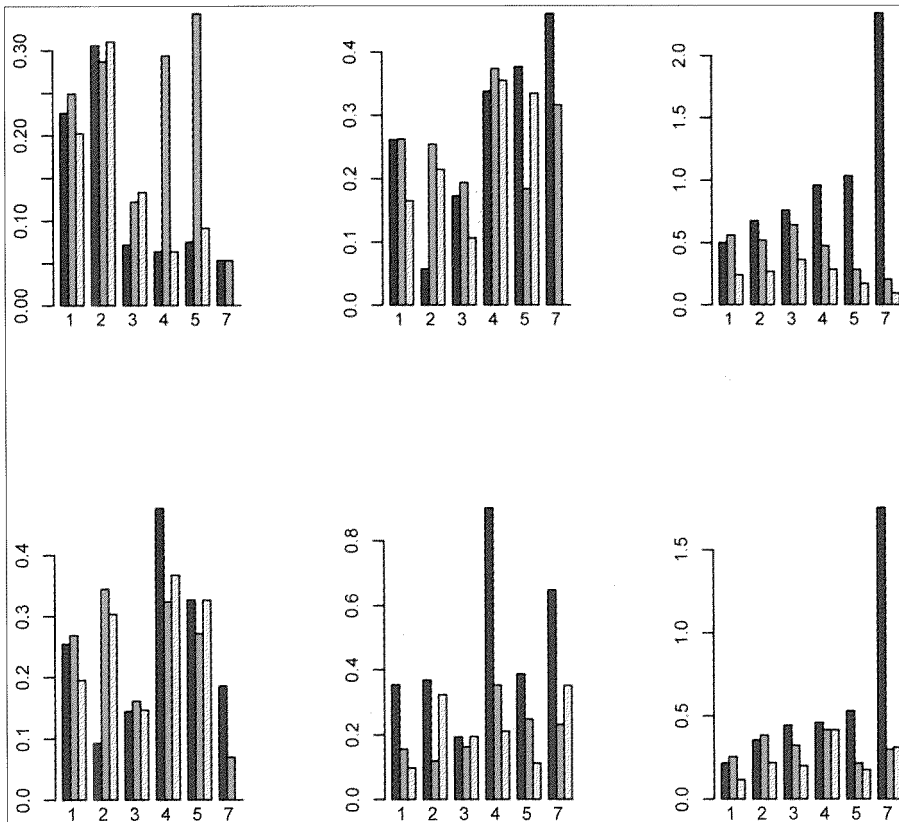
Ryc. 5. Udział procentowy analizowanych parametrów wejściowych 6S w wyjaśnieniu rozproszenia średniego odbicia pól testowych w zależności od kanału spektralnego.

Fig. 5. Percent of variance of test fields reflectance explained by 6S model input parameters and their dependence on spectral band.



Ryc. 6. Maksymalne różnice we współczynniku odbicia, które mogą być spowodowane zmianą parametru wejściowego modelu 6S.

Fig. 6. Maximum differences in the ground reflectance, which can be provoked by the change of the input parameter of the 6S model.



Rc. 7. Maksymalne różnice odchylenia standardowego, które mogą być spowodowane zmianą parametru wejściowego modelu 6S.

Fig. 7. Maximum differences in the standard deviation, which can be provoked by the change of the input parameter of the 6S model.

Interesujący jest wpływ modelu atmosfery dla wody, gdzie skutek błędnego wprowadzenia modelu zmniejsza się wraz z długością fali – odwrotnie niż dla pozostałych pól treningowych. Nietypowe zachowanie się wartości pikseli w obrębie pola treningowego wody, może być spowodowane tym, że odbicie jest bliskie 0. Przyczyną tego może być niemożność obniżenia wartości piksela, nawet jeśli „domaga się” tego algorytm 6S, ponieważ współczynnik odbicia nie może być mniejszy od 0.

Podsumowanie

W pracy rozważono problem wykonywania korekcji atmosferycznych zdjęć satelitarnych modelem 6S, będącym przykładem metod korekcji wymagających informacji o stanie atmosfery. Szczególną uwagę poświęcono problemowi wrażliwości modelu 6S na zmianę parametrów wejściowych takich, jak: profil atmosfery, zawartość aerozoli, widoczność oraz wysokość terenu nad poziom morza. Pozwoliło to na uszczegółowienie i wyznaczenie ważności parametrów wejściowych 6S w funkcji kanału i pola treningowego.

Wykonana analiza wrażliwości oparta jest o dużą statystycznie próbę. Należy jednak zauważyć, że zakresy użytych parametrów wejściowych nie wyczerpują wszystkich możliwości. Widoczność i wysokość terenu, będące zmiennymi ciągłymi, wprowadzone zostały z wystarczającą „gęstością” – dla widoczności dziesięć wartości w przedziale 10–200 km, dla wysokości terenu dziesięć wartości w przedziale 0–2000 m (tab. 2). Jednak profile atmosfery i aerozoli wprowadzono zaledwie kilka – w tym standardy. Znaczne zwiększenie dokładności można by uzyskać roz-

kładając „dyskretny” profil atmosfery na ciągłe: zawartość pary wodnej, ozonu, temperaturę i ciśnienie. Komplikacją są jednak zależności pomiędzy tymi czterema wielkościami, które trzeba byłoby uwzględnić. Niemniej jednak, znając te zależności, możliwe byłoby wymodelowanie profili atmosfery, które dałoby się uszeregować i wprowadzać do analizy jako ciągłe zmienne niezależne.

Podobna sytuacja jest z modelami aerozoli. Możliwy jest podział na cztery zmienne ciągłe – procentowe udziały cząstek czterech różnych typów. Uszeregowanie takich modeli wymagałoby znów zbadania interakcji występowania tych czterech rodzajów.

Konsekwencją tych uproszczeń dotyczących gazów i aerozoli jest mniejsza reprezentatywność uzyskanych wyników. Trzeba podkreślić, że modele atmosfery i aerozoli zostały wybrane tak, aby uwzględniały wszystkie potencjalne warunki dla konkretnego zdjęcia, a więc i położenia geograficznego i czasu. Jednak nieciągłość zmiennych nie daje pewności, czy jakiś osobliwy przypadek nie został pominięty.

Podsumowanie głównych wniosków dotyczących wrażliwości modelu 6S wynikających z przeprowadzonego badania najłatwiej zestawić w punktach:

- 1) Istotność parametrów wejściowych zależy przede wszystkim od długości fali, w mniejszym stopniu od średniej wartości pikseli.
- 2) Istotność modeli aerozoli jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali.
- 3) Istotność zawartości gazów w modelu atmosfery jest wprost proporcjonalna do długości fali.
- 4) Wpływ widoczności na model jest mały, największy w kanałach czwartym i piątym.

5) Wysokość terenu nad poziom morza w granicach 0–2000 m nie ma żadnego wpływu na model.

6) Dla bardzo niskich wartości pikseli – głównie dla wody – wyżej wymienione zależności zaburzają niemożność obniżenia wartości pikseli, nawet jeśli „domaga się” tego algorytm 6S, ponieważ współczynnik odbicia nie może być mniejszy od 0.

7) Błąd, jaki można popełnić źle wprowadzając parametry wejściowe, może spowodować największe różnice we współczynniku odbicia dla pikseli o dużej jasności – dla odsłoniętego gruntu do 25%.

8) Średnio, największy błąd występuje przy wprowadzeniu złego profilu atmosfery (4–10%), nieco mniejszy dla modelu aerozoli (do 6%).

9) Na odchylenie standardowe współczynnika odbicia pól testowych największy wpływ ma atmosfera, potem aerozole i widoczność.

Wyniki uzyskane w pracy uszeregowują parametry wejściowe korekcji atmosferycznych w kolejności ich ważności, szacując przy tym błąd, jaki można popełnić źle je wprowadzając.

Opisane wcześniej uproszczenie dotyczące zmiennych dyskretnych powoduje, że wnioski są reprezentatywne dla parametrów wejściowych użytych do badania zmienności. Wrażliwość modelu 6S na zmianę parametrów jest na tyle duża, że należałoby objąć analizą więcej zdjęć z różnych okresów i warunków, aby wyniki były bardziej uniwersalne.

Badanie można również rozszerzyć nie tworząc pól treningowych na zdjęciu, tylko przeprowadzając korekcję dla wszystkich pikseli z zakresu 0–255. W ten sposób pole treningowe zamieniono by w całych rozważaniach

konkretną wartością pikseli. Wtedy uzyskano by zależność wrażliwości od jasności pikseli dokładniej niż w przypadku pól treningowych. Dodając do tego modele atmosfery i aerozoli uwzględniające cały możliwy zakres zmienności, otrzymano by ocenę wrażliwości modelu 6S reprezentatywną dla większości spotykanych korekcji atmosferycznych. Wyniki takiej analizy byłyby kompletnym źródłem informacji na temat wrażliwości modelu i wynikającego z tego możliwego błędu popełnianego przy korekcji. Tego rodzaju badanie jest na pewno potrzebne, a jego wyniki byłyby przydatne w praktyce wykonywania korekcji atmosferycznych.

Literatura

- Bojanowski J., Lewiński S., 2006, *Porównanie wyników korekcji atmosferycznej 6S zdjęcia Landsat ETM z zastosowaniem standardowych parametrów wejściowych oraz uzyskanych na podstawie pomiarów meteorologicznych*, Teledetekcja Środowiska, 36.
- Cohen J., Cohen P., West S.G., Aiken L.S., 2003, *Applied multiple regression / correlation analysis for the behavioral sciences*, Lawrence Erlbaum, New Jersey.
- Ferguson G.A., Takane Y., 1997, *Analiza statystyczna w psychologii i pedagogice*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Haase R.F., 1983, *Classical and partial eta square in Multifactorial Designs*, Educational and Psychological Measurement, 43, 35–39.
- Kennedy J. J., 1970, The eta coefficient in complex ANOVA designs. Educational and Psychological Measurement, 30: 885–889.
- Pierce Ch.A., Richard A., Block R.A., Aguinis H., 2004, *Cautionary Note on Reporting Eta-Squared Value from Multifactor ANOVA Designs*, Educational and Psychological Measurement, 64(6), 916–924.



Mgr Jędrzej Bojanowski jest absolwentem Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Tytuł magistra uzyskał w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Tematem pracy dyplomowej była „Korekcja atmosferyczna zdjęć satelitarnych z zastosowaniem modelu 6S w środowisku oprogramowania GRASS”. Zajmuje się wpływem atmosfery na promieniowanie elektromagnetyczne mierzone podczas rejestrowania zdjęć satelitarnych oraz metodyką statystycznego opracowywania danych satelitarnych.