

MACIEJ BARTOLD

Analiza porównawcza wartości wskaźnika wegetacji obszarów leśnych w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych NOAA AVHRR i SPOT VEGETATION

Comparison of time series of the vegetation index derived from NOAA AVHRR and SPOT VEGETATION satellite observations

ABSTRACT

Bartold M. 2016. Analiza porównawcza wartości wskaźnika wegetacji obszarów leśnych w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych NOAA AVHRR i SPOT VEGETATION. Sylwan 160 (2): 153-161.

The paper aimed at comparison of remotely sensed data for forest areas in Poland. The main objective was to study how time-series of satellite data derived from NOAA AVHRR and SPOT VEGETATION (SPOT VGT) are compatible and can be useful for forest cover monitoring. NOAA AVHRR fifteen-year observations collected by the receiving station mounted at the Institute of Geodesy and Cartography were processed with radiometric, geometric and atmospheric corrections to obtain Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) images. Next, daily NDVI images were clustered into ten-day composites and smoothed with Savitzky-Golay filter. The long-term NDVI data derived from SPOT VGT were post-processed in order to prepare reference set to cross-comparison analysis. The study area encompasses forest complexes representative for various climatic conditions: Borecka, Augustów, Knyszyn and Białowieża Forests as well as forests of the Karkonosze and Beskid Żywiecki mountains. The satellite data were analyzed within vegetation period (April-September). The comparison of frequency of cloud-free observations and mean NDVI values over study sites was performed to follow the deviations in two datasets. The Wilcoxon signed-rank test proved that there are statistically significant NDVI differences between NOAA and SPOT data for Augustów, Knyszyn, Białowieża and Karkonosze Forests. On the other hand, NDVI observations for Borecka Forest and Beskid Żywiecki Mts. revealed quite high compatibility. The Spearman rank correlation results proved that NDVI time-series derived from NOAA AVHRR and SPOT VGT are incoherent and depended on test site or year of the observation. The cross-comparison analysis revealed that there is a need for additional investigation into achieving full compatibility of satellite datasets for successful forest cover monitoring.

KEY WORDS

forest monitoring, vegetation index, NOAA AVHRR, SPOT VEGETATION

ADDRESSES

Maciej Bartold – e-mail: maciej.bartold@igik.edu.pl

Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji, Uniwersytet Warszawski;
ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, 00-927 Warszawa

Wstęp

Wprowadzenie na orbitę okołozemską amerykańskich satelitów TIROS zapoczątkowało nową erę obserwacji Ziemi i przyczyniło się do wzrostu badań ukierunkowanych na szczegółowy monitoring jej środowiska. System TIROS, umieszczony na orbicie w kwietniu 1960 roku, był przeznaczony do badań zjawisk atmosferycznych. Jego kontynuatorem jest do dziś nieprzerwanie funkcjonująca seria satelitów meteorologicznych NOAA z sensorami Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Rejestrują one każdego dnia całą powierzchnię ziemską z rozdzielczością przestrzenną 1×1 km w zakresie promieniowania czerwonego, bliskiej i średniej podczerwieni oraz w dwóch zakresach dalekiej podczerwieni termalnej.

W ramach inicjatywy wspólnotowej Francji, Belgii, Włoch i Szwecji powstał kompletny program VEGETATION. Owocem tego przedsięwzięcia było skonstruowanie i umieszczenie na pokładach francuskich satelitów SPOT skanerów przeznaczonych do obserwacji biosfery. Skanery VEGETATION (VGT) zostały uruchomione na pokładzie satelitów SPOT4 w marcu 1998 roku oraz SPOT5 w maju 2002 roku. Rejestrowały one dwukrotnie w ciągu dnia powierzchnię ziemską z rozdzielczością przestrzenną 1×1 km w zakresie promieniowania niebieskiego, czerwonego oraz w bliskiej i średniej podczerwieni. Program zakończono w czerwcu 2014 roku, a obecnie po orbicie krąży następcza SPOT VEGETATION – satelita Proba-V.

Teledetekcja satelitarna odgrywa nieocenioną rolę w wielu kierunkach badań Ziemi. Metody teledetekcyjne badań środowiska znalazły w Polsce zastosowanie w kartowaniu użytkowania ziemi, rolnictwie i leśnictwie oraz w rejestrowaniu zagrożeń naturalnych, takich jak powodzie, pożary czy susze [Ciołkosz, Białousz 2008]. Do tego celu stosuje się najczęściej znormalizowany wskaźnik roślinności Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), który w uniwersalny sposób określa wigor roślin oraz stan ich rozwoju [Rouse 1973; Tucker 1979]. Do jego obliczenia wykorzystuje się właściwości spektralne chlorofilu zawartego w roślinach (czerwony zakres widma elektromagnetycznego) oraz struktur komórkowych i tkankowych (bliska podczerwień). Chlorofil maksymalnie absorbuje promieniowanie w zakresie niebieskim i czerwonym. Zakres wartości NDVI obejmuje od $-1,0$ do $1,0$, a wartości bliższe jedności wskazują na lepszą kondycję roślin.

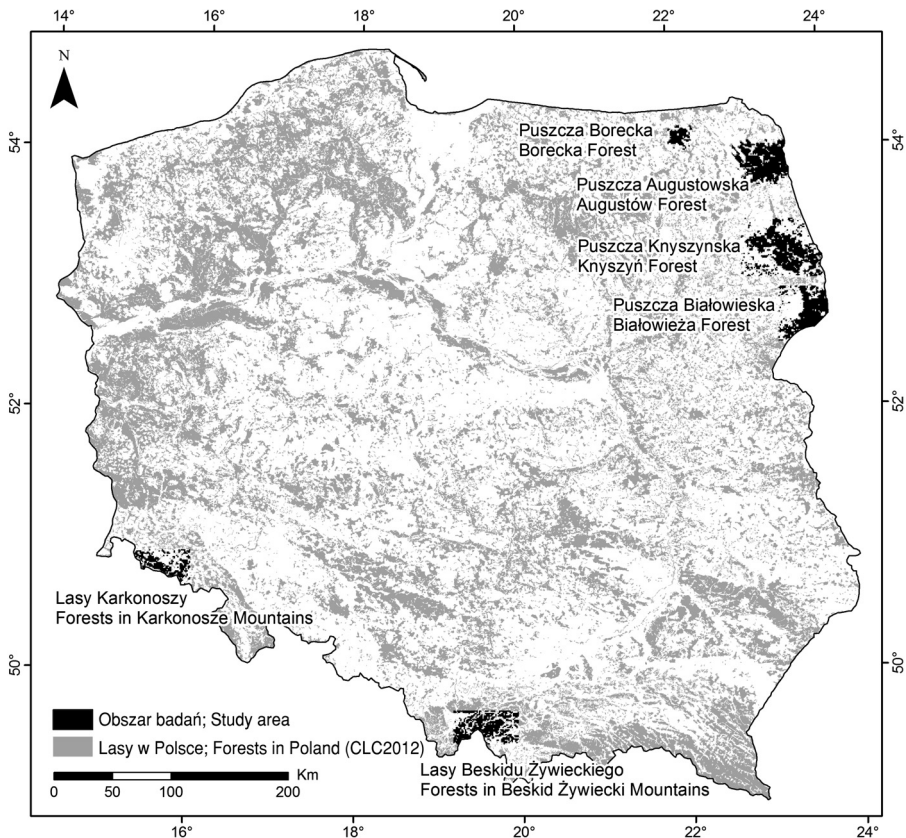
Prace nad satelitarnymi badaniami lasów w Polsce rozpoczęto już w latach 70., po udostępnieniu przez NASA pierwszych zdjęć satelitarnych Landsat MSS. Na ich podstawie rozpoznano podstawowe wydzielenia drzewostanów iglastych, liściastych i mieszanych [Ciołkosz, Poławski 1980]. W kolejnych latach wykonywano analizy stanu lasów na podstawie nowszych zdjęć Landsat TM i SPOT dla obszarów leśnych Sudetów, Borów Tucholskich i Puszczy Knyszyńskiej [Zawiła-Niedźwiecki 1990]. Rozwój metod teledetekcyjnych oraz dostęp do wieloletnich obserwacji pozwoliły na przeprowadzenie bardziej zaawansowanych badań w monitoringu zmian w lasach w Sudetach Zachodnich [Ciołkosz i in. 1997] oraz w lasach zniszczonych przez żywioły [Bartold 2012]. Rozwinięte techniki geoinformatyczne, w tym teledetekcyjne, znajdują zastosowanie także w szczegółowej inwentaryzacji urzędzeniowej lasu [Zajączkowski, Wężyk 2004].

W związku z dostępem do długoletnich obserwacji z różnych satelitów powstało wiele prac naukowych, w których badano ich współzależność [Brown i in. 2006; Sánchez i in. 2014]. Autorzy podkreślają istotny potencjał stałego monitorowania form pokrycia terenu na podstawie danych z satelitów niskorozdzielczych NOAA, SPOT (Proba) oraz Terra. Wskazują, że mimo nie zawsze zgodnych wyników obserwacji, należy stale przeprowadzać kolejne próby w celu weryfikowania jakości danych długoletnich, dostępnych z wielu satelitów środowiskowych.

W niniejszej pracy poruszono temat możliwości badania stanu roślinności lasów na podstawie ciągłych wieloletnich obserwacji satelitarnych. W konsekwencji zakończenia w 2014 roku 15-letniej działalności operacyjnej skanerów VEGETATION postawiono pytanie badawcze, czy dane funkcjonującego do dziś skanera AVHRR mogą być samodzielnie stosowane do monitorowania środowiska leśnego. Podjęto próbę zestawienia dwóch zbiorów danych satelitarnych w kontekście badania stanu i rozwoju polskich lasów. Przeprowadzono analizę porównawczą wskaźnika wegetacji NDVI, najbardziej uniwersalnego parametru stosowanego w pomiarach teledetekcyjnych do określania kondycji roślinności. Badania wykonano dla wybranych terenów leśnych, z uwzględnieniem klimatycznych uwarunkowań roślinności. Analizy bazują na średnio-rozdzielczych kilometrowych danych satelitarnych NOAA AVHRR oraz SPOT VGT. W niniejszej analizie porównawczej przyjęto, że wartości wskaźnika wegetacji z danych NOAA AVHRR będą odnoszone do referencyjnych wartości wskaźnika pozyskanego z danych SPOT VGT.

Material i metody

Do badań wybrano dominujące powierzchniowo puszcze w północno-wschodniej Polsce i górskie kompleksy leśne w Polsce południowej (ryc. 1). Lasy te cechują się zróżnicowanymi cechami klimatycznymi, takimi jak długość sezonu wegetacyjnego czy czas zalegania pokrywy śnieżnej.



Ryc. 1.

Badane kompleksy leśne
Forest complexes analysed in the study

Szczegółowe analizy na północy przeprowadzono na terenie Puszczy Boreckiej, Augustowskiej, Knyszyńskiej oraz Białowieskiej. Na południu obszar badawczy objął lasy w Karkonoszach i Beskidzie Żywieckim. Badane fragmenty lasów znajdują się w strefie klimatu umiarkowanego przejściowego z napływającymi masami powietrza: polarnego kontynentalnego w Puszczy Boreckiej, Augustowskiej, Knyszyńskiej i Białowieskiej, zwrotnikowego kontynentalnego w lasach Beskidu Żywieckiego oraz zwrotnikowego morskiego w lasach Karkonoszy.

Granice występowania formacji leśnych odczytano z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover (CLC). Zawiera ona dane powierzchniowe o minimalnej powierzchni 25 ha i szerokości co najmniej 100 m [Ciołkosz, Bielecka 2005]. Do niniejszej pracy zostały wykorzystane obszary leśne rozpoznane w najnowszym wydaniu bazy – CLC2012. Wyselekcjonowano z niej tereny leśne identyfikowane na poziomie klasy 3.1, definiowane według nomenklatury CORINE jako lasy, bez rozróżniania wieku i składu gatunkowego drzewostanu, w wyniku czego otrzymano obraz występowania badanych lasów w postaci rastrowej.

Aby zachować reprezentatywne piksele terenów leśnych oraz zapewnić czystość pomiaru, przeprowadzono analizę udziału powierzchni leśnej w powierzchni danego piksela. W tym celu opracowano siatkę kwadratów 1×1 km, odpowiadającą siatce pikseli obrazów NOAA AVHRR i SPOT VGT. Do badań przyjęto kryterium progu 50% powierzchni zajmowanej przez tereny leśne w obrębie piksela. Ten etap prac miał na celu minimalizację błędów wartości wskaźnika NDVI, mogących powstać w wyniku wystąpienia kilku klas pokrycia terenu w obrębie pojedynczego piksela. Pozwoliło to zachować reprezentatywność wartości wskaźnika w obrębie pikseli rozpoznanych jako obszary leśne. Taka metodyka została już opracowana przy tworzeniu warstwy tematycznej obszarów rolniczych do prognozowania plonów na podstawie zdjęć NOAA AVHRR [Turlej i in. 2013]. W rezultacie działań przygotowano sześć obszarów badawczych – obejmujących 196 km² Puszczy Boreckiej, 1044 km² Puszczy Augustowskiej, 1289 km² Puszczy Knyszyńskiej, 779 km² Puszczy Białowieskiej, 402 km² lasów Karkonoszy oraz 748 km² lasów Beskidu Żywieckiego. Rycina 1 przedstawia zasięg obszaru badań oraz warstwę tematyczną terenów leśnych według CORINE Land Cover 2012.

Pozyskanie, przetwarzanie danych oraz opracowywanie nowych algorytmów i zastosowań obrazów NOAA AVHRR jest od wielu lat domeną Instytutu Geodezji i Kartografii (IGiK) w Warszawie. Centrum pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania danych SPOT VGT znajduje się we Flamandzkim Instytucie do Badań Technologicznych (VITO) w Mol w Belgii. IGiK rejestruje zdjęcia satelitarne NOAA AVHRR codziennie od 1997 roku za pomocą stacji odbiorczej zainstalowanej w ramach wspólnego projektu z Kanadyjskim Centrum Teledetekcji. Pozyskane przez stację odbiorczą zdjęcia są poddawane korekcji radiometrycznej, atmosferycznej oraz geometrycznej [Bochenek 1999]. Następnie na ich podstawie są generowane obrazy wskaźnika wegetacji NDVI. Wskaźnik jest obliczany według wzoru:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

gdzie:

NIR – wartości odbicia spektralnego w zakresie podczerwonym,

RED – wartości odbicia spektralnego w zakresie czerwonym [Rouse 1973].

Ze względu na istotny problem częstego zachmurzenia występującego nad obszarem Polski dzienne obrazy są składane w kompozycje 10-dniowe według maksymalnej wartości NDVI zaobserwowanej w danym okresie dekadowym. W założeniach metody przyjęto, że zmiany w rozwoju roślin w okresie dziesięciu dni są tak małe, że nie wpływają na zmiany wskaźnika NDVI [Bochenek 1999]. Ostatnim etapem zadań jest wygładzanie kompozycji dekadowych filtrem Savitzky'ego-

-Golaya w celu minimalizacji szumów i błędów na obrazach NDVI. Błędy te mogą wynikać m.in. z zaniżania wartości wskaźnika w wyniku niedoskonałości maskowania chmur, ich cieni i innych zjawisk atmosferycznych [Bojanowski i in. 2009].

Produkt VGT-P obejmuje obrazy dzienne po wstępnych korekcjach radiometrycznych, atmosferycznych i geometrycznych. Kolejny produkt, sygnowany VGT-S, stanowią obrazy dzienne (S1) oraz kompozycje dekadowe (S10) po końcowej korekcji atmosferycznej. Wśród danych VGT-S dostępne są również kompozycje dekadowe wskaźnika NDVI, które są składane na podstawie maksymalnej wartości wskaźnika zaobserwowanej w okresie dziesięciu dni. Ostatni produkt VGT-D stanowią kompozycje dekadowe powstałe na bazie korekcji atmosferycznej, z uwzględnieniem dwukierunkowej funkcji odbicia BRDF.

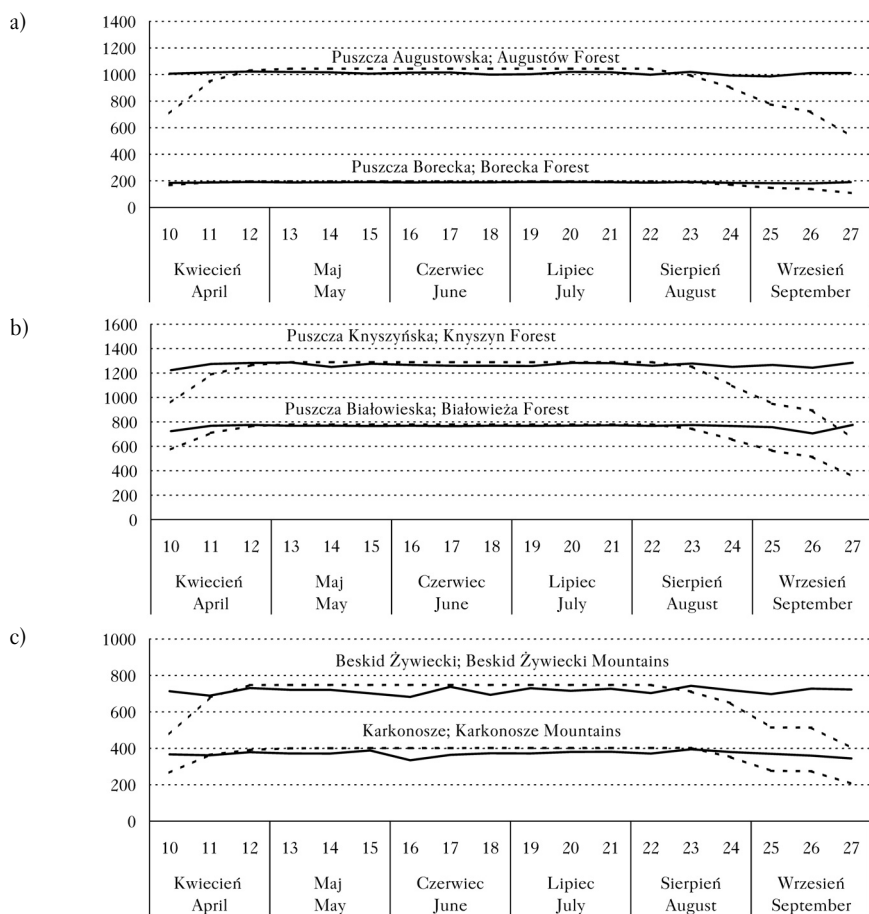
Współmierność testowanych obrazów NOAA AVHRR i SPOT VGT opiera się na zbieżnych parametrach obrazów: rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 1 km², wspólnym okresie rejestracji danych w latach 1998-2013 oraz kompozycjach dekadowych wskaźnika wegetacji NDVI składanych według tych samych założeń.

W pierwszym etapie analizy porównywano dla terenów leśnych liczebność pikseli obserwacji bezchmurnych na podstawie obrazów wskaźnika wegetacji NDVI NOAA AVHRR i SPOT VGT. W tym celu zestawiono dane w okresie od 10. do 27. dekady w latach 1998-2013 dla Puszczy Augustowskiej i Boreckiej, Puszczy Knyszyńskiej i Białowieskiej oraz dla lasów Karkonoszy i Beskidu Żywieckiego. Następnie zbadano, czy istnieje zależność między liczebnością pikseli uwzględnionych do pomiarów a wartościami NDVI z NOAA AVHRR i SPOT VGT. Sprawdzano różnice wskaźnika wegetacji obszarów leśnych w latach 1998-2013 oraz ich średnie wartości z piętnastu lat. Ponieważ analizowane dane nie są zgodne z rozkładem normalnym, do porównań użyto nieparametrycznego testu Wilcozona. Na zakończenie prac sprawdzono współzależność pomiarów przy użyciu testu rang Spearmana (r_s).

Wyniki i dyskusja

Stwierdzono niejednakową liczebność obserwacji NDVI NOAA i SPOT dla badanych kompleksów leśnych (ryc. 2). Dla obszarów leśnych północno-wschodniej Polski jest zachowana zgodność obserwacji w okresie maj-lipiec. W tym czasie niewielkie odstępstwa występują na terenach leśnych w południowej Polsce. Różnice w liczebności obserwacji pogłębiają się na wszystkich badanych terenach w kwietniu, sierpniu i wrześniu. We wrześniu obserwacje bezchmurne terenów leśnych na podstawie obrazów NOAA stanowiły 64%, a obserwacje SPOT 95% wszystkich możliwych rejestracji. Duże dysproporcje w liczebności obserwacji bezchmurnych, odpowiednio 71% z NOAA i 94% z SPOT, odnotowano także w pierwszej dekadzie kwietnia. Te różnice mogą być po części uzasadnione większą częstotliwością skanowania powierzchni przez sensory VGT umieszczone na satelitach SPOT4 i SPOT5. Oba rejestrowały ten sam obszar w ciągu dnia rano, a tym samym istniała większa szansa na pozyskanie obrazu w warunkach bezchmurnych. Skaner AVHRR, umieszczony na satelicie NOAA19, rejestruje powierzchnię dwukrotnie w ciągu doby, tj. raz w warunkach dziennych popołudniowych i raz w nocy. Stąd dostępność obserwacji bezchmurnych przez NOAA AVHR może być niższa.

Rozpiętość różnic NDVI jest duża, od około -0,3 do 0,4, a średnie różnice oscylują w granicach od -0,05 do 0,05 (ryc. 3). Między pomiarami NDVI z NOAA i SPOT istnieją różnice istotne statystycznie ($p < 0,001$) dla Puszczy Augustowskiej, Białowieskiej, Knyszyńskiej i lasów Karkonoszy. Brak różnic istotnych statystycznie odnotowano dla Puszczy Boreckiej ($p = 0,114$) i lasów Beskidu Żywieckiego ($p = 0,002$).



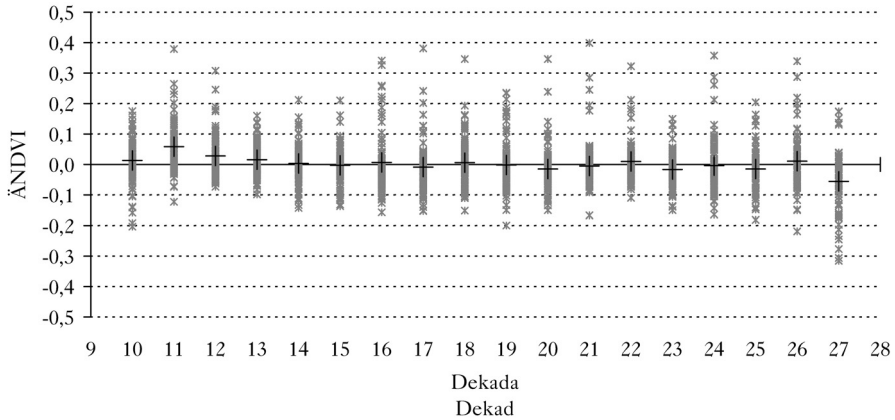
Ryc. 2.

Średnia liczba pikseli na podstawie wieloletnich (1998-2013) danych dekadowych NDVI z NOAA AVHRR (linia kropkowana) i SPOT VGT (linia ciągła) dla puszczy Augustowskiej i Boreckiej (a), Knyszynskiej i Boreckiej (b) oraz lasów Karkonoszy i Beskidu Żywieckiego (c)

Multiannual (1998-2013) mean number of pixels based on decadal NDVI from NOAA AVHRR (dotted line) and SPOT VGT (solid line) observations for Augustów and Borecka Forests (a), Knyszyn and Borecka Forests (b) as well as for Karkonosze and Beskid Żywiecki Mountains forests (c)

Rycina 4 ilustruje zróżnicowanie współczynnika r_s w latach 1998-2013. Bardzo wysokie wartości współczynnika korelacji $r_s \geq 0,9$ uzyskano głównie dla Puszczy Boreckiej, natomiast relatywnie niskie otrzymywano najczęściej dla Puszczy Augustowskiej. Dla lasów Karkonoszy wartości r_s oscyływały najczęściej około 0,5, podczas gdy dla lasów Beskidu Żywieckiego były relatywnie wyższe i w badanym okresie nie spadły poniżej 0,5. Tak duże zróżnicowanie wartości współczynnika korelacji nie pozwala jednoznacznie ocenić współzależności pomiarów NDVI. Pojedyncze wyniki, jakie uzyskano w 1999 roku dla lasów Karkonoszy czy w 2009 roku dla Puszczy Augustowskiej, wskazują na potrzebę ich weryfikacji na podstawie wielkoskalowych opracowań z uwzględnieniem wysokorozdzielczych danych satelitarnych.

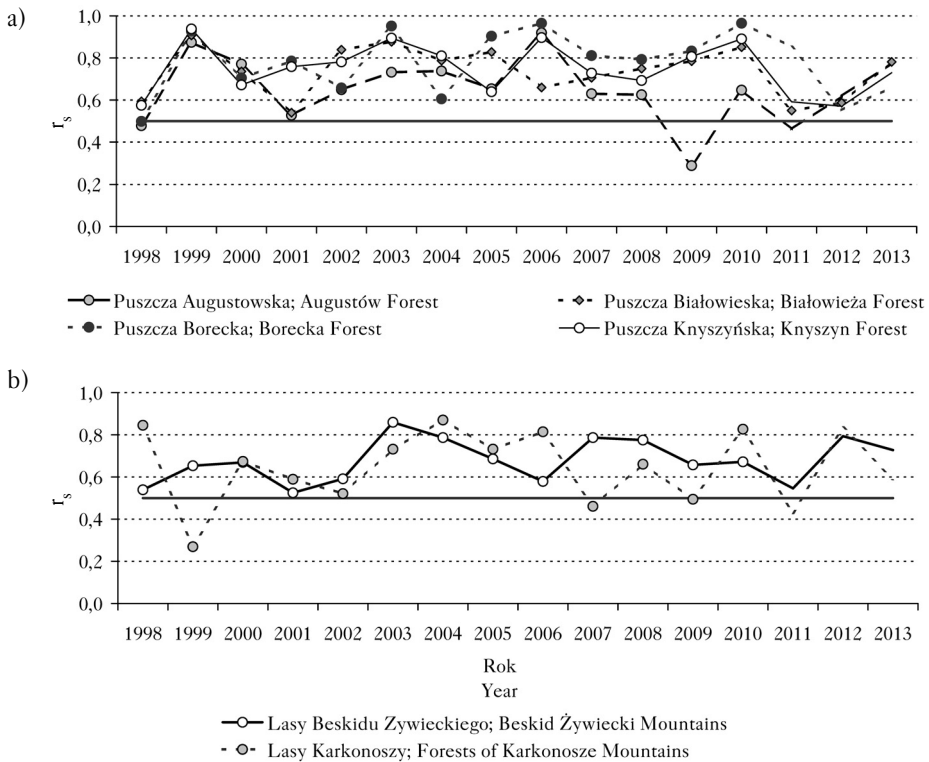
Przyczyn uzyskania różnorodnych wyników może być kilka. Takie kwestie pomiarów jak kąt widzenia satelity, geometria Słońca i satelity oraz anizotropia powierzchni zmieniają się wraz z upływem czasu i stale mają wpływ na jakość obserwacji. Odmienne godziny przelotów sateli-



Ryc. 3.

Roczna (szary) i średnia wieloletnia (czarny) różnica NDVI na podstawie danych dekadowych NOAA AVHRR i SPOT VGT z lat 1998-2013 dla badanych kompleksów łącznie

Annual (grey) and mean multiannual (black) difference in decadal NDVI between NOAA AVHRR and SPOT VGT in 1998-2013 period for all studied areas in total



Ryc. 4.

Współczynnik korelacja rang Spearmana danych NDVI NOAA AVHRR i SPOT VGT dla lasów północno-wschodniej (a) i południowej (b) Polski

Spearman correlation coefficient between NOAA AVHRR and SPOT VGT NDVI data for forest complexes in north-eastern (a) and southern (b) Poland

tów NOAA (po południu) i SPOT (przed południem) mogą też wpływać na odmiennosc rejestrowanego dziennego sygnału, a tym samym implikować różnorodność kompozycji dekadowych NDVI. Kwestie niedoskonałości korekcji radiometrycznej i atmosferycznej są stale sprawdzane i korygowane przez techników odpowiedzialnych za dystrybucję danych satelitarnych. Wpływ na różnice mogą mieć też niejednakowe zakresy spektralne sensorów, na podstawie których jest obliczany wskaźnik NDVI. Sensory AVHRR rejestrują promieniowanie czerwone i bliską podczerwień w szerszych zakresach spektralnych, odpowiednio w 0,58-0,68 μm i 0,725-1,0 μm . Dla porównania sensory VGT rejestrują pasma promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni w nieco węższych zakresach 0,61-0,68 μm i 0,78-0,89 μm . Stąd też nieznacznie różniące się szerokości widmowe mogą przyczynić się do odchyień wartości wskaźnika wegetacji NDVI. Test Wilcoxon dla badanych obszarów leśnych wykazał, że odchylenia te różnią się istotnie statystycznie. Wskazuje to na potrzebę dopasowania modelu dla dwóch zmiennych NDVI z NOAA i SPOT.

Podsumowanie

W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy na bieżąco pozyskiwane obrazy z satelity NOAA mogą być samodzielnie wykorzystane do przeprowadzenia kontynuacji badań wegetacji lasów w Polsce po zakończeniu programu SPOT VEGETATION w 2014 roku. Uzyskano zróżnicowaną zgodność wyników obserwacji NDVI z danych NOAA AVHRR i SPOT VGT. Analiza statystyczna na podstawie 15-letnich obserwacji wykazała, że jedynie dla Puszczy Boreckiej i lasów Beskidu Żywieckiego nie ma przeciwwskazań do stosowania zamiennie danych satelitarnych. Natomiast dla pozostałych obszarów uzyskano dość niejednoznaczne wyniki, które wskazują na potrzebę przeprowadzenia dalszego porównania NDVI z innych źródeł. Na potrzeby kompleksowej analizy należałoby więc uzupełnić obszar badawczy o wszystkie powierzchnie leśne w Polsce. Ze względu na różne zakresy rejestracji sensorów oraz terminy przelotów wskazane byłoby także, aby uzależnić jedne dane od drugich regresją statystyczną. Rok 2014 był pierwszym pełnym rokiem operacyjnego działania nowego satelity środowiskowego Proba-V, ogłoszonego następcą misji SPOT-VEGETATION. Wydarzenie to stwarza możliwość rozwinięcia badań monitoringu środowiska leśnego o nowe dane satelitarne. Rozwój teledetekcji satelitarnej oraz wzrost jakości danych może być budulcem opracowania systemu stałej, kompleksowej obserwacji lasów w oparciu o zintegrowane archiwalne i bieżące rejestracje z satelitów zarówno meteorologicznych, jak i środowiskowych.

Literatura

- Bartold M. 2012. Monitoring of forest damages in Poland and Slovakia based on Terra/MODIS satellite images. *Geoinformation Issues* 4 (1): 23-31.
- Bochenek Z. 1999. Operacyjne wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR do oceny warunków rozwoju upraw w Polsce. *Teledetekcja Środowiska* 29: 3-13.
- Bojanowski J., Kowalik W., Bochenek Z. 2009. Noise reduction of NDVI time-series: a robust method based on Savitzky-Golay filter. *Annals of Geomatics* 7 (2): 13-21.
- Brown M. E., Pinzon J. E., Didan K., Morisette J. T., Tucker C. J. 2006. Evaluation of the Consistency of Long-Term NDVI Time Series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (7): 1787-1793.
- Ciołkosz A., Białousz S. 2008. Zastosowanie teledetekcji satelitarnej w badaniach środowiska w Polsce. *Nauka* 3: 79-96.
- Ciołkosz A., Bielecka E. 2005. Pokrycie terenu w Polsce – Baza danych CORINE Land Cover. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Inspektorat Ochrony Środowiska: 1-76.
- Ciołkosz A., Bochenek Z., Iracka M. 1997. Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 44 (95): 73-93.
- Ciołkosz A., Poławski Z. 1980. Mapa użytkowania ziemi w skali 1: 250 000 sporządzona za pomocą wizualnej klasyfikacji treści obrazów satelitarnych. Zastosowanie teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego. PWN, Warszawa.
- Sánchez J., Camacho F., Lacaze R., Smets B., Roujean J. L. 2014. Consistency assessment of PROBA-V and SPOT-VEGETATION GEOV1 LAI, FAPAR and FCover products for the continuity of the Copernicus Global Land Service. *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing RAQRS IV*.

- Tucker C. J. 1979.** Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8 (2): 127-150.
- Turlej K., Bojanowski J., Bartold M. 2013.** Maska obszarów rolniczych dostosowana do monitoringu wzrostu roślin uprawnych w Polsce przy użyciu szeregów czasowych NOAA-AVHRR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 25: 233-242.
- Zajączkowski G., Wężyk P. 2004.** Techniki teledetekcyjne w inwentaryzacji urządzeniowej lasu. *Roczniki Geomatyki* 2 (4): 41-50.
- Zawiła-Niedźwiecki T. 1990.** Wybrane zagadnienia wykorzystania zdjęć wykonanych przez satelity Landsat TM i SPOT w badaniu lasu. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 37 (1-2): 63-73.