

Opracowanie maski obszarów leśnych w celu monitoringu kondycji zdrowotnej lasów w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych

Development of forest cover mask to monitor the health condition of forests in Poland using long-term satellite observations

Maciej Bartold

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, 00-927 Warszawa

Tel. +48 22 5520654, e-mail: maksb1983@gmail.com

Abstract. The work presented here aims at developing cover mask for monitoring forest health in Poland using remote sensing data. The main objective was to assess the impact of using the mask on forest condition monitoring combined with vegetation indices obtained from long-term satellite data. In this study, a new mask developed from the CORINE Land Cover 2012 (CLC2012) database is presented and its one-kilometer pixel size matched to low-resolution data derived from SPOT VEGETATION satellite registrations. For vegetation mapping, only pixels with a cover $\geq 50\%$ of broad-leaved and mixed forests defined by CLC2012 were taken into account. The masked pixels were used to evaluate spatial variability in eight Natural-Forest Regions (NFRs). The largest coverages by masked forests were obtained in Sudetian (65.7%), Carpathian (65.9%) and Baltic (51.3%) regions. For other forest regions the coverage was observed to be around 30–50%.

Time-series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) comprising SPOT VEGETATION images from 1998 until 2014 were computed and cross-comparison analyses on $\geq 50\%$ and $< 50\%$ forest cover masks brought up frequent differences at a level higher than 0.05 NDVI in seven out of eight NFRs. An exception is the Sudetian region, where the data was highly consistent. Furthermore, the Mann-Whitney U non-parametric test revealed statistically significant differences in two regions: Baltic and Masurian-Podlasie NFR. The comparative analysis of NDVI confirmed that there is a need for additional investigation of the quality of newly developed forest mask combined with vegetation and meteorological data.

Keywords: CORINE Land Cover 2012, forest condition, NDVI, satellite images, vegetation mapping

1. Wstęp

Systemy informacji o stanie lasów i kondycji drzewostanów są pożądanym źródłem wiedzy dla administracji rządowej, samorządowej, leśnej i społeczeństwa. Powstałe w ramach projektów badawczych systemy, takie jak Bank Danych o Lasach i Wielkoobszarowa Inwentaryzacja Stanu Lasu, są odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie monitoringu lasów w Polsce. Informacje są gromadzone na podstawie ciągłych lub okresowych obserwacji na stanowiskach kontrolno-pomiarowych i stałych powierzchniach obserwacyjnych. Kompleksowym źródłem o stanie zdrowotnym lasów są również coroczne raporty, opracowane przez Instytut Badawczy Leśnictwa na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

Wsparciem dla programów i systemów monitoringu lasów może być szeroka gama produktów satelitarnych. Umieszczone na orbitach okołobiegunowych satelity pozwalają na

prowadzenie stałych, codziennych obserwacji powierzchni ziemskiej. Misja amerykańskich satelitów meteorologicznych NOAA trwa nieprzerwanie od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Z kolei satelity środowiskowe Terra i Aqua, powstałe w ramach programu NASA, krążą nieustannie po orbitach od 1999 i 2000 roku. Natomiast europejski program satelitów środowiskowych SPOT VEGETATION był realizowany w latach 1998–2014. Od 2013 roku jest on kontynuowany przez satelitę Proba-V.

Ze względu na rozdzielczość terenową piksela, czyli rzeczywisty rozmiar najmniejszego elementu obrazu, satelity klasyfikuje się na wysoko-, średnio- i niskorozdzielcze. Wyżej wymienione satelity zaliczają się do kategorii satelitów niskorozdzielczych. Sensory AVHRR i MODIS, montowane na pokładach satelitów meteorologicznych NOAA oraz środowiskowych Terra i Aqua, skanują powierzchnię ziemską z rozdzielczością przestrzenną 1 km × 1 km

i 250 m × 250 m. Najnowszy satelita środowiskowy Proba-V rejestruje obszar w minimalnej rozdzielczości przestrzennej 100 m × 100 m. Sensory tych satelitów obrazują powierzchnię w zakresach światła widzialnego oraz bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni.

Dzięki długoletnim obserwacjom z różnych satelitów powstało wiele prac naukowych dotyczących monitorowania pokrycia lasów oraz kondycji zdrowotnej środowiska leśnego. Analizy procentowego udziału lasów w powierzchni każdego piksela na wieloletnich zobrazowaniach satelitarnych umożliwiły opracowanie szeregu map obszarów leśnych do określania tempa wylesiania na obszarach badawczych Amazonii (Lu et al. 2011) i Indii (Reddy et al. 2015). We wspomnianych pracach naukowych skupiano się na metodycznym aspekcie opracowania serii masek dla obszarów leśnych, pozwalających na odróżnianie lasów od pozostałych form użytkowania terenu i monitorowanie zmienności pokrycia środowiska leśnego w czasie.

Niemniej istnieją gotowe i oferowane nieodpłatnie warstwy tematyczne przedstawiające procentowe pokrycie lasów w powierzchni danego piksela na zobrazowaniach satelitarnych. Są to warstwy High Resolution Layers (HRL) opracowane dla lasów Europy w 2012 roku z dokładnością do 100 metrów i dostępne na stronie internetowej serwisu Copernicus <http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/>. Natomiast od 2000 roku Centrum Dystrybucji Danych Satelitarnych NASA oferuje globalny produkt Vegetation Continuous Fields (VCF) z dokładnością do 250 metrów, który został opracowany na bazie zdjęć rejestrowanych przez sensory MODIS (adres strony internetowej https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod44b). Jednakże produkty HRL i VCF mają określone ograniczenia czasowe i przestrzenne. Dane HRL dotyczą tylko jednego roku i nie pokrywają całego obszaru Polski. Z kolei dane VCF obejmują ostatnie piętnaście lat i nie zawierają informacji o typach lasów.

Szeroka gama wieloletnich danych niskorozdzielczych oraz ich powszechna i bezpłatna dostępność umożliwiają wykonanie złożonych analiz kondycji roślin. Niemniej jednak ograniczona rozdzielczość przestrzenna pozwala na monitorowanie środowiska w skali kraju oraz jednostek podziału terytorialnego państwa. Niska rozdzielczość przestrzenna danych, oferowana najczęściej w 1 km × 1 km, oraz złożoność problemów geometryzacji zdjęć satelitarnych (Bychawski 1988) mogą implikować błędy prawidłowego rozpoznania obszarów leśnych na korzyść graniczących terenów rolniczych i zabudowy. A tym samym może skutkować błędami pomiaru stanu i kondycji lasów.

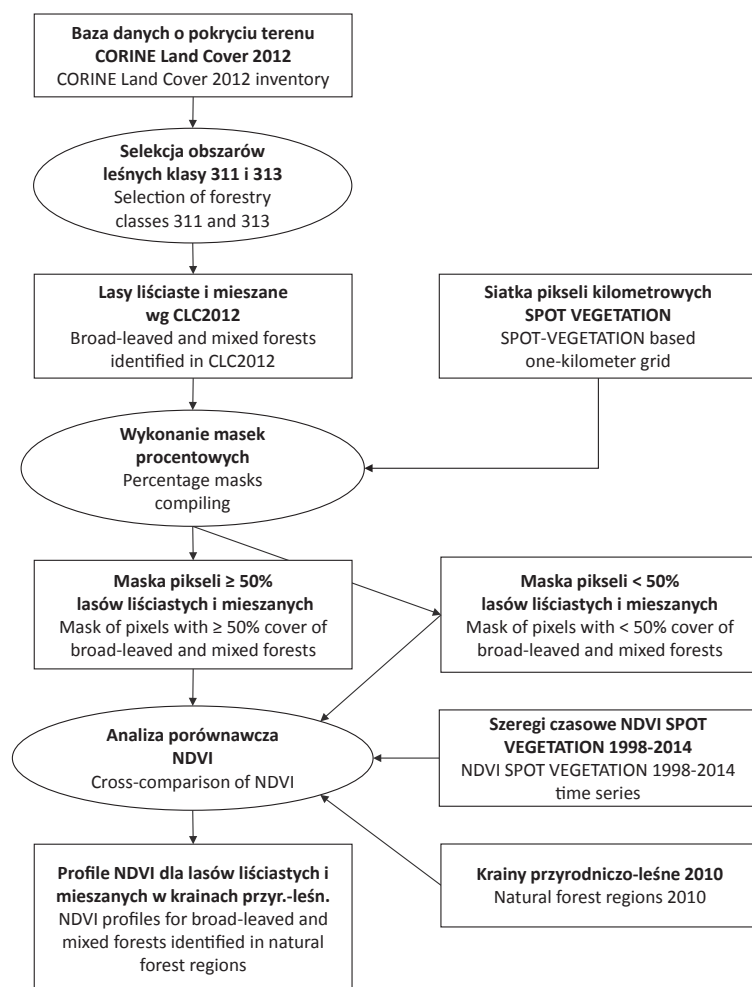
Na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych są prowadzone badania nad tempem wzrostu i rozwoju lasów. Wskaźniki wegetacji, wyprowadzane ze zdjęć satelitarnych, pozwalają na wyznaczanie okresów rozpoczęcia zielenienia się lasu liściastego czy zrzucania liści przez drzewa na zimę. Metody oparte na tych wskaźnikach pozwalają ocenić stan wzrostu i rozwoju lasów. Dlatego też w celu prowadzenia monitoringu kondycji zdrowotnej roślin z zastosowaniem te-

ledetekcji satelitarnej nieocenioną rolę pełnią warstwy tematyczne obszarów leśnych, będące maską do zawężenia badań tylko na terenach lasów. Na przykład w badaniach czasowo-przestrzennej zmienności wegetacji roślin na Svalbardzie przygotowywano poligony testowe z precyzyjną informacją o gatunkach roślin (Karlsen et al. 2014). Z kolei do opracowania map parametrów opisujących fenologię lasów w Indiach wykorzystano informatyczne zasoby leśne do odróżniania lasów od innych kompleksów roślinności (Prabakaran et al. 2013). Powszechnie dostępna cyfrowa baza danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover 2006 została uwzględniona przy testowaniu metody detekcji deforestacji w Polsce w latach 2000–2006 (Bartold 2013).

W raportach na temat stanu lasów (State of Europe's Forests 2015) i w publikacjach dotyczących zmian okresów fenologicznych roślin (Garamvolgyi 2013) autorzy podkreślają szczególną rolę monitorowania wzrostu i rozwoju lasów w kontekście zmian klimatycznych. Stąd też w niniejszym artykule zaproponowano zastosowanie maski obszarów leśnych dla potrzeb monitorowania kondycji zdrowotnej. Celem pracy było opracowanie warstwy reprezentatywnych pikseli terenów leśnych odczytanych z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover 2012. Metoda selekcji pikseli jest oparta na analizie udziału powierzchni leśnej w powierzchni danego piksela. Warstwa tematyczna została następnie weryfikowana na podstawie analizy przebiegów wskaźnika wegetacji, odczytanego dla lasów na podstawie niskorozdzielczych danych satelitarnych. Lasy liściaste strefy umiarkowanej cechują się wyraźną sezonowością, a tym samym są obszarem badawczym wskazanym do śledzenia przebiegów wskaźników wegetacji dla potrzeb monitorowania kondycji drzewostanów z poziomu satelitarnego.

2. Metodyka

Badania przeprowadzono w trzech etapach. Rycina 1 przedstawia schemat opracowania i testowania maski lasów liściastych. W pierwszym etapie prac pobrano z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover (CLC) granice występowania powierzchni leśnych w Polsce. W ramach programu CORINE, na podstawie wysokorozdzielczych danych satelitarnych, zostały kartowane obszary o minimalnej powierzchni 25 ha oraz szerokości co najmniej 100 m (Ciołkosz, Bielecka 2005). Aktualna czwarta edycja programu CLC2012 powstała w ramach europejskiego programu Copernicus GIO Land Monitoring (Hościło, Tomaszewska 2015). Z uwagi na przeznaczenie maski do monitorowania kondycji zdrowotnej lasów z klas ekosystemów leśnych i seminaturalnych CLC2012 wyselekcjonowano tylko obszary pokryte lasami liściastymi. Warunek ten spełniają klasy 311 i 313, definiowane według nomenklatury CORINE jako lasy liściaste i lasy mieszane, bez podziału na wiek i skład gatunkowy drzewostanu. Klasy 311 i 313 obejmują obszary lasów ze zwarcie drzewostanu większym niż 30% lub z zagęszczeniem 500 drzew na jeden hektar. Szczegółowa definicja klasy 311 obejmuje obszary leśne, w których w minimum



Rycina 1. Schemat opracowania i testowania maski obszarów lasów liściastych i mieszanych

Figure 1. Flowchart of steps to create and test broad-leaved and mixed forests mask

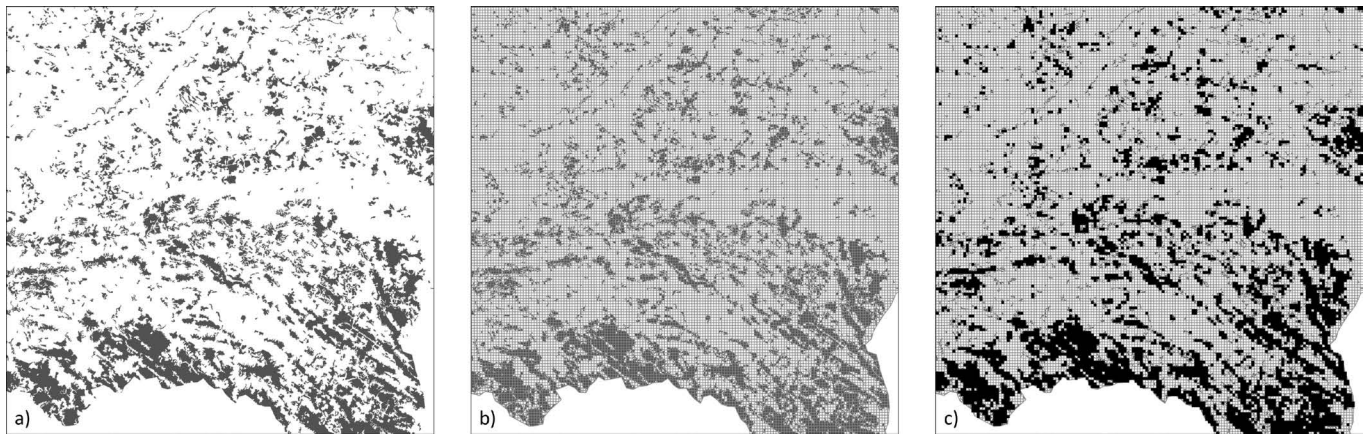
75% dominują lasy liściaste. Z kolei klasa 313 opisuje obszary lasów mieszanych, w których udział lasów liściastych czy iglastych nie przekracza 25% (CORINE land cover nomenclature illustrated guide). W rezultacie pierwszego etapu prac otrzymano w postaci wektorowej pierwotną warstwę tematyczną obszarów leśnych wg stanu na rok 2012.

Następnie przeprowadzono analizę udziału powierzchni leśnej w powierzchni danego piksela (ryc. 2). W tym celu opracowano siatkę kwadratów o boku jednego kilometra, odpowiadającą siatce pikseli obrazów satelitarnych SPOT VEGETATION. Do badań przyjęto kryterium progu 50% powierzchni zajmowanej przez tereny leśne w obrębie piksela. Ten etap prac miał na celu minimalizację błędów pomiaru kondycji lasów, mogących powstać w wyniku wystąpienia kilku klas pokrycia terenu w obrębie pojedynczego piksela.

Ta metodyka została już sprawdzona przy tworzeniu warstwy tematycznej obszarów rolniczych do prognozowania plonów na podstawie zdjęć NOAA AVHRR (Turlej et al. 2013). Autorzy publikacji poszukiwali kompromisu między uzyskaniem optymalnej liczebności a zachowaniem reprezentatywności pikseli rolniczych. Analizowali procentowy udział klas rolniczych CORINE Land Cover 2006 w powierzchni pikseli NOAA-AVHRR oraz w powierzchni pikseli w strefach buforowych o szerokości 600 metrów. Badania

nad zaawansowaną maską rolniczą wykazały nieznaczną poprawę odczytów wskaźnika wegetacji dla monitoringu roślin uprawnych w odniesieniu do odczytów wskaźnika na podstawie standardowej maski z progiem 50%. Kryterium 50% stosowane jest również w programach środowiskowych CORINE i produktach GLOBCOVER 2009 do wyróżniania dominujących form pokrycia terenu w powierzchni danego piksela (CORINE land cover nomenclature installation guide, GLOBCOVER 2009 Product Description Manual). Dlatego też w niniejszym artykule również zachowano kryterium progu 50% do opracowania maski obszarów leśnych.

Trzeci etap prac polegał na sprawdzeniu wpływu zastosowania nowej maski obszarów leśnych na jakość pomiaru znormalizowanego wskaźnika wegetacji NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obliczonego na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych. Wskaźnik ten, wprowadzony w latach 70. ubiegłego wieku, jest powszechnie uznawany za jeden z najbardziej uniwersalnych mierników kondycji i wigoru roślinności (Tucker 1979). Do jego obliczenia wykorzystuje się właściwości spektralne chlorofilu zawartego w roślinach w czerwonym zakresie widma elektromagnetycznego oraz struktur komórkowych w bliskiej podczerwieni. Zakres wartości NDVI obejmuje od -1,0 do 1,0, przy czym wartości bliżej jedynki wskazują większą in-



Rycina 2. Procedura tworzenia maski obszarów leśnych: a) obszary lasów liściastych i mieszanych wg CORINE Land Cover 2012, b) siatka pikseli kilometrowych SPOT VEGETATION, c) piksele z minimum 50% udziałem obszarów lasów liściastych i mieszanych
 Figure 2. Methodology of producing forests mask: a) broad-leaved and mixed forests in CORINE Land Cover 2012 database, b) SPOT-VEGETATION 1 kilometer grid c) pixels with 50% threshold of occurred broad-leaved and mixed forests

tensywność fazy wzrostu i lepszą kondycję roślinności, a tym samym większą ilość biomasy i wzrost udziału gatunków liściastych w lasach.

Pomiary wskaźnika vegetacji dla lasów w latach 1998–2014 przeprowadzono na podstawie danych satelitarnych SPOT VEGETATION. Do pomiarów wykorzystano 581 kompozycji dziesięciodniowych wskaźnika NDVI, które były składane z dziennych obserwacji satelitarnych po maksymalnej wartości wskaźnika zaobserwowanej w danej dekadzie. Taka metoda łączenia dziennych obrazów w kompozycje jest rozwiązaniem problemu częstego występowania zachmurzenia nad obszarem Polski. Kompozycje dekadowe, sygnowane produktem S10, są tworzone i udostępniane bezpłatnie przez Flamandzki Instytut Badań Technologicznych VITO w Belgii.

Wartości wskaźnika vegetacji NDVI dla lasów liściastych i mieszanych zostały uśrednione w granicach ośmiu krain przyrodniczo-leśnych, tj. Krainy Bałtyckiej (I), Krainy Mazursko-Podlaskiej (II), Krainy Wielkopolsko-Pomorskiej (III), Krainy Mazowiecko-Podlaskiej (IV), Krainy Śląskiej (V), Krainy Małopolskiej (VI), Krainy Sudeckiej (VII) i Krainy Karpackiej (VIII). W badaniach ze względu na przeznaczenie maski leśnej do celów monitorowania kondycji zdrowotnej lasów Polski zastosowano podział krain, który uwzględnia czynniki klimatyczne wpływające na vegetację lasów (Zielony, Kliczkowska 2012). Krainy przyrodniczo-leśne są hierarchicznie najwyższymi jednostkami regionalizacji. Granice zostały wyznaczone na podstawie zróżnicowania geologicznego, geomorfologicznego, klimatycznego oraz typów krajobrazów naturalnych. Taki podział uwzględnia również zróżnicowanie w udziale gatunków leśnych i ich przydatności dla gospodarki leśnej. Na potrzeby realizacji badań granice krain zostały zgeneralizowane do skali 1: 20 000 000.

Ocena przydatności nowej maski polegała na wykonaniu pomiarów NDVI zarówno dla obszarów spełniających kryterium 50% udziału powierzchni leśnej w obrębie piksela kilometrowego (maska $\geq 50\%$), jak i dla pozostałych obszarów

leśnych, które ww. kryterium nie spełniały (maska $< 50\%$). Rycina 3 przedstawia rozkład przestrzenny procentowego udziału powierzchni lasów na przykładzie Krainy Karpackiej.

Aby sprawdzić istotność statystyczną różnic pomiarów NDVI 1998–2014 dla dwóch niezależnych masek leśnych $\geq 50\%$ i $< 50\%$ przeprowadzono nieparametryczny test U Manna-Whitneya. Wybór testu nieparametrycznego jest uzasadniony brakiem normalnego rozkładu wskaźnika NDVI dla lasów w okresie vegetacyjnym oraz zestawieniem par obserwacji pomiarów wskaźnika z dwóch niezależnych populacji, obszarów leśnych maskowanych z progiem $\geq 50\%$ i $< 50\%$. Hipoteza zerowa zakłada brak różnic w pomiarach NDVI a tym samym brak wpływu opracowanej maski leśnej na ich jakość. Hipoteza alternatywna zakłada, że różnice wartości wskaźnika vegetacji są istotne statystycznie a zastosowanie nowej maski leśnej wpływa na uzyskanie wyników do monitoringu kondycji zdrowotnej lasów. Ustalono poziom istotności równy 0,05. Jeśli otrzymano wynik $p < 0,05$, to rozkłady różniły się istotnie statystycznie i przyjęto hipotezę alternatywną. Natomiast jeśli otrzymano $p > 0,05$ to nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

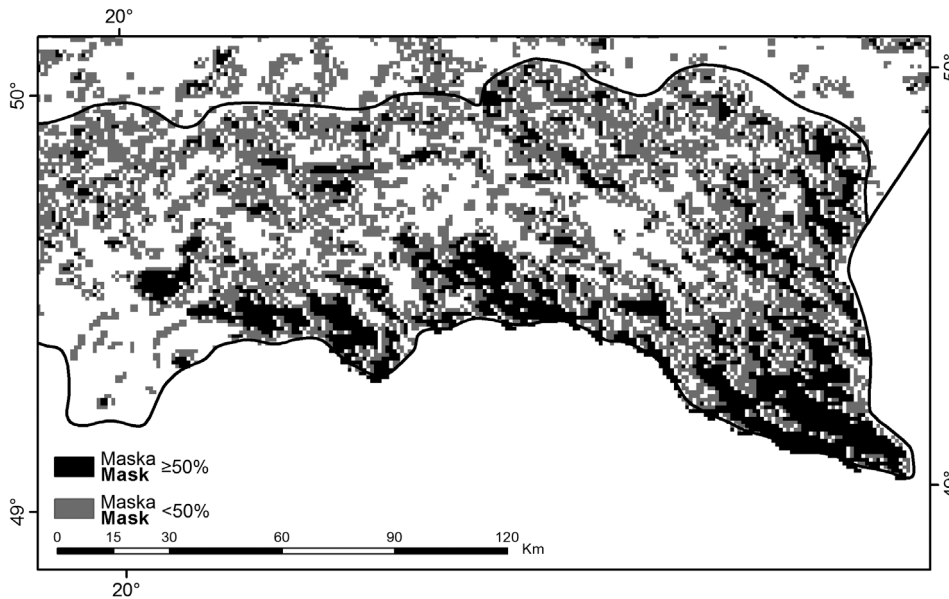
3. Wyniki i dyskusja

Rycina 4 przedstawia mapę przestrzennego rozmieszczenia obszarów liściastych i mieszanych, których udział w powierzchni jednego kilometra kwadratowego był równy lub większy niż 50%. Na mapie zaznaczono również granice ośmiu krain przyrodniczo-leśnych. Kryterium progu 50% pozwoliło zachować pewną reprezentatywność pikseli leśnych przeznaczonych do monitoringu wzrostu i rozwoju lasów. Udziały powierzchni maskowanych lasów liściastych i mieszanych w krainach zestawiono w tabeli 1. Największą powierzchnię badanych lasów odnotowano w Krainie Karpackiej, co stanowiło 27,9% powierzchni krainy. Kolejne na liście były lasy Krainy Sudeckiej i Bałtyckiej, odpowiednio z 16,7% i 13,5% udziałami. W Krainie Mazursko-Podlaskiej

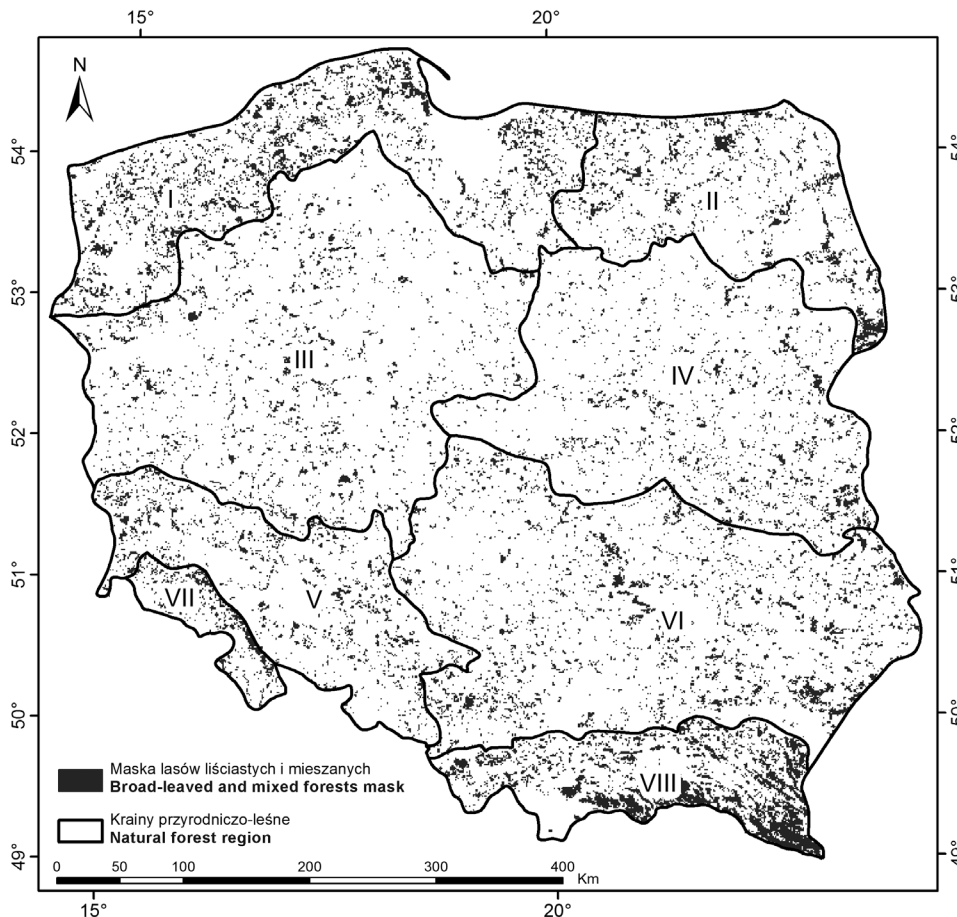
również odnotowano ponad 10% udział powierzchni obszarów leśnych. Najmniej maskowanych lasów rozpoznano w Krainie Wielkopolsko-Pomorskiej, gdzie ich udział stanowił 5,2% powierzchni krainy.

W tabeli 1 zestawiono również procentowe udziały powierzchni lasów liściastych i mieszanych klasyfikowanych

w bazie danych CORINE Land Cover 2012. Najwięcej rozpoznanych lasów liściastych i mieszanych było w Krainie Sudeckiej i Karpackiej, stanowiących odpowiednio 65,7% i 65,9% powierzchni tych krain. Wysoki, ponad 50% udział powierzchni zajmowały lasy w Krainie Bałtyckiej. W pozostałych krainach udział powierzchni lasów mieścił się w granicach 30–50%.



Rycina 3. Maska pikseli kilometrowych z $\geq 50\%$ oraz $< 50\%$ udziałem obszarów lasów liściastych i mieszanych w Krainie Karpackiej
Figure 3. Mask of one kilometer pixels with $\geq 50\%$ and $< 50\%$ broad-leaved and mixed forests in Carpathian Natural-Forest Region (CNFR)



Rycina 4. Maska $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych na tle krain przyrodniczo-leśnych
Figure 4. Broad-leaved and mixed forests mask at $\geq 50\%$ overlaid natural-forest regions

Tabela 1. Udział lasów liściastych i mieszanych wg CLC2012 i maski $\geq 50\%$ w odniesieniu do powierzchni krain przyrodniczo-leśnych
 Table 1. CLC2012 and $\geq 50\%$ masked broad-leaved and mixed forests share in Natural-Forest Regions areas

Kraina przyrodniczo-leśna Natural-Forest Region (NFR)	Powierzchnia krainy przyrodniczo-leśnej NFR Area [km ²]	Udział wszystkich lasów liściastych i mieszanych wg CLC2012 CLC2012 broad-leaved and mixed forests share [%]	Udział maskowanych $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych Masked broad-leaved and mixed forests share [%]
Bałtycka / Baltic	40193	51,3	13,5
Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie	27660	41,6	10,7
Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland-Pomerania	71439	30,8	5,2
Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie	53162	37,4	6,0
Śląska / Silesian	27125	43,7	8,9
Małopolska / Lesser Poland	68520	39,0	8,2
Sudecka / Sudetian	5070	65,7	16,7
Karpacka / Carpathian	19342	65,9	27,9

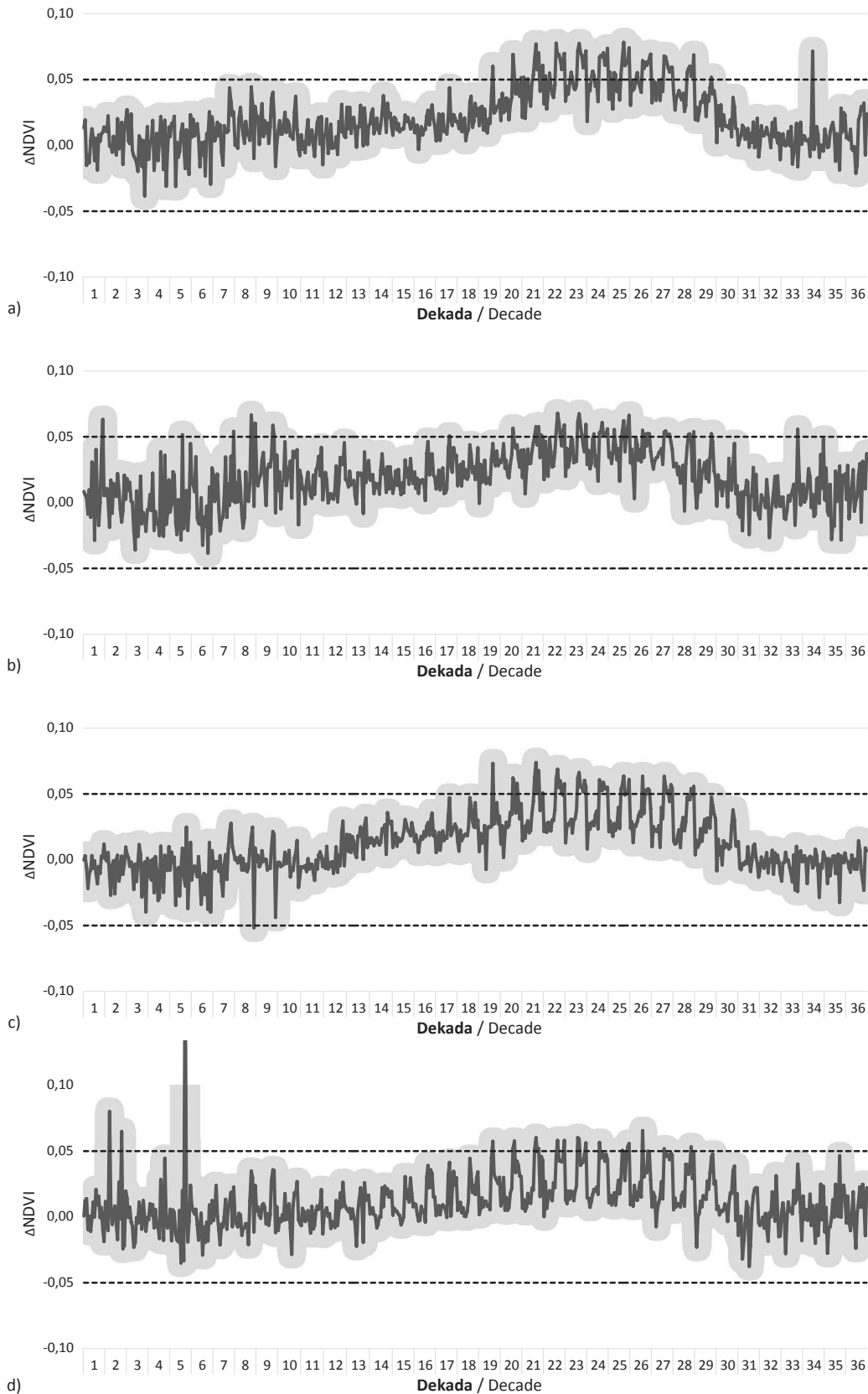
Zestawienie procentowego udziału lasów liściastych i mieszanych sklasyfikowanych według CLC2012 oraz maskowanych $\geq 50\%$ ma na celu wykazanie ilości informacji o lasach utraconej na rzecz tworzenia nowej maski leśnej dla potrzeb monitorowania kondycji zdrowotnej lasów. Największą, aż 49% (z 65,7% do 16,7%), stratę informacji o obszarach leśnych odnotowano w Krainie Sudeckiej. Taki wynik wskazuje na to, że praktycznie w co drugim analizowanym pikselu kilometrowym procentowy udział lasów liściastych i mieszanych nie przekraczał wymaganego kryterium 50. Może to wynikać z występowania licznych niewielkich obszarów leśnych z rozproszonymi stanowiskami drzew, które zachowały się po intensywnej działalności przemysłu oraz gradacji szkodników owadzych (Bochenek et al. 1997). Kolejne duże straty informacji o obszarach leśnych zaobserwowano w Krainie Bałtyckiej 37,8% (z 51,3% do 13,5%) oraz Karpackiej 38,0% (z 65,9% do 27,9%). W pozostałych krainach liczebność obszarów leśnych zmalała do 25–35%.

Reasumując, średnio około jedna trzecia obszarów lasów liściastych i mieszanych rozpoznanych w bazie CLC2012 zostało odrzuconych ze względu na niespełnione kryterium progu 50% do wyznaczenia nowej maski leśnej. Powierzchnie kilometrowe, w obrębie których lasy nie są dominującą formą pokrycia terenu, zostały odrzucone z uwagi na: 1) potrzebę zachowania reprezentatywnych pikseli leśnych oraz 2) na otrzymanie jak najbardziej wiarygodnych pomiarów wskaźnika i zminimalizowanie zakłóceń przez inne formy pokrycia terenu, np. tereny rolnicze, zabudowy, które mogą występować w sąsiedztwie lasów. Aby odpowiedzieć na pytanie, na ile odrzucone obszary leśne mogą wpływać na jakość pomiarów wskaźnika NDVI, wykonano analizę porównawczą wskaźnika odczytanego na podstawie szeregów

czasowych w latach 1998–2014. Ryciny 5 i 6 przedstawiają różnice pomiarów wskaźnika wegetacji NDVI, odczytane na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych SPOT-VEGETATION dla maski $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych oraz maski $< 50\%$ tychże lasów. Wyniki, w kontekście monitorowania wegetacji, posortowano według dekad roku.

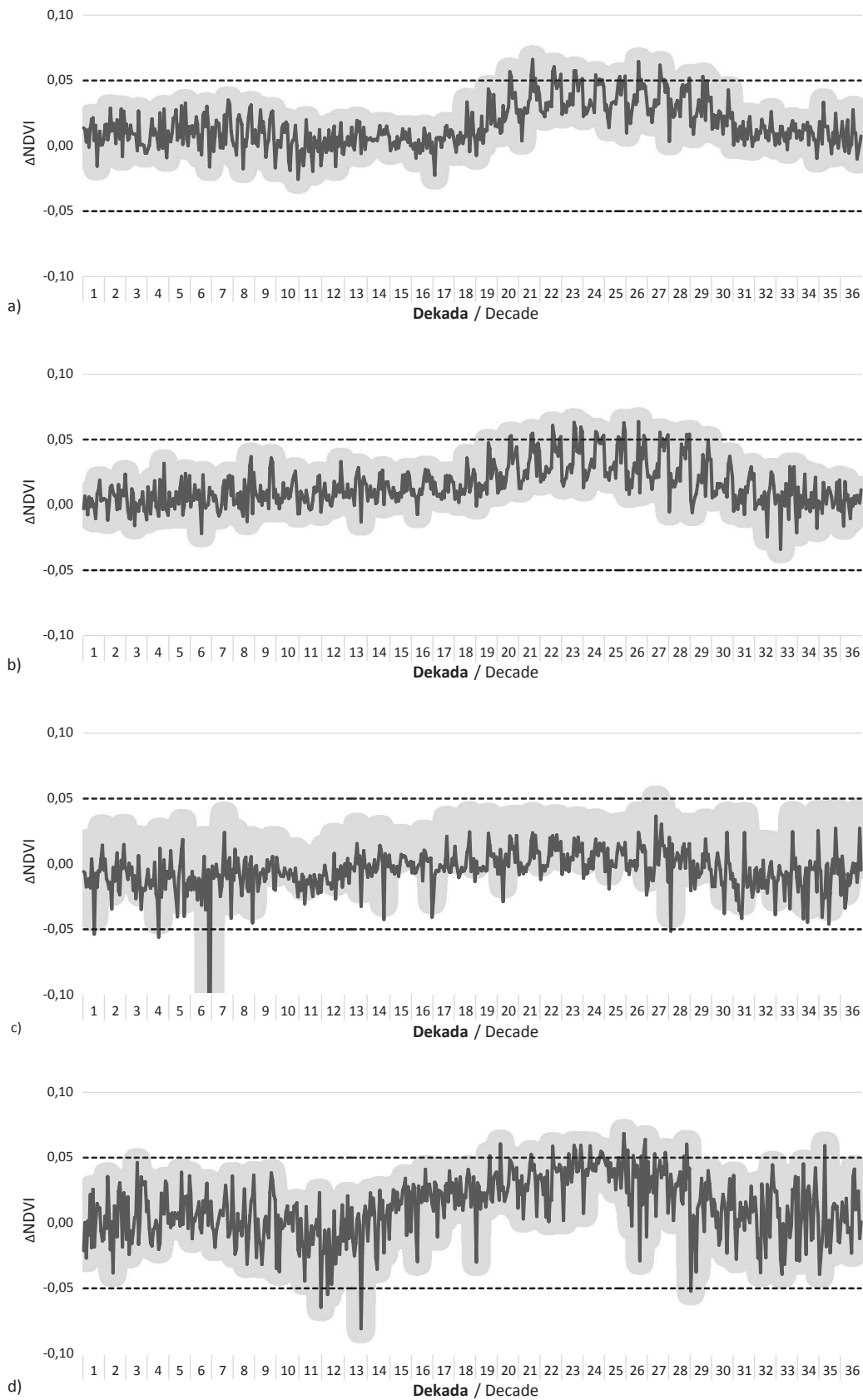
Do oceny wstępnych wyników porównania NDVI przyjęto poziom ufności 95% przy progu odrzucenia błędu pomiarów na poziomie 0,05. Ponieważ skala wartości NDVI jest od -1,0 do 1,0, a tym samym skala różnic tego wskaźnika to progi błędu pomiarowego różnic NDVI są również na poziomie -0,05 i 0,05. Na rycinach 5 i 6 nakreślono linie progu odrzucenia, gdzie różnice pomiarów NDVI większe niż 0,05 oraz mniejsze niż -0,05 wskazują na istotną zmianę wartości odczytów wskaźnika wegetacji. Różnice NDVI większe niż 0,05 wskazują na występowanie wyższych wartości wskaźnika wegetacji na podstawie maski $\geq 50\%$. Z kolei pomiary, w których odnotowano niższą niż -0,05 NDVI, świadczą o wyższych wartościach wskaźnika wegetacji z maski $< 50\%$.

Pomiary wskaźnika NDVI wykonano dla 581 kompozycji dekadowych (obserwacji) SPOT-VEGETATION, począwszy od pierwszej dekady kwietnia 1998 do drugiej dekady maja 2014 włącznie. Najczęstsze różnice indeksu wegetacji odnotowano w Krainie Bałtyckiej, gdzie na podane 581 obserwacji, aż w 76 terminach odnotowano przekroczenie błędu pomiarowego 0,05 NDVI (ryc. 5a). Stanowi to 13% wszystkich pomiarów wskaźnika wegetacji wykonanych w latach 1998–2014. Kolejne miejsca zajmują krainy Mazursko-Podlaska i Wielkopolsko-Pomorska z zarejestrowanymi odpowiednio 51 i 48 przypadkami występowania znaczących różnic NDVI (ryc. 5b, 5c). Z kolei na przeciwnym biegunie znalazły się wyniki pomiarów dla Krainy Sudeckiej. Tam



Rycina 5. Różnice wartości wskaźnika wegetacji NDVI, odczytanych na podstawie danych satelitarnych SPOT-VEGETATION w latach 1998–2014 dla maski ≥ 50 i $< 50\%$ obszarów leśnych krain: a) Bałtyckiej, b) Mazursko-Podlaskiej, c) Wielkopolsko-Pomorskiej, d) Mazowiecko-Podlaskiej

Figure 5. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Baltic, b) Masurian-Podlasie, c) Greater Poland-Pomerania, d) Mazovia-Podlasie



Rycina 6. Różnice wartości wskaźnika wegetacji NDVI, odczytanych na podstawie danych satelitarnych SPOT-VEGETATION, w latach 1998–2014 dla maski ≥ 50 i $< 50\%$ obszarów leśnych krain: a) Śląskiej, b) Małopolskiej, c) Sudeckiej, d) Karpackiej
 Figure 6. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Silesian, b) Lesser Poland, c) Sudetian, d) Carpathian

odnotowano tylko jeden przypadek występowania przekroczonej różnicy 0,05 NDVI obszarów lasów liściastych i mieszanych z maski $\geq 50\%$ i $< 50\%$.

Wyniki dla Krainy Sudeckiej wskazują na brak wpływu nowej maski na jakość wykonywanych pomiarów wskaźnika. Warto wspomnieć, że to właśnie dla wspomnianej krainy odrzucono najwięcej obszarów leśnych rozpoznanych w pikselach kilometrowych niespełniających kryterium 50%. Wpływ na taki stan może mieć występowanie lasów ogółem (liściastych, iglastych i mieszanych) jako dominującej formy pokrycia terenu w tej krainie. Dla pozostałych czterech krain Mazowiecko-Podlaskiej, Śląskiej, Małopolskiej i Karpackiej wyniki wykazują wpływ nowej maski leśnej na jakość pomiarów NDVI na poziomie 4% wszystkich obserwacji SPOT-VEGETATION w latach 1998–2014.

Następnie sprawdzono, jak często różnice pomiarów NDVI występują w okresie wzrostu i rozwoju drzewostanów oraz czy mogą mieć one istotne znaczenie dla potrzeb monitorowania vegetacji lasów. W tym celu na rycinach 5 i 6 pomiary NDVI posortowano w dekadach. W przypadku Krainy Bałtyckiej, z najczęściej odnotowanymi różnicami pomiarów, aż 99% z nich zaobserwowano w dekadach 18–30 odpowiadających okresowi czerwiec – październik (rycina 5a). Jest to bardzo ważna informacja podkreślająca istotne znaczenie przeprowadzenia pomiarów vegetacji lasów. Ryciny 5c dla Krainy Wielkopolsko-Pomorskiej, 6a dla Krainy Śląskiej i 6b dla Krainy Małopolskiej również potwierdzają występowanie znaczących różnic pomiarów NDVI tylko w okresie fenologii roślin od 18 do 30 dekady. Z kolei ryciny 5b i 5d wykazują przypadki występowania różnic wartości indeksu w okresie zimowym oraz letnio-jesiennym. Odchylenia pomiarów większe niż 0,05, zaobserwowane w okresie zimowym, mogą wskazywać na niedoskonałości maskowania pokrywy śniegowej. Te różnice nie mają istotnego wpływu na badanie vegetacji lasów w okresie wiosna – jesień.

Na zakończenie analizy przeprowadzono testy nieparametryczne U Manna-Whitneya. Statystyki pomiarów dla krain są następujące: a) Bałtycka $p=0,021$, b) Mazursko-Podlaska $p=0,038$, c) Wielkopolsko-Pomorska $p=0,095$, d) Mazowiecko-Podlaska $p=0,221$, e) Śląska $p=0,072$, f) Małopolska $p=0,105$, g) Sudecka $p=0,389$ oraz h) Karpacka $p=0,083$. Wyniki testu potwierdzają, że dla pomiarów lasów z maską $\geq 50\%$ i $< 50\%$ w krainach północnej Polski, tj. Bałtyckiej i Mazursko-Podlaskiej, otrzymano różnice wartości NDVI istotne statystycznie. Największe ryzyko odrzucenia hipotezy zerowej, zakładającej brak różnic, stwierdzono dla Krainy Sudeckiej (38,87%), Mazowiecko-Podlaskiej (22,12%) i Małopolskiej (10,45%).

Podsumowując dyskusję, nowa maska leśna $\geq 50\%$ miała wpływ na otrzymanie wyższych o ponad 0,05 NDVI pomiarów w okresie vegetacyjnym lasów w siedmiu krainach przyrodniczo-leśnych: Bałtyckiej, Mazursko-Podlaskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej, Mazowiecko-Podlaskiej, Śląskiej, Małopolskiej i Karpackiej. Ze względu na otrzymanie relatywnie wiarygodnych wartości NDVI wyniki tych pomiarów mogą implikować słuszność stosowania maski. Opracowana

maska leśna $\geq 50\%$ częściowo eliminuje problem błędnego pomiaru wskaźnika obszarów „czysto leśnych” i niezakłóconych występowaniem innej formy pokrycia terenu. Niemniej do kompleksowej analizy wskazane byłoby sprawdzenie, jakie klasy poza lasami występowały w pikselach oraz zbadanie otoczenia wokół każdego piksela tworzącego strefy buforowe o szerokości ponad pół piksela kilometrowego, na przykład 600 metrów. Doświadczenia z prac nad maską rolniczą dla potrzeb prognozowania plonów (Turlej et al. 2013) wykazały brak jednoznacznego, wyraźnego i uniwersalnego kryterium do prognozowania maski i strefy buforowej. Z kolei przyjęty w założeniach niniejszej pracy autorytatywny próg 50% jest stosowany w programach środowiskowych i produktach do klasyfikowania form pokrycia terenu, takich jak CORINE Land Cover, czy GLOBCOVER 2009.

Statystyki testu U Manna-Whitneya wykazują, że spośród wszystkich ośmiu badanych krain, jedynie dla dwóch Bałtyckiej i Mazursko-Podlaskiej otrzymano różnice istotne statystycznie. Są to krainy, gdzie zaobserwowano najczęstsze różnice pomiarów NDVI w latach 1998–2014, odpowiednio 76 i 51 na 581 obserwacji. Dla pozostałych sześciu krain stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, a ryzyko odrzucenia prawdziwej hipotezy jest na poziomie od 7,19% dla Krainy Śląskiej do 38,87% dla Krainy Sudeckiej.

Szczególny przypadek stanowią lasy Krainy Sudeckiej, gdzie odnotowano absolutny brak wpływu nowej maski na jakość odczytów (jedna błędna obserwacja na 581 wszystkich możliwych). Warto zwrócić uwagę, że pod względem powierzchni jest to najmniejszy region przyrodniczo-leśniczy ze wszystkich ośmiu badanych z krajobrazem górskim zdominowanym przez lasy iglaste piętra górnego i mieszane piętra dolnego. W siatce pikseli kilometrowych dominują lasy iglaste, dla których pomiary wskaźnika NDVI są bardzo zbliżone do odczytów dla lasów liściastych i mieszanych lub identyczne z nimi. Stąd też próg maski 50% mógł nie mieć żadnego wpływu na jakość pomiarów wskaźnika vegetacji.

Reasumując należy przeprowadzić dodatkową ocenę pomiarów wskaźnika vegetacji NDVI przez sprawdzenie korelacji z danymi meteorologicznymi lub satelitarnymi innego pochodzenia. Jako uzupełnienie weryfikacji wyników badań może być również zestawienie pomiarów wskaźnika na podstawie zdjęć nisko- i wysokorozdzielczych, np. SPOT-VEGETATION i Landsat. W tym przypadku, ze względu na specyfikę rejestracji zobrażeń wysokorozdzielczych, badanie może być przeprowadzone jedynie dla wybranych poligonów testowych w określonym przedziale czasowym.

4. Wnioski

1. Opracowana maska leśna $\geq 50\%$ wpłynęła na wyniki pomiarów wskaźnika vegetacji dla lasów w siedmiu regionach przyrodniczo-leśnych. Profile wskaźnika vegetacji dla lasów Krainy Sudeckiej wykazały brak wpływu stosowania nowej maski leśnej na wyniki pomiarów.

2. 99% różnic NDVI większych niż 0,05 odnotowano w okresie wzrostu i rozwoju lasów od 18 do 30 dekady.

Wskazuje to na potrzebę uwzględnienia opracowanej maski do monitoringu kondycji zdrowotnej środowiska leśnego.

3. Wyniki pomiarów NDVI z użyciem nowej maski leśnej $\geq 50\%$ oraz maski $< 50\%$ wykazały różnice istotne statystycznie dla Krainy Bałtyckiej i Krainy Mazursko-Podlaskiej. Stanowiły one odpowiednio 13,1% i 8,8% wszystkich obserwacji w latach 1998–2014. Ryzyko odrzucenia hipotezy zerowej, zakładającej zgodność pomiarów, jest niższe niż 2,14% i 3,80%.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały wykonane w ramach Studiów Doktoranckich na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Autor składa serdeczne podziękowania pracownikom Centrum Teledetekcji Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie za pomoc i cenne wskazówki. Badania sfinansowano ze środków własnych.

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., Ciołkosz A., Iracka M. 1997. Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 44(95): 73–94.
- Bychawski W. 1988. Geometryzacja zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 35(80): 33–46.
- Ciołkosz A., Bielecka, E. 2005. Pokrycie terenu w Polsce – Baza danych CORINE Land Cover. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Inspektorat Ochrony Środowiska, 1–76.
- CORINE land cover nomenclature illustrated guide, <http://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/Nomenclature.pdf> [10.10.2015].
- Garamvolgyi A., Hufnagel L., 2013, Climate Change Induced Vegetation Shifts in the Palearctic Region. *Applied Ecology and Environmental Research* 11(1): 79–122.
- GLOBCOVER 2009 Product Description Manual, http://due.esrin.esa.int/files/p68/GLOBCOVER2009_Product_Description_Manual_1.0.pdf [9.09.2015].
- Hościło A., Tomaszewska M. 2015. CORINE Land Cover 2012-4th CLC inventory completed in Poland. *Geoinformation Issues* 6(1): 49–58.
- Karlsen S.R., Elvebakk A., Hogda K.A., Grydeland T. 2014. Spatial and Temporal Variability in the Onset of the Growing Season on Svalbard, Arctic Norway – Measured by MODIS-NDVI Satellite Data. *Remote Sensing* 6: 8088–8106. DOI:10.3390/rs6098088.
- Prabakaran C., Singh C.P., Panigrahy S., Parihar J.S. 2013. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data. *Current Science* 105(6): 795–802.
- Reddy C.S., Jha C.S., Dadhwal V.K., Harikrishna P., Pasha S.V., Satish K.V., Dutta K., Saranya K.R.L., Rakesh F., Rajashekar G., Diwakar P.G. 2016. Quantification and monitoring of deforestation in India over eight decades (1930–2013). *Biodiversity and Conservation* 25: 93–116. DOI: 10.1007/s10531-015-1033-2.
- State of Europe's Forests 2015, <http://www.foresteurope.org/full-soef2015> [9.09.2015].
- 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.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 356 s. ISBN 978-83-61633-62-4.