

Oszacowanie wpływu rozpraszania światła przez atmosferę na pomiar refleksyjności wykonywany podczas lotów fotogrametrycznych na niskim pułapie nad terenami leśnymi

The influence of atmospheric light scattering on reflectance measurements during photogrammetric survey flights at low altitudes over forest areas

Anna Mazur¹ , Mariusz Kacprzak¹ , Katarzyna Kubiak^{1,2}, Jan Kotlarz^{1*} , Krzysztof Skocki¹

¹Instytut Lotnictwa, Zakład Teledetekcji, al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa;

²Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ochrony Lasu, Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

*Tel. +48 22 8460011 wew. 835, e-mail: jan.kotlarz@ilot.edu.pl

Abstract. In this article, we describe methods for the correction of multispectral aerial images by accounting for atmospheric interference. We also summarize the first correction results for images acquired at flight altitudes and evaluate the suitability of selected methods for the atmospheric correction of these images. Furthermore, processes and phenomena occurring in the atmosphere that potentially affect image quality and interfere with the electromagnetic radiation registered by the imaging sensors are discussed as well. The purpose of atmospheric correction is to reduce or eliminate atmospheric interference during multispectral image processing. Here we present methodology for image correction based on data gathered at various altitudes during the autumn flights conducted as part of the HESOFF project.

Keywords: atmospheric correction, radiometric correction, atmosphere composition, reflectance, radiation, reflection

1. Wstęp

Zdjęcia wielospektralne wykonane z pułapu lotniczego i satelitarnego mają duży potencjał interpretacyjny. Informacja zapisana w postaci wartości radiometrycznych pikseli wykorzystywana jest do badania środowiska ze szczególnym uwzględnieniem stanu wód oraz roślinności, w tym analizy drzew, łąk oraz zbóż. Do przeprowadzenia analizy ilościowej i jakościowej należy odpowiednio przygotować dane obrazowe. Prace te obejmują m.in. kalibrację detektorów, korekcję wpływu położenia Słońca, korekcję topograficzną oraz korekcję atmosferyczną, której istotą jest usunięcie wpływu atmosfery na wartości zarejestrowane na obrazie (Osińska-Skotak 2007; Ochtyra et al. 2016).

Konieczność wykonania korekcji atmosferycznej zależy od przeznaczenia zdjęć. W przypadku wykorzystania zdjęć do klasyfikacji pokrycia terenu lub detekcji zmian w szeregach czasowych często nie jest ona konieczna. Prostsze algorytmy korekcji atmosferycznej (m.in. DOS) mogą być stosowane w przypadku braku konieczności pozyskania informacji o refleksyjności powierzchni. Tam gdzie ten parametr jest niezbędny do prowadzenia analiz, należy stosować bardziej zaawansowane algorytmy (Song 2001).

Obecnie można wskazać dwie główne metody kalibracji danych wielospektralnych. Pierwsza grupa obejmuje wykorzystanie gotowych algorytmów zaszyfrowanych w modelach atmosfery. Oprogramowanie teledetekcyjne posiada specjalne moduły umożliwiające wyeliminowanie wpływu atmosfery. Najpopularniejsze pakiety wykorzystujące skomplikowane modele i algorytmy to MODTRAN5 (2015) oraz ATCOR2/3 i ATCOR4 (2015). Niestety, ze względu na dużą dynamikę zmian zachodzących w atmosferze, uzyskane wyniki nie zawsze są poprawne. Skuteczność działania zależy od stopnia skorelowania modelu atmosfery z rzeczywistym jej stanem w momencie pozyskania obrazów. Drugą grupę metod stanowi korekcja w oparciu o dane empiryczne pozyskane bezpośrednio na danym obszarze. Prace terenowe polegają na pomiarach spektrometrem lub na wykorzystaniu specjalnych znaczników kalibracyjnych o znanej refleksyjności (ryc. 1). Wpływ atmosfery jest zauważalny w analizach jakościowych, w tym klasyfikacji pokrycia terenu, natomiast nie ma dużego wpływu na uzyskane wyniki ilościowe (Osińska-Skotak 2005). W przypadku analiz ilościowych nawet stosunkowo niewielkie zmiany wartości, wywołane przejściem promieniowania słonecznego przez atmosferę, mogą mieć kluczowe znaczenie dla wartości obliczanych wskaźników i wyników prowadzonych badań.

Wpłynęło: 5.05.2016 r., zrecenzowano: 15.07.2016 r., zaakceptowano: 15.01.2018 r.



Rycina 1. Terenowe znaczniki kalibracyjne o refleksyjności (a) >95% i (b) <5% sfotografowane z pułapu 800 m

Figure 2. Calibration markers with (a) >95% and (b) <5% reflectance photographed from altitude 800 m

2. Wpływ atmosfery na wartości pikseli na zdjęciach lotniczych i satelitarnych

Na refleksyjność rejestrowaną, jako wartość danego piksela zdjęcia satelitarnego lub lotniczego, mają wpływ różnorodne procesy zachodzące w atmosferze. Uwzględnienie absorpcji i rozpraszania promieniowania jest istotne w późniejszym przetwarzaniu danych. Zastosowanie poprawek atmosferycznych jest wstępną fazą korekty radiometrycznej obrazów wielospektralnych. Ich celem jest jak najpełniejsze wyeliminowanie skutków zjawisk zachodzących w atmosferze w odniesieniu do pomiaru refleksyjności (Osińska-Skotak 2007). Przed obliczaniem wskaźników teledetekcyjnych lub przeprowadzeniem klasyfikacji terenu konieczne jest określenie wpływu atmosfery na wyniki. Szczególnie dużym błędem obciążone mogą być, ze względu na grubą warstwę atmosfery, dane pochodzące z sensorów umieszczonych na satelitach obserwacyjnych. Proces korekcji atmosferycznych stosowanych do obrazów satelitarnych jest skomplikowany i wymaga modelowania matematycznego i fizykochemicznego uwzględniającego parametry atmosfery (Kotula 2011). Metody korekcji atmosfery rozwinęły się wraz z rozwojem sensorów optycznych. Ich wykorzystanie na szeroką skalę jest związane z pozyskiwaniem zdjęć cyfrowych. Mimo wielu prac prowadzonych w celu pełnego opisu procesów zachodzących w atmosferze wciąż istnieje konieczność ich kontynuacji, ulepszenia istniejących algorytmów korekcyjnych i rozwoju technik do badania chwilowego składu zawartości związków na drodze promieniowania elektromagnetycznego (Głowienka 2008). Powietrze składa się głównie z mieszaniny gazów (w przypadku powietrza suchego), wody w trzech fazach oraz z aerozolu atmosferycznego (Khodri 2017), czyli zawiesiny cząstek stałych i płynnych (Wołoszyn 2009). Zawartość pary wodnej w atmosferze jest zmienna, ulega przemianom fazowym, zależy też od

szerokości geograficznej, a czas jej przebywania w atmosferze oszacowany jest na ok. 10 dni. Największa zawartość pary wodnej w atmosferze znajduje się bezpośrednio przy powierzchni i zmniejsza się wraz z wysokością. Na wysokości 1,5 km przeciętna koncentracja pary wodnej jest o 50% mniejsza niż przy powierzchni Ziemi, na wysokości 5 km zawartość pary wodnej jest 10 razy mniejsza, a na wysokości 10 km – 100 razy mniejsza. Większość (około 99%) pary wodnej zawiera się w warstwie do wysokości 12 km (Wołoszyn 2009). Szczególnie nad obszarami pokrytymi roślinnością modelowanie składu atmosfery jest trudne. Wymiana gazowa pomiędzy roślinami a atmosferą jest intensywna i zależy od wielu czynników (pory dnia, pory roku, oświetlenia zewnętrznego). Dodatkowo na rejestrowaną refleksyjność oraz na wskaźniki teledetekcyjne wpływają kąty pomiędzy lokalną osią pionu a osią optyczną układu rejestrującego promieniowanie oraz ewaluacją Słońca. Wpływ ten jest nawet trzykrotnie bardziej widoczny w niebieskich kanałach optycznych niż w podczerwieni, a typowe wskaźniki wegetacyjne, jak NDVI, może różnicować nawet o 50% (Burkat 2015). W postprocessingu danych należy oprócz korekcji atmosferycznej uwzględnić również wpływ geometrii refleksyjności.

Biosfera odgrywa kluczową rolę w globalnym obiegu węgla, ponieważ zielone części roślin pochłaniają dwutlenek węgla z atmosfery i przekształcają go przy udziale energii słonecznej w związki organiczne (fotosynteza), przy jednoczesnym wydzielaniu tlenu jako produktu ubocznego. W procesie oddychania energia słoneczna związana w fotosyntezie jest przechowywana w postaci organicznej energii chemicznej. Oddychanie polegające na pobieraniu tlenu oraz wydychaniu CO₂ prowadzi do zwrotu 60 PGC/rok (petagram of Carbon / rok) i jest procesem niezbędnym do wzrostu roślin (Badawy 2011). Pełni istotną rolę w bilansie węgla w poszczególnych komórkach rośliny, całej roślinie i ekosystemie. Pomimo że kluczową rolę w wymianie gazowej roślin odgrywa emisja i pochłanianie dwutlenku węgla, pary wodnej i tlenu, rośliny produkują także i emitują śladowe ilości gazów klasy nazywanej zbiorczo biogenymi lotnymi związkami organicznymi (BVOC). Emisja ich może być istotną częścią bilansu węgla w ekosystemie leśnym i może wynosić ok. 1,3 PGC/rok na całym świecie (Houston 2017).

Roślinność jest głównym źródłem lotnych związków organicznych (VOC) w atmosferze. Bezpośrednie emisje roślinne mogą obejmować izoprenoidy, terpenoidy i różnego rodzaju związki utlenione (oVOC), takie jak: aldehydy, kwasy organiczne, estry i alkohole. Wiele uwalnianych VOC zawiera w swojej budowie chemicznej co najmniej jedno podwójne wiązanie olefinowe, czyniąc je bardzo wrażliwym (reaktywnym) na działanie obecnych w atmosferze utleniaczy (OH, O₃, NO₃), które ostatecznie utleniają VOC do CO₂. Wśród VOC emitowanych przez rośliny dominują: izopren i jego pochodne, takie jak monoterpény i seskwiterpény (Kiendler-Scharr et al. 2009). Niestety wiedza na temat czasowej i przestrzennej zmienności emisji

BVOC i ich roli w tworzeniu aerozolu pozostaje niepełna. BVOCs funkcjonują jako prekursorzy ozonu i tym samym pośrednio pochłaniają promieniowanie słoneczne w zakresie ultrafioletowym (Trainer et al. 1987). Emisja VOC z roślin jest ograniczana zarówno przez czynniki fizjologiczne, jak i fizykochemiczne. Czynniki fizjologiczne wpływają na dostępność chemicznych prekursorów BVOC i enzymów kontrolujących ich przekształcenie. Fizykochemiczne czynniki ograniczające emisję BVOC to parametry powietrza (temperatura, ciśnienie cząstkowo-fazowe, stężenie fazy wodnej i lipidowej), dyfuzja gazowa, właściwości hydrofobowe i hydrofilowe związków organicznych wewnątrz liści oraz dyfuzja gazów na granicy liścia i atmosfery (Niinemets et al. 2004). Wielkość emisji BVOC zależy także od: intensywności nasłonecznienia, stężenia CO₂ w atmosferze, predyspozycji genetycznych, fazy rozwojowej liści i zjawisk fenologicznych. Wielkość emisji VOC zależy od gatunku rośliny i może różnić się nawet o cztery rzędy wielkości. Także różnice w gęstości biomasy i fazy wegetacyjnej roślinności mogą mieć wpływ na emisję. BVOC wytwarzane przez lasy pogarszają widoczność i mogą wpływać na klimat przez rozpraszanie i absorpcję promieniowania słonecznego oraz na powstanie chmur, służąc jako jądra do ich kondensacji. Głównymi składnikami BVOC są izopreny, monoterpeny, a także metanol, aceton, formaldehyd i aldehyd octowy.

Skład atmosfery jest zmienny w czasie i trudny do precyzyjnego modelowania. Należy pamiętać, że przy zobrazeniach lotniczych wykonanych z relatywnie niewielkiej (<2000 m) wysokości wpływ atmosfery może być znaczny ze względu na fakt, że w odniesieniu do atmosfery wzorcowej, połowa jej masy jest zawarta w dolnej warstwie, która podlega dynamicznym zmianom, a jej grubość to zaledwie 5000 m. Zatem prześledzenie jej wpływu na wyniki uzyskiwane w procesie przetwarzania danych teledetekcyjnych jest istotne. Zdjęcia wielospektralne pozyskiwane z niskich i średnich wysokości (do 2000 m) są mniej popularne i trudniej dostępne niż stosunkowo często wykorzystywane wielospektralne zobrażenia satelitarne (Czapski et al. 2014), dlatego też jest znacznie mniej publikacji naukowych związanych z zagadnieniem korekcji radiometrycznej dla tych obszarów. Na podstawie literatury przyjęto, że korekcję atmosferyczną można wykonać, korzystając z dwóch głównych metod: bezwzględnej oraz empirycznej, tzn. względnej (Głowienka 2008).

3. Metody korekcji atmosferycznej

Metoda korekcji bezwzględnej wykonywana jest w oparciu o standardowe modele atmosfery lub na podstawie pomiarów parametrów atmosferycznych w momencie wykonywania zobrażenia. Metody te polegają na wykorzystaniu modeli transferu promieniowania (Radiative Transfer Model – RTM), które opierają się na modelach średnich atmosfer klimatycznych, co oznacza, że nie rejestrują aktualnego stanu atmosfery, tj. panującego w chwili rejestracji danych, tylko

średni stan atmosfery w określonym rejonie klimatycznym. Modele transferu promieniowania to modele fizyczno-matematyczne opisujące na podstawie praw fizyki rozprzestrzenianie się promieniowania w atmosferze oraz oddziaływanie na roślinność (Jarocińska 2012). Metoda korekcji empirycznej (względnej) polega na porównaniu sygnału naziemnego z innym referencyjnym sygnałem zarejestrowanym na obrazie. Metoda ta wykorzystuje obraz oraz pomiary terenowe do przeprowadzenia korekcji. Opiera się głównie na pomiarach statystycznych. Parametry mogą być uzyskane bezpośrednio z obrazu, np. metodą Dark-Object-Subtraction (Kaneko 2016) Model (DOS), Flat Field (FF), Internal Average Relative Reflectance (IARR) lub ze spektrometrycznego pomiaru terenowego, np. metodą Empirical Line (Głowienka 2008).

Celem pracy było oszacowanie wpływu atmosfery na wartości radiometryczne obiektów zarejestrowanych na zdjęciach metodą empiryczną. Podjęto także próbę odpowiedzi na pytanie, czy możliwe jest osiągnięcie zadowalających rezultatów w obliczaniu wskaźników NDVI, NDWI, RSI i innych bez przeprowadzenia korekcji, przy wykorzystaniu zdjęć z prototypowej platformy wielospektralnej Quercus 6, powstałej w ramach projektu HESOFF.

4. Materiały i metody

Do prawidłowej analizy pozyskiwanych obrazów wielospektralnych niezbędne jest odpowiednie przygotowanie danych i zminimalizowanie wpływu czynników zakłócających wartość radiometryczną. Dzięki zastosowaniu znaczników terenowych o znanych wartościach odbicia w poszczególnych zakresach spektralnych możliwa jest prawidłowa kalibracja danych.

Założono, że wykorzystane w pracy znaczniki muszą spełniać podstawowe parametry:

- Możliwie niskie (<20%) i możliwie wysokie (>80%) odbicie spektralne w zakresach wykorzystywanych do badania drzew. Odbicie spektralne materiału referencyjnego musi być przewidywalne niezależnie od usytuowania i warunków oświetleniowych,
- Lambertowski charakter odbicia/rozpraszania padającego światła,
- Odpowiedni rozmiar terenu, co najmniej 3×GSD (ang. *Ground Sampling Distance*) cm (przewidywany maksymalny rozmiar piksela). Jest to graniczna wartość dla skutecznej detekcji (Campbell, Shin 2012; Tellidis, Levin 2014).

W celu kalibracji sensorów optycznych z pokładu samolotu wybrano znaczniki terenowe Zenith Lite Target firmy Sphere Optics (ryc. 2) z materiału aluminiowego z warstwą siarczanu baru (BaSO₄) w kształcie kwadratu o wymiarach 50×50 cm i ułożono je blisko badanego terenu leśnego. Typowe wartości współczynnika odbicia dla znaczników wyniosły poniżej 5% (dla znacznika ciemnego) i powyżej 95% (dla jasnego). Rycina 3 przedstawia krzywe spektralne dla wybranych znaczników. Zastosowanie znaczników terenowych umożliwiło poprawne skalibrowanie sensorów oraz przetworzenie danych eliminujące wpływ atmosfery, a w szczególności nieselektywne rozpro-



Rycina 2. Znaczniki kalibracyjne o niskiej (<5%) i wysokiej (>95%) reflektancji w zakresie światła widzialnego i podczerwieni wykorzystywane w projekcie HESOFF

Figure 1. Low (<5%) and high (>95%) reflectance in visual and near infrared light calibration markers used in HESOFF project

szenie na parze wodnej i cząsteczkach VOC, na zobrazowaną na zdjęciach reflektancję (ryc. 3).

Porównanie wyników z rezultatami wybranych algorytmów korekcji atmosferycznej wykonano dla serii obrazowań wykonanych z różnych wysokości nad Żelechowem na początku października 2014 r. W celu zilustrowania problemów związanych z zastosowaniem korekcji atmosferycznej dla obrazowań teledetekcyjnych pozyskanych z pułapu lotniczego wykonano także porównanie z dwoma algorytmami korekcji: algorytmem QUAC oraz algorytmem FLAASH.

Algorytm QUAC jest typowym algorytmem typu ‘czarna skrzynka’, który uwzględnia ogólne modele atmosfery i nie daje możliwości na wprowadzanie własnych parametrów w procesie korekcji, co znacząco redukuje jego przydatność do korekcji obrazowań lotniczych z niewielkich wysokości o silnym wpływie lokalnych niestandardowych składników atmosferycznych.

Algorytm FLAASH wymaga podania wielu parametrów charakteryzujących wykonane zobrazowanie oraz środowiskowe i meteorologiczne warunki jego wykonania do uzyskania poprawnego wyniku. Dla danych pozyskanych z typowych lotów fotogrametrycznych może to być trudne, tym bardziej że algorytm do poprawnej pracy wymaga wy-

korzystania kanału podczerwieni (około 2 μm), który nie jest w takich nalotach rejestrowany. Powoduje to błędy w wynikowych obrazach po korekcji.

Analiza zmienności nasilenia jasności wybranych pikseli i fragmentów obrazu została wykonana w funkcji długości fali (kanałów) oraz w funkcji wysokości obrazowania. Szczególnie ta druga analiza jest istotna ze względu na ocenę wpływu atmosfery na uzyskany obraz oraz poprawność korekcji.

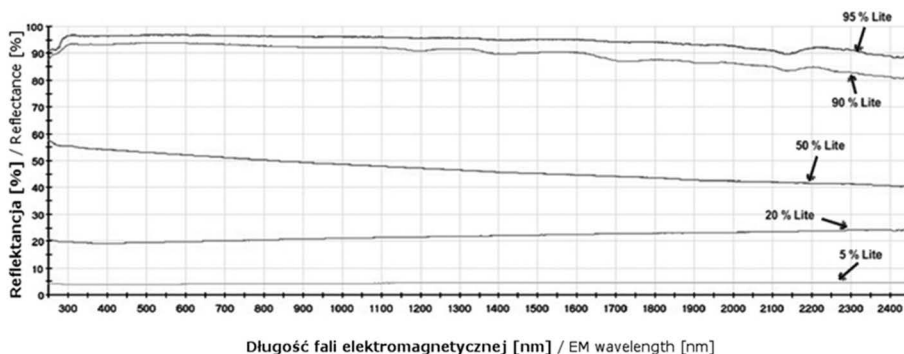
5. Wyniki i dyskusja

W pierwszym etapie pracy wykonano analizę jednolitych powierzchni obserwowanych na obrazach wykonanych ze wszystkich wysokości. Analiza nasilenia jasności wybranych pikseli zobrazowania surowego (ryc. 4), położonych w obrębie znaczników umieszczonych na powierzchni badanej w postaci krzyży z blach duraluminiowych, pokazuje obniżenie ich jasności wraz z wysokością lotu, niezależnie od kanału rejestracji. Dla wyższych poziomów lotu jest to związane z małym rozmiarem samych znaczników i uśrednianiem odbicia od ich powierzchni z otaczającym terenem. Wartości znaczników zapisano na 8 bitach w przedziale od 0 do 255.

Dla poszczególnych kanałów obrazu surowego (tab. 1) widać dużą różnicę między wynikami dla kanałów w zakresie widzialnym oraz w zakresie bliskiej podczerwieni. Wartości dla podczerwieni są znacznie niższe, wynika to bezpośrednio z charakteru spektralnego wykorzystanych w badaniu znaczników.

Algorytm QUAC (tab. 2) zmniejsza jasność pikseli w kanałach podczerwonych w sposób wyraźny, natomiast w przypadku kanałów w zakresie widzialnym wyniki są bardzo zbliżone do danych surowych z lekką redukcją mgiełki atmosferycznej.

W przypadku algorytmu FLAASH sytuacja jest całkowicie odmienna. Algorytm ten wykorzystuje model separacji chmur pierzastych typu cirrus z uwzględnieniem specjalnego kanału spektralnego w zakresie 1360–1380 nm, kanał ‘cirrus’ dostępny jest w scenach Landsat 8 OLI, natomiast nie jest dostępny dla rejestracji w typowych kamerach lotniczych. Dla danych z niskiego i średniego pułapu algorytm FLAASH dokonuje błędnej identyfikacji chmur. Algorytm klasyfikuje obszary jasne, w tym również wzorce bieli, jako chmury i wyłącza je z klasyfikacji (korekcji) przez przyporządkowanie tym pikselom wysokich wartości negatywnych. Obszary te zostają



Rycina 3. Krzywa spektralna znaczników firmy SphereOptics GmbH (2017)

Figure 3. SphereOptics GmbH (2017) markers spectral curve

Tabela 1. Poziom jasności wybranych pikseli nieprzetworzonego obrazu (źródłowego) oraz ich wskaźnik NDVI
 Table 1. Selected pixels intensity of RAW image with NDVI values

Wysokość [m] Altitude [m]	Środek rejestrowanego zakresu spektralnego [nm] The central value of spectral range [nm]						NDVI [%]
	460	550	570	640	760	850	
300	255	255	255	255	137	103	-30,10
800	153	255	255	255	76	57	-54,08
1200	163	255	203	255	78	56	-53,15
1300	149	209	125	218	59	47	-57,40
1700	162	199	235	225	61	40	-57,34
2100	159	185	211	199	58	40	-54,86
2500	145	165	152	161	54	39	-49,77

Tabela 2. Poziom jasności wybranych pikseli oraz ich wskaźnik NDVI dla zdjęcia przetworzonego z wykorzystaniem algorytmu QUAC
 Table 2. Selected pixels intensity QUAC algorithm processed image with NDVI values

Wysokość [m] Altitude [m]	Środek rejestrowanego zakresu spektralnego [nm] The central value of spectral range [nm]						NDVI [%]
	460	550	570	640	760	850	
300	255	255	255	255	206	192	-10,63
800	175	255	255	255	166	143	-21,14
1200	183	255	199	255	151	120	-25,62
1300	209	205	115	216	108	101	-33,33
1700	132	197	222	233	130	94	-28,37
2100	146	175	205	194	80	72	-41,61
2500	130	152	139	152	45	31	-54,31

Tabela 3. Poziom jasności wybranych pikseli i ich wskaźnik NDVI dla zdjęcia przetworzonego z wykorzystaniem algorytmu FLAASH
 Table 3. Selected pixels intensity FLAASH algorithm processed image with NDVI values

Wysokość [m] Altitude [m]	Środek rejestrowanego zakresu spektralnego [nm] The central value of spectral range [nm]						NDVI [%]
	460	550	570	640	760	850	
300	135	80	88	2	0	206	-100,00
800	0	120	130	44	182	144	61,06
1200	0	114	0	54	178	141	53,45
1300	0	14	0	0	138	118	100,00
1700	0	0	65	8	141	107	89,26
2100	0	0	14	0	136	102	100,00
2500	0	0	0	0	124	100	100,00

„wymaskowane”. Dla zilustrowania problemu wykonano tym algorytmem korekcję wszystkich kanałów zdjęć pozyskanych z siedmiu różnych wysokości lotu. Omawiane obszary są widoczne na przetworzonym zdjęciu jako czarne plamy. Aby ilościowo zbadać wyniki tej klasyfikacji przeliczono dodatkowo wartości uzyskane w wyniku zastosowania tej metody korekcji na zakres 0–255 i odczytano wartości pikseli dla znaczników. Wyniki zebrano w tabeli 3.

Po przeprowadzeniu korekcji widać, że uzyskane wyniki są wyraźnie odmienne od danych źródłowych. Prawidłowo poprawione są wyłącznie piksele o niewielkich wartościach refleksyjności, a piksele jasne uzyskują wynikowo wartość 0 (pierwotne wartości po korekcji wyrażone były w zakresie od -32 768 do 0).

Analiza obrazów przed i po korekcji wyraźnie pokazuje różnicę pomiędzy wynikami dla obu algorytmów. Obraz źródłowy oraz obrazy wynikowe zamieszczono na rycinach 4, 5, 6.

Zarówno obraz surowy (ryc. 4), jak i obraz po korekcji QUAC (ryc. 5) charakteryzują się dobrą kontrastowością. Obraz po korekcji jest nieznacznie ciemniejszy, ale wciąż w pełni czytelny, co jest poprawnym wynikiem usunięcia efektów rozpraszania atmosferycznego.

W przypadku obrazu po wykonanej korekcji algorytmem FLAASH (ryc. 6) widoczne są wyraźnie czarne pola o wartości 0 położone w najjaśniejszych obszarach obrazowania. Potencjał interpretacyjny obrazu jest zmniejszony ze względu na „wymaskowanie” części obszaru. W ujęciu przekrojowym warto przeanalizować kilka wykresów obrazujących zależności między wartościami obrazu surowego i obrazu po korekcji, korzystając z obydwu algorytmów.

Dla kanałów 550, 570 i 640 nm (ryc. 7, 8, 9) istnieje bardzo duża zgodność wartości pikseli reprezentujących znaczniki na obrazie surowym i po korekcji QUAC, natomiast wartości po korekcji FLAASH są diametralnie różne.

We wszystkich analizowanych przypadkach obraz po korekcji (ryc. 7, 8, 9) wykazuje niższe wartości pikseli niż dla obrazu surowego. Świadczy to o poprawnym zredukowaniu niewielkiego, lecz rosnącego ze wzrostem wysokości lotu, rozjaśniającego wpływu atmosfery wynikającego z rozpraszania światła w atmosferze. Wyraźnie widoczna jest także tendencja do obniżenia jasności pikseli znaczników w miarę wzrostu wysokości lotu. Wynik ten wydaje się niezgodny ze wzrastającym udziałem mgielki atmosferycznej, jednak przyczyna leży po stronie relatywnie niewielkich znaczników terenowych, które wraz ze wzrostem wysokości lotu są reprezentowane przez coraz mniejszą liczbę pikseli, a od wysokości około 1700 m n.p.t. zaczynają być uśredniane z otaczającym terenem. Wielkość terenowa piksela GSD dla wysokości 800 m wynosi 0,25 m., Znacznik natomiast ma kształt krzyża o wymiarach 2×2 m i szerokości ramion 0,4 m. W związku z „wymaskowaniem” znacznego obszaru zarejestrowanego na zdjęciu przy wykorzystaniu algorytmu FLAASH do analizy ilościowej wpływu atmosfery wykorzystano wyniki korekcji algorytmem QUAC odniesione do wartości zobrażeń surowych w postaci różnicy wartości. Wyniki przedstawia tabela 4.



Rycina 4. Kanał 640 nm, wysokość 1200 m, obraz surowy, skala jak na rycinie 1

Figure 4. 640 nm optical band, altitude 1200 m, RAW image, scale on image 2



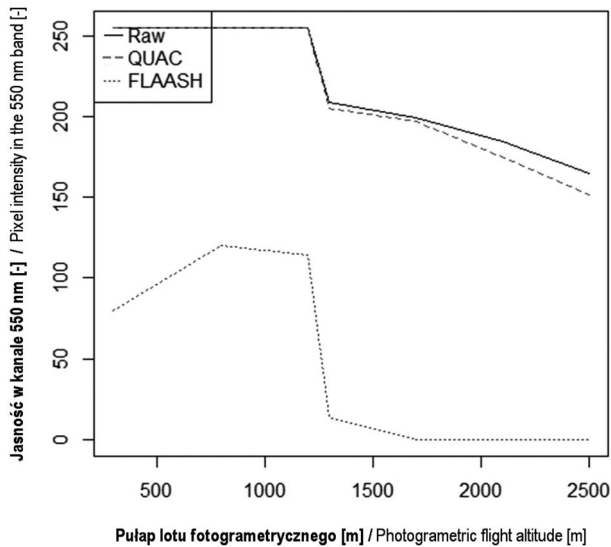
Rycina 5. Kanał 640 nm, wysokość 1200 m, obraz po korekcji algorytmem QUAC, skala jak na rycinie 1

Figure 5. 640 nm optical band, altitude 1200 m, QUAC algorithm processed image, scale on image 2



Rycina 6. Kanał 640 nm, wysokość 1200 m, obraz po korekcji algorytmem FLAASH, skala jak na rycinie 1

Figure 6. 640 nm optical band, altitude 1200 m, FLAASH algorithm processed image, scale on image 2



Rycina 7. Zależność między wartościami dla obrazu surowego (RAW) i obrazu po korekcji (QUAC, FLAASH), dla kanału 550 nm

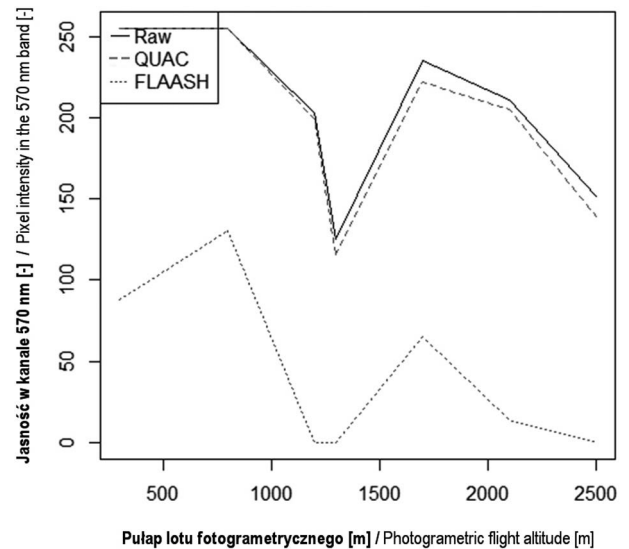
Figure 7. RAW image and processed images (QUAC, FLAASH) pixels intensities dependence for 550 nm optical band

W przypadku analizy wartości bezwzględnych zauważalne są szczególnie wysokie różnice dla kanałów bliskiej podczerwieni. Algorytm spowodował bardzo wyraźne rozjaśnienie obrazu.

Efekty działania algorytmu bardzo dobrze widać w tabeli obrazującej procentową korekcję jasności obrazów (tab. 4). Należy pamiętać, że wszystkie przedstawione powyżej analizy dotyczą poziomu jasności dla wybranych jasnych powierzchni znaczników usytuowanych na badanym terenie. W przypadku analizy całego obrazu wyniki bezwzględne i procentowe będą się różnić. Nie są one jednak przedstawiane w tym opracowaniu.

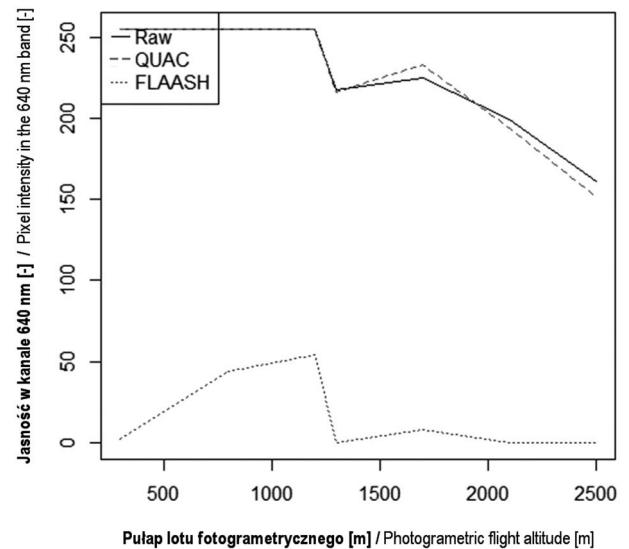
Autorska metoda oszacowania wpływu atmosfery na wartości zarejestrowane na zdjęciu

Porównywalne wyniki otrzymano przy wykorzystaniu autorskiego oprogramowania stworzonego na potrzeby realizowanego projektu. Obszar badawczy założono w Nadleśnictwie Karczma Borowa (współrzędne środka obszaru w układzie WGS84: 51.848766, 16.626985). W celu oceny wpływu atmosfery na pomiar refleksyjności jesienią 2013 r. wykonano misję fotolotniczą nad terenem leśnym o powierzchni 5 ha. Do pozyskania zdjęć wykorzystano prototypową platformę wielosensorową Quercus 6. rejestrującą promieniowanie w zakresach: 635 i 865 nm. Do analizy zdjęć wykorzystano program stworzony przez zespół projektowy zaangażowany w projekt HESOFF. W eksperymencie zmierzono refleksyjność dla wybranych zdjęć tego samego obszaru wykonanych na różnych wysokościach: 100, 400, 600 m. Wynikiem analizy jest wykres przedstawiający zależność refleksyjności od zmiany wysokości lotu.



Rycina 8. Zależność między wartościami dla obrazu surowego (RAW) i obrazu po korekcji (QUAC, FLAASH), dla kanału 570 nm

Figure 8. RAW image and processed images (QUAC, FLAASH) pixels intensities dependence for 570 nm optical band



Rycina 9. Zależność między wartościami dla obrazu surowego (RAW) i obrazu po korekcji (QUAC, FLAASH), dla kanału 640 nm
Figure 9. RAW image and processed images (QUAC, FLAASH) pixels intensities dependence for 640 nm optical band

6. Podsumowanie

Analiza danych wykazała, że korelacja rejestrowanego natężenia światła i pułapu jest silnie dodatnia, a refleksyjność wzrasta wraz z wysokością, zarówno dla zdjęć w zakresie czerwonym, jak i w zakresie podczerwonym. Pomimo względnie niewielkiego pułapu lotu fotogrametrycznego odnotowano typowe dla zdjęć satelitarnych pojaśnienie obiektów wraz z wysokością. Zjawisko to interpretuje się na trzy sposoby w zależności od sposobu rozpraszania

Tabela 4. Wpływ atmosfery na zmianę wartości pikseli (%)

Table 4. The influence of atmospheric light scattering on pixels intensities (%)

Wysokość [m] Altitude [m]	Środek rejestrowanego zakresu spektralnego [nm] The central value of spectral range [nm]					
	460	550	570	640	760	850
	[%]					
300	0,0	0,0	0,0	0,0	-50,4	-86,4
800	-14,4	0,0	0,0	0,0	-118,4	-150,9
1200	-12,3	0,0	2,0	0,0	-93,6	-114,3
1300	-40,3	1,9	8,0	0,9	-83,1	-114,9
1700	18,5	1,0	5,5	-3,6	-113,1	-135,0
2100	8,2	5,4	2,8	2,5	-37,9	-80,0
2500	10,3	7,9	8,6	5,6	16,7	20,5

nia, tj. rozproszenia Rayleigh'a, Mie oraz nieselektywnego (Lillesand, Kiefer 1994). Dyspersja, czyli rozpraszanie Rayleigh'a, zachodzi gdy promieniowanie reaguje z atomami i cząsteczkami, których rozmiar jest dużo mniejszy od długości fali. Padający na atom promień pobudza do drgań elektrony, które wysyłają fotony światła. Efekt związany z tym zjawiskiem jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali w czwartej potęgę (Slater et al. 1983; Chavez 1988). Warto zauważyć, że cząsteczkami odpowiadającymi za to zjawisko w atmosferze nad obszarami leśnymi są standardowe cząsteczki wchodzące w skład atmosfery, czyli azot, tlen itp., oraz gazy typowe dla ekosystemu leśnego, czyli izopreny, monoterpény, metanol itp. Te drugie, ze względu na swój rozmiar, w większym stopniu wpływają na rozpraszanie dłuższych fal światła. Rozpraszanie tego typu jest jednorodne we wszystkich kierunkach. Dotyczy przede wszystkim światła widzialnego. Drugim typem rozpraszania jest rozpraszanie Mie. Zachodzi ono wtedy, kiedy długość fali jest podobna do średnicy cząstki. Zjawisko zachodzi głównie w przypadku fal dłuższych. Standardowo bada się tutaj rozpraszanie na cząstkach pary wodnej i pyłów, w tym przypadku będą to jednak również duże cząstki VOC. Wielkość rozpraszania tego typu jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali (Slater et al. 1983). Trzecim typem rozpraszania, który głównie zaobserwowano w tej analizie, jest rozpraszanie nieselektywne. Zachodzi ono niezależnie od długości fali światła na cząstkach o wymiarach dużo większych od długości fali. Głównie należy wziąć pod uwagę krople deszczu, pary wodnej o rozmiarze 5–100 μm . Podlega mu światło w zakresie widzialnym, bliskiej i środkowej podczerwieni (Wołoszyn 2009).

W przypadku stosowania algorytmów korekcji atmosferycznej dla zobrazowań wielospektralnych wykonywanych z pułapu lotniczego należy w każdym przypadku rozważyć wykonanie korekcji z wykorzystaniem odpowiednich technik. Z jednej strony dostępne algorytmy mogą być bardzo

uproszczone (QUAC), przez co dają poprawne rezultaty jedynie dla typowych scen wykonanych w standardowych warunkach. Tego typu algorytmy są łatwe do użycia, ale są nieprzydatne dla zobrazowań obejmujących obszary o nietypowych składnikach atmosferycznych, np. nad obszarami o bujnej roślinności. Z drugiej jednak strony w przypadku stosowania skomplikowanych algorytmów korekcyjnych istnieje konieczność wprowadzenia wielu parametrów wejściowych, których pozyskanie jest niemożliwe dla typowych misji lotniczych realizowanych na potrzeby projektów badawczych. Brak tych parametrów wpływa na błędną klasyfikację obszarów zarejestrowanych na zdjęciach, tak jak w przypadku zastosowania korekcji FLAASH (ryc. 9). Dodatkowo należy zauważyć, że oprócz natężenia jasności pikseli, również wskaźniki teledetekcyjne biomasy, takie jak EVI lub NDVI, są wrażliwe na pułap, z którego wykonywany jest pomiar. Dla badanych pikseli różnica wskaźnika NDVI wynosiła od 4,54 do 32,94% pomiędzy zdjęciami bez i z korekcją atmosferyczną. Należy pamiętać, że przy wskaźnikach tego typu używa się danych obrazowych z różnych kanałów optycznych pomiędzy którymi, jak wykazano w niniejszej pracy, występuje znaczne zróżnicowanie wpływu atmosfery na poziom jasności. W badanym przypadku dla korekcji algorytmem QUAC różnica dla kanału 640 nm była niewielka, zaś dla kanału 730 nm – znaczna. Rozwiązaniem dla wskazanych w publikacji problemów mogą być dalsze, szczegółowe studia nad teoretycznymi oraz praktycznymi aspektami korekcji atmosferycznej dla niewielkich obszarów. W pracach należy uwzględnić charakter badanego obszaru oraz wpływ wszystkich istotnych dla danego ekosystemu składników atmosfery.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Za pomoc w realizacji badań autorzy dziękują pracownikom Zakładu Ochrony Lasu Instytutu Badawczego Leśnictwa oraz Zakładu Teledetekcji Instytutu Lotnictwa w Warszawie.

Badania sfinansowano w ramach projektu HESOFF nr Life 11 ENV/PL/459 finansowanego w ramach instrumentu finansowego LIFE + ze środków Komisji Europejskiej i Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Literatura

- ATCOR. 2015. <http://www.rese.ch/products/atcor/index.html> [30.05.2017].
- Badawy B. 2011. Quantifying carbon processes of the terrestrial biosphere in a global atmospheric inversion based on atmospheric mixing ratio, remote sensing and meteorological data. Diss. Universität Jena. DOI 10.4126/98-004421237.
- Burkart A., Aasen H., Alonso L., Menz G., Bareth G., Rascher U. 2015. Angular dependency of hyperspectral measurements over wheat characterized by a novel UAV based goniometer. *Remote Sensing* 7(1): 725–746. DOI 10.3390/rs70100725.
- Campbell J.E., Shin M. 2012. Satellite Imagery and Aerial Photography, in: *Geographic Information System Basics v. 1.0*, 94–99. DOI 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- Chavez P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459–479. DOI 10.1016/0034-4257(88)90019-3.
- Czapski P., Kacprzak M., Korniluk T., Kotlarz J., Kubiak K., Mazur A., Mrowiec K., Oszako T., Pieniżek J., Pośpieszczyk A., Tkaczyk M., Wodziński K., Zalewska N. 2014. Budowa i zastosowanie platformy wielosensorowej w badaniu wybranych parametrów środowiska. *Prace Instytutu Lotnictwa* 1(234): 126–142. DOI 10.15199/50.2016.3.1.
- Delwiche C.F., Sharkey T.D. 1993. Rapid appearance of 13C in biogenic isoprene when 13CO₂ is fed to intact leaves. *Plant, Cell and Environment* 16: 587–591.
- Fall R., Benson A.A. 1996. Leaf methanol—the simplest natural product from plants. *Trends in Plant Sciences* 1: 296–301. DOI 10.1016/S1360-1385(96)88175-0.
- Fall R. 2003. Abundant oxygenates in the atmosphere: A biochemical perspective. *Chemical Reviews* 103: 4941–4495. DOI 10.1021/cr0206521.
- Fuentes J.D., Lerdau M., Atkinson R., Baldocchi D., Bottenheim J.W., Ciccioli P., Lamb B., Geron C., Gu L., Guenther A., Sharkey T.D., Stockwell W. 2000. Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81: 1537–1575. DOI 10.1175/1520-0477(2000)081.
- Głowienka E. 2008. Porównanie metod korekcji atmosferycznej dla danych z sensorów hiperspektralnych 18, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Kraków. ISBN 978-83-61576-08-2.
- Guenther A., Hewitt C.N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., McKay W.A., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J., Zimmerman P. 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres* 100: 8873–8892. DOI 10.1029/94JD02950.
- Guenther A., Zimmerman P., Wildermuth M. 1994. Natural volatile organic compound emission rates for U.S. woodland landscapes. *Atmospheric Environment* 28: 1197–1210. DOI 10.1016/1352-2310(94)90297-6.
- Houghton R.A., Nassikas A.A. 2017. Negative emissions from stopping deforestation and forest degradation, globally. *Global Change Biology* 24(1): 350–359. DOI 10.1111/gcb.13876.
- Jardine K., Harley P., Karl T., Guenther A., Lerdau M., Mak J.E. 2008. Plant physiological and environmental controls over the exchange of acetaldehyde between forest canopies and the atmosphere. *Bio-geosciences* 5: 1726–4170. DOI 10.5194/bg-5-1559-2008.
- Jarocińska A. 2012. Zastosowanie modeli transferu promieniowania w hiperspektralnych badaniach stanu roślinności łąk. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, rozprawa doktorska.
- Kaneko E., Aoki H., Tsukada M. 2016. Image-based path radiance estimation guided by physical model. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. DOI 10.1109/IGARSS.2016.7730811.
- Khodri M., Swingedouw D., Mignot J., Sicre M.-A., Garnier E., Masson-Delmotte V., Ribes A., Terray L. 2017. Klimat ostatniego tysiąclecia. *Przeгляд Geofizyczny* 58(1-2): 55–82. DOI 10.4267/2042/56360.
- Kiendler-Scharr A., Wildt J., Dal Maso M., Hohaus T., Kleist E., Mentel T.F., Tillmann R., Uerlings R., Schurr U., Wahner A. 2009. New particle formation in forests inhibited by isoprene emissions. *Nature* 461: 381–384. DOI 10.1038/nature08292.
- Kotula A. 2011. Czynniki kształtujące jakość radiometryczną ortofotomapy w procesie fotogrametrycznym. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Katedra Geoinformatyki, Fotogrametrii i Teledetekcji, Kraków.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. 1994. *Remote Sensing and Photo Interpretation*, 3rd. ed. John Wiley & Sons, New York, 750 p. ISBN 3540528059.
- MODTRAN. 2016. <http://modtran5.com/about/index.html> [12.10.2016].
- Niinemets U., Loreto F., Reichstein M. 2004. Physiological and physico-chemical controls on foliar volatile organic compound emissions. *Trends in Plant Sciences* 9: 180–186. DOI 10.1016/j.tplants.2004.02.006.
- Ochtyra A., Zagajewski B., Kozłowska A., Marcinkowska-Ochtyra A., Jarocińska A. 2016. Ocena kondycji drzewostanów Tatrzńskiego Parku Narodowego za pomocą metody drzewa decyzyjnego oraz wielospektralnych obrazów satelitarnych Landsat 5 TM. *Sylwan* 160(3): 256–264.
- Osińska-Skotak K. 2005. Wpływ korekcji atmosferycznej na wyniki cyfrowej klasyfikacji. *Acta Scientiarum Polonorum: Geodesia et Descriptio Terrarum* 4(1): 41–53.
- Osińska-Skotak K. 2007. Znaczenie korekcji radiometrycznej w procesie przetwarzania zdjęć satelitarnych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 17b, Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska. ISBN 978-83-920594-9-2.
- Shu Y., Atkinson R. 1995. Atmospheric lifetimes and fates of a series of sesquiterpenes. *Journal of Geophysical Research* 100: 7275–7281. DOI 10.1029/95JD00368.
- Slater P., Doyle F., Fritz L., Welch R. 1983. Photographic systems for remote sensing. *American Society of Photogrammetry Second Edition of Manual of Remote Sensing* 1(6): 231–291. ISBN 0686231082.
- Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., Mocomber S.A. 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?

- Remote Sensing of Environment* 75: 230–244. DOI 10.1016/S0034-4257(00)00169-3.
- SphereOptics 2017. Herrsching, Germany, <http://sphereoptics.de/en/contact/adress-and-technical-contact-persons/> [30.11.2017].
- Tellidis I., Levin E. 2014. Photogrammetric Image Acquisition with Small Unmanned Aerial Systems. ASPRS Annual Conference Louisville, Kentucky, 23–28.
- Trainer M., Williams E.J., Parrish D.D., Buhr M.P., Allwine E.J. 1987. Models and observations of the impact of natural hydrocarbons on rural ozone. *Nature* 329: 705–707. DOI 10.1038/329705a0.
- Warneke C., Karl T., Judmaier H., Hansel A., Jordan A., Lindinger W. 1999. Acetone, methanol, and other partially oxidized volatile organic emissions from dead plant matter by abiological processes: Significance for atmospheric HOx chemistry. *Global Biogeochemical Cycles* 13: 9–17. DOI 10.1029/98GB02428.
- Wołoszyn E. 2009. Meteorologia i klimatologia w zarysie. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk. ISBN 978-83-7775-237-1.

Wkład autorów

A.M. – realizacja nalotu fotogrametrycznego, postprocessing danych, analiza krzywych spektralnych refleksyjności, redagowanie artykułu; M.K. – realizacja nalotu fotogrametrycznego, analiza krzywych spektralnych, analiza pod kątem fotogrametrycznym, redagowanie artykułu; K.K. – analiza krzywych spektralnych refleksyjności, redagowanie artykułu; J.K. – przygotowanie oprogramowania służącego do postprocessingu danych, redagowanie artykułu; K.S. – processing danych spektralnych za pomocą algorytmów QUAC I FLAASH, redagowanie artykułu.