

MACIEJ BARTOLD, ZBIGNIEW BOCHENEK

Wpływ warunków meteorologicznych na początek okresu wegetacyjnego lasów liściastych północno-wschodniej Polski

Impact of meteorological conditions on the onset of the growing season over broadleaved forests in northeastern Poland

ABSTRACT

Bartold M., Bochenek Z. 2019. Wpływ warunków meteorologicznych na początek okresu wegetacyjnego lasów liściastych północno-wschodniej Polski. Sylwan 163 (12): 997-1005. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2019044>.

The paper aims at assessing the impact of meteorological conditions on the start of the growing season (SOS) over forests in north-eastern Poland. The main objective was to study which, and if so to what extent, the meteorological parameters can describe the changes of the onset of vegetation in broadleaved forests. Study area encompasses forest complexes located in north-eastern Poland, which are under the influence of maritime and continental climate characterized by a shorter vegetation period and large temperature fluctuations. In this study forest mask containing only pixels with $\geq 50\%$ cover of broadleaved forests defined by CLC2012 was applied. The time-series of satellite images derived from VEGETATION mission were applied for determining the start of the growing season. 10-day composites of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 1999 to 2016, derived at 1 km pixel resolution were filtered with double logistic function in order to determine the SOS. The meteorological parameters such as maximum air temperature, total precipitation and surface solar radiation derived from field measurements one month before the start of the growing season were taken into account. The Pearson correlation results proved that only maximum air temperature was related to the onset of the growing season. The strength of the relations depended on the dominant trees recognized within the forest area. There were no statistically significant relations with the precipitation and solar surface radiation which could be explained by frequent clouds during the month before the SOS and not observed unfavorable conditions that could have impacted on the changes of the growing season in forests.

KEY WORDS

forest monitoring, NDVI, SPOT VEGETATION, Proba-V, growing season

ADDRESSES

Maciej Bartold ⁽¹⁾ – e-mail: maciej.bartold@igik.edu.pl
Zbigniew Bochenek ⁽²⁾ – e-mail: zbigniew.bochenek@igik.edu.pl

⁽¹⁾ Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji, Uniwersytet Warszawski;
ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, 00-927 Warszawa

⁽²⁾ Centrum Teledetekcji, Instytut Geodezji i Kartografii; ul. Kaczmarskiego 27, 02-679 Warszawa

Wstęp

Terminy początku i końca okresu wegetacyjnego wyznacza się w Polsce na podstawie pomiarów temperatury i obserwacji fenologicznych. W opracowaniach klimatologicznych na potrzeby rolnictwa i leśnictwa operuje się pojęciem meteorologicznego okresu wegetacyjnego (MOW). Do jego wyznaczania stosuje się metody proponowane przez Gumińskiego [1948] oraz Huculaka i Makowca [1977]. Pierwsza metoda pozwala określić MOW jako tę część roku, która charakteryzuje się średnią dobową temperaturą powietrza wyższą lub równą 5,0°C. Nowsza metoda uwzględnia ponadto skumulowane szeregi odchyleń średniej temperatury dobowej od wartości progowej 5,0°C. Natomiast obserwacje fenologiczne są prowadzone w stałych punktach obserwacyjnych, np. w ogrodzie dendrologicznym na terenie Akademii Rolniczej w Poznaniu [Kluza, Zientarska 1999], w Obserwatorium Agrometeorologicznym w Felinie [Kołodziej, Węgrzyn 2004; Siłuch, Bartoszek 2012; Siłuch i in. 2016], w Arboretum w Rogowie [Bednarek 1962; Chojnacka-Ożga 1999], w Trzebowiu na obszarze Wielkopolskiego Parku Narodowego [Mager, Kępińska-Kasprzak 2016], a także na stacji fitoklimatycznej na Kopciowej [Feliksik i in. 2001; Durło i in. 2004]. Badania te opierają się na obserwacjach własnych lub prowadzonych za pomocą specjalnej aparatury fotograficznej i następnie na powiązaniu zanotowanych zmian fenologicznych z pomiarami temperatury powietrza, promieniowania słonecznego i opadów atmosferycznych. Wyniki tych badań są ściśle związane z warunkami panującymi w konkretnym miejscu i dla wybranych gatunków roślin, natomiast brak jest informacji o okresie wegetacyjnym w szerszym ujęciu przestrzennym i uwzględniającej zróżnicowanie drzew liściastych.

Wsparcie w monitorowaniu przestrzennych zmian przebiegu faz fenologicznych roślin mogą być systemy satelitarne. Wskaźniki roślinne wyprowadzane z wieloletnich zobrażeń satelitarnych i obliczane za pomocą matematycznych relacji wartości odbicia w poszczególnych kanałach są wykorzystywane do śledzenia czasowo-przestrzennej zmienności dynamiki wzrostu i rozwoju roślin, jak również w celu modelowania początku i końca okresu wegetacyjnego [Zhang i in. 2003; Beck i in. 2006; White i in. 2009; Tan i in. 2011]. Terminy początku OW są powiązane z terminami rozpoczęcia fazy ulistnienia, w której rośliny wytwarzają aparat asymilacyjny umożliwiający uruchomienie aktywności fotosyntetycznej. Przekłada się to następnie na wzrost wartości wskaźnika roślinności. Z kolei daty końca OW pokrywają się z terminami zakończenia fazy opadania liści – odnotowywany jest wtedy wyraźny spadek wartości wskaźnika roślinności. Wyniki wyznaczania terminów trwania okresu wegetacyjnego lasów metodami teledetekcyjnymi są najczęściej korelowane z obserwacjami meteorologicznymi [O'Connor i in. 2012; Prabakaran i in. 2013; Yu i in. 2014] lub ze zdalnymi rejestracjami kamer fenologicznych z amerykańskiej sieci PhenoCam [Klosterman i in. 2014; Hufkens i in. 2018]. W Polsce badano możliwości zastosowania danych z satelity Terra MODIS do wyznaczania okresu wegetacyjnego i powiązania otrzymanych terminów trwania tego okresu z pomiarami meteorologicznymi i obserwacjami fenologicznymi [Siłuch, Bartoszek 2012; Siłuch i in. 2016]. Autorzy zaznaczają, że z uwagi na stosunkowo niewielki obszar badań (w promieniu 10 km od miejsca położenia trzech posterunków meteorologicznych i w Ogrodzie Botanicznym w Lublinie) oraz krótką serię danych (lata 2001-2009 lub 2008-2014) wyniki mają charakter poglądowy.

W niniejszej pracy poruszono temat możliwości wyznaczania terminów początku okresu wegetacyjnego lasów w Polsce na podstawie ciągłych wieloletnich obserwacji satelitarnych w ramach misji VEGETATION. Celem pracy jest sprawdzenie, czy daty początku okresu wegetacyjnego oraz zmiany tych terminów mogą być powiązane z takimi parametrami meteorologicznymi jak maksymalna temperatura powietrza, opady atmosferyczne oraz promieniowanie słoneczne.

Obszar badań

Badania przeprowadzono dla wybranych kompleksów leśnych usytuowanych w obszarach chronionych w północno-wschodniej Polsce: w Mazurskim Parku Krajobrazowym, Puszczy Knyszyńskiej, w Dolinie Biebrzy, na Wzgórzach Sokólskich, w Lesie Warmińskim, Puszczy Augustowskiej, Puszczy Białowieskiej, w Rezerwacie Krajobrazowym im. Szafera oraz w strefie Lasów Naturalnych Puszczy Białowieskiej. Badane kompleksy leśne są objęte ochroną, a działalność gospodarcza na ich terenie jest ograniczona, dlatego w badaniach nie uwzględniono lokalnej działalności leśnej. Obiektem badań były drzewostany z przewagą drzew liściastych, z uwagi na ich wyraźną sezonowość zaznaczającą się na zdjęciach satelitarnych. Badane lasy północno-wschodniej Polski znajdują się pod wpływem klimatu atlantyckiego i kontynentalnego oraz charakteryzują się krótszym okresem wegetacyjnym i dużymi wahaniami temperatury [Zielony, Kliczkowska 2012; Bochenek i in. 2015].

Materiał i metody

Materiałem badawczym były szeregi czasowe znormalizowanego wskaźnika roślinności NDVI, wyprowadzonego z danych satelitarnych SPOT VEGETATION i Proba-V. Wskaźnik NDVI jest powszechnie wykorzystywany do analizy żywotności roślin oraz stanu ich rozwoju [Rouse i in. 1973]. Jest obliczany według wzoru:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

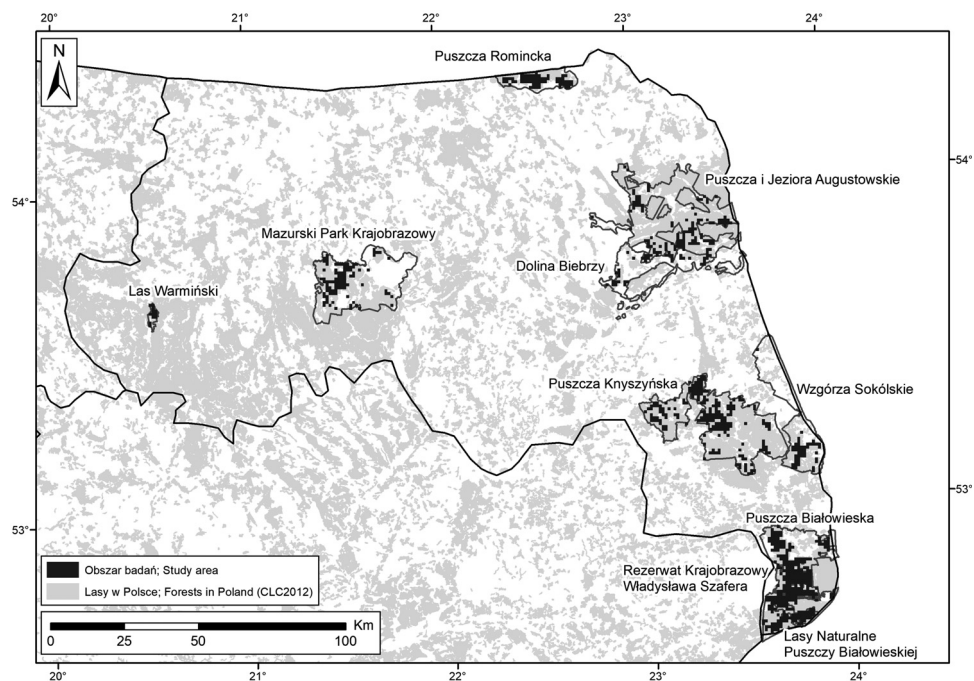
gdzie:

NIR – współczynnik odbicia zarejestrowany w paśmie podczerwonym,

RED – współczynnik odbicia w paśmie czerwonym.

Teoretycznie NDVI przyjmuje wartości z zakresu od $-1,0$ do $1,0$, przy czym wartości bliższe jedności wskazują na lepszą kondycję roślin. Do badań wykorzystano 576 10-dniowych kompozycji wskaźnika NDVI, które były składane z dziennych obserwacji satelitarnych metodą MVC (ang. Maximum-Value Composite), uwzględniającą maksymalną wartość wskaźnika zaobserwowaną w danej dekadzie. Taka metoda składania obrazów, zaproponowana przez Holbena [1986], jest kompromisem między pozyskaniem jak największej liczby danych niezachmurzonych nad obszarem Polski a śledzeniem zmienności czasowej kondycji roślin [Bochenek 1999]. Kompozycje dekadowe o rozdzielczości przestrzennej 1×1 km zostały pobrane bezpłatnie przez portal Flamandzkiego Instytutu ds. Badań Technologicznych VITO, będącego dystrybutorem danych z misji VEGETATION.

W niniejszej pracy zastosowano maskę obszarów leśnych, uprzednio opracowaną i weryfikowaną pod względem przebiegu wskaźnika roślinności lasów liściastych w Polsce [Bartold 2016]. Zasięg lasów liściastych wyznaczono z bazy danych o pokryciu terenu Corine Land Cover 2012, uwzględniając pokrycie lasów liściastych w klasie 311 minimum 75% oraz pokrycie lasów liściastych w klasie 313 maksimum 25%. Następnie w procesie selekcji wprowadzono kryterium progu 50% powierzchni zajmowanej przez tereny leśne w obrębie piksela 1×1 km, w celu minimalizacji błędów prawidłowego rozpoznania obszarów leśnych na korzyść graniczących z nimi terenów rolniczych i zabudowy. Kwestie wielkości błędu i uznania obszarów z pokryciem 50% powierzchni piksela były poruszane w pracy dotyczącej użycia maski rolniczej dla potrzeb systemu prognozowania plonów w Polsce [Turlej i in. 2013]. Próg 50% jest powszechnie stosowany w programach środowiskowych i produktach do klasyfikowania form pokrycia terenu, takich jak Corine Land Cover czy GlobCover 2009. Rycina 1 przedstawia obszar badań obejmujący maskowane piksele leśne na tle lasów rozpoznanych w programie Corine.



Ryc. 1.

Analizowane piksele 1×1 km z udziałem $\geq 50\%$ badanych lasów na tle granic obszarów chronionych w północno-wschodniej Polsce

Analysed 1×1 km pixels with with $\geq 50\%$ fraction of broadleaved forests classes against borders of nature protection areas in north-eastern Poland

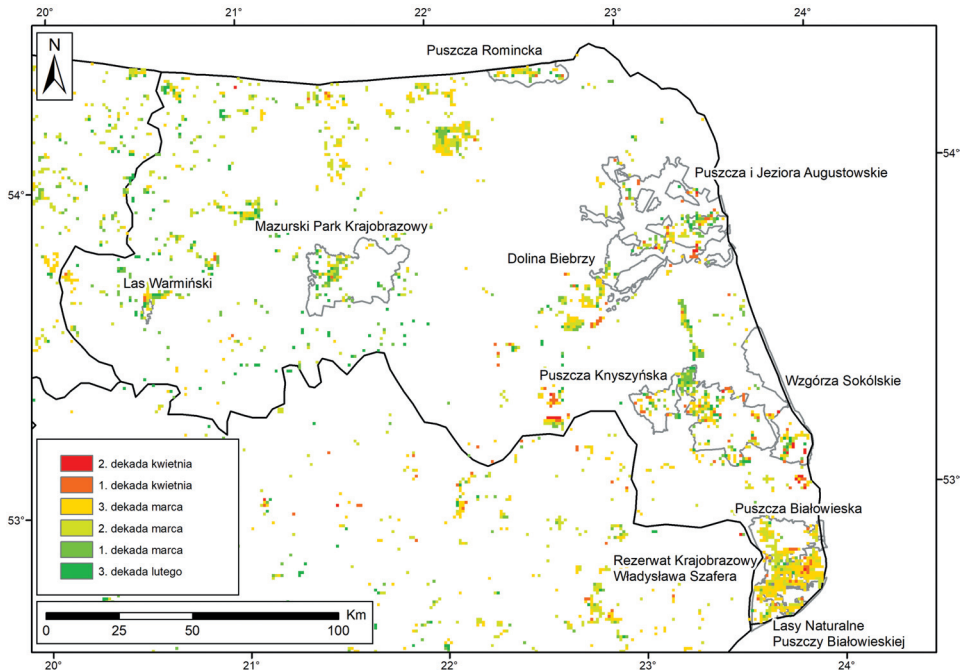
Na podstawie szeregów czasowych NDVI obliczono parametry charakteryzujące okres wegetacji. W tym celu zastosowano oprogramowanie TIMESAT 3.2 z narzędziami do przetwarzania danych satelitarnych i wyznaczania na ich bazie parametrów określających terminy wzrostu i rozwoju roślin, w tym początku okresu wegetacyjnego [Jönsson, Eklundh 2004]. W obliczeniach przyjęto wygładzanie metodą podwójnej funkcji logistycznej oraz ważenie pomiarów wskaźnika roślinności dla obszarów zasłoniętych chmurami, z pokrywą śniegową i obszarami pokrytymi wodą. Wygładzone dane teledetekcyjne posłużyły do obliczenia amplitudy NDVI w każdym roku kalendarzowym. Na podstawie amplitudy wskaźnika roślinności ustalane są kryteria progowe definiujące poziom wartości NDVI, na które przypadają daty początku okresu wegetacyjnego. W niniejszej pracy przyjęto kryterium progu 0,35 amplitudy NDVI, wzorując się na pracach nad wykorzystaniem danych SPOT VEGETATION dla okresowo zielonych lasów liściastych [Han i in. 2013; Prabakaran i in. 2013]. Termin początku okresu wegetacyjnego lasów w Polsce określano w dekadach miesiąca.

Do badania relacji między początkiem sezonu wegetacyjnego a warunkami pogodowymi wykorzystano obserwacje meteorologiczne z bazy serwisu Tutiempo. Informacje o maksymalnej temperaturze dobowej i dobowych sumach opadu atmosferycznego otrzymano ze stacji synoptycznych rozmieszczonych na terenie Polski i w jej sąsiedztwie. W siatce 1×1 km zostały wyinterpolowane obrazy rozkładu dobowej maksymalnej temperatury powietrza i dobowych sum opadów atmosferycznych. Do opracowania obrazów rozkładu temperatury wykorzystano metodę, w której redukuje się temperaturę rzeczywistą do poziomu morza zgodnie z gradientem wilgotnoadiaba-

tycznym $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Następnie wykonano interpolację uzyskanej temperatury przy użyciu kriginu i wprowadzono ostateczną wartość temperatury na poziom rzeczywisty, uwzględniając ponownie gradient wilgotnoadiabaticzny. Z kolei do interpolacji sum opadów atmosferycznych użyto metody wieloboków Thiessena. Metodę przetwarzania danych klimatycznych Tutitempo wzorowano na pracy Musiała [2009], gdzie stosowano ją do badań środowiska przyrodniczego na obszarach prawnie chronionych w Polsce. Informacje o miesięcznych sumach całkowitego promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię odczytano ze zbioru CM SAF SARA-H-2, udostępnianego przez Europejską Organizację Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych (EUMETSAT). Są to dane modelowane na podstawie rejestracji przez sensor SEVIRI umieszczony na pokładach satelitów meteorologicznych Meteosat. Dane dla okresu 1999-2015 były udostępnione w rozdzielczości przestrzennej 5 km, na potrzeby niniejszych badań próbkowano je do rozmiaru piksela 1 km. Aby ocenić istnienie wpływu warunków meteorologicznych na zmieniające się w czasie daty rozpoczęcia sezonu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce, przeprowadzono analizę korelacji uśrednionych wartości maksymalnej temperatury powietrza, sumy opadów atmosferycznych i sumy całkowitego promieniowania słonecznego na 30 dni przed terminem początku okresu wegetacyjnego lasów i w terminie początku tego okresu. Obliczono współczynniki korelacji liniowej r Pearsona, przyjmując poziom istotności $\alpha=0,05$.

Wyniki

Piksele maski lasów liściastych rozpoznane w obrębie wybranych kompleksów leśnych w północno-wschodniej Polsce obejmują kilka rodzajów drzew, w tym dąb, buk, olszę i brzozę (tab. 1). Najwięcej pikseli maski obszarów lasów liściastych otrzymano dla kompleksów leśnych Puszczy



Ryc. 2.

Początek okresu wegetacyjnego lasów w północno-wschodniej Polsce w 2014 roku
Onset of vegetation period in north-eastern Poland in 2014

Tabela 1.

Forma ochrony przyrody (Forma), dominujący rodzaj drzewa według Leśnej Mapy Numerycznej (Rodzaj drzewa), liczba pikseli leśnych z udziałem $\geq 50\%$ klas lasów liściastych (N) oraz udział (U [%]) maskowanych lasów liściastych w odniesieniu do powierzchni badanych obszarów chronionych

Form of nature protection (Forma), dominant broadleaved species according to Forest Numeric Map (Rodzaj drzewa), number of pixels with $\geq 50\%$ fraction of broadleaved forests classes (N) and fraction (U [%]) of masked broadleaved forests in total area of investigated protected areas

	Forma	Rodzaj drzewa	N	U
Dolina Biebrzy	OChK	Js	29	10,4
Las Warmiński	Rez.	Db	12	65,5
Lasy Naturalne Puszczy Białowieskiej	Rez.	Ol	68	79,9
Mazurski Park Krajobrazowy	PK	Brz	95	16,9
Puszcza Białowieska	OChK	Ol	213	33,5
Puszcza i Jeziora Augustowskie	OChK	Ol	123	17,7
Puszcza Knyszyńska	PK	Brz	198	27,0
Puszcza Romincka	PK	Db	63	42,8
Rez. Krajobrazowy Władysława Szafera	Rez.	Brz	7	51,5
Wzgórze Sokólskie	OChK	Brz	45	11,9

Rez. – rezerwat przyrody, PK – park krajobrazowy, OChK – obszar chronionego krajobrazu

Rez. – nature reserve, PK – landscape park, OChK – area of protected landscape; Js – ash, Db – oak, Ol – alder, Brz – birch

Białowieskiej i Knyszyńskiej, aczkolwiek ich udział w skali powierzchni obszaru prawnie chronionego jest niewielki – odpowiednio 33,5 i 27%. Z kolei największy udział pikseli maski obszarów lasów liściastych w powierzchni kompleksów leśnych odnotowano dla rezerwatu przyrody Lasy Naturalne Puszczy Białowieskiej oraz Lasu Warmińskiego – ich udział wynosił odpowiednio 79,9 i 65,5%. Spośród drzew dominujących w badanych lasach występują te, które rozwijają liście względnie wcześniej (brzozy), jak również stosunkowo późno (buk, dęby).

W badanych kompleksach leśnych odnotowano znaczne różnice terminów początku okresu wegetacyjnego – do 50 dni. Rozpoczął się on najwcześniej w trzeciej dekadzie lutego, a kończył najpóźniej w drugiej dekadzie kwietnia. W Puszczy Knyszyńskiej, zdominowanej przez brzozę, start odnotowywano najczęściej w pierwszych dwóch dekadach marca. Natomiast w sąsiedniej Puszczy Białowieskiej, z dominacją olszy, początek okresu zaobserwowano 10 dni później, w trzeciej dekadzie marca. Tak duże zróżnicowanie terminów początku OW w sąsiednich pikselach może być wyjaśnione złożonością metodyki MVC do tworzenia 10-dniowych kompozycji wskaźnika roślinności NDVI. W skrajnych przypadkach rozrzut wyników terminu startu OW odczytanych z sąsiednich pikseli może wynosić 1 dzień lub 20 dni, przy odczytaniu wartości NDVI z 1 marca (lub 10 marca) w pierwszej dekadzie miesiąca i z 11 marca (lub 20 marca) w drugiej dekadzie tego miesiąca. Należy również zwrócić uwagę, że duże zróżnicowanie terminów początku OW może być też rezultatem zmieszania się kilku rodzajów drzew w obrębie jednego piksela kilometrowego, implikującego otrzymanie uśrednionych odpowiedzi spektralnych, a nie tylko pochodzących z rejestracji odbicia z wyraźnie dominującego jednego rodzaju drzewa.

Odnotowano ujemną korelację ze średnią maksymalnej dobowej temperatury powietrza, zaobserwowaną w ciągu 30 dni przed wyznaczonym metodą teledetekcyjną terminem początku okresu wegetacyjnego – im cieplej było w dniach poprzedzających, tym bardziej przyspieszony był początek okresu wegetacyjnego lasów (tab. 2). Otrzymano umiarkowane korelacje: na poziomie od $-0,49$ (Las Warmiński) do $-0,71$ (Dolina Biebrzy). Natomiast badając relacje z sumami opadów atmosferycznych, otrzymano korelacje dodatnie, poza jednym wyjątkiem ($-0,19$ Dolina Biebrzy). Niemniej siła odnotowanych korelacji jest niska, nieprzekraczająca 0,4, a większości przypadków osiąga poziom od 0,2 do 0,3. Nie stwierdzono istotnego wpływu nasłonecznienia na

Tabela 2.

Współczynnik korelacji między terminem początku okresu wegetacyjnego (OW) a maksymalną temperaturą powietrza (Tmax), sumą opadów atmosferycznych (P) i sumą promieniowania słonecznego (R) w ciągu 30 dni przed wyznaczonym terminem startu OW w latach 1999-2016

Pearson correlation coefficients between onset of vegetation period (OW) and maximum air temperature (Tmax), precipitation (P) and radiation (R) during 30 days prior to determined start of growing season in years 1999-2016

	OW-Tmax	OW-P	OW-R
Dolina Biebrzy	-0,71	-0,19	-0,12
Las Warmiński	-0,49	0,33	-0,27
Lasy Naturalne Puszczy Białowieskiej	-0,64	0,21	-0,12
Mazurski Park Krajobrazowy	-0,63	0,30	-0,11
Puszcza Białowieska	-0,61	0,23	-0,08
Puszcza i Jeziora Augustowskie	-0,68	0,12	0,03
Puszcza Knyszyńska	-0,68	0,08	-0,18
Puszcza Romincka	-0,50	0,37	0,11
Rez. Krajobrazowy Władysława Szafera	-0,67	0,31	-0,21
Wzgórza Sokólskie	-0,55	0,27	-0,08

wyznaczone terminy początku okresu wegetacyjnego. W większości korelacje są ujemne, a ich siła nie przekracza $-0,27$. Dla Puszczy Augustowskiej oraz Rominckiej otrzymano dodatnie korelacje, niemniej siła relacji również jest niska.

Dyskusja

Wyniki niniejszych prac potwierdzają wcześniejsze badania w Puszczy Białowieskiej, Knyszyńskiej i Augustowskiej nad analizą wpływu wybranych charakterystyk klimatycznych na przebieg wskaźnika NDVI uzyskanego z danych satelitarnych NOAA AVHRR z lat 2006, 2013 i 2014 [Bochenek i in. 2015]. Ówczesne badania wykazały relacje zmian wskaźnika roślinności NDVI ze zmianami temperatury maksymalnej w marcu na poziomie 0,63 (Puszcza Białowieska), 0,66 (Puszcza Knyszyńska) i 0,68 (Puszcza Augustowska). Analiza potwierdziła, że niesprzyjające warunki meteorologiczne z ujemną temperaturą powietrza w marcu w latach 2006 i 2013 wpłynęły na opóźnienie rozwoju roślinności, co skutkowało spowolnieniem wzrostu wskaźnika roślinności NDVI. Z kolei korzystne warunki meteorologiczne w marcu 2014 pozytywnie wpłynęły na wegetację lasów i nie spowodowały zaburzeń w przebiegu wskaźnika NDVI. W niniejszej pracy nad wyznaczaniem terminów początku okresu wegetacji otrzymano siłę relacji dla tych trzech obszarów podobną do uzyskanej we wcześniejszych badaniach, odpowiednio $-0,61$, $-0,68$ i $-0,68$ – z zaznaczeniem, że zmienił się kierunek zmian. Wynika to z faktu, że pracowano nad terminem początku OW wyznaczonym na podstawie przebiegu NDVI, a nie bezpośrednio nad wartościami wskaźnika NDVI, stąd kierunek relacji jest odwrotny. Bardzo słabe lub słabe współzależności terminu początku okresu wegetacyjnego i opadów (tab. 2) potwierdziły wyniki badań Prabakarana i in. [2013] oraz Siłucha i in. [2016]. W warunkach Polski wykazano silne związki początku sezonu pyłkowego leszczyny z maksymalną temperaturą zaobserwowaną w lutym ($r=-0,71$) i marcu ($r=-0,66$) [Siłuch i in. 2016]. Bardzo słabe zależności z opadami mogą wynikać z charakterystyki strefy klimatycznej, w której to temperatura powietrza, a nie opady w istotny sposób determinują warunki rozwoju roślin. Zróżnicowanie dominujących w badanych lasach rodzajów drzew liściastych nie wpłynęło na otrzymane wyniki. Uzyskane w niniejszej pracy umiarkowane zależności korelacji terminów początku okresu wegetacyjnego z warunkami meteorologicznymi dla Puszczy Rominckiej ($r=-0,50$) i Wzgórz Sokólskich ($r=-0,55$) sugerują istotny wpływ

innych czynników, np. geograficznych uwarunkowań lokalnych i występowania innych drzew w powierzchniach pikseli kilometrowych. Jest to szczególnie widoczne na Wzgórzach Sokólskich, z występującymi licznymi lasami sosnowymi ze znaczną domieszką dębu, klonu, jesionu czy lipy, a na rozlewiskach rzek wierzby, brzozy i olszy. Natomiast w Puszczy Rominckiej przeważają drzewostany sosnowo-świerkowe z domieszką dębu, lipy, brzozy i grabu, a w zagłębieniach terenu występują olsze. Silniejszą korelację ($r > -0,60$) otrzymano dla obszarów leśnych z wyraźną dominacją jednego gatunku, np. Puszczy Knyszyńskiej czy Augustowskiej.

Podsumowanie

Terminy początku okresu wegetacyjnego wyznaczonego metodą teledetekcyjną były dla lasów północno-wschodniej Polski istotnie statystycznie skorelowane ze średnią maksymalną temperaturą powietrza zaobserwowanymi w ciągu 30 dni przed wyznaczonymi terminami startu OW. Nie stwierdzono istotnych statystycznie związków z sumami opadów atmosferycznych i całkowitego promieniowania słonecznego. W okresie poprzedzającym terminy początku okresu wegetacyjnego nie odnotowano na tyle niesprzyjających warunków opadowych, aby mogły mieć one wpływ na przyspieszenie lub opóźnienie terminów trwania OW. Natomiast brak związku z sumami promieniowania słonecznego może być uzasadniony częstym występowaniem zachmurzenia, które determinuje aktywność fotosyntetyczną roślin. Wyniki pracy wskazują na potencjał zobrazowań satelitarnych do wyznaczania okresu wegetacyjnego w programie TIMESAT. Możliwość automatyzacji procesów przetwarzania zobrazowań satelitarnych, wygładzania danych, wawogowania pomiarów wskaźnika wegetacji i ustawienia progów amplitudy NDVI stwarza warunki operacyjnego działania systemu monitorowania okresu wegetacyjnego lasów liściastych. Możliwości działania programu TIMESAT i wyznaczania za jego pomocą okresu wegetacyjnego są znane na świecie od co najmniej 15 lat. Niemniej w prowadzonych w Polsce badaniach program ten nie był dotychczas poddany ocenie przydatności i nie analizowano wiarygodności wyników uzyskanych przy jego użyciu. Na podstawie satelitarnych kompozycji dekadowych wskaźnika roślinności NDVI nie otrzymuje się dokładnych danych o terminie trwania okresu wegetacyjnego, ale za to obejmują one większy obszar. Niniejsza praca stanowi nowe spojrzenie na wykorzystanie danych satelitarnych do określania okresu wegetacyjnego lasów liściastych w Polsce.

Literatura

- Bartold M. 2016. Opracowanie maski obszarów leśnych w celu monitoringu kondycji zdrowotnej lasów w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych. *Leś. Pr. Bad.* 77 (2): 141-150. DOI: <https://doi.org/10.1515/frp-2016-0016>.
- Beck P. S. A., Atzberger C., Högda K. A., Johansen B., Skidmore A. K. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment* 100: 321-334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.021>.
- Bednarek A. 1962. Układ i przebieg pór fenologicznych w lasach doświadczalnych w Rogowie. *Sylvan* 106 (2): 43-59.
- Bochenek Z. 1999. Operacyjne wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR do oceny warunków rozwoju upraw w Polsce. *Fotointerpretacja w Geografii* 29: 3-13.
- Bochenek Z., Ziółkowski D., Bartold M. 2015. Application of NOAA AVHRR satellite images for studying various environmental and climatic conditions in Polish forests. *Geoinformation Issues* 7 (1): 29-37.
- Chojnacka-Ozga L. 1999. Długość termicznego okresu wegetacyjnego w lasach doświadczalnych SGGW w Rogowie w latach 1926-1998. W: Feliksik E. [red.]. *Klimatyczne uwarunkowania życia lasu*. Wydawnictwo PTL. 127-133.
- Durło G., Feliksik E., Wilczyński S. 2004. Wieloletnia zmienność czasu trwania meteorologicznego okresu wegetacyjnego na Kopciowej w Beskidzie Sądeckim. *Acta Agraria et Silvestria. Series Silvestris* 42: 23-34.
- Feliksik E., Wilczyński S., Durło G. 2001. Variability of air temperatures of the temperate climatic belt of the Beskid Sądecki mountains in the period 1971-2000 as exemplified by the climatological station in Kopciowa. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Forestry* 4 (2).
- Gumiński R. 1948. Próba wydzielenia dzielnic rolniczo-klimatycznych w Polsce. *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny* 1 (1): 7-20.

- Han Q., Luo G., Li C. 2013. Remote sensing-based quantification of spatial variation in canopy phenology of four dominant tree species in Europe. *Journal of Applied Remote Sensing* 7 (1): 073485. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.7.073485>.
- Holben B. N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7 (11): 1417-1434. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>.
- Huculak W., Makowiec M. 1977. Wyznaczanie meteorologicznego okresu wegetacyjnego na podstawie jednorocznych materiałów obserwacyjnych. *Zeszyty Naukowe SGGW-AR. Leśnictwo* 25: 65-73.
- Hufkens K., Basler D., Miliman T., Melaas E. K., Richardson A. D. 2018. An integrated phenology modelling framework in R. *Methods in Ecology and Evolution* 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12970>.
- Jönsson P., Eklundh L. 2004. TIMESAT – a program for analyzing time-series of a satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30 (8): 833-845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>.
- Klosterman S. T., Hufkens K., Gray J. M., Melaas E., Sonnentag O., Lavine I., Mitchell L., Norman R., Friedl M. A., Richardson A. D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. *Biogeosciences* 11: 4305-4320. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-11-4305-2014>.
- Kluza M., Zientarska A. 1999. Obserwacje fenologiczne wybranych gatunków drzew i krzewów z rodziny *Celastraceae* i *Rosaceae* introdukowanych w Ogródzie Dendrologicznym Akademii Rolniczej w Poznaniu. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Seria Botanika* 309: 31-54.
- Kołodziej J., Węgrzyn A. 2004. Zróżnicowanie czasu trwania okresu wegetacyjnego w obserwatorium agrometeorologicznym w Felinie w pięćdziesięciolecie 1951-2000. *Annales UMCS Sec. E* 59 (2): 869-880.
- Mađer P., Kępińska-Kasprzak M. 2016. Pojawy fenologiczne w 2014 roku w Trzebnawiu koło Poznania na tle wcześniejszych obserwacji fitofenologicznych na obszarze środkowej Wielkopolski. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiecius* 15 (2): 93-103. DOI: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2016.15.2.93>.
- 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.
- O'Connor B., Dwyer E., Cawkwell F., Eklundh L. 2012. Spatio-temporal patterns in vegetation start of season across the Island of Ireland using the MERIS Global Vegetation Index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68: 79-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.004>.
- Prabakaran C., Singh C. P., Paniğrahy S., Parihar J. S. 2013. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data. *Current Science* 105 (6): 795-802.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*. 309-317.
- Siłuch M., Bartoszek K. 2012. Możliwości wykorzystania danych satelitarnych do wyznaczania początku i końca okresu wegetacyjnego. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie* 2 (38): 245-255.
- Siłuch M., Dąbrowska A., Bartoszek K. 2016. Początek okresu wegetacyjnego określany na podstawie danych meteorologicznych, teledetekcyjnych i pojavów fenologicznych leszczyny pospolitej. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiecius* 15 (2): 117-125. DOI: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2016.15.2.117>.
- Tan B., Morisette J. T., Wolfe R. E., Gao F., Ederer G. A., Nightingale J., Pedelty J. A. 2011. An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 4 (2): 361-371. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2075916>.
- 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.
- White M. A., De Beurs K. M., Didan K., Inouye D. W., Richardson A. D., Jensen O. P., O'Keefe J., Zhang G., Nemani R. R., Van Leeuwen W. J. D., Brown J. F., De Wit A., Schaepman M., Lin X., Dettinger M., Bailey A. S., Kimball J., Schwartz M. D., Baldocchi D. D., Lee J. T., Lauenroth W. K. 2009. Intercomparison, interpretation and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology* 15: 2335-2359. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>.
- Yu X., Wang Q., Yan H., Wang Y., Wen K., Zhuang D., Wang Q. 2014. Forest Phenology Dynamics and Its Responses to Meteorological Variations in Northeast China. *Advances in Meteorology*. Article ID 592106. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/592106>.
- Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B., Strahler A. H., Hodges J. C. F., Gao F., Reed B. C., Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment* 84: 471-475. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9).
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. CILP, Warszawa.