

**METODYKA OCENY STANU ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO
OBSZARÓW PRAWNIE CHRONIONYCH W POLSCE W OPARCIU
O ZINTEGROWANE DANE TELEDETEKCYJNE I KLIMATYCZNE**

**THE METHODOLOGY OF ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL
CONDITIONS IN PROTECTED AREAS IN POLAND BASED
ON INTEGRATED REMOTE SENSING AND CLIMATIC DATA**

Jan Musiał

Zakład Teledetekcji, Instytut Geodezji i Kartografii

SŁOWA KLUCZOWE: wskaźniki roślinne, NDVI, VCI, MODIS, monitoring środowiska, obszary chronione, dane klimatyczne

STRESZCZENIE: Celem opracowania jest prezentacja możliwości zastosowania obrazów satelitarnych w połączeniu z danymi klimatycznymi do badania chwilowych i długookresowych zmian zachodzących w środowisku przyrodniczym obszarów objętych ochroną prawną. Wykorzystanymi w pracy materiałami są: ośmiodniowe kompozycje obrazów satelitarnych pozyskane przez radiometr MODIS oraz autorska baza danych zawierająca informacje o wybranych elementach meteorologicznych (temperatura powietrza, opady, etc.). Długość analizowanej serii danych zawiera się w przedziale od 2000 do 2008 roku. Na podstawie zgromadzonych obrazów satelitarnych zostały wyprowadzone i skorygowane za pomocą filtru Savitzky-Golay wskaźniki roślinne NDVI oraz VCI. Uzyskane wskaźniki roślinne zostały uśrednione w ramach klas pokrycia terenu CORINE dla obszarów chronionych sieci NATURA 2000 w Polsce. Następnie łącząc ośmiodniowe wartości indeksów roślinnych z danymi klimatycznymi utworzono szeregi czasowe prezentujące przebieg tych dwóch elementów w poszczególnych latach. Obliczając współczynniki korelacji dla tego zestawu danych określono zależność fluktuacji wartości wskaźnika NDVI od warunków klimatycznych. Na wybranych przykładach potwierdzono przydatność proponowanej metody do oceny kondycji i zdolności środowiska przyrodniczego do regeneracji. Dzięki przeprowadzonym analizom, można było umiejscowić w czasie nagle i gwałtowne zmiany zachodzące w środowisku, jak również ocenić ich skalę. Możliwości oceny długofalowych, powolnych zmian w środowisku zaprezentowano na przykładzie sukcesji roślinnej na hałdzie poeksploatacyjnej. Pojedyncze wyniki analiz opracowane dla każdego z obszarów NATURA 2000 zestawiono wyciągając ogólne wnioski na temat kondycji środowisk przyrodniczych w poszczególnych klasach pokrycia terenu.

1. WSTĘP

1.1. Monitoring i ocena środowiska przyrodniczego

Ocena stanu środowiska przyrodniczego w Polsce w świetle zachodzących w nim zmian wywołanych działalnością człowieka (zmianami pokrycia terenu, zanieczyszczeniem środowiska), zmianami klimatu, zagrożeniami naturalnymi (pożarami, porywistymi wiatrami, szkodnikami) stała się kluczową kwestią w ostatnich latach. Liczne konwencje: Berneńska (o ochronie gatunków dzikiej fauny i flory europejskiej oraz siedlisk przyrodniczych), Ramsarska (o obszarach błotno-wodnych), Konwencja o Ochronie Różnorodności Biologicznej oraz zobowiązania wprowadzone przez Unię Europejską (liczne dyrektywy: Ptasia, Siedliskowa) nakładają na Polskę obowiązek monitorowania i oceniania stanu środowiska przyrodniczego. Dzięki rzetelnej ocenie można lepiej zarządzać środowiskiem w ramach zasad zrównoważonego rozwoju oraz monitorować i prognozować zmiany zachodzące w przyrodzie. W Polsce systemem pomiarów, ocen i prognoz stanu środowiska oraz gromadzenia, przetwarzania i rozpowszechniania informacji o środowisku zajmuje się Państwowy Monitoring Środowiska. Gromadzenie danych w ramach monitorowania środowiska przyrodniczego jest procesem pracochłonnym, wymagającym zaangażowania dużej liczby specjalistów i znacznych środków finansowych. Według projektu Ministerstwa Ochrony Środowiska z roku 2006: „Prowadzenie monitoringu na obszarach NATURA 2000 będzie kosztowało około 20 000 zł rocznie dla jednego obszaru, czyli w sumie 1 520 000 zł.” Oprócz obszarów sieci NATURA 2000 istnieje wiele innych cennych przyrodniczo powierzchni i siedlisk objętych różnymi formami ochrony prawnej. Prowadzenie częstego, systematycznego monitoringu i oceny stanu środowiska przyrodniczego wszystkich obszarów wartościowych przyrodniczo za pomocą badań terenowych jest niemożliwe z powodów finansowych. Fakt ten stwarza możliwość dla zastosowania technik teledetekcyjnych, a w szczególności satelitarnych, dzięki którym proces gromadzenia danych jest o wiele mniej kosztowny, obejmuje swym zasięgiem znaczne obszary i pozwala na pozyskiwanie danych o dużej rozdzielczości czasowej. Jednakże oprócz niewątpliwych zalet dane teledetekcyjne posiadają również ograniczenia związane z samym sposobem pozyskiwania danych. Skanowanie powierzchni Ziemi ze znacznych wysokości wiąże się z potrzebą wyeliminowania wpływu atmosfery na wiązkę promieniowania elektromagnetycznego (np. rozpraszania i pochłaniania promieniowania). Również same zjawiska zachodzące w atmosferze takie jak: rozwój zachmurzenia, zamglenia, jej zapylenie wymagają odpowiedniej korekcji obrazu satelitarnego. Wszystkie te czynniki wpływają na rzetelność uzyskanych wyników i poprawność wyciągniętych wniosków, dlatego ważną kwestią podczas pracy z danymi satelitarnymi jest ich początkowa ocena pod kątem występujących na nich zakłóceń.

1.2. Zastosowanie wskaźników roślinnych do oceny stanu środowiska przyrodniczego

Proces monitoringu środowiska przyrodniczego prowadzony na podstawie danych satelitarnych bazuje głównie na wykorzystaniu wskaźników roślinnych. Indeksy wege-

tacyjne (spektralne) służą do ilościowej i jakościowej oceny stanu roślinności, a także do korekty obrazów pod względem radiometrycznym, ze względu na wpływ rzeźby terenu, atmosfery lub różnego oświetlenia (Adamczyk, Będkowski, 2005). Główna zasada ich konstrukcji jest bardzo prosta i opiera się na różnicy w odbiciu różnych długości fal elektromagnetycznych przez powierzchnię roślin (Dąbrowska-Zielińska *et al.*, 2003). Zielone części roślin absorbują energię słoneczną w zakresie promieniowania czynnego fotosyntetycznie PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), które zawiera się w przedziale od 400÷700 nm. Chlorofil pochłania głównie promieniowanie w zakresie niebieskim (<500 nm) oraz w zakresie czerwonym (600÷700 nm), a odbija w zakresie zielonym (500÷600 nm), co powoduje, że postrzegamy rośliny w tym kolorze. Dłuższe niż 700 nm fale elektromagnetyczne są bezużyteczne z punktu widzenia syntezy nowych komórek roślinnych. Dodatkowo mogłyby one doprowadzić do przegrzania rośliny, dlatego specjalna warstwa komórek w liściach określana, jako miękisz palisadowy, posiada zdolność silnego odbijania promieniowania elektromagnetycznego z zakresu bliskiej podczerwieni.

Pokrywa roślinna jest ściśle powiązana z innymi komponentami ekosystemów, takimi jak: atmosfera, hydrosfera, pedosfera, zoosfera, stąd na jej podstawie można wnioskować o kondycji całego środowiska przyrodniczego. Śledząc przebieg wartości wskaźników roślinnych w czasie dla danego obszaru można wnioskować o pozytywnym, bądź negatywnym charakterze zmian zachodzących w jego środowisku przyrodniczym lub ich braku (Maselli, 2004). Głównym, naturalnym czynnikiem wpływającym na rozwój roślinności w skali globalnej jest przebieg warunków klimatycznych. Korelując wartości wskaźników roślinnych i wybranych parametrów klimatycznych, można wyróżnić zmiany w środowisku przyrodniczym wywołane innymi niż klimatyczne czynnikami (Xiao, Moody, 2005).

W niniejszej pracy wykorzystano dwa wskaźniki roślinne NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) i VCI (*Vegetation Condition Index*).

Wskaźnik NDVI jest prostym wskaźnikiem roślinnym, opierającym się na opisywanej wcześniej różnicy w odbiciu spektralnym zielonej roślinności w kanałach czerwonym (RED) i bliskiej podczerwieni (NIR). Wyraża się go wzorem:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

Wskaźniki wprowadzone wcześniej niż NDVI, np. indeks RVI (*Ratio Vegetation Index*), odznaczały się zakresem wartości od zera do nieskończoności, co utrudniało ich porównywanie i wykorzystywanie. Określenie *Normalized Index* odnosi się do stałego zakresu wartości wskaźnika NDVI, który zawiera się w przedziale od -1 do 1. Wartości tego wskaźnika z zakresu od -1 do 0 charakteryzują tereny pozbawione pokrywy roślinnej, podczas gdy pozostałe wartości (od 0 do 1) oszacowują stan fizjologiczny roślinności, zgodnie z zasadą: im większa zawartość chlorofilu, tym większe odbicie spektralne w zakresie podczerwieni i większa absorpcja promieniowania czerwonego, co przekłada się na wysoką wartość indeksu NDVI.

Drugim wskaźnikiem roślinnym porównywanym w niniejszym opracowaniu jest wskaźnik VCI (*Vegetation Condition Index*), który wyliczany jest na podstawie szeregu wartości NDVI w danym okresie. Wyrażany jest – dla danego piksela – jako stosunek

różnicy wartości NDVI w wybranym momencie i minimalnej wartości NDVI w analizowanym okresie badawczym do różnicy wartości maksymalnej i minimalnej NDVI w analizowanym okresie badawczym (Dąbrowska-Zielińska *et al.*, 2002). Przyjmuje on wartości z zakresu od 0 do 100. Zapis matematyczny wskaźnika VCI przedstawia równanie.

$$(2) \quad VCI = 100 \cdot (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$$

Wskaźnik VCI został skonstruowany z myślą o uwypukleniu wartości ekstremalnych NDVI w analizowanym okresie badawczym. Zgodnie z zaprezentowanym równaniem (2), jeżeli wartość NDVI danego piksela w wybranym momencie analizowanego szeregu czasowego jest bliska wartości minimalnej w całym szeregu, wtedy VCI jest niskie (rzędu 0÷33). Na tej podstawie można wnosić o złych warunkach klimatycznych panujących w tym okresie (Seiler *et al.*, 2007). Jeżeli natomiast dany piksel w wybranym momencie analizowanego szeregu czasowego charakteryzuje się ponadprzeciętną wartością NDVI w porównaniu z resztą okresu, wtedy indeks VCI ma wysokie wartości (rzędu 66÷100). W pozostałych przypadkach, gdy wartość NDVI danego piksela jest zbliżona do średniej wartości tegoż piksela z całego analizowanego okresu, wtedy VCI przyjmuje wartości od 34÷65.

2. CEL PRACY

Celem niniejszej pracy było opracowanie metodologii oceny stanu środowiska przyrodniczego obszarów prawnie chronionych przy wykorzystaniu wskaźników roślinnych wyprowadzonych z obrazów satelitarnych i skorelowanych z danymi klimatycznymi. Na tej podstawie podjęto próbę scharakteryzowania kondycji poszczególnych klas pokrycia terenu CORINE w ramach wszystkich obszarów NATURA 2000 w Polsce. Wcześniej prowadzone prace o zbliżonej tematyce przyniosły zadawalające rezultaty (Senay, Elliott, 2000).

3. WYKORZYSTANE DANE

3.1. Dane klimatyczne

Bezpłatne, codzienne dane klimatyczne pochodzące z depesz synoptycznych z 140 stacji rozmieszczonych na terenie Polskie i w jej najbliższym sąsiedztwie pobrano z witryny internetowej <https://www.tutiempo.net>. Pozyskany materiał zawierał informacje o: temperaturze średniej, minimalnej, maksymalnej powietrza, opadach atmosferycznych, ciśnieniu atmosferycznym, prędkości wiatru, wilgotności powietrza, indykatorach deszczu, śniegu, burzy oraz mgły. W toku dalszych analiz wykorzystano jedynie dane o temperaturze powietrza i opadach atmosferycznych. W zależności od stacji meteorologicznej zakres czasowy uzyskanych danych zawierał się w przedziale od kilku do ponad 60 lat.

3.2. Dane satelitarne

Wykorzystane w pracy dane satelitarne pochodzą z radiometru MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) zainstalowanego na pokładzie amerykańskiego satelity Terra. Ich zasięg czasowy obejmuje lata 2000 do 2008. Sensor MODIS skanuje powierzchnię Ziemi w 36 wąskich zakresach spektralnych od 0.4 μm do 14.4 μm , z czego pierwsze dwa kanały: $b_1 = 0.62 \div 0.67 \mu\text{m}$; $b_2 = 0.841 \div 0.876 \mu\text{m}$, mają najlepszą rozdzielczość przestrzenną wynoszącą 250 m (właśnie te kanały wykorzystano w wyznaczaniu wskaźnika NDVI). Obrazy z kolejnych 5 zakresów spektralnych charakteryzują się rozdzielczością przestrzenną 500 m. Dla pozostałych 29. kanałów wielkość zarejestrowanego piksela wynosi 1 km. Szerokość skanowanego pasa terenu przez sensor MODIS wynosi 2330 km, co pozwala mu w zależności od szerokości geograficznej, na pokrycie danego obszaru co jeden lub dwa dni. Sensor MODIS jest również zainstalowany na pokładzie satelity AQUA, który został głównie zaprojektowany do badania globalnego cyklu obiegu wody w przyrodzie. Wyposażenie dwóch satelitów w ten sam instrument pozwala na zwiększenie rozdzielczości czasowej otrzymywanych obrazów do jednego dnia.

Na podstawie dziennych obrazów satelitarnych tworzone są ośmiodniowe kompozycje poszczególnych kanałów spektralnych, które w wyniku przetworzeń są skorygowane o zakłócenia atmosferyczne (Vermote *et al.*, 2002) i błędy geometrii zobrazowania. Dodatkowo oprócz samych scen satelitarnych dołączany jest obraz *Quality Check*, który zawiera informację o jakości danych dla każdego piksela zapisaną w postaci bitowej. Dzięki tej informacji można ustalić czy dany piksel był zachmurzony, pokryty śniegiem, czy sąsiadował z chmurą, itp. Pozwala to w toku dalszych analiz na wyeliminowanie pikseli, które mają zafałszowane wartości związane ze wspomnianymi czynnikami.

Darmowe dane zarejestrowane przez sensor MODIS dostępne są na stronie internetowej: <https://wist.echo.nasa.gov>.

3.3. Pozostałe dane wykorzystane w opracowaniu

Do przeprowadzenia analiz wykorzystano ponadto następujące dane:

- Baza CORINE LAND COVER 2000, która posłużyła do wyznaczenia klas pokrycia terenu w ramach obszarów NATURA 2000 (<http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/clc-download>);
- Numeryczny model rzeźby terenu SRTM30, który uwzględniono podczas interpolacji temperatury powietrza (<http://srtm.usgs.gov/index.php>);
- Warstwy wektorowe przedstawiające granice obszarów sieci NATURA 2000 (materiały Ministerstwa Ochrony Środowiska).

4. METODY

4.1. Przetwarzanie danych klimatycznych

Dane klimatyczne pobrano z witryny <https://www.tutiempo.net> za pomocą programu do archiwizacji stron html. Następnie ściągnięte strony html przetworzono do pliku

tekstowego .txt. Za pomocą opracowanego skryptu w języku programowania Python, przekształcono pliki tekstowe na formę tabelaryczną i zapisano w formacie .dbf. Wszystkie tabele zaimportowano do środowiska ArcGIS w postaci bazy danych Access i utworzono warstwę geometryczną zawierającą lokalizację wszystkich stacji meteorologicznych. Następnie za pomocą kolejnych skryptów uśredniono dane dzienne do ośmiodniowych, tak aby pokrywały się przedziałami czasowymi z ośmiodniowym kompozycjami skanera MODIS. Ostatecznie opracowano skrypt, który jednocześnie połączył część opisową bazy danych (tabele klimatyczne) z częścią geometryczną (warstwa ze stacjami meteorologicznymi) i wyinterpolował w siatce 5x5 km ośmiodniowe obrazy zawierające informacje o średnich temperaturach i sumie opadów. Do interpolacji temperatury wykorzystano metodę (Dodson, Marks, 1997), która polega na redukcji temperatury rzeczywistej do poziomu morza zgodnie z gradientem wilgotnoadiabaticznym ($0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Następnie dokonuje się interpolacji uzyskanej temperatury przy użyciu krugingu uniwersalnego i ostatecznie na sprowadzeniu wyinterpolowanych wartości temperatury na poziom rzeczywisty ponownie uwzględniając gradient wilgotnoadiabaticzny. Do interpolacji ośmiodniowych sum opadów atmosferycznych użyto metody wieloboków Thiessena. Wybór wspomnianych metod był podyktowany potrzebą szybkiej i efektywnej interpolacji całego zestawu danych klimatycznych (ponad 400 warstw wektorowych), dla wszystkich wybranych parametrów meteorologicznych.

4.2. Przetwarzanie danych satelitarnych

W oprogramowaniu ENVI 4.5 zintegrowanym ze środowiskiem programistycznym IDL 7.0 przeprowadzono cały cykl przetwarzania danych pozyskanych przez sensor MODIS. Z uwagi na bardzo dużą ilość obrazów wejściowych wymagających automatycznego przetwarzania według określonego wzorca, prawie wszystkie operacje były wykonywane za pomocą skryptów zapisanych w środowisku IDL 7.0. Pozwalały one na zapętlenie określonych funkcji programu ENVI 4.5, poprzez automatyczne zmienianie parametrów tych funkcji takich jak np. pliki wejściowe i wyjściowe.

W pierwszym etapie przygotowywania danych, zmozaikowano cztery sceny zawierające odbicie spektralne w pierwszych dwóch kanałach b1 ($0.62\div 0.67\ \mu\text{m}$) i b2 ($0.841\div 0.876\ \mu\text{m}$) oraz obraz *Quality Check* zawierający informacje na temat jakości poszczególnych pikseli dla każdej oktady w analizowanych 9 latach. Kolejnym krokiem było uzyskanie informacji o zachmurzeniu, pokrywie śnieżnej i pikselach zakwalifikowanych jako niepewne, które zapisane były w formie bitowej w obrazie *Reflectance Band Quality*. Zapis wielu atrybutów danego piksela w tego rodzaju obrazie polega na tym, iż poszczególne informacje przypisane są do określonych numerowanych bitów. Dzięki temu kombinacja zer i jedynek na danej pozycji bitowej określa pewien unikalny atrybut piksela. Ten sposób rejestracji danych pozwala na zapisanie wszystkich atrybutów danego piksela w postaci pojedynczej wartości liczbowej. Z wektorowej bazy CORINE 2000 utworzono rastrową maskę wód powierzchniowych o rozdzielczości przestrzennej 250 m.

Na podstawie uprzednio przygotowanych obrazów satelitarnych zawierających odbicie spektralne w pierwszych dwóch kanałach obliczono wskaźnik NDVI i usunięto

zachmurzenie, pokrywą śnieżną, wody powierzchniowe i obszary zakwalifikowane jako niepewne. Następnie przebiegi wartości NDVI w poszczególnych latach zostały wygładzone za pomocą filtra Savitzky-Golay przy wykorzystaniu opracowanego w języku programowania R skryptu (Bojanowski *et al.*, 2009). Ostatecznie na podstawie skorygowanych obrazów NDVI obliczono wskaźnik VCI.

4.3. Tworzenie klas pokrycia terenu dla obszarów chronionych

W celu uśrednienia wartości wskaźników NDVI i VCI oraz danych klimatycznych zostały utworzone maski rastrowe poszczególnych klas pokrycia terenu w ramach obszarów NATURA 2000 (OSO – Obszary Specjalnej Ochrony ptaków i SOO – Specjalne Obszary Ochrony siedlisk). Warstwy z obszarami NATURA 2000 przecięto z bazą CORINE 2000, a następnie z warstwą prezentującą przestrzenny rozkład pikseli obrazów MODIS. Z wynikowej warstwy wybrano piksele homogeniczne, w których dana klasa pokrycia CORINE stanowiła ponad 90% powierzchni piksela. Operacja ta miała na celu wyeliminowanie pikseli składających się z mozaiki klas pokrycia terenu, których wartość wskaźnika NDVI w znaczący sposób odbiegałaby od średniej wartości tegoż wskaźnika w danej klasie. Każdej klasie pokrycia terenu w poszczególnych obszarach NATURA 2000 nadano unikatowy identyfikator tak, aby w toku dalszych analiz określone wyniki można było przypisać konkretnemu obszarowi.

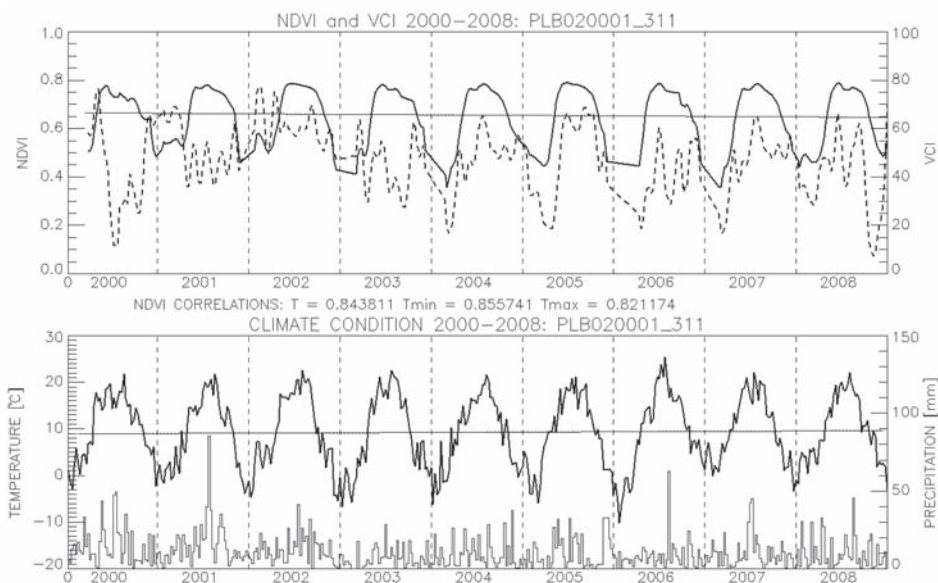
4.4. Zestawienie wskaźników roślinnych i danych klimatycznych

W ramach utworzonych klas pokrycia terenu dla obszarów chronionych uśredniono wartości wskaźników roślinnych oraz parametrów klimatycznych i wygenerowano tabele zbiorcze dla całego badanego wielolecia. Następnie wyliczono korelacje pomiędzy wskaźnikami roślinnymi a parametrami klimatycznymi, wyznaczono trendy dla poszczególnych zbiorów danych oraz zaprezentowano uzyskane wyniki w formie graficznej na wykresie. W celu prowadzenia dalszych analiz wyliczone parametry zostały zapisane w jednej wynikowej tabeli.

5. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

W wyniku przeprowadzonych przetworzeń dla każdej klasy pokrycia terenu znajdującej się w danym obszarze NATURA 2000 można przeprowadzić analizę przebiegu wartości wskaźników roślinnych oraz warunków klimatycznych. Przykładowa analiza zestawu danych została przedstawiona na Rys. 1. Prezentuje ona na górnym wykresie przebieg wartości wskaźników roślinnych (NDVI – linia ciągła, VCI – linia przerywana). Pomiedzy wykresami zamieszczono obliczone korelacje między danymi klimatycznymi a wskaźnikiem NDVI. Dolny wykres przedstawia zaś przebieg warunków klimatycznych w badanym wieloleciu. W tytułach wykresów umieszczono informację na temat kodu

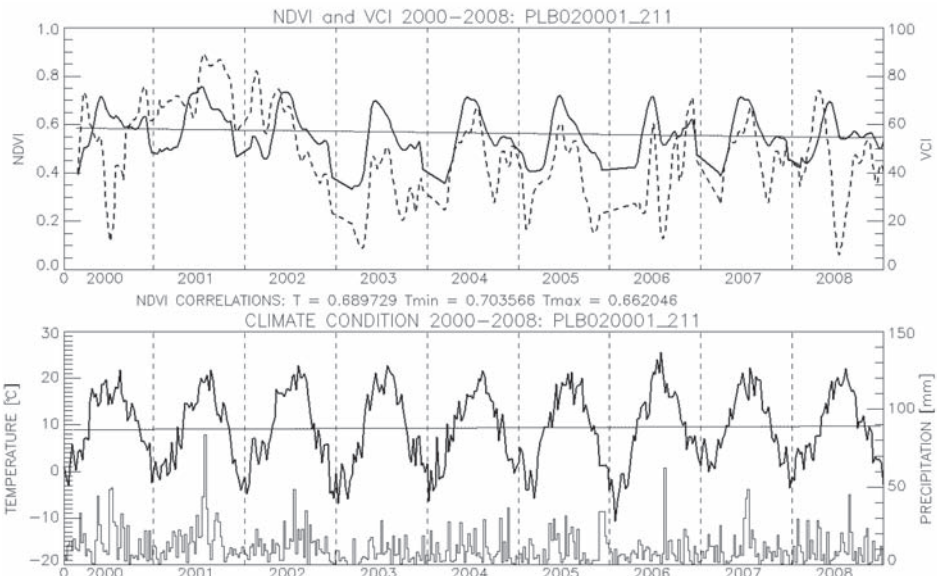
obszaru NATURA 2000 (PLB020001) oraz klasy pokrycia terenu CORINE (311). Na tej podstawie można określić, iż prezentowany wykres dotyczy obszaru „Dolina Baryczy” pokrytego lasem liściastym. Analizując linię trendu wskaźnika NDVI i jej nachylenie względem osi odciętych, można wnioskować, że na tym obszarze w lasach liściastych nie zaszły widoczne zmiany. Wysoka korelacja wskaźnika NDVI z danymi klimatycznymi wskazuje na duży udział roślinności naturalnej, której rozwój w ciągu roku nie był zaburzony przez inne czynniki (np. antropogeniczne). Śledząc przebieg wskaźnika VCI można zaobserwować, iż najbardziej sprzyjającym dla rozwoju roślinności w lesie liściastym był rok 2002, kiedy to sezon wegetacyjny, ze średnią temperaturą powietrza przekraczającą 5°C, rozpoczął się wyjątkowo wcześnie, a rozkład opadów w ciągu roku był dość równomierny.



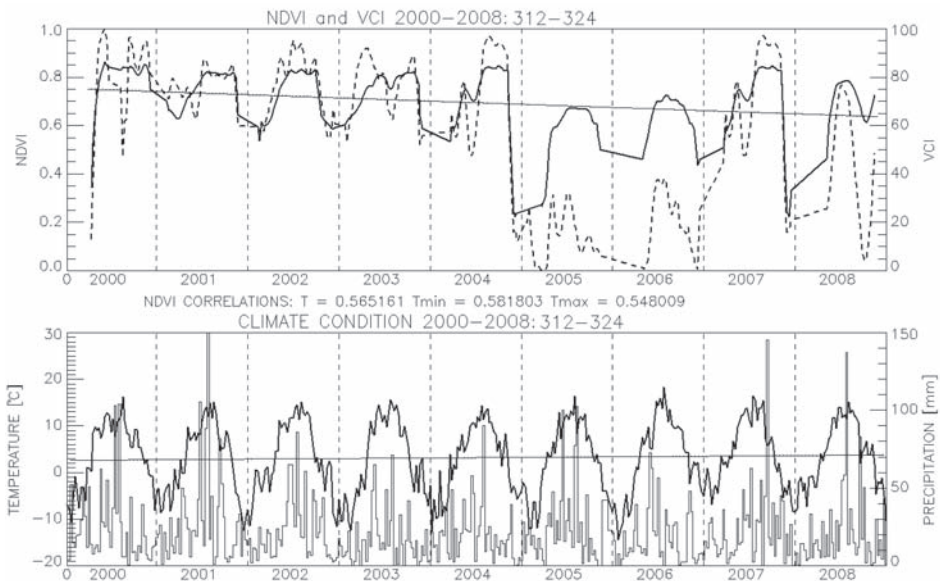
Rys. 1. Zestaw wskaźników roślinnych i danych klimatycznych dla klasy lasów liściastych na obszarze NATURA 2000 „Dolina Baryczy”.

Podobną analizę przeprowadzono dla klasy pól uprawnych w tym samym obszarze NATURA 2000 (Rys. 2). Przebieg wartości NDVI w tej klasie jest ostrzejszy w porównaniu z przebiegiem tegoż wskaźnika w klasie lasów liściastych. Ponadto korelacja wskaźnika NDVI z danymi klimatycznymi jest mniejsza, co wynika z większego wpływu czynnika antropogenicznego na rozwój roślinności w tej klasie.

Kolejny zestaw danych prezentuje nagłą zmianę w środowisku przyrodniczym, która związana była z wycinką lasu iglastego (Rys. 3). Śledząc przebieg wartości wskaźników roślinnych można łatwo zauważyć drastyczny ich spadek w roku 2005, co znalazło



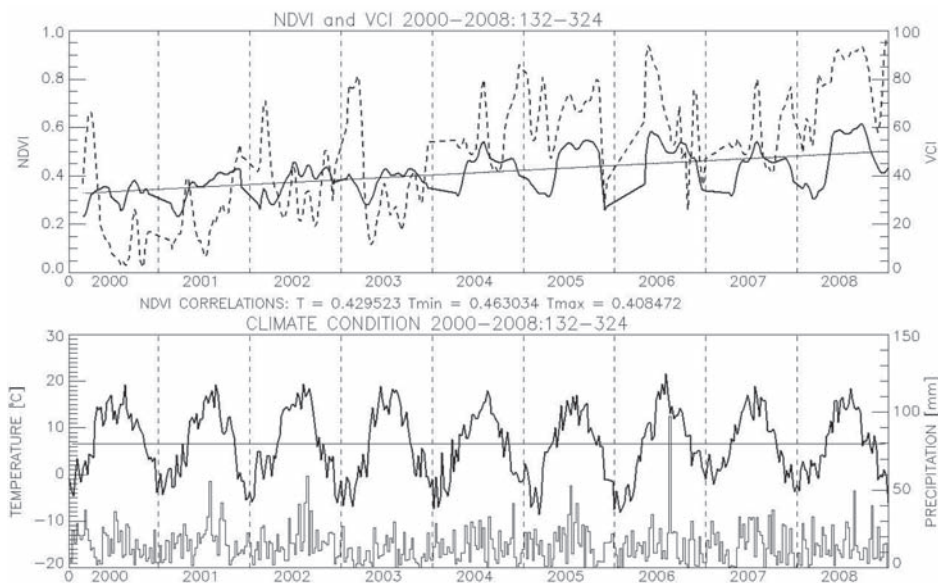
Rys. 2. Zestaw wskaźników roślinnych i danych klimatycznych dla klasy pól uprawnych na obszarze NATURA 2000 „Dolina Baryczy”.



Rys. 3. Zestaw wskaźników roślinnych i danych klimatycznych dla obszaru przecinki w lesie iglastym.

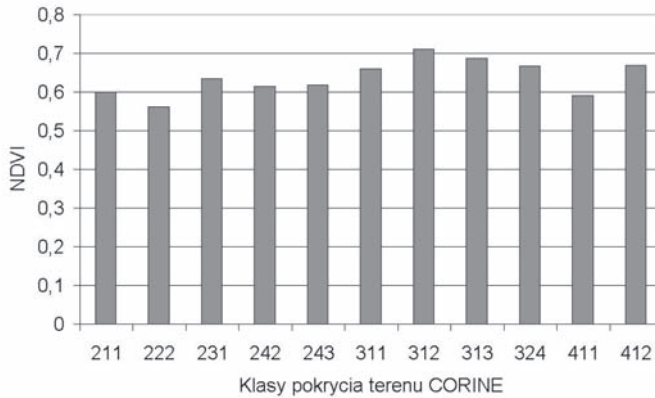
swoje odzwierciedlenie w znacznym spadku linii trendu wskaźnika NDVI. Na podstawie tego typu analizy można z łatwością ustalić, kiedy zaszła znacząca zmiana w środowisku przyrodniczym, w jakim stopniu na nie wpłynęła i jak szybko środowisko zdążyło się po niej zregenerować.

Tempo i możliwości powrotu zdegradowanego środowiska przyrodniczego do stanu pierwotnego na tle zachodzących w Polsce transformacji przemysłowych i wprowadzenia „czystych technologii” stało się tematem wielu prac badawczych (Kostuch, Twardy, 2006). Również aplikacja opisywanej metody oceny stanu środowiska przyrodniczego na podstawie wskaźników roślinnych przynosi zadawalające rezultaty. Jej zastosowanie ilustruje (Rys. 4), na którym przedstawiono sukcesję roślinną zachodzącą na hałdzie przemysłowej na terenie Górnego Śląska i związany z nią systematyczny wzrost wskaźników roślinnych. Wartość współczynnika nachylenia linii trendu wskaźnika NDVI względem osi odciętych, pozwala w prosty sposób liczbowo ująć tempo sukcesji roślinnej i porównać ze sobą różne obszary, na których to zjawisko ma miejsce.



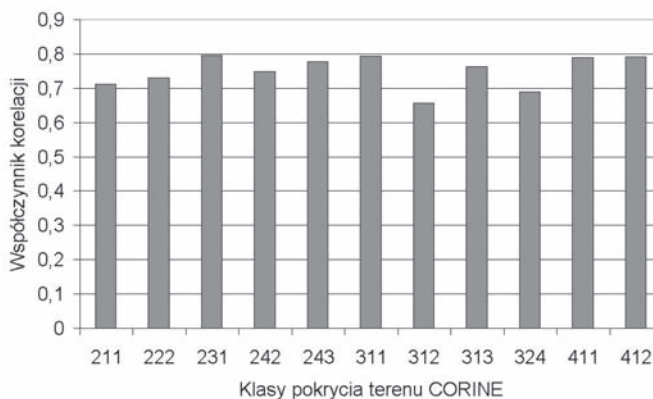
Rys. 4. Zestaw wskaźników roślinnych i danych klimatycznych dla obszaru hałdy poeksploatacyjnej.

Pojedyncze wyniki obliczeń dla poszczególnych obszarów NATURA 2000 zestawiono razem w celu wyciągnięcia ogólnych wniosków dotyczących przebiegu wartości wskaźnika NDVI w różnych klasach pokrycia terenu w skali całej Polski. Najwyższe, średnie wartości tego wskaźnika (Rys. 5) związane są z roślinnością charakteryzującą się dużą zasobnością w biomase, tj. z klasami leśnymi (3.1.1; 3.1.2; 3.1.3; 3.2.4) oraz z torfowiskami (4.1.2).



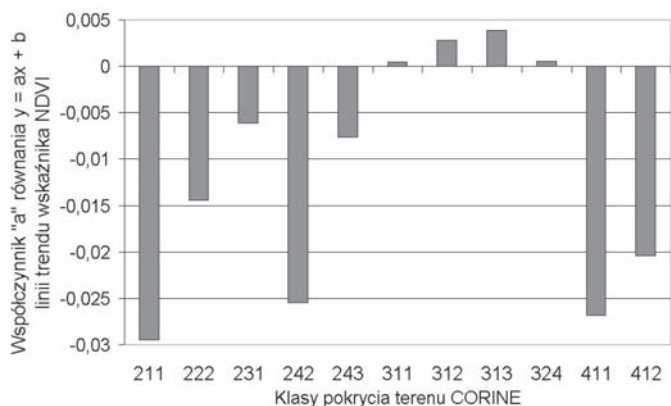
Rys. 5. Średnie wartości wskaźnika NDVI w klasach pokrycia terenu CORINE na obszarach NATURA 2000 w Polsce.

Zmienność NDVI na obszarze pokrytym roślinnością naturalną wykazuje większą korelację z warunkami klimatycznymi niż na terenach intensywnie użytkowanych przez człowieka (Rys. 6). Prawidłowość ta potwierdza tezę, iż integracja wskaźników roślinnych z danymi klimatycznymi pozwala na wyróżnienie zmian w środowisku zachodzących w wyniku działania czynników zewnętrznych. Jedynie klasy pokrycia terenu związane z roślinnością iglastą wykazują stosunkowo niską korelację z warunkami klimatycznymi, co spowodowane jest całoroczną, zieloną barwą igieł i związaną z nią niewielką fluktuacją wartości wskaźnika NDVI w ciągu roku.



Rys. 6. Współczynnik korelacji wskaźnika NDVI z temperaturą minimalną powietrza w klasach pokrycia terenu CORINE na obszarach NATURA 2000 w Polsce.

Wielkość i rodzaj zachodzących zmian w środowisku przyrodniczym poszczególnych klas pokrycia terenu obszarów NATURA 2000 w skali całej Polski, można ocenić ilościowo na podstawie nachylenia linii trendu wskaźnika NDVI względem osi odciętych (Rys. 7). Rozpatrując jego wartość łatwo zauważyć, iż w prawie wszystkich klasach pokrycia terenu nastąpił spadek wartości wskaźnika NDVI w ciągu badanego wielolecia. Największe spadki odnotowały klasy najbardziej podatne na niedobory wody związane z rolnictwem i obszarami podmokłymi. Fakt ten potwierdza negatywny wpływ coraz częściej występujących susz (lata: 2003, 2006, 2008) na środowisko przyrodnicze Polski.



Rys. 7. Współczynnik nachylenia linii trendu wskaźnika NDVI względem osi odciętych w klasach pokrycia terenu CORINE na obszarach NATURA 2000 w Polsce.

6. PODSUMOWANIE

Proponowana metodyka oceny stanu środowiska przyrodniczego obszarów prawnie chronionych w Polsce w oparciu o zintegrowane dane satelitarne i klimatyczne w świetle zaprezentowanych w opracowaniu kilku przykładowych zastosowań, przyniosła zadowalające rezultaty. Na jej podstawie, analizując nachylenie linii trendu wskaźnika NDVI i wspierając się danymi klimatycznymi, można wnioskować o rodzaju i tempie zmian zachodzących w środowisku przyrodniczym. Ponadto śledząc przebieg wartości wskaźników roślinnych w badanym wieloleciu, można dokładnie umiejscowić w czasie nagłe i gwałtowne zmiany, jak również ocenić ich skalę i zdolność środowiska do regeneracji. Uzyskaną w ten sposób wiedzę można wykorzystać do efektywniejszego zarządzania środowiskiem i odpowiedniej alokacji środków finansowych i osobowych na obszarach, które poddane są największej presji i zmianom.

Dużą zaletą proponowanej metodyki jest fakt, iż wszystkie wykorzystane w niej materiały są dostępne nieodpłatnie w Internecie. Oprócz tego zmuszone obliczeniowo prze-

tworzenia całego zestawu danych dla badanego wielolecia wykonuje się tylko raz, po czym przetwarza się jedynie dane z bieżącego roku. Wszystkie przeprowadzane operacje zostały zautomatyzowane poprzez opracowanie skryptów w językach programowania Python i IDL. Pozwala to na wykonanie całego łańcucha przetworzeń przez osobę bez odpowiedniej wiedzy merytorycznej, jedynie podając podstawowe parametry (lokalizację plików wejściowych i wyjściowych).

Należy również zaznaczyć, iż opisana metodyka może zostać zastosowana dla dowolnego obszaru o powierzchni przekraczającej 6.25 ha (250 x 250 m), co pozwala badać przebieg wartości wskaźników roślinnych w wieloleciu dla pojedynczych kompleksów leśnych, łąk, torfowisk, itp. Informacje uzyskane na tej podstawie nie zastąpią wyników badań terenowych, lecz mogą korzystnie wpłynąć na ich odpowiednie przygotowanie i zaplanowanie.

Niniejsza publikacja nie kończy prac związanych z rozwojem proponowanej metodyki. W najbliższym czasie autor, znając ograniczenia jakie niosą ze sobą wskaźniki NDVI i VCI (Van Leeuwen *et al.*, 2006), planuje poszerzyć gamę wykorzystanych wskaźników roślinnych i przetworzyć dane satelitarne pozyskane przez inny sensor.

7. LITERATURA

Adamczyk J., Będkowski K., 2005. *Metody Cyfrowe w Teledetekcji*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Bojanowski J., Kowalik W., Bochenek Z., 2009. Noise reduction of NDVI timeseries: a robust method based on Savitzky-Golay filter. *Annals of Geomatics*, Vol. 7, s. 13-21.

Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F., Ciołkosz A., Gruszczyńska M., Kowalik W., 2002. Regional vegetation mapping and direct land surface parameterization from remotely sensed and site data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, s. 1109-1125.

Dodson R., Marks R., 1997. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region. *Climate Research*, Vol. 8, s. 1-20.

Kostuch R., Twardy S., 2006. Roślinność zasiedlająca hutnicze wysypiska wielkopieczowe Nowej Huty. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*, Vol. 545, s. 1-10.

Maselli F., 2004. Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, s. 423-433.

Seiler R., Kogan F., Guo Wei, Vinocur M., 2007. Seasonal and interannual responses of the vegetation and production of crops in Cordoba – Argentina assessed by AVHRR derived vegetation indices. *Advances in Space Research*, Vol. 39, s. 88-94.

Senay G., Elliott R., 2000. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation. *Forest Ecology and Management*, Vol. 128, s. 83-91.

Van Leeuwen W., Orr B., Marsh S., Herrmann S., 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 100, s. 67–81.

Vermote E. F., El Saleous N. Z., Justice C. O., 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, s. 97–111.

Xiao J., Moody A., 2005. Geographic distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982 to 1998. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, s. 2371–2390.

THE METHODOLOGY OF ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN PROTECTED AREAS IN POLAND BASED ON INTEGRATED REMOTE SENSING AND CLIMATIC DATA

KEY WORDS: vegetation indices, NDVI, VCI, MODIS, environmental monitoring, protected areas, climatic data

SUMMARY: This work is intended to present the potential for using satellite images in combination with climatic data in order to analyse rapid and long-term changes occurring in the environments of protected areas. The materials used were 8 day compositions of MODIS satellite images and the author's database of selected climatic data (i.e. air temperatures, precipitation). The data analysed covers the period 2000 to 2008. Vegetation indices (NDVI and VCI) derived from satellite data were smoothed and corrected with the Savitzky-Golay filter in order to reduce noise in the signal. The indices so calculated were averaged within the CORINE land cover classes for protected areas within the NATURA 2000 network in Poland. Then time series were created, presenting the inter-annual and long-term diversity of the 8-day values of the vegetation indices and climatic data values. Correlation coefficients were calculated for those datasets in order to examine dependency between the NVDI vegetation indices and climatic conditions. Selected environmental examples proved the usefulness of the proposed methodology in the assessment of environmental conditions and their capacity to recover from degradation. The results of the analyses enabled the researchers to identify the timing of severe and rapid changes in the environment and to evaluate their scale. The opportunities for assessing long-term changes were shown using the example of vegetation development on post-industrial tips. Individual results for particular protected areas were combined and some general conclusions were drawn.

mgr Jan Musiał
jmusial@o2.pl
telefon: +48 606932123