

ZMIENNOŚĆ ZASOBÓW TERMICZNYCH W POLSCE W ASPEKCIE OBSERWOWANYCH ZMIAN KLIMATU

Agnieszka Sulikowska, Agnieszka Wypych, Zbigniew Ustrnul
Uniwersytet Jagielloński

Danuta Czekierda

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy

Streszczenie. Obserwowany wzrost temperatury powietrza na półkuli północnej, zwłaszcza w Europie, może prowadzić do znacznych zmian w fenologii roślin, a w konsekwencji także w produkcji rolnej. Celem pracy jest ocena zróżnicowania przestrzennego zasobów termicznych na obszarze Polski oraz ich zmienności w okresie 1951–2010 w obliczu zmieniających się warunków termicznych. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem dobowych wartości temperatury powietrza. Zasoby termiczne zdefiniowane zostały za pomocą sum temperatur efektywnych (*Growing Degree Days* – *GDD*) obliczonych dla wartości progowych temperatury powietrza: 0°C, 5°C i 10°C. Następnym etapem analizy zróżnicowania przestrzennego zasobów termicznych była ocena ich zmienności wieloletniej oraz tendencji zmian. Badania objęły w szczególności regiony sadownicze odznaczające się największą powierzchnią upraw drzew owocowych oraz wielkością zbiorów jabłek, śliwek i wiśni. Uzyskane wyniki potwierdzają zwiększenie zasobów termicznych na obszarze kraju, będące konsekwencją wydłużającego się okresu wegetacyjnego.

Słowa kluczowe: zasoby termiczne, sumy temperatur efektywnych, Polska

WSTĘP

Obserwowany wzrost temperatury powietrza na półkuli północnej, zwłaszcza w Europie, w ostatnich dekadach jest faktem niezaprzeczalnym, znajdującym poparcie w prowadzonych na szeroką skalę badaniach, których podsumowanie można znaleźć

Adres do korespondencji – Corresponding authors: mgr Agnieszka Sulikowska, dr Agnieszka Wypych, prof. dr hab. Zbigniew Ustrnul, Zakład Klimatologii, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, mgr Danuta Czekierda, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa, e-mail: a.sulikowska@uj.edu.pl.

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

w Piątym Raplocie IPCC [IPCC 2013]. Z uwagi na istotny bezpośredni czy też pośredni – w interakcji z innymi czynnikami, takimi jak fotoperiod – wpływ warunków termicznych na rozwój roślin [Nyéki i Soltész 1996, Cleland i in. 2007], jakakolwiek ich zmiana może prowadzić do znacznych modyfikacji w fenologii roślin, a w konsekwencji do zmian w produkcji rolnej [Chmielewski i in. 2004, Żmudzka 2004]. W rolnictwie, sadownictwie i leśnictwie najbardziej istotną miarą roli, jaką pełnią warunki termiczne, jest długość trwania okresu wegetacyjnego oraz dostarczane zasoby ciepła [Chmielewski i Rötzer 2001, Spinoni i in. 2015]. Badania dowiodły, że okres wegetacyjny wydłuża się o około 5 dni na każdy 1°C wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza [Chmielewski i Rötzer 2001] oraz do 12 dni na każdy 1°C wzrostu średniej temperatury powietrza wiosną [Chmielewski i Rötzer 2001, Scheffinger i in. 2003, Menzel i in. 2006]. To właśnie warunki termiczne wiosny wydają się być w znacznym stopniu odpowiedzialne za czas występowania poszczególnych fenofaz [Wielgolaski 1999, Sparks i in. 2000, Menzel i in. 2006, Cook i in. 2012].

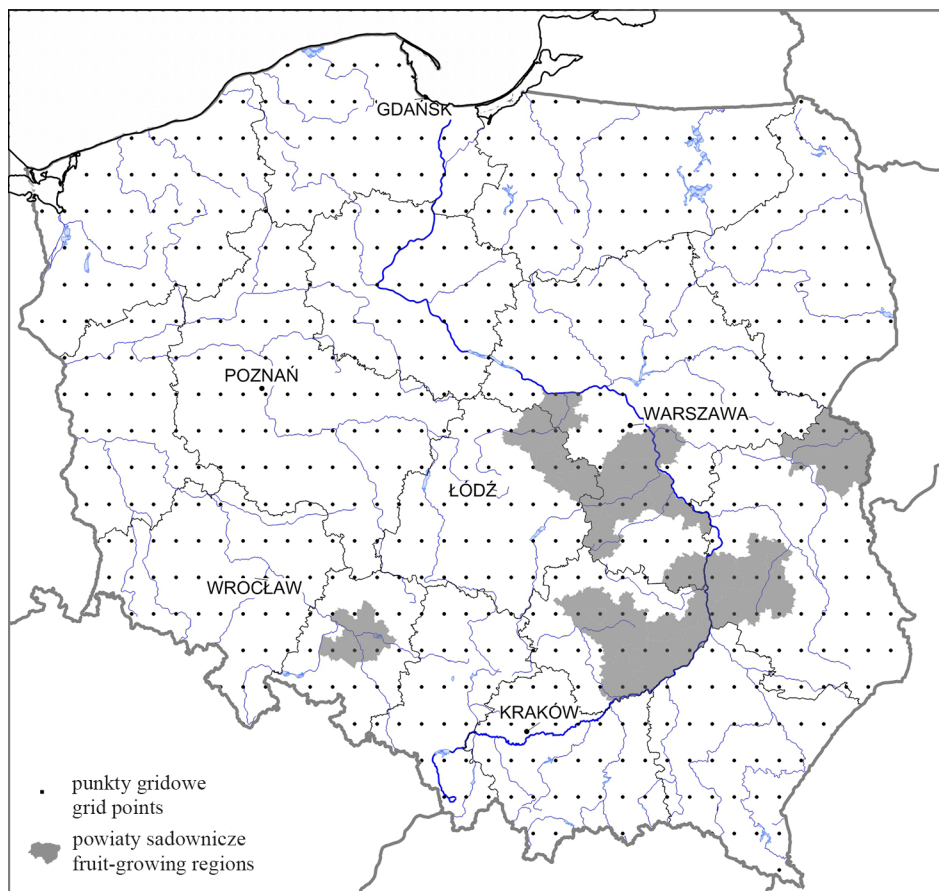
Samo wydłużenie okresu wegetacyjnego nie jest jednak tak ważne, jak wzrost temperatury w czasie wegetacji roślin. Przekłada się on bowiem na wzrost zasobów ciepła, przyspieszając tym samym lub opóźniając wystąpienie kolejnych fenofaz (wcześniejsze kiełkowanie, rozwój liści i kwitnienie wiosną, dojrzewanie owoców latem, późniejsze opadanie liści jesienią) [Chmielewski i Rötzer 2001].

Celem pracy jest ocena zróżnicowania przestrzennego zasobów termicznych na obszarze Polski (ze szczególnym uwzględnieniem rejonów produkcji sadowniczej) oraz ich zmienności w okresie 1951–2010 w obliczu zmieniających się warunków termicznych w Europie.

DANE I METODY

Obszar Polski, obejmujący około 313 tys. km² i znacznie zróżnicowany przestrzennie pod względem przyrodniczym, z uwagi na centralne położenie w Europie wydaje się być dobrym indykatorem warunków panujących w środkowej części kontynentu. Analizę przeprowadzono dla okresu 1951–2010 z wykorzystaniem codziennych wartości średniej dobowej, maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza, pozyskanych z bazy danych E-OBS (v.10) o rozdzielczości przestrzennej 0,25° × 0,25° [Haylock i in. 2008]. Zmienność warunków termicznych ma największe znaczenie dla roślin wieloletnich (np. drzew owocowych), gdyż są one szczególnie wrażliwe na wahania temperatury zwłaszcza w okresie wiosennego kwitnienia, kiedy to występowanie późnych przymrozków stanowi poważne zagrożenie dla pąków. Dlatego też szczegółową analizę wykonano dla największych pod względem powierzchni upraw drzew owocowych oraz wielkości zbiorów owoców (jabłka, śliwy, wiśnie) regionów sadowniczych w kraju (ryc. 1) [Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2014].

Wybrano cztery regiony, na terenie których znajdują się powiaty o największym odsetku powierzchni sadów w Polsce: opolski (powiat opolski), łódzko-mazowiecki (powiaty: łowicki, rawski, skierniewicki, białobrzegi, grójecki, kozienicki, otwocki, piaseczyński, przysuski, sochaczewski), świętokrzysko-lubelski (powiaty: lipski, buski, kielecki, opatowski, sandomierski, staszowski, kielecki, kraśnicki, lubelski, opolski) i bialski (powiat bialski).



Ryc. 1. Obszar badań – położenie punktów gridowych E-OBS i regionów sadowniczych
 Fig. 1. Research area – localization of E-OBS grid points and fruit-growing regions

Zasoby termiczne zdefiniowane zostały za pomocą sum temperatur efektywnych (wskaźnik *Growing Degree Days*, *GDD*) (1), opisujących ilość dostarczanej energii cieplnej w danym czasie [McMaster i Wilhem 1997, Bonhomme 2000, Miller i in. 2001]. Sumy temperatur efektywnych są wskaźnikiem powszechnie stosowanym w agroklimatologii w celu określenia ilości energii cieplnej potrzebnej do osiągnięcia poszczególnych stanów rozwojowych roślin, co znajduje szersze zastosowanie w modelach prognozujących terminy ich osiągnięcia [Anderson i in. 1986, Miller i in. 2001, Zavalloni i in. 2006, Matzneller i in. 2014], terminy optymalnych zasiewów [Worthington i Hutchinson 2005] i zbiorów [Łysiak 2012], czy też zagrożenia wystąpieniem szkodników [Herms 2004, Juszczak i in. 2008].

$$GDD = \left[\frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2} \right] - T_{base} \quad (1)$$

gdzie:

GDD – sumy temperature efektywnych (*Growing Degree Days*), °C,

$T_{\max}$ – maksymalna dobowatempertura powietrza, °C,

$T_{\min}$ – minimalna dobowatempertura powietrza, °C,

T_{base} – wartość progowa temperatury powietrza, °C.

Pośród wielu stosowanych wartości progowych temperatury powietrza zależnych od gatunku, odmiany rośliny czy też przeznaczenia samej analizy [Yang i in. 1995, Nyéki i Soltész 1996, Snyder i in. 1999, Zavalloni i in. 2006, Matzneller i in. 2014] wybrano 0°C, 5°C i 10°C, warunkujące odpowiednio okres nie zimowy, wegetacyjny oraz okres aktywnego wzrostu roślin. Są one najczęściej wykorzystywane do oceny wpływu warunków termicznych na wzrost i rozwój roślin [Gordon i Bootsma 1993, Grigorieva i Matzarakis 2005].

Oprócz szczegółowej analizy rozkładu przestrzennego sum GDD w Polsce, przedstawiono także ich zmienność czasową wraz z oszacowaniem trendów. Wielkości trendów określono za pomocą regresji liniowej, a ich istotność statystyczną sprawdzono testem t-Studenta [von Storch i Zwiers 2003].

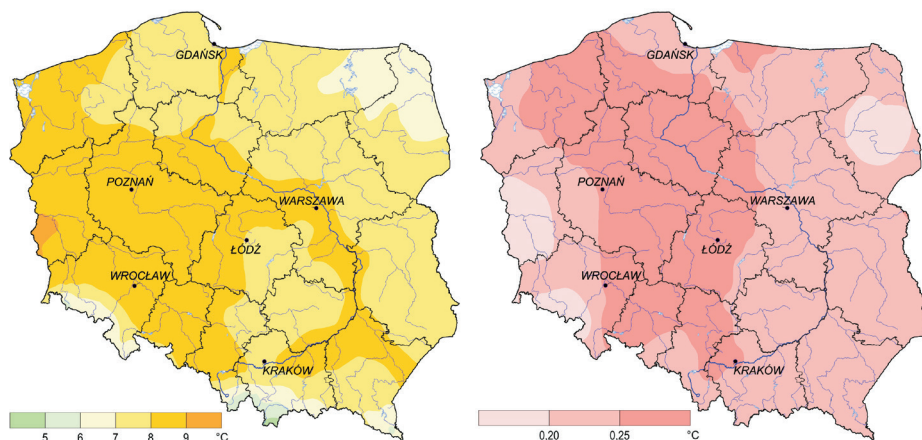
WYNIKI I DISKUSJA

Zróznicowanie przestrzenne oraz tendencje zmian sum GDD w Europie przedstawili Spinoni i in. [2015]. Autorzy zdecydowanie podkreślają, że w ostatnich dekadach na obszarze kontynentu występuje zwiększenie zasobów termicznych, przy czym zmiany są najwyraźniejsze w basenie Morza Śródziemnego, a najsłabiej widoczne w północnej części Europy. Wykazane obniżenie sum GDD w Europie Północnej nie ma większego znaczenia, gdyż i tak niewielkie sumy roczne utrudniają lub wręcz uniemożliwiają stałą uprawę roślin w tym regionie. Co więcej, obszary położone w niskich szerokościach geograficznych w połowie XX wieku odznaczały się istotnym statystycznie ubytkiem zasobów ciepła; tendencja dodatnia zaznacza się dopiero od lat 80. XX wieku [Spinoni i in. 2015]. Wyniki te potwierdzają wcześniejsze badania prowadzone m.in. w Rosji [Grigorieva i Matzarakis 2005, Blinova i Chmielewski 2014] czy w Polsce [Żmudzka 2012].

Temperatura powietrza i okres wegetacyjny

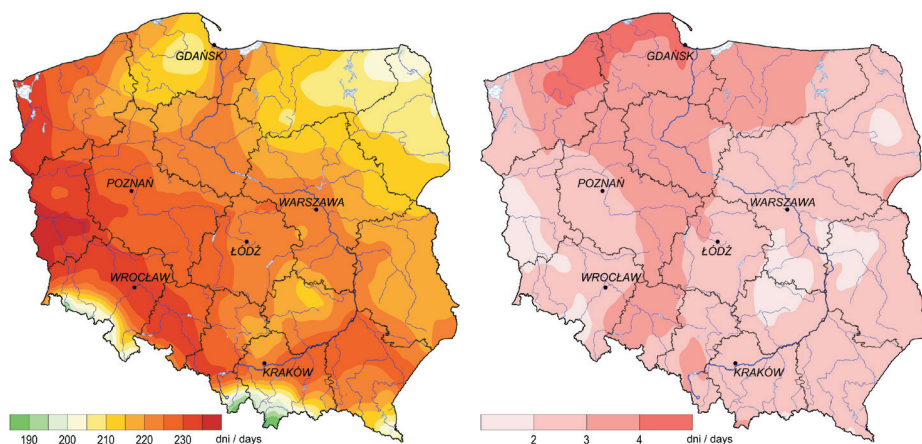
Ocenę zasobów ciepła w Polsce poprzedzono szczegółową analizą rozkładu przestrzennego oraz tendencji średniej rocznej temperatury powietrza i długości trwania okresu wegetacyjnego (ryc. 2 i 3). Najwyższą średnią roczną temperaturą powietrza charakteryzuje się zachodnia część kraju oraz dolina Wisły, najniższą zaś obszary górskie i Suwalszczyzna. Tendencja wzrostu średniej rocznej temperatury powietrza została stwierdzona w całym kraju. Największe ocieplenie występuje w środkowo-zachodniej Polsce, w pasie od Wybrzeża Koszalińskiego po Nizinę Śląską i Wyżynę Krakowsko-Częstochowską gdzie osiąga ponad 0,25°C na 10 lat. Do rozkładu przestrzennego i tendencji temperatury powietrza nawiązuje zróznicowanie przestrzenne i tendencje długości trwania okresu wegetacyjnego. Jest on najdłuższy w południowo-zachodniej części kraju

(z wyłączeniem obszarów górskich), a najkrótszy w górach i na Suwalszczyźnie, przy czym obserwowane jest jego istotne statystycznie wydłużanie się, wynoszące do 4 dni na 10 lat na Wybrzeżu. Wyniki te są zgodne z wcześniejszymi badaniami [m.in. Żmudzka i Dobrowolska 2001, Żmudzka 2012].



Ryc. 2. Rozkład przestrzenny średniej rocznej temperatury powietrza w Polsce (po lewej) oraz jej tendencja w przeliczeniu na 10 lat (po prawej)

Fig. 2. Spatial differentiation of annual mean temperature in Poland (left) and its tendency per 10 years (right)



Ryc. 3. Rozkład przestrzenny długości okresu wegetacyjnego (po lewej) oraz jej tendencja w przeliczeniu na 10 lat (po prawej)

Fig. 3. Spatial differentiation of growing season length in Poland (left) and its tendency per 10 years (right)

Zasoby termiczne (sumy temperatur efektywnych, *GDD*)

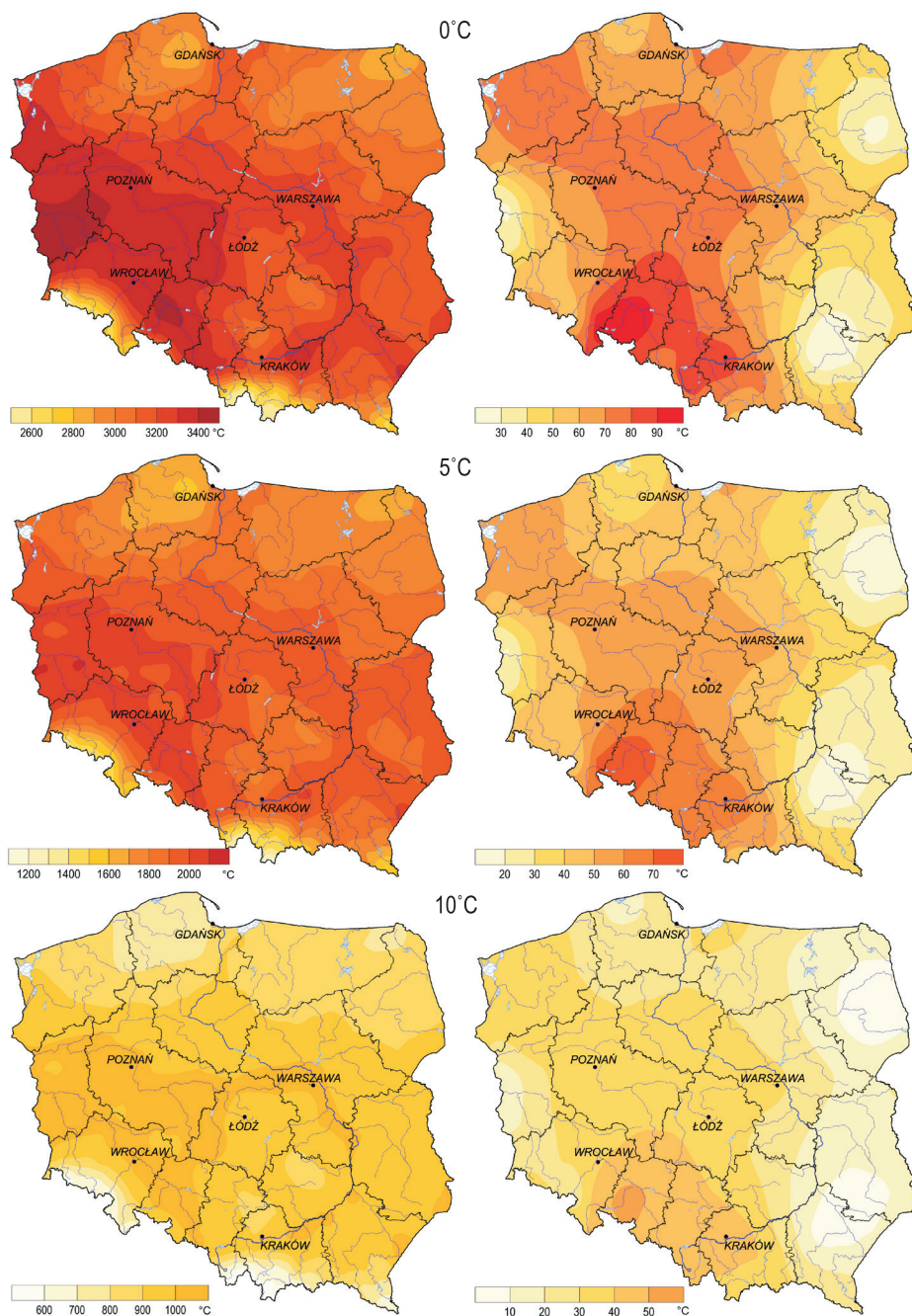
Zasoby termiczne Polski zdefiniowane na podstawie wskaźnika *GDD* w latach 1951–2010 wynoszą średnio 3150°C dla wartości progowej temperatury powietrza 0°C, 1880°C dla 5°C oraz 920°C dla 10°C. Zróżnicowanie przestrzenne sum temperatur efektywnych w Polsce nawiązuje do rozkładu średniej rocznej temperatury powietrza – największe są na południu i południowym zachodzie (z wyłączeniem obszarów górskich) oraz wzdłuż dolin Wisły i Odry, najmniejsze w górach oraz na przedgórzu, a także w północno-wschodniej Polsce (ryc. 4). Tendencja zmian zasobów termicznych w Polsce jest zdecydowanie dodatnia i istotna statystycznie, średnio na 10 lat wynosi 60°C dla progę 0°C, 43°C dla 5°C oraz 28°C dla 10°C. Uprzywilejowanym obszarem jest pod tym względem południowo-środkowa część Polski, gdzie wzrost jest dwukrotnie większy w stosunku do średniej zmiany w skali kraju (odpowiednio: 116°C, 90°C i 62°C dla omawianych wartości progowych). Najmniejsze i nieistotne statystycznie zmiany zaobserwowano w województwach wschodnich oraz na środkowym zachodzie.

Warto zwrócić uwagę na regionalne różnice, które widoczne są przy porównaniu rozkładu przestrzennego sum *GDD* dla różnych temperatur progowych. Sumy ciepła powyżej 0°C odznaczają się największym zróżnicowaniem przestrzennym, sięgającym 1000°C. Obszary o największych zasobach termicznych otrzymują nieco powyżej 120%, zaś o najmniejszych 65% średniej krajowej sumy *GDD*. W przypadku temperatury progowej 5°C i 10°C zakres zmienności wartości jest wprawdzie mniejszy (odpowiednio: niespełna 800°C oraz nieznacznie powyżej 500°C), jednakże ich rozkład przestrzenny jest zdecydowanie mniej równomierny. Obszary o nadwyżkach ciepła otrzymują około 130% (temperatura progowa 5°C) i ponad 150% (10°C) średniej krajowej, podczas gdy rejony odznaczające się niedoborem zasobów termicznych jedynie 53% i 35% odpowiednio. Taki rozkład przestrzenny podkreśla zróżnicowanie występowania termicznych pór roku na obszarze Polski, w tym także długości trwania okresu wegetacyjnego i podkreśla znaczenie wpływów kontynentalnych we wschodniej części kraju.

Zróżnicowanie zasobów termicznych w regionach sadowniczych

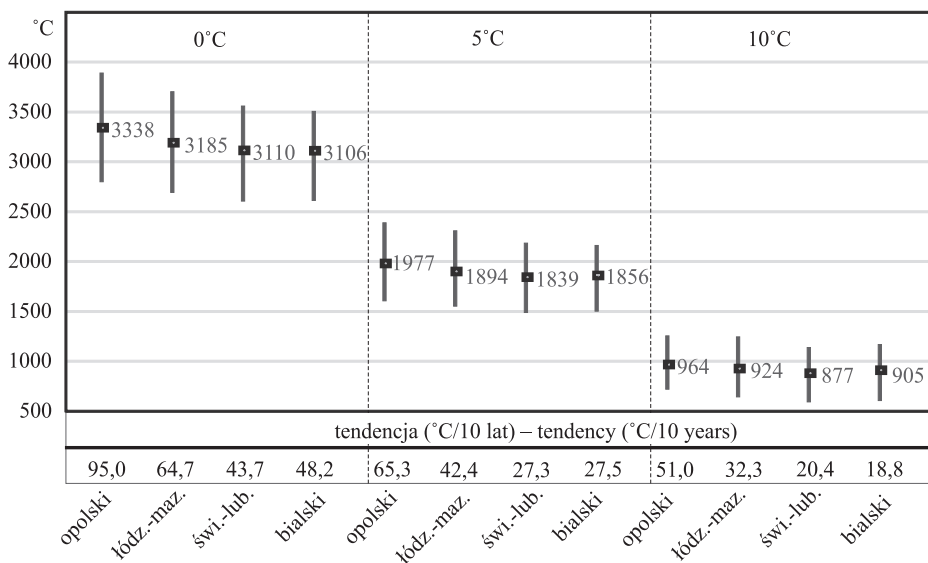
W świetle opisanego wyżej rozkładu przestrzennego i tendencji zmian zasobów termicznych w Polsce, należy się spodziewać, że na perspektywy rozwoju produkcji rolnej w wyróżnionych regionach sadowniczych decydujący wpływ będzie miało ich położenie.

Jak wspomniano wcześniej, zróżnicowanie zasobów termicznych widoczne jest przede wszystkim dla temperatury progowej 0°C, a nieco mniejsze w przypadku 5°C i 10°C. W badanych regionach sadowniczych sumy *GDD* (dla progę 0°C) wahają się od > 3300°C w opolskim do 3106°C w bialskim (ryc. 5). W przypadku pozostałych temperatur progowych najmniej uprzywilejowanym jest region bialski, warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że regiony bialski i świętokrzysko-lubelski mają zbliżone cechy termiczne, a średnia suma *GDD* dla progów 5°C i 10°C jest nawet nieco niższa w tym ostatnim. Region opolski cechował się największymi wartościami wzrostu zasobów termicznych. Tendencje tych zmian we wszystkich regionach były najwyższe dla temperatury progowej 0°C, osiągając ponad 90°C w regionie opolskim i niespełna



Ryc. 4. Rozkład przestrzenny sum GDD dla wartości progowych temperatury powietrza 0°C, 5°C, 10°C (po lewej) oraz ich tendencje (°C na 10 lat) (po prawej)

Fig. 4. Spatial differentiation of GDD in Poland for selected air temperature thresholds: 0°C, 5°C, 10°C (left) and their tendencies (°C na 10 years) (right)



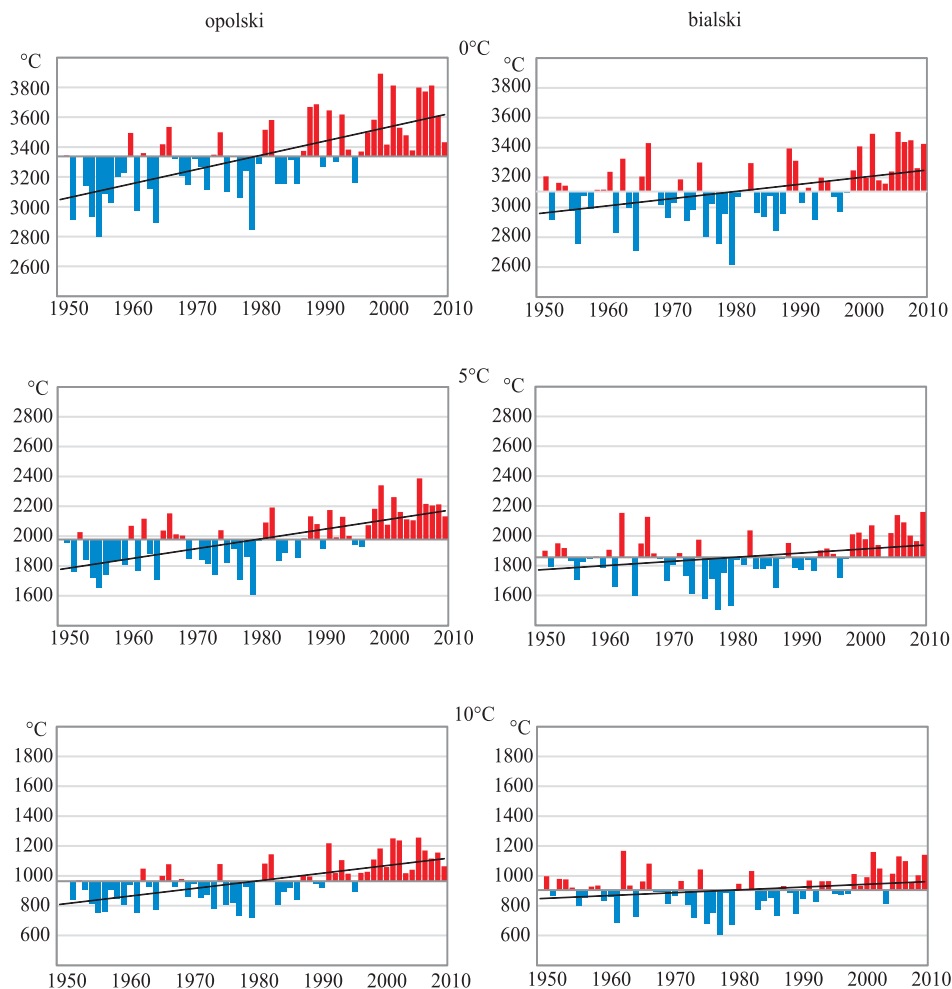
Ryc. 5. Zakres wartości sum *GDD* w rozpatrywanych regionach sadowniczych dla progowych wartości temperatury powietrza 0°C, 5°C, 10°C, ich średnia wartość oraz tendencje zmian

Fig. 5. Ranges of *GDD* in the analyzed fruit-growing regions for selected air temperature thresholds: 0°C, 5°C, 10°C, their mean values and tendencies

45°C w regionie świętokrzysko-lubelskim. W przypadku pozostałych progów różnice przestrzenne są równie znaczące, przy istotnych statystycznie zmianach we wszystkich badanych regionach.

W przebiegu wieloletnim (ryc. 6) wyraźnie odznaczają się ostatnie dekady badanego okresu (od 1980 roku), charakteryzujące się wyższymi od średniej wieloletniej zasobami ciepła i istotnie dodatnią tendencją zmian. Wpływa ona niewątpliwie na wzrostowy trend w całym analizowanym okresie, co zaobserwowali również Spinoni i in. [2015] dla obszaru Europy Środkowej. Warto zwrócić uwagę na fakt, że zdecydowanie największą zmiennością z roku na rok odznaczają się sumy *GDD* powyżej temperatury progowej 0°C, przy równoczesnym największym przyroście na 10 lat.

Jako że rozwój roślin następuje po osiągnięciu określonych zasobów ciepła, analizie poddano także zmienność dat, w których sumy *GDD* przekroczyły progi 150°C, 240°C i 300°C odpowiadające kolejnym fazom rozwoju drzew owocowych. W tym przypadku, przy istotnych statystycznie zmianach, różnice przestrzenne są praktycznie niezauważalne zwłaszcza pomiędzy regionami położonymi w centralnej i wschodniej części kraju (tab. 1). Wyjątek stanowi region opolski, w którym przyspieszenie kolejnych fenofaz sięga 2 dni. Potwierdza to wyniki uzyskane przez Jatzak i Walawendera [2009] na podstawie obserwacji fenologicznych prowadzonych w okresie 1951–1992.



Ryc. 6. Wieloletnia zmienność sum *GDD* na tle wartości średniej (1951–2010) w regionach opolskim i bialskim dla progowych wartości temperatury powietrza: 0°C, 5°C, 10°C

Fig. 6. Long-term variability of *GDD* in the opolski and bialski fruit-growing regions for selected air temperature thresholds: 0°C, 5°C, 10°C

Tabela 1. Dаты przekroczenia progów *GDD* 150°C, 240°C i 300°C: średnie, najwcześniejsze i najpóźniejsze oraz ich tendencja w regionach sadowniczychTable 1. Mean, the earliest and the latest dates of reaching *GDD* thresholds 150°C, 240°C and 300°C in the fruit-growing regions

Próg <i>GDD</i> <i>GDD</i> threshold	Region sadowniczy Fruit-growing region	Średnia Mean	Najwcześniej The earliest	Najpóźniej The latest	Tendencja dni/10 lat Tendency days/10 years
150°C	opolski	8,05	24,04	24,05	-1,9
	łódz.-maz.	8,05	24,04	26,05	-1,6
	świ.-lub.	9,05	26,04	28,05	-1,3
	bialski	9,05	26,04	28,05	-1,3
240°C	opolski	16,05	30,04	3,06	-2,1
	łódz.-maz.	19,05	5,05	5,06	-1,7
	świ.-lub.	19,05	7,05	6,06	-1,3
	bialski	19,05	7,05	6,06	-1,3
300°C	opolski	23,05	7,05	11,06	-2,2
	łódz.-maz.	25,05	11,05	12,06	-1,8
	świ.-lub.	27,05	13,05	15,06	-1,3
	bialski	26,05	13,05	13,06	-1,4

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza daje dość jednoznaczny z punktu widzenia agroklimatycznego obraz zmienności zasobów termicznych na obszarze Polski. Obserwuje się istotny statystycznie wzrost średniej rocznej temperatury powietrza (ok 0,2°C na 10 lat), przejawiający się m.in. w wydłużaniu okresu wegetacyjnego średnio o 2,5 dnia na 10 lat. Opisane tendencje skutkują wzrostem zasobów ciepła średnio o 60°C na 10 lat dla proggu 0°C oraz nieco mniej intensywnym, ale istotnym przyrostem *GDD* w przypadku pozostałych progów: 46°C/10 lat dla 5°C, 28°C na 10 lat dla 10°C.

Biorąc pod uwagę wyniki badań fenologicznych potwierdzających, iż wzrost temperatury powietrza o 1°C w skali roku przyspiesza rozwój roślin o 2–5 dni i o kilkanaście dni, gdy wzrost zasobów termicznych dotyczy okresu wiosennego [m.in. Chmielewski i Rötzer 2002, Menzel i in. 2006, Jatczak i Walawender 2009] można zakładać, iż możliwy jest rozwój sadownictwa w Polsce, w kierunku wprowadzania nowych, ciepłolubnych odmian. Wzrost i rozwój roślin wieloletnich jest wypadkową oddziaływania wielu czynników, z których niezwykle ważny w warunkach Polski jest czynnik wodny [Serba i in. 2009]. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza zapotrzebowanie roślin na wodę wzrasta [Lakatos i in. 2006], przez co zwiększenie zasobów termicznych w Polsce może mieć także negatywne skutki w postaci zmniejszenia dostępności wody [Serba i in.]. Pamiętać również należy, że warunki pogodowe są w dużej mierze zależne od specyfiki warunków lokalnych (np. zastoiska zimnego powietrza we wklęsłych formach terenu, które mogą

przyczyniać się do występowania wiosennych przymrozków). Przeprowadzona analiza mezoskalowa (dla obszaru Polski oraz dla wydzielonych regionów, które wprowadzie są względnie jednolite pod względem termicznym, jednakże zróżnicowane środowiskowo) nie daje więc jednoznacznej odpowiedzi co do tendencji zmian w skali lokalnej.

*

Badania przeprowadzone w ramach realizacji projektu badawczego *Towards an Integrated Framework for Climate Change Impact Assessments for International Market Systems with Long-Term Investments*, National Science Foundation CNH grant nr 0909378.

PIŚMIENNICTWO

- Anderson, J.L., Richardson, E., Kesner, C.D. (1986). Validation of chill unit and flower bud phenology models for “Montmorency” sour cherry. *Acta Horticult.*, 184, 71–78.
- Blinova, I., Chmielewski, F.-M. (2014). Climatic warming above the Arctic Circle: are there trends in timing and length of the thermal growing season in Murmansk Region (Russia) between 1951 and 2012? *Internat. J. Biometeor.*, 59(6), 693–705.
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using “degree.day” units. *Europ. J. Agron.*, 13(1), 1–10.
- Chmielewski, F., Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricult. Forest Meteorol.*, 108, 101–112.
- Chmielewski, F.M., Müller, A., Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricult. Forest Meteorol.*, 121(1–2), 69–78.
- 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 Research*, 19(3), 257–264.
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., Schwartz, M.D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.*, 22(7), 357–365.
- Cook, B.I., Wolkovich, E.M., Parmesan, C. (2012). Divergent responses to spring and winter warming drive community level flowering trends. *Proceed. National Academy of Sciences USA*, 109(23), 9000–5.
- Gordon, R., Bootsma, A. (1993). Analyses of growing degree-days for agriculture in Atlantic Canada. *Climate Research*, 3(3), 169–176.
- Grigorieva, E., Matzarakis, A. (2005). Growing degree days at the Russian Far East, http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7_Grigorieva_Matzarakis_44_49.pdf.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank A.M.G., Klok E. J., Jones P. D. New M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 113(20).
- Hermes, D. (2004). Using degree-days and plant phenology to predict pest activity. IPM (Integrated Pest Management) of Midwest Landscapes, Minnesota Agricultural Experiment Station Publication 58-07645, 49–59.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In V.B. and P.M.M. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, ed., 1535.
- Jatczak, K., Walawender, J. (2009). Average rate of phenological changes in Poland according to climatic changes – evaluation and mapping. *Advan. Sci. Res.*, 3, 123–126.
- Juszcak, R., Leśny, J., Olejnik, J. (2008). Sumy temperatur efektywnych jako element prognozy agrometeorologicznej wielkopolskiego internetowego serwisu informacji agrometeorologicznej (WISIA). *Acta Agrophys.*, 12(2), 409–426.

- Lakatos, L., Szabó, T., Racskó, J., Soltész, M., Szabó, Z., Nagy, J., Nyéki, J. (2006). Effects of weather characteristics on blooming dates in an apple gene bank plantation between 1984 and 2001. *Internat. J. Hortic. Sci.*, 12(2), 37–44.
- Łysiak, G. (2012). The Sum of Active Temperatures as a Method of Determining the Optimum Harvest Date of 'Sampion' and 'Ligol' Apple Cultivars. *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 11(6), 3–13.
- Matzneller, P., Blümel, K., Chmielewski, F.M. (2014). Models for the beginning of sour cherry blossom. *Internat. J. Biometeor.*, 58(5), 703–715.
- McMaster, G.S. & Wilhem, W.W. (1997). Growing degree days: one equation, two interpretations. *Agric. Forest Meteorol.*, 87, 291–300.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgoski, R., Zach, S., Züst, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biol.*, 12(10), 1969–1976.
- Miller, P., Lanier, W., Brandt, S. (2001). Using Growing Degree Days to Predict Plant Stages. Montana State University Extension Service, 9, p. MT00103 AG 7/2001.
- Nyéki J., Soltész M. (1996). Floral biology of temperate zone fruit trees and small fruits. *Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat*.
- Rocznik Statystyczny Rolnictwa (2014), <http://stat.gov.pl/>.
- Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., Peter, C. (2003). Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theor. Appl. Climatology*, 74(1–2), 41–51.
- Serba, T., Leśny, J., Juszczak, R., Olejnik, J. (2009). Wpływ zmian klimatycznych na rolnictwo w Europie, Projekt Adagio. *Acta Agrophys.*, 13(2), 487–496.
- Snyder, R.L., Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P. (1999). Determining degree-day thresholds from field observations. *Internat. J. Biometeor.*, 42(4), 177–182.
- Sparks, T.H., Jeffree, E.P., Jeffree, C.E. (2000). An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK. *Internat. J. Biometeor.*, 44(2), 82–87.
- Spinoni, J., Vogt, J., Barbosa, P. (2015). European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. *Internat. J. Climat.*, 36, 25–36.
- Von Storch, H., Zwiers, R.W. (2003). Statistical Analysis Climate Research, <http://www.cambridge.org/ca/academic/subjects/earth-and-environmental-science/climatology-and-climate-change/statistical-analysis-climate-research>.
- Wielgolaski, F.-E. (1999). Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. *Internat. J. Biometeor.*, 42(3), 158–168.
- Worthington, C., Hutchinson, C. (2005). Accumulated growing degree days as a model to determine key developmental stages and evaluate yield and quality of potato in Northeast Florida. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, 1, 98–101.
- Yang, S., Logan, J., Coffey, D.L. (1995). Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agric. Forest Meteorol.*, 74(1–2), 61–74.
- Zavalloni, C., Andresen, J.A., Flore, J.A. (2006). Phenological Models of Flower Bud Stages and Fruit Growth of "Montmorency" Sour Cherry Based on Growing Degree-day Accumulation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 131(5), 601–607.
- Żmudzka, E. (2004). Tło klimatyczne produkcji rolniczej w Polsce w drugiej połowie XX wieku. *Acta Agrophys.*, 3(2), 399–408.
- Żmudzka, E. (2012). Wieloletnie zmiany zasobów termicznych w okresie wegetacyjnym i aktywnego wzrostu roślin w Polsce. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 12(2), 377–389.
- Żmudzka, E., Dobrowolska, M. (2001). Termiczny okres wegetacyjny w Polsce – zróżnicowanie przestrzenne i zmienność czasowa. *Przegl. Nauk. Wydz. Inżyn. Kształt. Środ. SGGW*, 21, 75–80.

VARIABILITY OF THERMAL RESOURCES IN POLAND AS A RESULT OF ONGOING CLIMATE CHANGE

Abstract. The goal of the study was to assess the spatial differentiation and temporal variability of thermal resources in Poland in the period 1951–2010 in response to ongoing changes of thermal conditions in Europe. The research was based on daily temperature values. Thermal resources have been defined by Growing Degree Days index (GDD) calculated for three air temperature thresholds: 0°C, 5°C and 10°C. The detailed analysis of the spatial differentiation of thermal resources was followed by the long-term variability and trends evaluation. The analysis was conducted for the whole country and, because perennial crops are particularly vulnerable to the variability of thermal conditions, the largest fruit-growing regions in Poland in terms of growing area size and the size of fruit harvests (apples, plums, cherries). The obtained results confirm the increase of thermal resources in Poland and indicate the lengthening of the growing season as the main cause.

Key words: thermal resources, growing-degree days, Poland

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.06.2016

Do cytowań – For citation: Sulikowska, A., Wypych, A., Ustrnul, Z., Czekierda, D. (2016). Zmienność zasobów termicznych w Polsce w aspekcie obserwowanych zmian klimatu. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 15(2), 127–139.