MONITORING SATELITARNY ŚRODOWISKA W SKALI REGIONALNEJ: POMORZE ZACHODNIE W LATACH 2000–2015

Alfred Stach

Stach A., 2016: Monitoring satelitarny środowiska w skali regionalnej: Pomorze Zachodnie w latach 2000–2015 (*Satellite monitoring of the environment on a regional scale: Western Pomerania in the years 2000–2015*), Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Vol. 18(1), s. 29–39.

Zarys treści: Teledetekcja satelitarna stanowi od wielu lat najważniejsze źródło wiedzy o stanie i tendencjach zmian środowiska na Ziemi, jednakże wykorzystanie rejestracji wykonywanych z satelitów do monitoringu środowiska w skali lokalnej czy regionalnej było mocno ograniczone. Sytuację zmieniło w znacznym stopniu wprowadzenie do użytkowania w latach 2000 i 2002 satelitów Terra i Aqua wyposażonych w spektroradiometr MODIS. Umożliwia on rejestrowanie charakterystyk powierzchni całej planety dwa razy na dobę w 36 kanałach spektralnych i w rozdzielczości 0,25–1 km. Celem, który sobie postawiono, była ocena tendencji zmian środowiska Pomorza Zachodniego w latach 2000–2015 na podstawie danych z czujników MODIS. Wykorzystano do tego wskaźniki temperatury powierzchni ziemi (LST) dla dnia i nocy, oraz stanu roślinności NDVI i EVI. Analizowano tendencje wieloletnie – zarówno wartości średnich, jak i charakterystyk cyklu sezonowego. Przeprowadzone obliczenia wykazały występowanie w analizowanym okresie i na analizowanym obszarze istotnych tendencji zmian zarówno LST, jak i wskaźników biomasy NDVI i EVI. Dotyczyły one wartości średnich, jak i parametrów cyklu sezonowego. Rozkład przestrzenny trendów wykazuje zarówno zmienność lokalną i regionalną. Trendy średnich wartości LST zanotowano jedynie dla pomiarów nocnych. Są one wyłącznie wzrostowe. Obejmują ponad 56% powierzchni analizowanego obszaru. Stwierdzono zarówno przyrosty (ok. 28% powierzchni), jak i spadki (ok. 10%) średnich wartości wskaźników biomasy roślinnej (NDVI i EVI). Około 70% powierzchni dużych przyrostów obu wskaźników jest wspólna, co wskazuje na wzrost ilości chlorofilu (NDVI), powierzchni liści oraz zmiany typu i fizjonomii zbiorowiska roślinnego (EVI). Analiza relacji pomiędzy charakterystykami powierzchni oraz zmianami LST i wskaźników biomasy umożliwia identyfikację obszarów, które powinny być poddane dokładniejszym badaniom – „hotspotów" nierównowagi środowiska.

Słowa kluczowe: monitoring satelitarny, MODIS, temperatura powierzchni ziemi, NDVI, EVI, trendy wieloletnie, cykl sezonowy, Pomorze Zachodnie
Key words: *environmental monitoring using satellite, MODIS, land surface temperature, NDVI, EVI, long-term trends, seasonal cycle, Western Pomerania Province*

Alfred Stach, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań, e-mail: frdstach@amu.edu.pl

1. Wprowadzenie

Teledetekcja satelitarna stanowi od wielu lat najważniejsze źródło wiedzy o stanie i tendencjach zmian środowiska na Ziemi (Purkis, Klemas 2011; Thenkabail 2016). Mimo pośredniego charakteru wykonywanych pomiarów, jej wielką zaletą jest obszarowy, a nie punktowy typ dostarczanych danych oraz synchroniczne, jednolite „pokrycie" skanowanej powierzchni. Wykorzystanie jednakże rejestracji wykonywanych

z satelitów do monitoringu środowiska w skali lokalnej czy regionalnej było mocno ograniczone. Wynikało to z jednej strony z niezadowalającej rozdzielczości przestrzennej i/lub czasowej wykonywanych pomiarów, a z drugiej – ze stosunkowo krótkiego, zazwyczaj kilkuletniego, czasu trwania poszczególnych misji satelitarnych. Nie ułatwiał też zadania bardzo szybki postęp techniczny i brak powszechnie akceptowanych uzgodnień międzynarodowych co do standardów wykonywania pomiarów. Jednolite serie pomiarowe były więc stosunkowo krótkie. Barierę w szerszym wykorzystaniu danych z monitoringu satelitarnego stanowiła też wielokrotnie ich ograniczona dostępność.

Wymienione wyżej ograniczenia zostały jednakże znacząco zredukowane przez wprowadzenie do użytkowania na początku ubiegłej dekady satelitów serii EOS (ang. *Earth Observing System*), a zwłaszcza Terra i Aqua (http://eospso.nasa.gov/). Jednym z podstawowych czujników na nich zainstalowanych jest spektroradiometr obrazujący średniej rozdzielczości MODIS (ang. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, Xiong i in. 2011). Rejestruje on promieniowanie elektromagnetyczne w 36 kanałach obejmujących zakres 0,46–14,39 μm i dostarcza dane o rozdzielczości przestrzennej 0,25–1,00 km/piksel w nadirze. Duże pole widzenia (110°) czujnika MODIS umożliwia rejestrowanie charakterystyk powierzchni całej planety dwa razy na dobę. Orbity satelitów Terra i Aqua są stabilizowane z dokładnością ±5–10 minut, co pozwala na uzyskanie homogenicznych serii obserwacyjnych, kluczowych do badań środowiska, a trudno osiągalnych za pomocą innych sensorów. Terra działa nieprzerwanie od marca roku 2000, a Aqua od lipca roku 2002, a zatem serie ich pomiarowe mają już 16 i 14,5 roku.

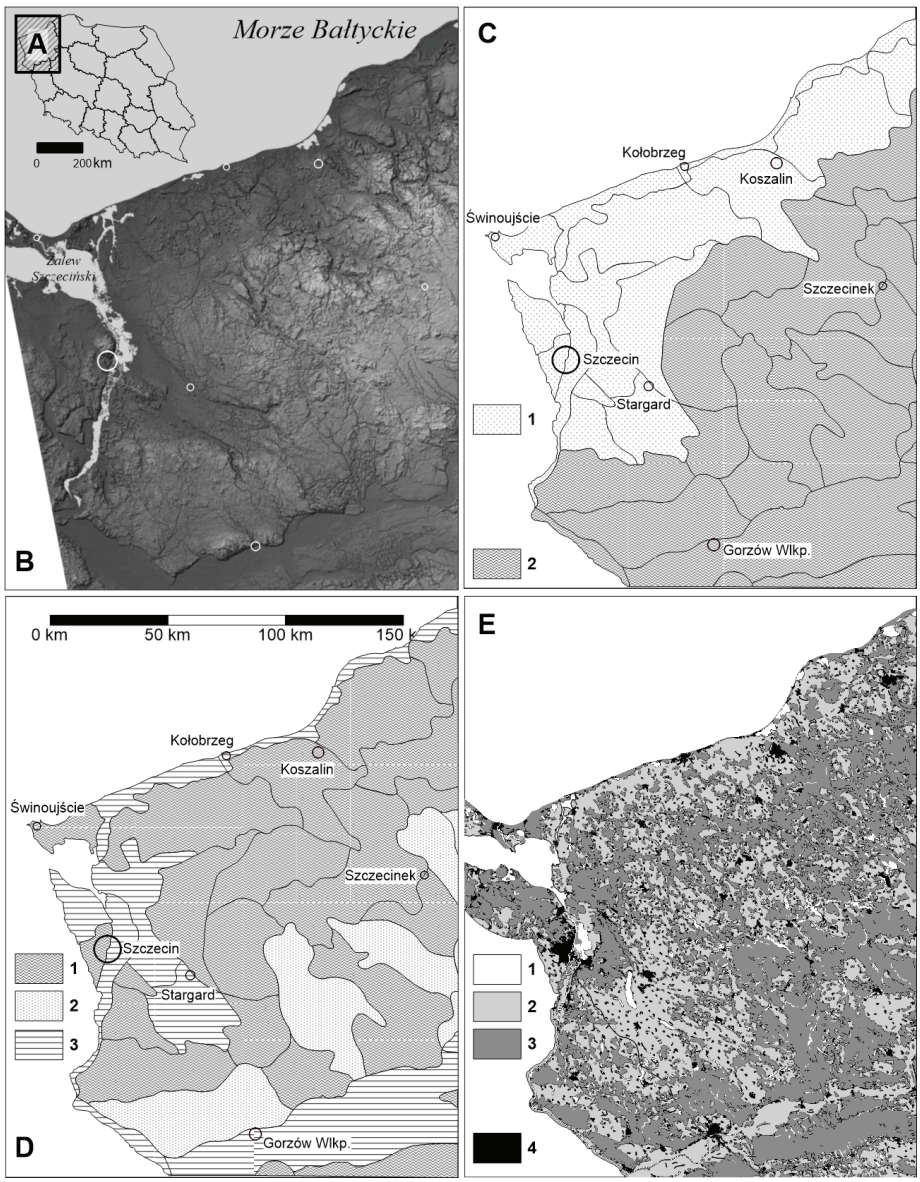
Dane pozyskiwane przez czujniki MODIS są bezpłatnie dostępne – zarówno „surowe", to jest zarejestrowane w poszczególnych kanałach spektralnych wartości promieniowania elektromagnetycznego, jak i dane tematyczne, tzw. produkty (Masuoka i in. 2011) – efekt interpretacji danych pierwotnych. Z tego względu analizy wykonane przy ich wykorzystaniu można już liczyć w tysiącach, zarówno w skali globalnej (np. Sobrino i Julien 2013), jak i regionalnej (np. Benali i in. 2012; Stroppiano i in. 2014), w tym również dla obszaru Polski (Bartold 2012; Gawuc, Strużewska 2015; Lamarche i in. 2012; Musiał 2009; Ślązek 2014; Tomaszewska i in. 2011). Zdecydowanie jednak dominują opracowania specjalistyczne, w których dane pojedynczych wskaźników wykorzystywane są do oceny poszczególnych komponentów środowiska, takich jak na przykład uszkodzenia lasów, stan wegetacji, temperatura powierzchni terenu na obszarach zurbanizowanych, ewapotranspiracja itp. Brak jest syntez regionalnych, w których na jednym obszarze analizowano by wiele wskaźników satelitarnych. Dawałoby to podstawy do oceny stanu i zmian całych ekosystemów, a nie jedynie ich poszczególnych składowych. Niniejsze opracowanie jest wstępną próbą takiej syntezy.

Celem, który sobie postawiono, była ocena tendencji zmian środowiska Pomorza Zachodniego w latach 2000–2015 na podstawie danych z czujników MODIS. Wykorzystano do tego wskaźniki temperatury powierzchni ziemi (ang. LST – *Land Surface Temperature*) dla dnia i nocy, oraz stanu roślinności NDVI i EVI (ang. NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*, EVI – *Enhanced Vegetation Index*). Analizowano tendencje wieloletnie zarówno wartości średnich, jak i charakterystyk cyklu sezonowego. Jednocześnie można było wykazać duży, lecz do tej pory nie wykorzystany, potencjał danych MODIS do analiz zmienności przestrzennej i tendencji zmian środowiska w różnych skalach przestrzennych – od lokalnej do skali całego kraju.

2. Obszar badań

Jako obszar badań wybrano Pomorze Zachodnie – region o charakterze historycznym, który współcześnie utożsamiany jest często z obszarem województwa zachodniopomorskiego (ryc. 1). Jest to teren mocno zróżnicowany przyrodniczo i gospodarczo, obejmujący zarówno duże aglomeracje miejskie, obszary intensywnie użytkowane rolniczo, wykorzystywane gospodarczo lasy, jak i cenne, chronione prawnie obiekty przyrodnicze: parki narodowe, jeziora, obszary chronionego krajobrazu itp. Na tym terenie zlokalizowane są także dwie z jedenastu Stacji Bazowych ZMŚP: Storkowo i Wolin.

W obrębie granic Polski i w zasięgu analizowanego obszaru (30,545 tys. km^2 = 86,3% całości) znajduje się w całości lub części 36 mezoregionów (Kondracki 2002, ryc. 1C). Większość z nich – 21 mezoregionów obejmujących 63,3% powierzchni – należy do podprowincji Pojezierzy Południowobałtyckich. Pozostałe mezoregiony wchodzą w skład Pobrzeży Południowobałtyckich. Biorąc pod uwagę charakter rzeźby, można wyróżnić na analizowanym obszarze trzy typy (ryc. 1D). Najwięcej, bo 22 mezoregiony (61,1%), to młodoglacjalne wysoczyzny morenowe charakteryzujące się znacznym udziałem jezior. Około 23,3% powierzchni (9 mezoregionów) stanowią powierzchnie sandrowe, często także z jeziorami. Najmniej, bo 5 (15,6% powierzchni), jest mezoregionów, które można by scharakteryzować jako obniżenia, kotliny, większe doliny i równiny akumulacji wodnej, gdzie dość często występują wydmy.



Ryc. 1. Charakterystyki analizowanego obszaru

Objaśnienia: A. Zasięg obszaru analizy. Kształt Polski wynika ze zastosowania odwzorowania sinusoidalnego. B. Rzeźba terenu na podstawie modelu DETD2 o rozdzielczości 30m. Wielkość symboli miast jest proporcjonalna do liczby mieszkańców. C. Podział obszaru na mezoregiony i podprowincje (Kondracki 2002): 1 – podprowincja Pobrzeży Południowobałtyckich, 2 – podprowincja Pojezierzy Południowobałtyckich. D. Podział mezoregionów ze względu na dominujący typ rzeźby terenu: 1 – młodoglacjalne wysoczyzny morenowe często charakteryzujące się znacznym udziałem jezior , 2 – powierzchnie sandrowe, często także z jeziorami, 3 – obniżenia, kotliny, większe doliny i równiny akumulacji wodnej, gdzie dość często występują wydmy. E. Główne kategorie pokrycia/użytkowania terenu według Corine Land Cover 2012: 1 – wody, 2 – obszary użytkowane rolniczo, 3 – lasy i mokradła, 4 – obszary zurbanizowane.

Fig. 1. Characteristics of the analysed area

Explanation: A range of analysed area. The shape of the Poland results from the use of sinusoidal projection. B. The relief on the basis of the DETD2 model with a resolution of 30 m. The size of the city symbols (circles) is proportional to the number of inhabitants. C. The division of area on mesoregions and subprovinces (Kondracki 2002): 1 – subprovinces of the southern Baltic Coastlands, 2 – subprovinces of the southern Baltic Lake Districts. D. Division of mesoregions due to the dominant type of relief: 1 – young glacial high plains (mostly with lakes), 2 – outwash plains, often with lakes, 3 – depressions, basins, larger valleys and water accumulation plains where quite often occur sand dunes. E. Main categories of land cover / land use according to Corine Land Cover 2012: 1 – water, 2 – areas used for agricultural purposes, 3 – forests and wetlands, 4 – urban areas.

Do oceny rozkładu przestrzennego i udziału form pokrycia/użytkowania terenu w obrębie analizowanego obszaru i w granicach Polski wykorzystano bazę Corine Land Cover 2012 (ryc. 1E). Dominujący i prawie jednakowy udział mają obszary użytkowane rolniczo (46,6%) i lasy i inne zbiorowiska roślinne (47,7%). Równe 2/3 powierzchni zajmują dwie klasy użytków: grunty orne (33,6%) i lasy iglaste (33,0%). Około 3,0% zajmują tereny zurbanizowane z dominującą klasą zabudowy luźnej (2,3%). Pozostały obszar to głównie jeziora i cieki (2,4%) oraz bagna i torfowiska (0,3%). W latach 2000–2006 zmiany pokrycia/użytkowania terenu były stosunkowo nieduże i obejmowały 0,6% powierzchni. W kolejnym 6-leciu ich rozmiar był ponad dwa razy większy (1,3%). Największy jednakże procent tych zmian związany był z gospodarką leśną (wyręby, zalesienia). W drugim okresie wyraźnie także wzrosła powierzchnia obszarów zurbanizowanych, co było związane głównie z budową drogi ekspresowej S3 i gazoportu.

Na badanym obszarze w granicach Polski mieszka około 2,339 mln osób (dane ze spisu powszechnego 2011), co daje średnią gęstość zaludnienia 72,8 osoby na km^2. Większość jednak tego terenu charakteryzuje się niską gęstością zaludnienia: 33,4% powierzchni to gęstość poniżej 10 os./km^2, a 67,9% – poniżej 25 os./km^2. Ponad 67% populacji mieszka w miastach, z czego 17% w Szczecinie.

3. Dane źródłowe

W pracy użyto średnie 8-dniowe wartości LST dla dnia i nocy (Wan 2006; Wan, Li 2011) zawarte w produktach MOD11A2 (Terra) i MYD11A2 (Aqua) oraz średnie 16-dniowe wartości NDVI i EVI (Huete i in. 1999, 2011; Solano i in. 2010) z produktów MOD13Q1 (Terra) i MYD13Q1 (Aqua). Obejmowały one okres od 06.03.2000 do 10.02.2016 (LST Terra) i od 18.02.2000 do 02.02.2016 (NDVI i EVI Terra) oraz od 04.07.2002 do 10.02.2016 (LST Aqua) i od 04.07.2002 do 26.02.2016 (NDVI i EVI Aqua).

LST jest kluczowym parametrem fizycznym procesów zachodzących na powierzchni terenu tak w skali regionalnej, jak i globalnej, łącząc w sobie efekty wszystkich oddziaływań na granicy powierzchnia-atmosfera i strumieni energii przepływających między nimi. Ocena temperatury powierzchni terenu z poziomu orbity satelitarnej dokonuje się poprzez przeliczenie radiancji rejestrowanej przez czujniki w zakresie podczerwieni termalnej (TIR). Dane LST MODIS są obliczane na podstawie dwóch algorytmów umożliwiających korektę wpływu atmosfery i różnic emisyjności dla różnych typów pokrycia terenu. Jednym z nich jest algorytm uogólnionego podziału okna (ang. *generalized split-window algorythm*, Wan i Dozier 1996), wykorzystujący dane z kanałów 31 i 32, aby uzyskać LST dla pikseli pozbawionych chmur przy zastosowaniu klas emisyjności powierzchni. Drugi – oparty na teorii fizycznej algorytm „dzień/noc" (ang. *day/night algorithm*, Wan i Li 1997) – stosowany jest do uzyskiwania spektralnej emisyjności powierzchni i jej temperatury w rozdzielczości 6 km na podstawie pary dziennych i nocnych obrazów MODIS dla siedmiu kanałów podczerwieni termalnej (TIR).

Porównania między obliczonymi z danych MODIS LST a 47 pomiarami wykonanymi *in situ* przy bezchmurnym niebie (Wan 2008) wskazują, że ich dokładność jest, w większości przypadków (39 z 47), lepsza niż 1 K. Pomiary wykonywano w bardzo szerokim zakresie temperatur (od -10 do +58°C) i zawartości pary wodnej w profilu atmosfery (4 do 35 mm). Pierwiastek średnich kwadratów (RMS) różnic był mniejszy od 0,7 K dla wszystkich 47 przypadków, a po wyeliminowaniu 8 sytuacji z dużymi ładunkami aerozoli – mniejszy od 0,5 K. Średnie różnice LST uzyskane niezależnie oboma algorytmami wynoszą 0,2 K (SD = 0,5 K). Maksymalne błędy mogą jednak, przy niektórych typach pokrycia terenu (na przykład pokrywa śnieżna) i wysokiej zawartości pary wodnej w atmosferze, przekraczać nawet 10 K, a różnice w stosunku do rzeczywistej LST mogą mieć charakter systematyczny (Hachem i in. 2012; Westermann i in. 2012; Guillevic i in. 2014).

Podstawą do tworzenia empirycznych indeksów roślinności było badanie typowych sygnatur spektralnych liści (Huete i in. 1999; Solano i in. 2010). Energia fal od nich odbijanych w zakresie widzialnym jest niewielka ze względu na dużą absorpcję przez fotosyntetycznie aktywne pigmenty, z maksimum owej absorpcji w zakresie światła błękitnego (470 nm) i czerwonego (670 nm). Z kolei prawie całe promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni (NIR) jest rozpraszane (odbijane i przewodzone), a udział absorpcji jest niewielki. W efekcie tego kontrast między rejestrowanym odbiciem w zakresie fal czerwonych i bliskiej podczerwieni jest czułym wskaźnikiem intensywności wegetacji. Indeksy wegetacji są miarą tego kontrastu i stanowią łączny efekt struktury pokrywy roślinnej (% pokrycia, wskaźnik pokrycia liśćmi LAI, rozkład nachylenia liści LAD) i jej fizjologicznych właściwości (ilość i rodzaj barwników, natężenie fotosyntezy).

Indeks NDVI jest standaryzowaną funkcją stosunku między odbiciem w zakresie NIR i czerwieni (ρ_{NIR}/ρ_{red}) według wzoru (1), przybierającą wartości z zakresu od -1 do +1.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (1)$$

Ze względu na swoją konstrukcję NDVI zmniejsza wpływ niektórych typów szumów instrumentalnych i innych zakłóceń związanych ze zróżnicowaniem bezpośredniej i rozproszonej irradiancji, występowaniem chmur i ich cieni, zróżnicowaniem azymutu i wysokości słońca i kąta widzenia czujnika, wpływem topografii terenu i absorpcji atmosferycznej. Główną wadą wskaźników opartych na proporcjach NIR/red jest ich asymptotyczna nieliniowość. Z tego względu mogą być niewrażliwe na zróżnicowanie roślinność na niektórych typach pokrycia terenu. Nie są one także w stanie uwzględnić zależności spektralnych powstających w trakcie przechodzenia promieniowania przez atmosferę (radiancja scieżki), efektów oddziaływań „sklepienie roślin – podłoże" oraz anizotropii dwukierunkowego odbicia od powierzchni roślin, szczególnie tych związane z cieniem sklepienia roślinności.

Głównym wnioskiem z badań nad minimalizacją zakłóceń atmosferycznych na wskaźniki roślinności jest wykorzystanie różnicy reflektancji w błękitnym i czerwonym zakresie widma. Umożliwia to stabilizację wartości indeksu w stosunku do zmienności zawartości aerozoli atmosferycznych. Konstrukcja wskaźnika EVI pozwala dodatkowo na usunięcie zróżnicowania wywołanego zmianami jasności podłoża (gleby). Wzór do obliczania EVI jest następujący (2):

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \cdot \rho_{red} - C_2 \cdot \rho_{blue} + L} \quad (2)$$

gdzie: ρx to skorygowane reflektancje dla poszczególnych przedziałów widma, a G, C_1, C_2, L to współczynniki zapewniające korektę jasności podłoża i zawartości aerozoli atmosferycznych specyficzne dla określonego czujnika. W algorytmie obliczeń EVI z danych z czujnika MODIS mają one następujące wartości G = 2,5, C_1 = 6, C_2 = 7,5 i L = 1.

Podczas gdy NDVI jest wrażliwy głównie na ilość i aktywność chlorofilu, to EVI jest bardziej czuły na cechy strukturalne pokrywy roślinnej, w tym indeks powierzchni liści (LAI), typ pokrywy, fizjonomię roślin i „architekturę" zbiorowiska roślinnego. Z tego względu oba indeksy roślinności uzupełniają się wzajemnie w badaniach roślinności obejmujących identyfikację jej zmian i oceny parametrów biofizycznych. Istotna różnica między NDVI i EVI dotyczy też reakcji na obecność pokrywy śnieżnej. NDVI wówczas maleje, natomiast EVI wzrasta.

Do analiz wytyczono prostokątny fragment obrazów MODIS z 18 paska i 3 wiersza (h18v03) o powierzchni 47 571 km^2 (obszar lądowy = 35 395 km^2). Obejmuje on prawie całe województwo zachodniopomorskie wraz z najbliższym otoczeniem (ryc. 1). W obrębie wytyczonego obszaru mieściło się 41 591 pikseli danych LST o wymiarach 926,6 × 926,6 m każdy oraz 661 308 pikseli danych NDVI i EVI o wymiarach 231,5 × 231,5 m. Daje to sumaryczną powierzchnię odpowiednio 35 711,5 oraz 35 488,9 km^2. Różnice w stosunku do powierzchni obszaru lądowego wynikają z uwzględniania w analizie pikseli zawierających jedynie we fragmencie ląd, a położonych w większości na obszarze przybrzeżnym Bałtyku czy też Zalewu Szczecińskiego. W sumie w analizie uwzględniono 734 (Terra) i 629 (Aqua) obrazów z danymi LST oraz 368 (Terra) i 314 (Aqua) obrazów z danymi NDVI i EVI.

4. Metodyka analiz

Oryginalne dane zarówno LST, jak i NDVI i EVI są zapisane w postaci 16-bitowych liczb całkowitych. Zostały one przeliczone do skali Celsjusza (LST) i zakresu standaryzowanych wskaźników wegetacji, to jest od -0,2 do 1,0 (NDVI i EVI).

W pracy wykorzystano stosunkowo nową metodykę analiz serii czasowych obrazów satelitarnych zaimplementowaną w module Earth Trend Modeler systemu GIS TerrSet (Eastman 2015). Obejmuje ona identyfikacje tendencji wieloletnich zarówno wartości średnich, jak i charakterystyk cyklu sezonowego.

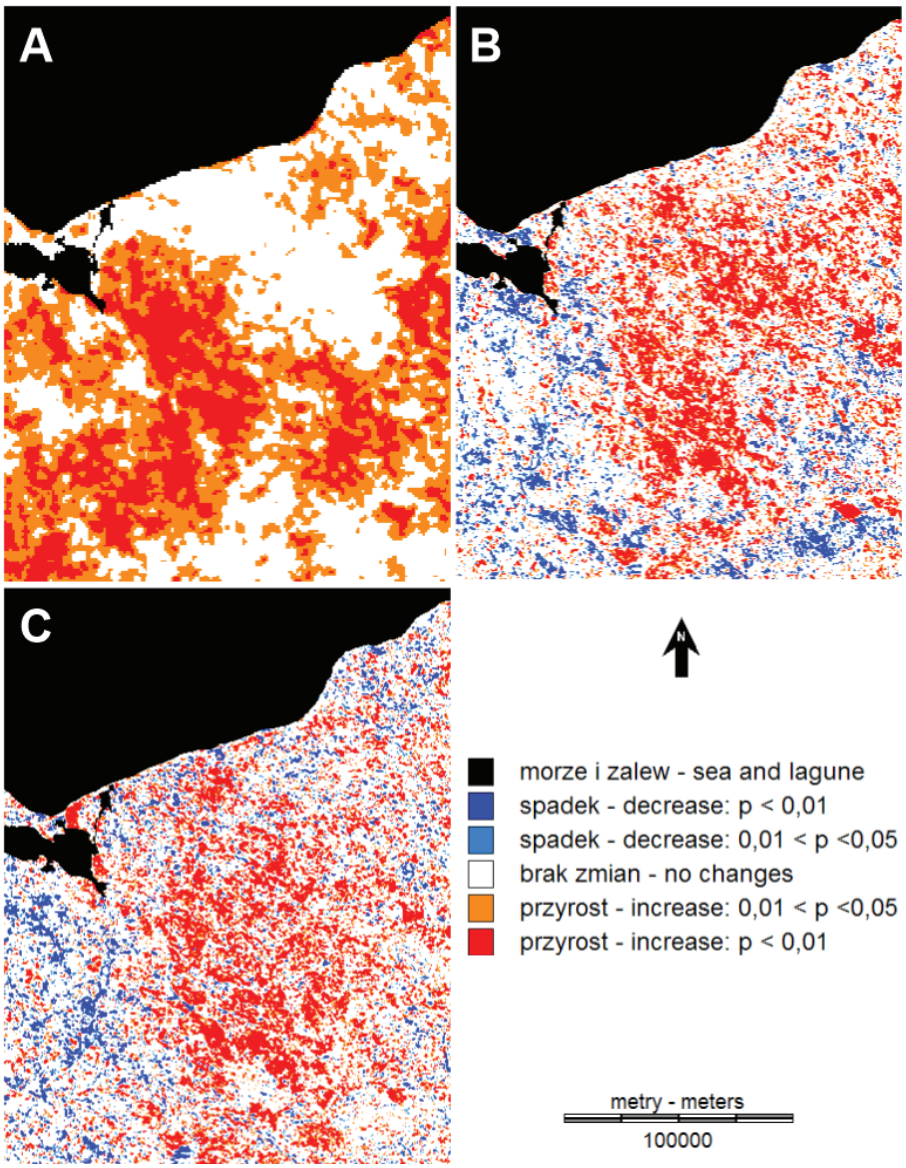
W tym pierwszym zakresie oprócz parametrów zwykłych trendów liniowych stosowane są też techniki nieparametryczne zarówno do identyfikacji trendów liniowych, jak i monotonicznych trendów nieliniowych (Thiel-Sen, Mann-Kendall). Nowością jest zastosowanie tak zwanego kontekstowego testu Manna-Kendalla (Neeti, Eastman 2011). Opiera się on na założeniu, że tendencje między sąsiednimi pikselami powinny wykazywać autokorelację i pozwala na zmniejszenie wykrywalności fałszywych trendów oraz zwiększenie ufności wyników, gdy trendy są spójne przestrzennie. Metoda ta, tak jak i inne testy nieparametryczne, nadaje się do małych próbek i jest odporna na wartości odstające, które bez znaczącego wpływu na końcowy wynik mogą stanowić nawet do 29% całej analizowanej serii pomiarowej. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do danych LST czułych na występowanie zachmurzenia (Wan 2008, Wan, Li 2011). Analiza trendów wartości średnich była wykonywana na danych, które wcześniej poddano procedurze odfiltrowania zmienności sezonowej.

Analiza trendów sezonowości (ang. STA, *Seasonal Trend Analysis*, Eastman i in. 2009) to skuteczna procedura koncentrująca się na ogólnym charakterze długo-

terminowych tendencji. Składa się ona z dwóch etapów. W pierwszym wyróżniane są składowe roczne i krótsze cyklu sezonowego za pomocą regresji harmonicznej. W drugim etapie przy pomocy nieparametrycznej techniki nachylenia mediany (estymator Theil-Sen) określane są trendy parametrów cykli (amplitudy i fazy). Metodyka ta skutecznie eliminuje szum o wysokiej częstotliwości występujący w skali pojedynczego roku i jest odporna na krótkookresową zmienność pomiędzy latami. Również w tej procedurze wykorzystywano kontekstowy test Manna-Kendalla. Analiza STA wykonywana jest dla pełnych serii rocznych, a zatem liczba uwzględnianych obrazów LST została zredukowana do 690 i 598 (Terra – lata 2001–2015 i Aqua – lata 2003–2015), a obrazów NDVI i EVI do 345 i 299.

5. Wyniki

Przeprowadzone obliczenia wykazały występowanie w analizowanym okresie i na analizowanym obszarze istotnych tendencji zmian zarówno LST, jak i wskaźników biomasy NDVI i EVI. Dotyczyły one zarówno wartości średnich, jak i parametrów cyklu sezonowego. W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną jedynie informacje o powierzchni i rozkładzie przestrzennym terenów, na których stwierdzono występowania



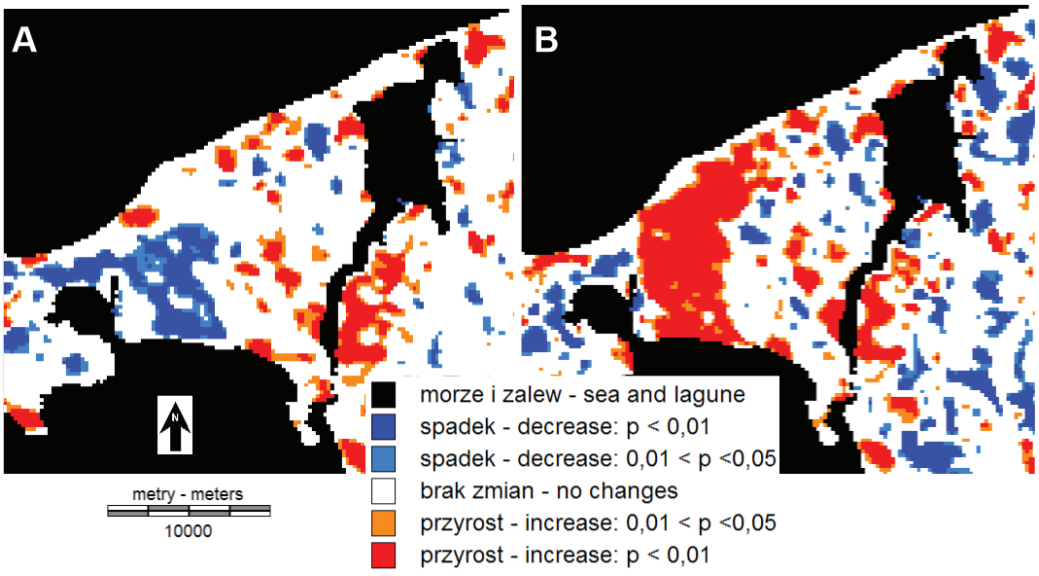
Ryc. 2. Identyfikacja trendów LST (A), NDVI (B) i EVI (C) określonych dla lat 2000–2015 za pomocą kontekstowego testu Manna-Kendalla. Analizowano obrazy z czujnika MODIS umieszczonego na satelicie Terra
Fig. 2. LST (A), NDVI (B) and EVI (C) trends identification for the years 2000 to 2015 period using the contextual Mann-Kendall test. Analysis was performed on images taken from the MODIS sensor located on the Terra satellite

trendów w 16-letniej serii danych z satelity Terra.

Zaskakujący był wynik analiz danych LST. Istotne statystycznie tendencje dla średnich wieloletnich stwierdzono jedynie dla temperatur nocnych. Ich wzrost notowany jest na powierzchni ponad 20 tys. km^2, co stanowi 56,5% powierzchni całego analizowanego obszaru. Na obszarze ponad 7,3 tys. km^2 (20,7%) zidentyfikowane trendy są bardzo istotne statystycznie ($p < 0,01$). Nigdzie nie stwierdzono tendencji do obniżenia temperatur. Rozkład przestrzenny trendów jest bardzo nieregularny, lecz oprócz zmienności lokalnej widoczne są też wyraźnie zróżnicowania regionalne. Skupione są one bowiem na obszarach morenowych i sandrowych w południowej i wschodniej części województwa i na obszarach z nim sąsiadujących (na wschodzie: Pojezierze Szczecineckie, Wałeckie, Dobiegniewskie, Równiny Drawska, Charzykowska i Dolina Gwdy; na południu: Pojezierze Ińskie i Myśliborskie, Równiny Goleniowska, Pyrzycko-Stargardzka i Gorzowska). Zdecydowanie rzadziej notowane są one w centralnej i północnej części analizowanego obszaru, choć występują bezpośrednio wzdłuż linii brzegowej, na przykład na odcinku blisko 50 km na wschód od Kołobrzegu.

Trendy wieloletnie wskaźników roślinności (biomasy) NDVI i EVI pokazują dość zbliżone rozkłady przestrzenne (ryc. 2B i 2C), choć są miejsca występowania istotnych różnic. W obu przypadkach obniżenie wartości wskaźników zanotowano na ok. 10% analizowanego obszaru, a ich wzrosty – na ok. 28%. Podobne są też proporcje powierzchni bardzo istotnych trendów spadku i wzrostu ($p < 0,01$) – odpowiednio 6 i 20%. Choć w wielu miejscach lokalne powierzchnie spadków i wzrostów wskaźników biomasy sąsiadują ze sobą, to jednak wyraźna jest także zmienność regionalna. Obszary obniżenia wskaźników biomasy dominują w zachodniej części województwa – wzdłuż biegu Odry i wokół Zalewu Szczecińskiego. Ich udział jest także większy (szczególnie EVI) w północno-wschodniej części analizowanego obszaru. Największy obszar względnie zwartych trendów przyrostowych ciągnie się pasem do Kotliny Gorzowskiej przez Pojezierze Dobiegniewskie i Choszczeńskie po Pojezierze Ińskie i Równinę Nowogardzką. Całkowity współczynnik zgodności Kappa pomiędzy rozkładami przestrzennymi klas trendów NDVI i EVI wynosi 42,4%, a współczynnik korelacji danych nominalnych (V-Cramera) między nimi jest równy 0,4 ($p < 0,000001$). Największy poziom zgodności, bo wynoszący około 70%, jest związany z klasą wzrostów o wysokiej istotności ($p < 0,01$). Stosunkowo wysoka, bo wynosząca 45%, jest też zgodność rozkładów obszarów, na których żadnych trendów wskaźników biomasy nie stwierdzono.

Znacząca różnica między wynikami analizy trendów NDVI i EVI dotyczy na przykład dużego fragmentu obszaru Wolińskiego Parku Narodowego, obejmującego wolińską morenę czołową (ryc. 3). Teren ten jest częściowo objęty monitoringiem prowadzonym przez Stację Bazową ZMŚP w Białej Górze. Analiza 16-letniej serii wskaźnika NDVI wykazała trend malejący w południowej części tego obszaru i brak jakichkolwiek tendencji



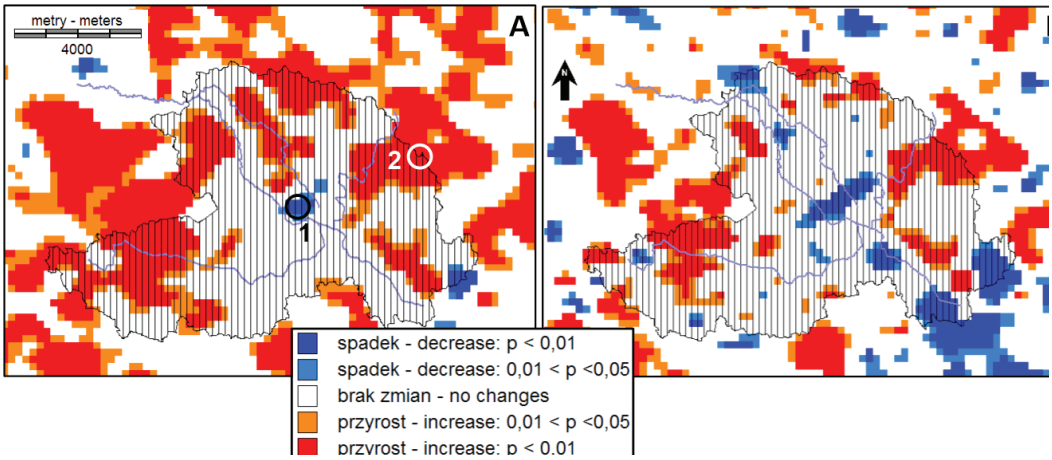
Ryc. 3. Identyfikacja trendów NDVI (A) i EVI (B) określonych dla lat 2000–2015 za pomocą kontekstowego testu Manna-Kendalla dla obszaru wyspy Wolin i jej otoczenia (powiększony fragment rycin 2B i 2C)
Fig. 3. NDVI (A) and EVI (B) trends identification for the years 2000 to 2015 period for the area of Wolin Island and its surroundings (magnified part of figures 2B and 2C)

w części północnej biegnącej wzdłuż brzegu morskiego. Seria pomiarowa EVI natomiast dla całości tego terenu charakteryzuje się wysoko istotnym statystycznie trendem rosnącym. Wskazywałoby to na przebudowę struktury zbiorowisk roślinnych zachodzącej albo wraz ze spadkiem ich biomasy, albo bez istotnej jej zmiany. Układ przestrzenny tych stref niewykazujący wyraźnego związku z aktualnym składem gatunkowym i wiekiem drzewostanów oraz typem gleb sugeruje jako główny czynnik mikroklimatyczne oddziaływanie morza.

Identyczne porównanie (ryc. 4) przeprowadzono dla obszaru zlewni górnej Parsęty objętej monitoringiem środowiska od połowy lat 80. ubiegłego wieku (Stacja Bazowa ZMŚP Storkowo). Typ i rozkład przestrzenny różnic między trendami NDVI i EVI jest tutaj inny. Miejsca, w których występują istotne statystycznie tendencje wzrostowe, są dla obu wskaźników identyczne, ale ich powierzchnia jest różna – większa na mapach NDVI niż EVI. W wielu przypadkach niewielkie obszary, na których stwierdzono istotny wzrost EVI są „powiększone" i „połączone" na mapie NDVI. Większe różnice dotyczą lokalizacji i wielkości obszarów, na których zanotowano trendy malejące. Wiele miejsc o takich charakterystykach widocznych na mapie NDVI nie występuje na mapie EVI. Obszary zmian wskaźników biomasy są związane przede wszystkim z leśnym i łąkowym typem użytkowania terenu.

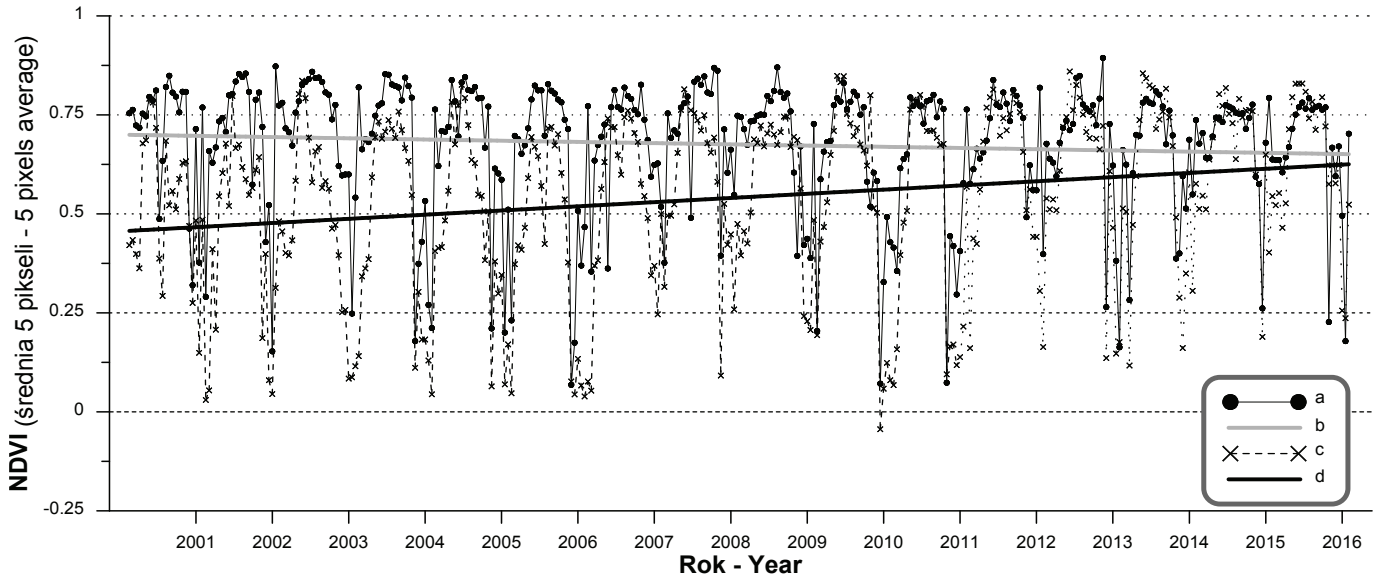
Jako przykłady odmiennych, i wysoce istotnych statystycznie, tendencji wybrano dwie lokalizacje z lasami (ryc. 4A i 5). Pierwsza z nich pokryta względnie młodymi nasadzeniami sosnowymi, rosnącymi na piaszczystych glebach, charakteryzowała się w latach 2000–2015 ujemnym trendem zarówno NDVI, jak i EVI. Druga to rosnący na bogatszych glebach, dojrzały wielogatunkowy las z dominującym udziałem buka. Na tym fragmencie zlewni oba wskaźniki biomasy wykazywały w analizowanym okresie silny przyrost. Drzewostany w obu lokalizacjach były eksploatowane i poddawane zabiegom pielęgnacyjnym, tak jak w innych typowych lasach gospodarczych. Dokładniejsza analiza wykresów na rycinie 5 wskazuje, że główną przyczyną odmiennych tendencji w obu lokalizacjach był spadek/wzrost wartości NDVI/EVI w sezonach letnich. Można przypuszczać, że spadek produktywności lasów w pierwszej lokalizacji był spowodowany sekwencją ciepłych i stosunkowo suchych lat i małymi zdolnościami do retencji wody piaszczystych gleb tam występujących. Tam, gdzie dostęp do wody był większy, rośliny na wzrost temperatur zareagowały pozytywnie.

Badania tendencji zmian cyklu sezonowego, których szczegółowe wyniki zostaną przedstawione w osobnym opracowaniu, wykazały na badanym obszarze w latach 2000–2015 występowanie istotnych trendów zarówno w odniesieniu do temperatury powierzchni ziemi, jak i wskaźników biomasy. Dotyczą one przede wszystkim zmniejszenia amplitudy sezonowej i przesunięcia fazy – szczególnie w okresie między zimą a wiosną. Powierzchnia istotnych statystycznie trendów jest jednak znacząco mniejsza niż w przypadku zmian średnich wieloletnich.



Ryc. 4. Identyfikacja trendów NDVI (A) i EVI (B) określonych dla lat 2000–2015 za pomocą kontekstowego testu Manna-Kendalla dla obszaru, zaznaczonej szrafem, zlewni górnej Parsęty (powiększony fragment rycin 2B i 2C). Na mapie NDVI zaznaczono (punkty 1 i 2) lokalizacje wysoko istotnych trendów malejących i rosnących przedstawionych na rycinie 5

Fig. 4. NDVI (A) and EVI (B) trends identification for the years 2000 to 2015 period for the marked by vertical hatch the area of upper Parsęta catchment (magnified part of figures 2B and 2C). On NDVI map is a selection (points 1 and 2) of locations with highly significant decreasing and increasing trends as shown in Figure 5



Ryc. 5. Serie uśrednionych wartości NDVI dla 5 pikseli i ich trendy wieloletnie dla dwóch lokalizacji w obrębie zlewni górnej Parsęty (patrz ryc. X)
Objaśnienia: a – NDVI w lokalizacji 1, b – trend spadkowy NDVI w lokalizacji 1 (test Manna-Kendalla $p < 0{,}001$), c – NDVI w lokalizacji 2, d – trend wzrostowy NDVI w lokalizacji 2 (test Manna-Kendalla $p < 0{,}000001$).
Fig. 5. Series of averaged 5 pixels NDVI values and their long-term trends for the two locations within the drainage basin of the upper Parsęta (see Fig. X)
Explanation: a – NDVI at location 1, b – the downward trend in NDVI location 1 (Mann-Kendall test $p < 0.001$), c – NDVI at location 2, d – upward trend in NDVI location 2 (Mann-Kendall test $p < 0.000001$).

6. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia wykazały występowanie w analizowanym okresie i na analizowanym obszarze istotnych tendencji zmian zarówno LST, jak i wskaźników biomasy NDVI i EVI. Dotyczyły one tak wartości średnich, jak i parametrów cyklu sezonowego. Rozkład przestrzenny trendów wykazuje zarówno zmienność lokalną, jak i regionalną. Trendy średnich wartości LST zanotowano jedynie dla pomiarów nocnych. Są one wyłącznie wzrostowe. Obejmują ponad 56% powierzchni analizowanego obszaru. Stwierdzono zarówno przyrosty (ok. 28% powierzchni), jak i spadki (ok. 10%) średnich wartości wskaźników biomasy roślinnej (NDVI i EVI). Około 70% powierzchni wysokich przyrostów obu wskaźników jest wspólna, co wskazuje zarówno na wzrost ilości chlorofilu (NDVI), powierzchni liści, oraz zmiany typu i fizjonomii zbiorowiska roślinnego (EVI). Analiza relacji pomiędzy charakterystykami powierzchni, zmianami LST i wskaźników biomasy umożliwia identyfikację obszarów które powinny być poddane dokładniejszym badaniom – „hotspotów" nierównowagi środowiska.

7. Literatura

Bartold M., 2012: Monitoring of forest damages in Poland and Slovakia based on Terra.MODIS satellite images. Geoinformation Issues, 4(1): 23–31.

Benali A., Carvalho A.C., Nunes J.P., Carvalhais N., Santos A., 2012: Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. Remote Sensing of Environment, 124: 108–121.

Eastman J.R., 2015: TerrSet Manual. Clark Labs, Clark University.

Eastman J.R., Sangermano F., Ghimire B., Zhu H., Chen H., Neeti N., Cai Y., Machado E.A., Crema S.C., 2009: Seasonal trend analysis of image time series. International Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 10, 2721–2726.

Gawuc L., Strużewska J., 2015: Analysis of the impact of different temporal aggregation techniques of land surface temperature on SUHI indicators and the relationship of surface temperature with population density and night lighting. ICUC9 – 9th International Conference on Urban Climate jointly with12th Symposium on the Urban Environment, 1–6.

Guillevic P.C., Biard J.C., Hulley G.C., Privette J.L., Hook S.J., Olioso A., Göttsche F.M., Radocinski

R., Románf M.O., Yu Y., Csiszar I., 2014: Validation of Land Surface Temperature products derived from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) using ground-based and heritage satellite measurements. Remote Sensing of Environment, 154: 19–37.

Hachem S., Duguay C.R., Allard M., 2012: Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with ground surface and air temperature measurements in continuous permafrost terrain. The Cryosphere, 6: 51–69.

Huete A., Didan K., van Leeuwen W., Miura T., Glenn E., 2011: MODIS Vegetation Indices. [w:] Ramachandran, B., i in. (red.), Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Springer Science+Business Media LLC, New York, ss. 579–602.

Huete A., Justice C., van Leeuwen W., 1999: MODIS Vegetation Index (MOD 13) algorithm theoretical basis document. Version 3. University of Arizona & University of Virginia, ss. 1–120. (http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf).

Kondracki J., 2002: Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.

Lamarche C., Tomaszewska M., Dabrowska-Zielinska K., Defourny P., 2012: Object – based automatic change detection in forested areas of Poland between 2000 and 2006 using NDVI Times series at moderate resolution. Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU General Assembly 2012, Vienna, 1.

Masuoka E., Roy D., Wolfe R., Morisette J., Sinno S., Teague M., Saleous N., Devadiga S., Justice C.O., Nickeson J., 2011: MODIS Land Data Products: Generation, Quality Assurance and Validation. [w:] Ramachandran, B., i in. (red.), Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Springer Science+Business Media LLC, New York, ss. 509–531.

Musiał J., 2009: Metodyka oceny stanu środowiska przyrodniczego obszarów prawnie chronionych w Polsce w oparciu o zintegrowane dane teledetekcyjne i klimatyczne. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 20: 307–320.

Neeti N., Eastman J.R., 2011: A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. Transactions in GIS, 15(5): 599–611.

Purkis S., Klemas V., 2011: Remote sensing and global environmental change. Wiley-Blackwell.

Sobrino J.A., Julien Y., 2013: Trend Analysis of Global MODIS-Terra Vegetation Indices and Land Surface Temperature Between 2000 and 2011. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 6(5): 2139–2145.

Solano R., Didan K., Jacobson A., Huete A., 2010: MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). Version 2.00, May 2010 (Collection 5). Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona, ss. 1-38. (https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf).

Stroppiana D., Antoninetti M., Brivio P.A., 2014: Seasonality of MODIS LST over Southern Italy and correlation with land cover, topography and solar radiation. European Journal of Remote Sensing, 47: 133–152.

Ślązek M., 2014: Analysis of evapotranspiration in the catchment of the Nurzec River, Poland using MODIS data. Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development, 18(1): 44–51.

Thenkabail P.S. (red.), 2016: Land resources monitoring, modeling, and mapping with remote sensing. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Tomaszewska M., Lewiński S., Woźniak E., 2011: Wykorzystanie zdjęć satelitarnych MODIS do badania stopnia pokrycia terenu roślinnością. Teledetekcja Środowiska, 46: 13–22.

Wan Z., 2006: Collection-5 MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide. ICESS, University of California, Santa Barbara, ss. 1-30. (http://www.icess.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_C5.pdf).

Wan Z., 2008: New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. Remote Sensing of Environment, 112: 59–74.

Wan Z., Dozier J., 1996: A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34(4): 892–905.

Wan Z., Li Z.-L., 1997: A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35: 980–996.

Wan Z., Li Z.-L., 2011: MODIS Land Surface Temperature and Emissivity. [w:] Ramachandran, B., i in. (red.), Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Springer Science+Business Media LLC, New York, ss. 563–571.

Westermann S., Langer M., Boike J., 2012: Systematic bias of average winter-time land surface temperatures inferred from MODIS at a site on Svalbard, Norway. Remote Sensing of Environment, 118: 162–167.

Xiong X., Wolfe R., Barnes W., Guenther B., Vermote E., Saleous N., Salomonson V., 2011: Terra and Aqua MODIS Design, Radiometry, and Geometry in Support of Land Remote Sensing. [w:] Ramachandran, B., i in. (red.), Land Remote Sensing and Global Environmental Change, Springer Science+Business Media LLC, New York. 133–164.

SATELLITE MONITORING OF THE ENVIRONMENT ON A REGIONAL SCALE: WESTERN POMERANIA IN THE YEARS 2000–2015

Summary

Satellite remote sensing for many years has been the most important source of knowledge about the state and trends of environmental changes on Earth. However, the use of recording made from satellites to monitor the environment on a local or regional scale was limited. The situation has changed significantly by entering into service in 2000 and 2002 of two satellites Terra and Aqua equipped with MODIS spectroradiometer. It allows to record the characteristics of the surface of the planet twice a day in 36 spectral channels with a resolution of 0.25–1 km.

The aim was the assessment of trends in the environment of Western Pomerania in the years 2000–2015 on the basis of data from the MODIS sensor. This area is highly diverse both in natural and economic conditions, including large urban areas, areas intensively used for agriculture, forest plantations as well as valuable, legally protected natural objects: national parks, lakes, protected landscape areas, etc. In this work we used land surface temperature (LST), and the state of vegetation indexes NDVI (Normalized Difference Vegetation) and EVI (Enhanced Vegetation Index). We analyzed trends in both long-term average values, as well as the characteristics of seasonal cycle. The study was based on the 8 days average values of LST for the day and the night, and the 16 days average value of NDVI and EVI from March 2000 to February 2016. The analysis covered an area of approximately 35.500 km^2. The novelty was the use of so-called contextual Mann-Kendall test. It is based on the assumption that the trends between adjacent pixels should exhibit autocorrelation and reduces false detection of trends and increase the confidence of the results when trends are spatially coherent. Analysis of seasonal trends consist of two stages. In the first the annual and shorter components of the seasonal cycle was fitted using harmonic regression. In the second stage by means of non-parametric technique of median slope were determined parameters trends of cycles (amplitude and phase). This methodology effectively eliminates high frequency noise that occurs in the scale of a single year and it is resistant to short-term variability between years. Also in this procedure the contextual Mann-Kendall test was used.

The calculations showed the presence in the analyzed period and analyzed area of significant trends in both LST, and NDVI / EVI indicators of biomass. That concern both the averages and seasonal cycle parameters. Spatial distribution of trends shows variability in two spatial scales: local and regional.

Multi-annual LST trends were recorded surprisingly only for the night measurements. They are only increase. They include over 56% of the study area and their spatial distribution is not random. On a regional scale they primarily include higher-lying moraine areas. Much less frequently they are listed in the Noteć and Odra valleys and the lowlands along the shore of the Baltic Sea.

It has been found both increments (approx. 28% of the area) and decreases (approx. 10%) of the average values of plant biomass (NDVI and EVI). About 70% of the high increases of the two indicators is shared, indicating both an increase in the amount of chlorophyll (NDVI), leaf area, and changes in the type and physiognomy of plant community (EVI). The spatial distribution trends of biomass indicators also showed regional variation, but it is more complicated than in the case of LST. Analysis of the seasonal cycles characteristics showed that on the areas of statistically significant changes, they relates to both the decrease in the annual amplitude and phase shift – a faster onset of the growing season in the spring.

Identification of the relationship between the characteristics of the surface, LST changes and indicators of biomass enables the identification of areas that should be subjected to a more elaborate test – hotspots of environmental imbalance.