

LONGINA CHOJNACKA-OŻGA, WOJCIECH OŻGA

Tendencje zmian długości termicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce

Trends in the length of the thermal growing season in the north-eastern Poland

ABSTRACT

Chojnacka-Ożga L., Ożga W. 2018. Tendencje zmian długości termicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce. Sylwan 162 (6): 479-489.

In the context of climate change and global warming, a growing number of studies reported lengthening of the growing season for most of the Northern Hemisphere, which is associated with increase of air temperature. Evidences of the increase of the growing season length were noted through satellite data and phenological and meteorological observations. This article presents the studies on the temporal and spatial tendencies in the thermal growing season (TGS) length in north-eastern Poland in 1951-2015. The analyses were conducted using long-term and homogeneity daily data sets from 13 meteorological stations (fig. 1). The dates of beginning and end of the TGS were determined by Huculak-Makowiec method. Trends in the TGS length as well as start and end dates were analysed for the whole study period as well as for successive 30-years periods: 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 and 1981-2010. The results show a general increase of the length of the TGS in the north-eastern Poland in 1951-2015 period, however, there are spatial and temporal differences in TGS evolution. In the western and central part of the region, the growing season in the past 65 years became ca. 20 days longer, while in the eastern part the lengthening of TGS was weaker and amounted to 7-10 days. Most of this change is due to earlier onset of the TGS in spring (average for the western part =2.1 days/10 years, while for the eastern one – 1.2 days/10 years). The observed trends and tendencies show spatial and temporal variability in TGS evolution. Trends in parameters of TGS, calculated for 30-years period, varied directionally and spatially with no significant trends before 1980. In the period 1981-2010 the growing season was longer than in the previous years, the largest increases were found in the central part of the region (1.2 days/year), while the smallest in the south-eastern part (0.5 day/year). Since the 1980s the frequency of long growing seasons increased. A particularly large and steady increase of TGS occurred over the first 15 years of the 21st century. Length as well as start and end dates of the TGS displayed large inter-annual and decadal variability with tendencies for increased range of variability.

KEY WORDS

change climate, extended of growing season, variability of parameters of growing season

ADDRESSES

Longina Chojnacka-Ożga – e-mail: longina_chojnacka_ozga@sggw.pl
Wojciech Ożga

Katedra Hodowli Lasu, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

Ocieplenie klimatu, widoczne we wzroście średniej rocznej temperatury powietrza, skutkuje zmianą wszystkich elementów systemu klimatycznego zarówno w skali globalnej, jak regionalnej i lokalnej. Związki między parametrami klimatu i okresem wegetacyjnym (jego początkiem, końcem i długością) sprawiają, że zmienność okresu wegetacyjnego jest postrzegana jako ważny wskaźnik zmian klimatycznych [Climate... 2017].

W ostatnich latach pojawiło się wiele prac informujących o wydłużaniu się okresu wegetacyjnego w XX wieku na większości obszarów półkuli północnej jako konsekwencji wzrostu temperatury powietrza [Ahas i in. 2002; Frich i in. 2002; Menzel i in. 2003; Parmesan, Yohe 2003; Linderholm 2006; Linderholm i in. 2008; Marosz i in. 2011; Xu i in. 2013; Cui i in. 2017]. Wskazują one na wydłużenie tego okresu o około 10-20 dni w ciągu ostatnich dziesięcioleci (zależnie od regionu i przyjętej metody badań). Dowodów na to zjawisko dostarczają zarówno obserwacje fenologiczne [Menzel 2000; Chmielewski, Rötzer 2002; Walther i in. 2002; Schwarz i in. 2006; Fu i in. 2014], jak i analizy danych satelitarnych NOAA, AVHRR i NDVI [Barichivich i in. 2011; Høgda i in. 2013; Park i in. 2016]. Analizy zmian parametrów okresu wegetacyjnego na podstawie danych fenologicznych napotykać na utrudnienia związane z ograniczoną dystrybucją przestrzenną danych oraz ich zasięgiem czasowym. Dane satelitarne pozwalają na badania na poziomie regionalnym i globalnym, jednak ich zasięg czasowy obejmuje ostatnie 3-4 dekady. Trudno na ich podstawie określać globalne i regionalne zmiany długoterminowe obejmujące cały XX wiek. Stąd też w badaniach długoterminowych zmian okresu wegetacyjnego w różnych skalach przestrzennych bardzo często wykorzystuje się termiczny okres wegetacyjny (TGS, ang. Thermal Growing Season) wyznaczany na podstawie danych meteorologicznych. Dobre globalne pokrycie przestrzenne stacjami meteorologicznymi i długie ciągi danych pomiarowych (obejmujące XX wiek i lata wcześniejsze) umożliwiają poznanie wieloletnich tendencji zmian TGS (długości i ram czasowych), a także ich możliwych mechanizmów (np. zmiany w obiegu atmosferycznym).

Termiczny okres wegetacyjny można zdefiniować jako cały okres, w którym teoretycznie może mieć miejsce rozwój roślin. Fizjologiczne znaczenie tego okresu różni się od okresu wegetacyjnego, tj. rzeczywistego wzrostu roślin, ale w wyższych szerokościach geograficznych może być on stosowany jako wskaźnik w ocenie warunków klimatycznych determinujących początek i koniec wegetacji roślin wystawionych na działanie warunków pogodowych cały rok, np. drzew i krzewów [Carter 1998]. Termiczny okres wegetacyjny (czasem określanym jako klimatyczny [Linderholm 2006]) jest wyznaczany na podstawie różnych kryteriów, najczęściej na podstawie średnich dobowych wartości temperatury powietrza lub daty ostatniego wiosennego/pierwszego jesiennego przymrozku [Frich i in. 2002; Menzel i in. 2003; Walther, Linderholm 2006; Cui i in. 2017]. Niemniej jednak brak jest uniwersalnej definicji termicznego okresu wegetacyjnego [Linderholm 2006]. W polskiej literaturze jest on definiowany jako okres z ustaloną średnią dobową temperaturą powietrza równą lub większą niż 5°C [Huculak, Makowiec 1977; Chojnacka-Oźga 1999; Niedźwiedź 2003; Węgrzyn 2008; Tomczyk, Szyga-Pluta 2016]. Najczęściej jest on wykorzystywany jako wskaźnik fitoklimatyczny do oceny potencjału produkcyjnego rolnictwa [Żmudzka 2004; Szwejkowski i in. 2008], rzadziej do oceny tendencji klimatycznych [Nieróbcia i in. 2013, Tomczyk, Szyga-Pluta 2016].

W prezentowanym artykule dokonano analizy tendencji zmian długości termicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce w okresie 1951-2015. Jest to kontynuacja wcześniejszej charakterystyki okresu wegetacyjnego na tym obszarze [Chojnacka-Oźga, Oźga 2015]. Szeroko zakrojone badania trendów długości okresu wegetacyjnego w XX wieku na obszarze

wokół Morza Bałtyckiego podjęte przez Linderholma i Walthera [2006, 2008] nie objęły terenów Polski, stąd prezentowana praca może stanowić ich częściowe uzupełnienie. Tendencje i trendy wzrostowe długości TGS w Polsce były stwierdzone w badaniach obejmujących zasięgiem cały kraj bądź wybrany region. W opracowaniach zawierających informację o trendach TGS na obszarze Polski północno-wschodniej przeważają analizy dotyczące ostatnich 30-40 lat, bazujące najczęściej na kilku seriach pomiarowych (od 1 do 6) i stosunkowo mało spójne metodycznie i periodycznie z badaniami prowadzonymi na obszarze wokół Morza Bałtyckiego (tab. 1).

W przedstawionych badaniach postawiono następujące pytania: (i) czy na obszarze północno-wschodniej Polski wystąpiły istotne wzrastające długoterminowe trendy długości termicznego okresu wegetacyjnego; (ii) czy kierunek i tempo zmian długości okresu rozpatrywane w okresach krótszych (30-letnich) były względnie stałe; (iii) czy w ostatnich 30 latach wzrosła częstotliwość długich i anomalnie długich okresów wegetacyjnych i (iv) czy zachodzące zmiany wykazywały istotne zróżnicowanie przestrzenne.

Material i metody

Analiza przestrzenna objęła obszar pomiędzy 52°42' a 54°10' szerokości geograficznej północnej i między 19°11' a 23°52' długości geograficznej wschodniej (ryc. 1). Tendencje zmian termicznego okresu wegetacyjnego analizowano na podstawie danych z 13 stacji meteorologicznych IMGW-PIB, dla których były dostępne średnie dobowe wartości temperatury powietrza z lat 1951-2015. Pozostałe stacje meteorologiczne znajdujące się na terenie objętym badaniem nie spełniały tego kryterium (krótszy zasięg czasowy, braki w danych >12 miesięcy). Dane wykorzystane w pracy zostały pozyskane z bazy IMGW-PIB.

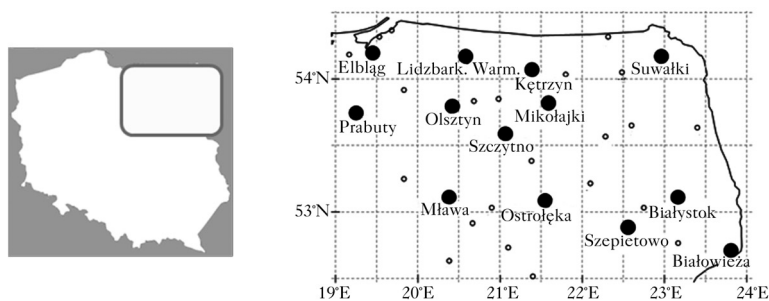
W badaniach tendencji zmian termicznego okresu wegetacyjnego mogą być stosowane różne metody wykorzystujące jako dane wejściowe średnie dobowe lub miesięczne wartości temperatury powietrza. W światowych opracowaniach powszechnie stosuje się metody wykorzystujące dane dobowe [Frich i in. 2002; Walther, Linderholm 2006; Cui i in. 2017], podczas gdy w polskiej literaturze przedmiotu spotyka się prace bazujące zarówno na danych miesięcznych [Żmudzka, Dobrowolska 2001; Krużel i in. 2015; Tomczyk, Szyga-Pluta 2016], jak i dobowych [Węgrzyn 2008; Mager, Kopec 2010; Nieróbca i in. 2013; Chojnacka-Ożga, Ożga 2015].

Tabela 1.

Wybrane opracowania dotyczące termicznego okresu wegetacyjnego w regionie bałtyckim i w Polsce
Selected studies on the thermal vegetation period in the Baltic Region and in Poland

| Dane źródłowe i metoda Source data and method | Literatura Reference | Analiza Analysis |
|---|--|---------------------|
| Średnia dobowa temperatura powietrza; próg termiczny 5°C i kryterium przymrozku Mean daily air temperature; 5°C threshold and frost criterion | Linderholm i in. [2008] | 1 |
| Aproksymacja wieloletniej średniej dobowej temperatury powietrza Approximation of long-term mean daily air temperature | Nieróbca i in. [2013] | 2 |
| Średnia miesięczna temperatura powietrza; metoda Gumińskiego Mean monthly air temperature; Gumiński method | Żmudzka [2004] Krużel i in. [2015] | 1 2 |
| Średnia dobowa temperatura powietrza; metoda Huculaka-Makowca Mean daily air temperature; Huculak-Makowiec method | Tomczyk, Szyga-Pluta [2016] Kozuchowski, Degirmendzić [2005] | 1 1 (1*) |
| | Mager, Kopec [2010] | 1 (2*) |

1 – trendy długoterminowe; 2 – porównanie wartości średnich z różnych okresów; * – liczba stacji z północno-wschodniej Polski
1 – long-term trends; 2 – comparison of mean values from different period; * – number of stations from north-eastern Poland



Ryc. 1.

Lokalizacja stacji meteorologicznych, z których wykorzystano dane
Location of weather stations used in the study

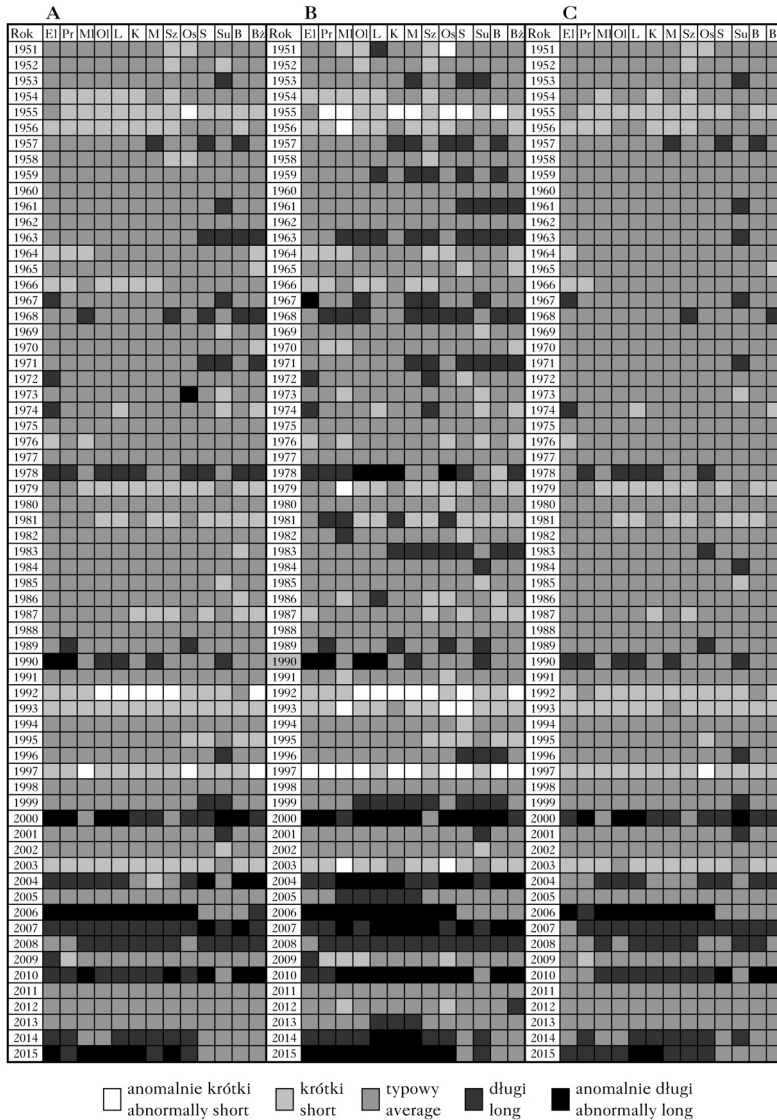
Materiałem źródłowym były średnie dobowe wartości temperatury powietrza pozyskane z możliwie najdłuższych, homogenicznych serii pomiarowych pochodzących ze stacji meteorologicznych znajdujących się na terenie Polski północno-wschodniej (ryc. 1). Homogeniczność serii sprawdzono przy użyciu programu MASH (Multiply Analysis od Series for Homogenization [Szetimrey 1999]). Założono dwa kryteria: zasięg czasowy serii 1951-2015 oraz dopuszczalny próg braku danych do jednego roku. Wszystkie serie pomiarowe, które spełniły te kryteria, zostały wykorzystane w pracy. Do wyznaczania termicznego okresu wegetacyjnego wybrano metodę Huculaka i Makowca [1977], która bazuje na konstrukcji skumulowanych szeregów odchyłeń średniej temperatury dobowej od wartości progowej 5°C. Metoda ta pozwala na wgląd do wartości w każdym roku, eliminuje dowolność interpretacji oraz cechuje się dużą korelacją z obserwacjami fenologicznymi. Dla każdego roku i każdej stacji meteorologicznej wyznaczono podstawowe parametry termicznego okresu wegetacyjnego (daty początku i końca oraz długość), które poddano analizie czasowej i przestrzennej. Parametry porównano w poszczególnych latach wielolecia 1951-2015 oraz w kolejnych okresach 30-letnich (1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010). Empiryczne rozkłady parametrów TGS były zgodne z rozkładem normalnym (test Shapiro-Wilka), co pozwoliło na ich klasyfikację na podstawie wartości odchylenia standardowego (SD). Przyjęto za Węgrzyn [2008] następujące klasy: A: $-2SD$ anomalnie krótki; B: od $-2SD$ do $-1SD$ krótki; C: od $-1SD$ do $1SD$ typowa/normalna długość okresu; D: od $1SD$ do $2SD$ długi; E: >$2SD$ anomalnie długi. Klasyfikacji dokonano na podstawie trzech okresów referencyjnych: jako pierwszy przyjęto cały okres badań 1951-2015, jako dwa następne – okresy stanowiące normy klimatyczne (Standard WMO Climate Normal): 1961-1990 (norma WMO do 2015) oraz 1981-2010 (obecna norma WMO) [Guide... 2011].

Kierunek oraz istotność tendencji zmian parametrów TGS określono modelem regresji liniowej, ocenę modelu dokonano na podstawie wartości odchylenia standardowego, składnika resztowego i współczynnika korelacji liniowej. Istotność trendów oceniono na poziomie $p < 0,05$. Do zbadania struktury przestrzennej zastosowano analizę skupień – metodą Warda. Dla wydzielonych grup obliczono serie czasowe średnich obszarowych parametrów TGS. Serie te porównano z wartościami średnimi dla okresów referencyjnych, obliczając dla każdego roku odchylenia od średnich (\pm) w dniach [Guide... 2011]. Dla średnich obszarowych wyznaczono analogicznie jak wcześniej równania trendu liniowego.

Wyniki

W latach 1951-2015 długość termicznego okresu wegetacyjnego na obszarze północno-wschodniej Polski cechowała się zmiennością krótkookresową (coroczną) oraz długookresową (ryc. 2).

Zakres wahań i częstość występowania poszczególnych klas długości TGS były zależne od przyjętego okresu referencyjnego (ryc. 2). W klasyfikacji bazującej na dawnej normie klimatycznej (1961-1990) zmienność długości i częstość anomalnie krótkich i długich okresów były najwyższe, natomiast na podstawie nowej normy klimatycznej (1981-2010) – najniższe. Niezależnie od przyjętego okresu referencyjnego na całym obszarze objętym badaniem prawie wszystkie stwierdzone dla całego wielolecia 1951-2015 anomalnie długie okresy wegetacyjne wystąpiły



Ryc. 2.

Klasyfikacja długości termicznych okresów wegetacyjnych na obszarze Polski północno-wschodniej na podstawie średniej z wielolecia 1951-2015 (A) oraz norm klimatycznych 1961-1990 (B) i 1981-2010 (C)

Classification of the length of the thermal growing season in north-eastern Poland based on 1951-2015 average (A) and WMO Climate Normals 1961-1990 (B) and 1981-2010 (C)

El – Elbląg, Pr – Prabuty, Mi – Mława, Ol – Olsztyn, L – Lidzbark Warmiński, K – Kętrzyn, M – Mikołajki, Sz – Szczytno, Os – Ostrołęka, S – Szeptetowo, Su – Suwałki, B – Białystok, Bz – Białowieża

w latach 2000-2015. Okres wegetacyjny w 2006 roku, najdłuższy w całej 65-letniej serii, w zachodniej i środkowej części regionu trwający 261 dni, a we wschodniej 237 dni, był dłuższy od średniej wieloletniej odpowiednio o 45 i 37 dni. Łącznie długie i anomalnie długie okresy TGS stanowią w tych latach od 50% przypadków w zachodniej i środkowej części regionu do 30% we wschodniej. Zwraca również uwagę fakt, że począwszy od 2000 roku na większości obszaru wystąpił tylko jeden krótki okres wegetacyjny (2003).

Tendencje zmian długości TGS na obszarze Polski północno-wschodniej rozpatrywane w całym okresie 1951-2015 były dodatnie, przy czym trendy istotne statystycznie ($p < 0,05$) stwierdzono w zachodniej i środkowej części regionu (tab. 2). W poszczególnych okresach badanego wiekolecia kierunek i tempo opisywanych zmian były różne, a różnice między stacjami znaczne (tab. 2, ryc. 5). Największe wydłużenie okresu, widoczne zwłaszcza w ostatnich 25 latach, wystąpiło na obszarze Pojezierza Mazurskiego.

Analiza skupień wskazała dwie grupy (obszary) o podobnym przebiegu długości okresu wegetacyjnego (ryc. 3). Pierwsza grupa (obszar G1) obejmuje 4 położone najbardziej na wschodzie stacje: Suwałki, Białystok, Białowieża, Szepietowo, druga (obszar G2) pozostałe stacje. W grupie drugiej wyodrębniają się dwie podgrupy (ryc. 3).

Obliczone dla każdej grupy średnie obszarowe długości okresu wegetacyjnego porównano z wartościami średnimi: długoterminową 1951-2015 (ryc. 4) oraz wyznaczonymi dla obu norm klimatycznych. Na całym obszarze nastąpiło od początku XXI wieku znaczące wydłużenie tego okresu (ryc. 4), przy czym we wschodniej części (G1) było ono mniejsze niż w części zachodniej i środkowej (G2). Kształt linii przedstawiających odchylenia TGS od wartości średniej był podobny w przypadku każdego okresu referencyjnego. W przebiegu średnich obszarowych długości okresu wegetacyjnego widoczna jest periodyczna zmienność (ryc. 4). Znajduje ona potwierdzenie w wartościach współczynników kierunkowych trendu liniowego wszystkich parametrów TGS obliczonych w kolejnych 30-letnich okresach (tab. 1, ryc. 5). Kierunki zmian długości okresu były podobne na całym obszarze. Większe wydłużenie okresu w części zachodniej i środkowej było związane z występowaniem tu tendencji do coraz późniejszego końca TGS (ryc. 5).

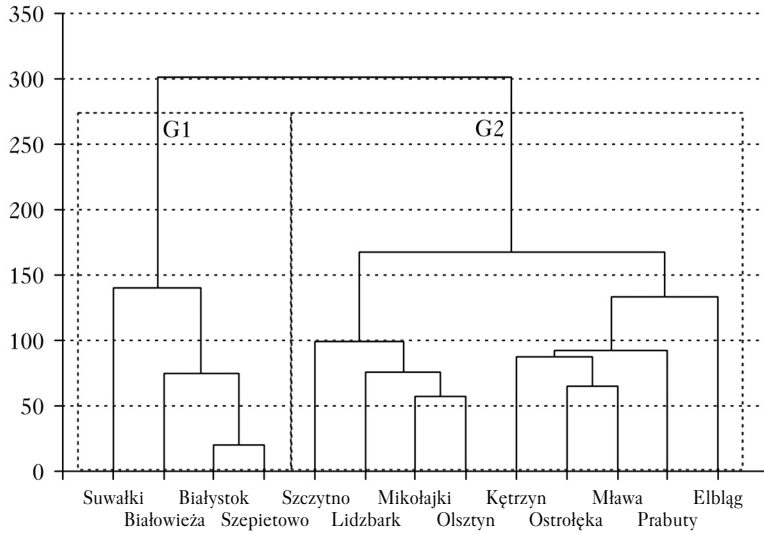
Tabela 2.

Współczynniki kierunkowe trendu długości termicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce w wybranych okresach w latach 1951-2015

Directional coefficients of the linear trends of thermal growing season in north-eastern Poland for selected periods in the years 1951-2015

| | 1951-2015 | 1951-2000 | 1951-1980 | 1961-1990 | 1971-2000 | 1981-2010 | 1981-2015 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Elbląg | 0,2500 | 0,0543 | 0,0447 | 0,3226 | -0,1321 | 0,7924 | 0,7387 |
| Prabuty | 0,2798* | 0,1820 | 0,1993 | 0,3206 | 0,0850 | 0,4966 | 0,5739 |
| Mława | 0,2332* | 0,0487 | 0,1101 | -0,1815 | -0,0340 | 0,6783 | 0,4616 |
| Olsztyn | 0,2855* | 0,1241 | 0,2432 | -0,1079 | 0,2058 | 1,1811* | 0,9574* |
| Lidzbark | 0,3729* | 0,0814 | -0,2214 | 0,1766 | 0,4972 | 1,1010* | 1,0179* |
| Kętrzyn | 0,3389* | 0,0002 | 0,0467 | -0,1057 | -0,0627 | 1,0429* | 0,9944* |
| Mikołajki | 0,2978* | 0,0073 | -0,0857 | -0,1642 | 0,3571 | 1,0863* | 1,0235* |
| Szczytno | 0,2172* | 0,0627 | 0,3535 | -0,3459 | 0,0078 | 0,8861* | 0,8686* |
| Ostrołęka | 0,2134 | 0,0320 | 0,2487 | 0,0841 | -0,3003 | 0,5003 | 0,5280 |
| Szepietowo | 0,1785 | 0,0291 | 0,0574 | -0,1461 | 0,4125 | 0,6987* | 0,5423 |
| Suwałki | 0,1827 | 0,0743 | -0,1971 | -0,3446 | 0,5397 | 0,6747 | 0,6415* |
| Białystok | 0,1103 | -0,0389 | -0,1330 | -0,3762 | 0,1735 | 0,8596* | 0,4854 |
| Białowieża | 0,1322 | 0,0122 | -0,0839 | -0,1511 | -0,0521 | 0,6819 | 0,5034 |

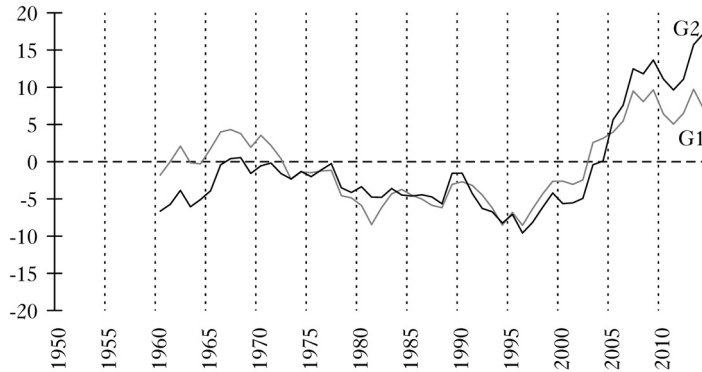
* istotne dla $p < 0,05$; significant for $p < 0,05$



Ryc. 3.

Grupowanie stacji pod względem podobieństwa długości okresu wegetacyjnego (metoda Warda, odległość euklidesowa)

Clustering of stations based on the similarity of length of thermal growing season (Ward agglomeration, Euclidean distance)



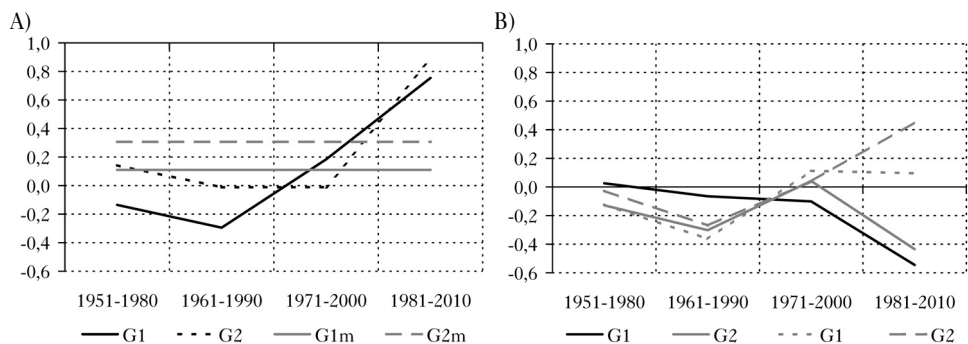
Ryc. 4.

Odchylenie (wygładzane średnią 11-letnią) [dni] średniej obszarowej długości termicznego okresu wegetacyjnego w wyznaczonych regionach północno-wschodniej Polski od średniej dla wielolecia 1951-2015

Deviation (smoothed with a 11-years moving average) [days] of mean regional length of the thermal growing season in the north-eastern Poland from 1951-2015 average

Dyskusja

Uzyskany w niniejszej pracy wzorec regionalny TGS dla Polski północno-wschodniej, obejmujący minione 65 lat (1951-2015), jest jednym z najdłuższych ciągów termicznego okresu wegetacyjnego opracowanych dla Polski. Koresponduje on z wzorcami TGS dla regionu bałtyckiego [Linderholm i in. 2008], Niemiec [Menzel i in. 2003] oraz z polskimi badaniami nad zmianą długości okresu wegetacyjnego. Wyniki niniejszych badań pokazują, że w latach 1951-2015 termiczny okres wegetacyjny w północno-wschodniej Polsce wydłużył się średnio o dwa tygodnie,



Ryc. 5.

Wartości współczynników kierunkowych trendu liniowego długości (A) oraz daty początku i końca (odpowiednio linia ciągła i przerywana na B) termicznego okresu wegetacyjnego w wyznaczonych regionach północno-wschodniej Polski w kolejnych okresach trzydziestoletnich

Directional coefficients of linear trend of length (A) as well as start and end date (solid and dashed line on B, respectively) of thermal growing season in selected regions in north-eastern Poland for consecutive thirty-years periods

G1m i G2m – wartości współczynnika kierunkowego dla lat 1951-2015

G1m and G2m – directional coefficient for 1951-2015 period

można jednak zauważyć zróżnicowanie przestrzenne tych zmian. W zachodniej i środkowej części północno-wschodniej Polski wydłużył się on o prawie 20 dni, a długoterminowy trend zmian był istotny statystycznie (3 dni/10 lat). We wschodniej części wydłużenie okresu było mniejsze (7-10 dni) i brak było istotnych długoterminowych trendów. Bezwzględna wielkość wydłużania się TGS wskazuje na gradient malejący z zachodu na wschód. Podobne spostrzeżenie poczynili Carter [1998] dla krajów nordyckich oraz Linderholm i in. [2008] dla regionu bałtyckiego.

Wzorzec TGS w latach 1951-2000 koresponduje z wynikami Linderholma i in. [2008], którzy stwierdzili, że w drugiej połowie XX wieku wystąpiła tendencja do wydłużenia się okresu, brak jednak ogólnych istotnych trendów parametrów TGS. Podobne relacje wystąpiły na obszarze objętym prezentowanymi badaniami (tab. 1): widoczna jest tendencja do coraz wcześniejszych początków okresu, skutkująca wzrostem długości TGS w latach 1951-2000 średnio o 2,5 dnia. Wzrost TGS był większy niż na Litwie [Linderholm i in. 2008], ale mniejszy niż w północno-zachodniej Polsce [Tylkowski 2015] i zachodniej części regionu bałtyckiego. W regionie bałtyckim podczas tych 50 lat odnotowano wydłużenie się TGS średnio o 7,4 dnia [Linderholm i in. 2008], a w Niemczech, w zależności od metody, od 5,5 do 24,5 dnia [Menzel i in. 2003]. Brak istotnych zmian długości okresu w Suwałkach w latach 1951-2000 stwierdzili także Żmudzka [2001] oraz Kożuchowski i Degirmendzić [2005]. Przyczyną ogólnego braku istotnych trendów długości okresu w latach 1951-2000 może być stwierdzona duża coroczna i dekadowa zmienność długości TGS. Zmiany długości TGS z roku na rok dochodziły do 60 dni w obydwu kierunkach (wydłużenie/skrócenie okresu w stosunku do roku poprzedniego). Również tendencje zmian obliczane dla okresów 30-letnich były zróżnicowane kierunkowo (tab. 2, ryc. 5).

Począwszy od lat 80. ubiegłego wieku można zauważyć istotne wydłużenie TGS na obszarze Polski północno-wschodniej, decydujące o istotności trendów długoterminowych (tab. 1). Jest to przede wszystkim konsekwencją zmian temperatury powietrza, widocznych w ciągu ostatnich 30 lat. W pierwszej dekadzie, uznanej za najcieplejszą od momentu rozpoczęcia pomiarów instrumentalnych, na całym obszarze wystąpiły prawie wszystkie stwierdzone dla całego okresu badań anomalnie długie okresy wegetacyjne (ryc. 2). W latach 2000-2015 50% okresów

wegetacyjnych było dłuższych o przynajmniej 3 tygodnie (zachodnia i środkowa część, powyżej 231 dni) lub 2 tygodnie (część wschodnia, powyżej 220 dni) niż średnio w latach 1961-1990. Okres wegetacyjny w 2006 roku, najdłuższy w całej 65-letniej serii, w zachodniej i środkowej części regionu trwający 261 dni, a we wschodniej 237 dni, był dłuższy od średniej wieloletniej odpowiednio o 45 i 37 dni. Dodatni trend zmian temperatury powietrza, największy zimą i wiosną [Marosz i in. 2011], skutkował coraz wcześniejszym rozpoczynaniem się TGS na całym obszarze badań, a w części zachodniej i środkowej badanego obszaru również późniejszym końcem (ryc. 5). Koresponduje to częściowo z wynikami Krużel i in. [2015], którzy wskazują, że termiczny okres wegetacyjny w latach 1981-2010 był średnio dłuższy o 6 dni w Suwałkach i Białymstoku i o 4 dni w Kętrzynie w stosunku do okresu 1971-2000. Według Tomczyka i Szygi-Pluty [2016] w latach 1971-2010 na całym obszarze Polski północno-wschodniej wystąpiły istotne statystycznie zmiany TGS i wynosiły one 4,5-4,7 dnia/10 lat. Według Nieróbcy i in. [2013] w latach 2001-2009 nastąpiło wydłużenie okresu we wschodniej Polsce o 6 dni w stosunku do 1971-2000. Jako przyczyny wydłużania się okresu wegetacyjnego Nieróbca i in. [2013] oraz Tomczyk i Szyga-Pluta [2016] podają przede wszystkim opóźnienie końca okresu, natomiast Krużel i in. [2015] zarówno wcześniejszy początek, jak i późniejszy koniec TGS. Mager i Kopeć [2010] zauważyli w latach 1966-2005 w Olsztynie i Suwałkach istotne statystycznie przyspieszenie dat początku i nieistotne tendencje zmian pozostałych parametrów TGS. Wyniki niniejszych badań wskazują, że na obszarze Polski północno-wschodniej większy wpływ na wydłużanie TGS ma coraz wcześniejsze jego rozpoczynanie się. W okresie 1951-2015 daty początku okresu uległy przesunięciu w kierunku wcześniejszym o 14 dni, a trend zmian był istotny statystycznie. W zmianie dat końca stwierdzono brak istotnych trendów, w zachodniej i środkowej części zaznacza się tendencja opóźnienia dat końca (do 6 dni), natomiast na wschodnich krańcach regionu tendencja przyspieszenia dat końca okresu (do 4 dni). Wcześniejszy początek jako główną przyczynę wydłużania się termicznego okresu wegetacyjnego w regionie bałtyckim podali również Linderholm i in. [2008]. Większe zmiany wiosną niż jesienią korespondują z wynikami badań fenologicznych prowadzonych w Europie [Menzel 2000; Ahas i in. 2002; Chmielewski, Rötzer 2002] oraz z analizami wskaźników stanu wegetacji ze zdjęć satelitarnych [Høgda i in. 2013; Park i in. 2016].

Różna wielkość i istotność zmian długości okresu oraz dat jego początku i końca uzyskiwanych w cytowanych powyżej badaniach dla Polski północno-wschodniej, nawet dla zbliżonego okresu badań, może być pochodną różnych założeń metodycznych (tab. 1). Walther i Linderholm [2006], badając zmiany długości termicznego okresu wegetacyjnego w rejonie bałtyckim, wykazali, że w zależności od użytej definicji i metody wyznaczania daty początku i końca okresu można uzyskać różne (pod względem wartości i istotności statystycznej) trendy dla tej samej stacji. Dlatego do badań trendów zmian parametrów TGS powinno się stosować metody bazujące na analizie danych dobowych, pozwalających prześledzić zmiany z roku na rok, kompatybilne z metodami stosowanymi w krajach europejskich, a także z opracowaniami regionalnymi w Polsce [Węgrzyn 2008; Tylkowski 2015].

Projekcje klimatyczne przewidują dalsze zwiększanie się długości okresu wegetacyjnego, co będzie miało zarówno korzystne, jak i niekorzystne implikacje w leśnictwie. Wydłużenie się tego okresu może przyczynić się m.in. do wzrostu produktywności lasu oraz zwiększenia sekwestracji węgla przez lasy [Barichivich i in. 2011]. Z badań Barforda i in. [2001] wynika, że długość okresu wegetacyjnego jest jednym z czynników kontrolujących absorpcję CO₂ w lasach strefy umiarkowanej. Na obszarze Polski północno-wschodniej przyspieszenie początku wiosny z jednej strony umożliwi wcześniejsze rozpoczęcie prac leśnych, z drugiej może powodować większe zagrożenie przymrozkowe. W porównaniu do trendu początku okresu wegetacyjnego (2,1 dnia/10 lat),

długoterminowy trend daty ostatniego wiosennego przymrozku jest słabszy ($-0,9$ dnia/10 lat w części środkowej i $-0,04$ dnia /10 lat w części wschodniej badanego regionu; wyniki własne niepublikowane), co implikuje wydłużanie się okresu potencjalnych przymrozków po rozpoczęciu wegetacji.

Podsumowanie

W latach 1951-2015 na całym obszarze północno-wschodniej Polski nastąpiło wydłużenie termicznego okresu wegetacyjnego, występujące w malejącym gradiencie zachód-wschód. W zachodniej i środkowej części regionu długość okresu wegetacyjnego wzrosła w ciągu 65 ostatnich lat o prawie 20 dni, we wschodniej części wydłużenie okresu było mniejsze i wynosiło 7-10 dni. Większość zachodzących zmian związana była z coraz wcześniejszym rozpoczynaniem się okresu wegetacyjnego: w części zachodniej o 2,1 dnia/10 lat, w części wschodniej 1,75 dnia/10 lat. Obserwowane trendy i tendencje wykazują zróżnicowanie przestrzenne i czasowe zmian długości TGS. Długoterminowe trendy były istotne statystycznie w zachodniej i środkowej części badanego regionu. Trendy obliczane dla kolejnych 30-letnich okresów klimatycznych do lat 80. ubiegłego wieku były nieistotne statystycznie, zróżnicowane kierunkowo i przestrzennie. W latach 1981-2010 na całym obszarze Polski północno-wschodniej okres wegetacyjny był dłuższy niż latach poprzednich. Największe wydłużenie okresu miało miejsce w środkowej części regionu (1,2 dnia/rok), najmniejsze w południowo-wschodniej (0,5 dnia/rok). Począwszy od lat 80. ubiegłego wieku nastąpiło zwiększenie częstotliwości występowania długich okresów wegetacyjnych, a w pierwszych 15 latach XXI wieku anomalnie długich.

Długość termicznego okresu wegetacyjnego oraz daty początku i końca cechowały się dużą zmiennością z roku na rok oraz dekadową, przy czym zakres zmienności znacznie rozszerzył się w ostatnich latach. Przy opracowywaniu strategii dla gospodarki leśnej w północno-wschodniej Polsce (RDLP Olsztyn i RDLP Białystok) powinny być wzięte pod uwagę zarówno trendy wydłużania się okresu wegetacyjnego, jak i trudna do prognozowania jego zmienność czasowa.

Literatura

- Ahas R., Aasa A., Menzel A., Fedotova V. G., Scheffinger H. 2002. Changes in European spring phenology. *Int. J. Climatol.* 22: 1727-1738.
- Barford C. C., Wofsy S. C., Goulden M. L., Munger J. W., Pyle E. H., Ubranski S. P., Hutyrta L., Saleska S. R., Fitzjarrald D., Moore K. 2001. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science* 294: 1688-1691.
- Barichivich J. K., Briffa K. R., Myneni R. B. 2011. Large-scale variations in the vegetation growing season and annual cycle of atmospheric CO₂ at high northern latitudes from 1950 to 2011. *Global Change Biology* 19 (10): 3167-3183.
- Carter T. R. 1998. Changes in the thermal growing season in Nordic countries during the past century and prospects for the future. *Agricultural and Food Science in Finland* 7 (2): 161-179.
- Chmielewski F.-M., Rötzer T. 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Res.* 19: 257-264.
- Chojnacka-Ożga L. 1999. Długość termicznego okresu wegetacyjnego w Lasach Doświadczalnych SGGW w latach 1926-1998. W: Feliksik E. [red.]. *Klimatyczne uwarunkowania życia lasu*. Wyd. PTL, Warszawa. 127-133.
- Chojnacka-Ożga L., Ożga W. 2015. Przestrzenna i czasowa zmienność długości meteorologicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce. W: Lorenc H., Ustrnul Z. [red.]. *Klimat a społeczeństwo i gospodarka*. Monografie IMGW-PIB. Warszawa. 129-143.
- Climate change, impacts and vulnerability in Europe. 2017. EEA Report 1.
- Cui L., Shi J., Ma Y. 2017. A Comparison of Thermal Growing Season Indices for the Northern China during 1961-2015. *Advances in Meteorology* ID 6718729.
- Frich P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M. Klein Tank A. M. G., Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century. *Climate Res.* 19: 193-212.

- Fu H. Y., Piao S., Zhao Z., Zhang Y., Menzel A., Janssens I. 2014. Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23: 1255-1263.
- Guide to Climatological Practices. 2011. WMO 100: 73-90.
- Høgda K. A., Tømmervik H., Karlsen S. R. 2013. Trends in the Start of the Growing Season in Fennoscandia 1982-2011. *Remote Sens.* 5: 4304-4318.
- Huculak W., Makowiec M. 1977. Wyznaczenie meteorologicznego okresu wegetacyjnego na podstawie jednorocznych materiałów obserwacyjnych. *Zeszyty Naukowe SGGW AR w Warszawie, Leśnictwo* 25: 65-72.
- Kozuchowski K., Degirmendzić J. 2005. Contemporary changes of climate in Poland: trends and variation in thermal and solar conditions related to plant vegetation. *Pol. J. Ecol.* 53 (3): 283-297.
- Krużel J., Ziernicka-Wojtaszek A., Borek Ł., Ostrowski K. 2015. Zmiany czasu trwania meteorologicznego okresu wegetacyjnego w Polsce w latach 1971-2000 oraz 1981-2010. *Inżynieria Ekologiczna* 44: 47-52.
- Linderholm H. W. 2006. Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* 137: 1-14.
- Linderholm H. W., Walther A., Chen D., Moberg A. 2008. Twentieth-century trends in the thermal growing-season in the Greater Baltic Area. *Climate Change.* 87: 405-419.
- Mađer P., Kopeć M. 2010. Okres wegetacyjny w Polsce i w Europie w dobie obserwowanego ocieplenia. W: Bednorz E., Kolendowicz L. [red.]. *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje.* Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań. 49-63.
- Marosz M., Wójcik R., Biernacik D., Jakusik E., Pilarski M., Owczarek M., Miętus M. 2011. Zmienność klimatu Polski od połowy XX wieku. *Rezultaty projektu Klimat. Prace i Studia Geograficzne* 47: 51-66.
- Menzel A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorol.* 44: 76-81.
- Menzel A., Jakobi G., Ahas R., Scheffinger H., Estrella N. 2003. Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. *Int. J. Climatol.* 23: 793-812.
- Niedźwiedz T. [red.]. 2003. *Słownik meteorologiczny.* IMGW, Warszawa.
- Nieróbca A., Kozyra J., Mizak K., Wróblewska E. 2013. Zmiana długości okresu wegetacyjnego w Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 13 (2): 81-94.
- Park T., Ganguly S., Tømmervik H., Euskirchen E., Høgda K.-A., Karlsen S. R., Brovkin V., Nemani R., Myneni R. 2016. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environ. Res. Lett.* 11 (8).
- Parmesan C., Yohe G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Robeson S. M. 2002. Increasing growing-season length in Illinois during the 20th century. *Climatic Change* 52: 219-238.
- Schwarz M. D., Ahas R., Aasa A. 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12 (2): 343-351.
- Szetimrey T. 1999. *Multiply Analysis od Series for Homogenization.* Budapest. WMO. WCDMP 41.
- Szejnkowski Z., Dragańska E., Banaszkiewicz B. 2008. Scenariusze warunków agroklimatycznych okolic Olsztyna w perspektywie spodziewanego globalnego ocieplenia w roku 2050. *Acta Agrophysica.* 12 (2): 543-552.
- Tomczyk A., Szyga-Pluta K. 2016. Okres wegetacyjny w Polsce w latach 1971-2010. *Przegląd Geograf.* 88 (1): 75-86.
- Tylkowski J. 2015. The Variability of Climatic Vegetative Seasons and Thermal Resources at the Polish Baltic Sea Coastline in the Context of Potential Composition of Coastal Forest Communities. *Baltic Forestry* 21 (1): 73-82.
- Walther A., Linderholm H. W. 2006. A comparison of growing season indices for the Greater Baltic Area. *Int. J. of Biometeorol.* 51 (2): 107-118.
- Walther G. R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J. C., Fromentin J. M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- Węgrzyn A. 2008. Typowe i anomalne długości okresu wegetacyjnego na Lubelszczyźnie. *Acta Agrophysica* 12 (2): 561-573.
- Xu L., Myneni R. B., Chapin F. S., Callaghan T. V., Pinzon J. E., Tucker C. J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H. 2013. Temperature and vegetation seasonality diminishment over Northern Lands. *Nat. Clim. Chang.* 3: 581-586.
- Żmudzka E. 2004. Tło klimatyczne produkcji rolniczej w Polsce w drugiej połowie XX wieku. *Acta Agrophysica* 3 (2): 399-408.
- Żmudzka E., Dobrowolska M. 2001. Termiczny okres wegetacyjny w Polsce – zróżnicowanie przestrzenne i zmienność czasowa. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW* 21: 75-80.