

FALE UPAŁÓW LATEM 2015 ROKU I ICH UWARUNKOWANIA CYRKULACYJNE

AGNIESZKA SULIKOWSKA, AGNIESZKA WYPYCH¹, IZABELA WOSZCZEK²

¹Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej,
Uniwersytet Jagielloński
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

²Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa

Abstract: The main goal of the study was to characterize the thermal conditions during the hot summer of 2015 and to determine the circulation types with respect to the occurrence of extremely high air temperature and heat waves in Poland. The daily maximum (T_{MAX}) and minimum (T_{MIN}) air temperatures from 7 stations in Poland in 1951–2015 were used, as well as the Grosswetterlagen and Niedzwiedz circulation type classifications. A day with an extremely high air temperature (D_{TE}) was defined as having T_{MAX} above the 95th percentile and a heat wave as a sequence of at least 3 such days. The results prove that the summer of 2015 in Poland was unusually hot, especially in the south-western part of the country. The circulation types accompanying D_{TE} and the heat waves were mainly anticyclonic with an advection of tropical air masses from the southern sector.

Keywords: temperature extremes, atmospheric circulation, Grosswetterlagen

WPROWADZENIE

Od początku ubiegłego stulecia na kuli ziemskiej, zwłaszcza w strefie średnich i wysokich szerokości geograficznych półkuli północnej, obserwowany jest wzrost temperatury powietrza, szczególnie intensywny w ostatnich dziesięcioleciach XX w. i na początku wieku XXI (IPCC 2007). Ze zmianami rozkładu średniej rocznej temperatury powietrza wiążą się zmiany w rozkładzie jej wartości skrajnych, a co za tym idzie – częstości występowania zdarzeń o charakterze ekstremalnym, do jakich zaliczane są fale upałów (IPCC 2007). W ostatnich dziesięcioleciach obserwowany jest wzrost częstości występowania ekstremalnie wysokich wartości temperatury powietrza, a także czasu trwania i intensywności fal upałów w skali globalnej i hemisferycznej (Perkins i in. 2012) oraz w poszczególnych regionach na Ziemi, w tym w Europie (Della-Marta i in. 2007; Peterson i in. 2013) i w Polsce (Wibig i in. 2009; Bielec-Bąkowska, Piotrowicz 2013). W przyszłości prognozowana jest kontynuacja tych trendów (Meehl i Tebaldi 2004; Alexander i in. 2006; IPCC, 2007; Kyselý 2010), przez co zagadnienie to znalazło się w centrum zainteresowania meteorologów i klimatologów na całym świecie.

Utrzymujące się przez kilka dni ekstremalne warunki termiczne w postaci fal upałów mogą mieć katastrofalny wpływ na środowisko przyrodnicze oraz życie i gospodarkę człowieka (Peterson i in. 2013). Obrazem tego są np. upały, które wystąpiły w Europie Zachodniej w 2003 r. i w Europie Wschodniej w roku 2010. Były one przyczyną zwiększonej śmiertelności wśród ludzi i zwierząt (Twardosz 2009; García-Herrera i in. 2010; Barriopedro i in. 2011). Falom upałów w 2003 r. towarzyszyła dotkliwa dla gospodarki rolnej susza (García-Herrera i in. 2010), natomiast w 2010 r. niszczycielskie pożary i związane z nimi wzrost zanieczyszczenia powietrza (Barriopedro i in. 2011). Upalne sezony letnie w 2003 i 2010 r. znalazły swoje odzwierciedlenie w przebiegu temperatury powietrza w Polsce. Jednak jako niezwykle gorące i skutkujące zwiększoną śmiertelnością oraz stratami gospodarczymi zaznaczyły się inne sezony – lata: 1963, 1992, 1994, 2006 (Kuchcik, Degórski 2009; Wibig i in. 2009; Ustrnul, Wypych 2011; Kossowska--Cezak 2014; Tomczyk, Bednorz 2016). Na tle 120-lecia (1871–1990) lato 1992 r. w Warszawie zaznaczyło się jako najgorętsze i najsuchsze (Kossowska-Cezak 1993). Dwa lata później wystąpiło bogate w rekordy temperatury powietrza lato 1994 r. (Kuchcik 2006a), czego skutkiem była zwiększona o około 30% śmiertelność wśród mieszkańców Warszawy (Kuchcik 2001). Kolejny niezwykle gorący sezon to lato 2006 r., które cechowało się jedną z największych dotychczas częstością dni upalnych i fal upałów w środkowej Polsce (Wibig i in. 2009; Kossowska-Cezak, Skrzypczuk 2011). Dołączyć do nich może lato 2015 r. które, jak potwierdzają analizy NOAA (2016), należało do jednych z najcieplejszych w Europie Środkowej, a Rządowe Centrum Bezpieczeństwa alarmowało o współwystępującej z upałami suszy, zagrożeniu pożarowym w lasach i problemach energetycznych w Polsce (Informacja tygodniowa... 2015).

Cyrkulacja atmosferyczna jest najczęściej wymienianym w literaturze czynnikiem kształtującym warunki termiczne w strefie średnich i wysokich szerokości geograficznych (Kyselý 2008; Wibig i in. 2009; Ustrnul, Wypych 2011; Schneidereit i in. 2012). Jej rolę w występowaniu ekstremów termicznych, a także fal upałów w Polsce z wykorzystaniem różnych kalendarzy typów cyrkulacji badali Wibig i inni (2009), Ustrnul i Wypych (2011), Przybylak i inni (2012). Nieco inne podejście przedstawili Tomczyk i Bednorz (2016), którzy w celu określenia sytuacji barycznych sprzyjających falom upałów badali anomalie pola ciśnienia na poziomie morza oraz wysokości powierzchni izobarycznych. Inne opracowania wskazują na znaczenie sytuacji blokadowych w tworzeniu fal upałów, które były m.in. przyczyną tych w roku 2003 i 2010 (Black i in. 2004; Schneidereit 2012; Porębska, Zdunek 2013). Kyselý (2008) w swoich badaniach zwraca również uwagę na wpływ zmian w stałości typów cyrkulacji atmosferycznej na częstość i intensywność dodatnich anomalii termicznych w Europie.

Celem niniejszych badań jest ocena warunków termicznych w Polsce latem 2015 r. na tle 65-lecia (1951–2015) oraz roli, jaką pełni cyrkulacja atmosferyczna w kształtowaniu ekstremów termicznych w Polsce.

DANE I METODY

Podstawę opracowania stanowią dobowe wartości maksymalnej (T_{MAX}) i minimalnej (T_{MIN}) temperatury powietrza latem (czerwiec–sierpień) z lat 1951–2015 z 7 stacji meteorologicznych (Słubice, Poznań, Toruń, Legionowo, Legnica, Opole, Kraków), udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej-Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Analizy zróżnicowania przestrzennego wykonano na podstawie danych z około 100 posterunków meteorologicznych (stacji I–IV rzędu) względnie równomiernie rozmieszczonych na obszarze kraju. W kilku przypadkach, w miejscach o rzadkiej sieci pomiarowej, zdecydowano się uwzględnić także stacje dysponujące krótszymi, jednak co najmniej 30-letnimi seriami pomiarowymi. W celu określenia cyrkulacyjnych uwarunkowań dni z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) oraz fal upałów wykorzystano dwa kalendarze typów cyrkulacji atmosferycznej – mezoskalowy, mający szerokie zastosowanie w Europie Środkowej kalendarz Grosswetterlagen (GWL; Werner, Gerstengarbe 2010; <www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html>) oraz lokalny kalendarz cyrkulacji atmosfery dla Polski Południowej (TN; Niedźwiedź 2016).

W pierwszej kolejności skupiono się na wyborze kryterium wyznaczania fal upałów, które zaliczane są do zdarzeń o charakterze ekstremalnym i definiowane są jako okresy kolejnych dni z wyjątkowo wysoką temperaturą powietrza (IPCC 2012). Pomimo że są one tematem licznych opracowań na całym świecie, to dotychczas brak spójnej definicji i jednoznacznych metod ich wyznaczania (Robinson 2001; Stephenson i in. 2008; Kossowska-Cezak 2010; Perkins, Alexander 2013). W opracowaniach dotyczących obszaru Polski fala upałów często jest definiowana jako ciąg co najmniej 3 dni z maksymalną temperaturą powietrza powyżej 30°C w każdym dniu (Kossowska-Cezak 2010; Tomczyk 2014, Krzyżewska 2015). Inną coraz powszechniej stosowaną definicją fali upałów jest ciąg co najmniej 3 dni, w których temperatura powietrza przekracza próg wyznaczony przez wartości wybranych percentyli (najczęściej od 90. do 99.) (Meehl, Tebaldi 2004; Kuchcik, Degórski 2009; Kyselý 2010; Perkins i in. 2012; Perkins, Alexander 2013; Lhotka, Kyselý 2015; Tomczyk, Bednorz 2016). W niniejszym opracowaniu za dzień z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) uznano taki, w którym T_{MAX} była wyższa od wartości 95. percentyla, a fala upałów to ciąg przynajmniej trzech takich dni. Percentyle wyznaczono dla każdego dnia kalendarzowego metodą 15-dniowej średniej ruchomej wyśrodkowanej na danym dniu z całego okresu badań (1951–2015) (Perkins, Alexander 2013).

Na kolejnym etapie pracy dokonano analizy przestrzennej i czasowej maksymalnej temperatury powietrza (T_{MAX}) w Polsce w latach 1951–2015, na podstawie której wybrano miejscowości charakteryzujące się największym prawdopodobieństwem występowania jej ekstremalnie wysokich wartości (Słubice, Poznań, Toruń, Legionowo, Legnica, Opole, Kraków). W badaniach skupiono

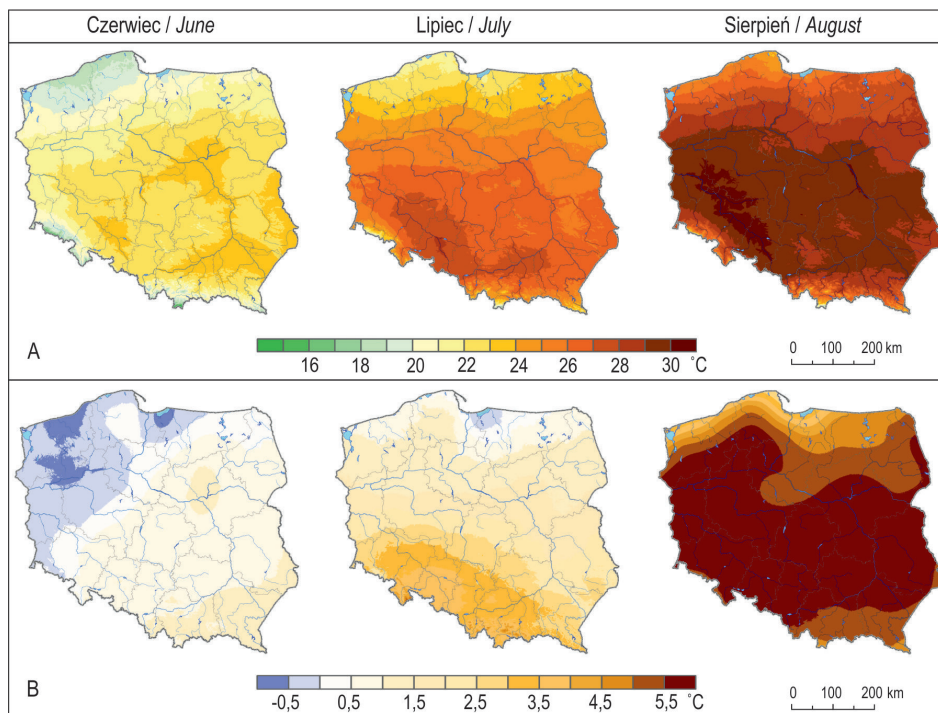
się szczególnie na rozkładzie przestrzennym i przebiegu T_{MAX} w lecie 2015 r. na tle całego okresu badań. Dla siedmiu wybranych stacji przeprowadzono także analizę czasową zmienności T_{MAX} , D_{TE} i fal upałów oraz związanych z nimi nocy tropikalnych zdefiniowanych jako doby z $T_{MIN} > 20^{\circ}C$ (Kossowska-Cezak 2014). Istotność statystyczną badanych trendów, które wyznaczono za pomocą regresji liniowej, oceniono testem t -Studenta na poziomie istotności 5% (Von Storch, Zwiers 2003). W celu określenia roli cyrkulacji atmosferycznej w pojawianiu się D_{TE} i fal upałów zbadano częstość oraz prawdopodobieństwo warunkowe ich występowania w typach cyrkulacji określonych według dwóch kalendarzy cyrkulacji atmosfery – Grosswetterlagen (GWL; analiza dla 7 stacji) oraz dla Polski Południowej (TN; analiza dla stacji w Krakowie). Wyniki analiz według tych kalendarzy przedstawiono tylko dla stacji w Krakowie, aby możliwe było ich porównanie.

WYNIKI

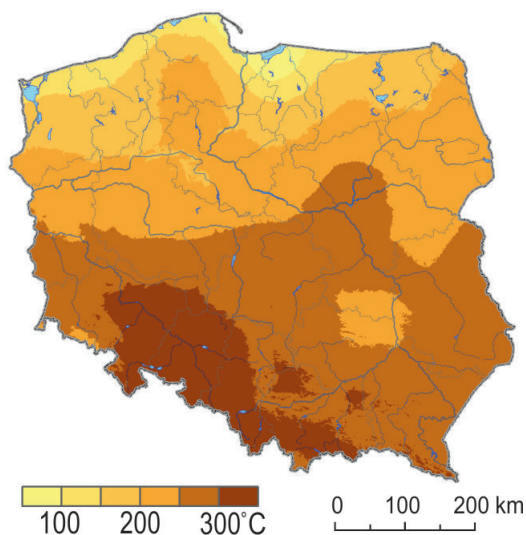
Ekstrema termiczne latem 2015 r.

Lato 2015 r. odznaczyło się zdecydowanie wyższą temperaturą powietrza niż średnia z wielolecia 1951–2015, co było ściśle związane z temperaturą lipca, a w szczególności sierpnia (ryc. 1). W czerwcu średnia T_{MAX} była zbliżona do normalnej na obszarze całego kraju. Nieco chłodniej niż zwykle było na północnym zachodzie, a cieplej na południowym wschodzie, jednak anomalia nie osiągnęła $1,5^{\circ}C$. W lipcu gorąco było na Nizinie Śląskiej i w Dolinie Górnej Wisły (tam anomalia przekroczyła $3,0^{\circ}C$), a szczególnie w okolicach Opolą, gdzie średnia miesięczna T_{MAX} wyniosła ponad $28,0^{\circ}C$. Niewątpliwie najgorętszym miesiącem lata 2015 r. był sierpień, podczas którego średnia T_{MAX} była niezwykle wysoka w całym kraju, a na znacznym obszarze anomalia osiągnęła ponad $5,5^{\circ}C$ (w Słubicach, Legnicy, Opolu i Legionowie nawet $6,0^{\circ}C$). W pasie ciągnącym się wzdłuż Doliny Górnej Odry średnia miesięczna T_{MAX} przekroczyła $30,0^{\circ}C$ (ryc. 1). W Opolu średnia T_{MAX} latem 2015 r. była najwyższa w całym badanym okresie. Na innych stacjach bardziej gorąco było jedynie w roku 1992, a w Poznaniu także w latach 2002, 2003 i 2006 (por. rozdz. *Zmienność wieloletnia ekstremów termicznych w Polsce*).

W celu scharakteryzowania warunków termicznych latem 2015 r. obliczono sumy T_{MAX} od czerwca do sierpnia. Podczas gdy średnio w Polsce wynoszą one $2039^{\circ}C$, w 2015 r. osiągnęły aż $2295^{\circ}C$. Najwyższe były w południowo-zachodniej części kraju (w Opolu ponad $2540^{\circ}C$), gdzie odchylenia od średniej wieloletniej przekroczyły $300^{\circ}C$ (ryc. 2). Najniższe sumy T_{MAX} tego lata wystąpiły w obszarach górskich (ok. $1300^{\circ}C$), ale i tam odchylenia od średniej były duże – około $280^{\circ}C$. W badanym 65-leciu wyższa suma T_{MAX} w skali kraju wystąpiła



Ryc. 1. Rozkład przestrzenny średniej T_{MAX} w miesiącach letnich 2015 r. (A) oraz odchyleń średniej T_{MAX} w miesiącach letnich 2015 r. od średniej 1951–2015 (B)
 Fig. 1. Mean T_{MAX} of the 2015 summer months (A) and deviations of the mean T_{MAX} of the 2015 summer months from the average 1951–2015 (B)



Ryc. 2. Odchylenia sum T_{MAX} latem w 2015 r. od średniej 1951–2015
 Fig. 2. Deviations of the T_{MAX} sums in the 2015 summer from the mean 1951–2015

jedynie w 1992 r., ale różnica była bardzo mała (8°C). Spośród rozpatrywanych stacji tylko w Opolu i Legnicy rekord ten został pobity w roku 2015.

Wartości T_{MAX} latem 2015 r. były wyższe od średniej wieloletniej od 66% dni w Toruniu i Poznaniu do 75% dni w Opolu (ryc. 3). W sierpniu na pięciu z rozpatrywanych stacji cieplej niż zwykle było podczas 100% dni, wyjątki stanowiły Opole i Kraków (1 i 5 dni poniżej średniej). Najwięcej D_{TE} wystąpiło na południu i południowym zachodzie Polski, a więc tam, gdzie średnia T_{MAX} osiągnęła najwyższe wartości: w Opolu było ich aż 30 (30% dni tego lata), w Krakowie 27, w Legnicy 23. W Poznaniu i Toruniu liczba D_{TE} nie przekroczyła 20 (17%) i była zbliżona do tej osiągniętej w latach 1994 i 2006. Na rozpatrywanych stacjach D_{TE} utworzyły od 2 do 4 fal upałów, a najdłuższa fala pojawiła się w Opolu i trwała 10 dni. W większości przypadków występowały one w przybliżeniu w tym samym czasie (tab. 1).

Pierwsza fala upałów rozpoczęła się na poszczególnych stacjach w dniach 3–4.07 i trwała od 3 do 5 dni (tab. 1). Objęła wszystkie stacje poza Legnicą i Opolem, jednak i tam było niezwykle gorąco i wystąpiły pojedyncze D_{TE} (ryc. 3). Temperatura maksymalna w czasie tej fali była najwyższa na północnym zachodzie Polski, w Słubicach wyniosła $36,4^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4A). W dniach 17–19.07 fale upałów wystąpiły w Legnicy i Opolu, a na innych stacjach zdarzyły się pojedyncze D_{TE} (tab. 1, ryc. 3). Były to jedyne stacje, na jakich odnotowano ponad $35,0^{\circ}\text{C}$ w tych dniach. Kolejny, trzeci okres z falami upałów rozpoczął się w pierwszej dekadzie sierpnia. Wystąpiły one na wszystkich rozpatrywanych stacjach z wyjątkiem Torunia, gdzie w tym czasie wystąpiły D_{TE} pojedyncze i w parach. W tym okresie najgoręcej było na południowym zachodzie i w środkowej Polsce (ryc. 4B). Fale upałów trwały od 3 dni w Poznaniu do aż 10 dni

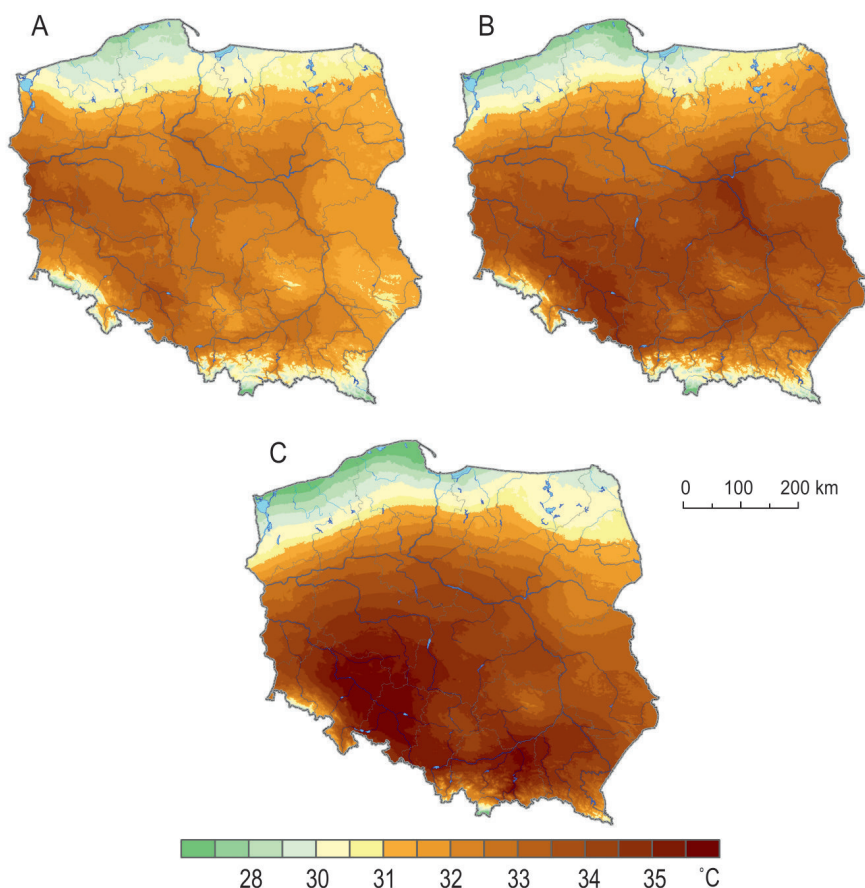
Tabela 1. Daty początku (P) i czas trwania (D; liczba dni) fal upałów oraz liczba nocy tropikalnych (NT) w lecie 2015 r. na siedmiu rozpatrywanych stacjach

Table 1. Dates of the beginning of heatwaves (P), their duration (D; days) and the number of tropical nights (NT) during the 2015 summer at seven stations

Stacja	Lipiec <i>July</i>		Sierpień <i>August</i>		Sierpień/Wrzesień <i>August/September</i>		NT
	P	D	P	D	P	D	
Słubice	3.07	5	6.08 10.08	3 3	30.08	3	3
Poznań	–	–	6.08	3	30.08	4	5
Toruń	4.07	3	–	–	30.08	3	3
Legionowo	4.07	3	4.08	6	30.08	4	3
Legnica	17.07	3	6.08	7	30.08	3	1
Opole	17.07	3	6.08	10	30.08	3	5
Kraków	4.07	4	7.08	7	30.08	3	8

w Legnicy. Ponieważ fale te objęły początek września, w wielu miejscach odnotowano nowy rekord T_{MAX} w tym miesiącu (Biuletyn..., 2015).

Pojawianiu się D_{TE} , zarówno pojedynczych, jak i tworzących fale upałów, towarzyszyły noce tropikalne ($T_{MIN} > 20^{\circ}C$), które wiążą się ze szczególnie dużym obciążeniem biotermicznym dla ludzi i zwierząt (Kuchcik, Degórski 2009; Twardosz 2009). Na rozpatrywanych stacjach wystąpiło ich od 1 w Legnicy do 8 w Krakowie (tab. 1). W Krakowie utworzyły one dwa nieprzerwane ciągi o długości 4 nocy (22–25.07 i 9–12.08), a w Poznaniu jeden ciąg trwający dwie noce (7–8.08), co mogło szczególnie spotęgować negatywny wpływ upałów na samopoczucie i zdrowie mieszkańców. Na pozostałych stacjach noce tropikalne występowały pojedynczo.



Ryc. 4. Rozkład przestrzenny średniej T_{MAX} podczas trzech okresów, w których wystąpiły fale upałów w 2015 r.: 3–7.07 (A); 4–15.08 (B); 30.08–1.09 (C)

Fig. 4. Mean T_{MAX} during three periods with heatwaves during the 2015 summer: 3–7.07 (A); 4–15.08 (B); 30.08–1.09 (C)

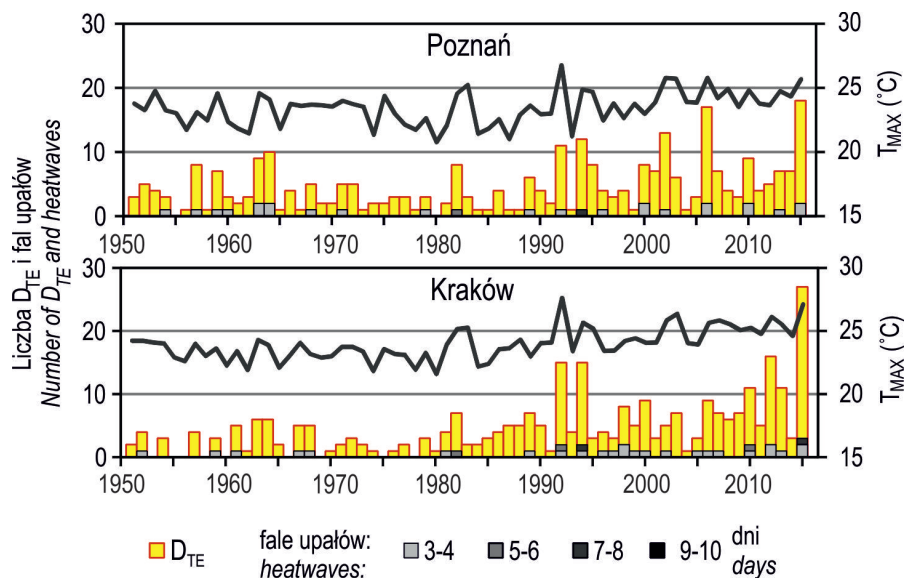
Zmienność wieloletnia ekstremów termicznych w Polsce

Średnia T_{MAX} lata w latach 1951–2015 na rozpatrywanych stacjach charakteryzowała się tendencją dodatnią, ale była ona różna w poszczególnych miesiącach. W czerwcu była istotna statystycznie jedynie w Krakowie ($0,2^{\circ}\text{C}/10$ lat), natomiast w lipcu i sierpniu na wszystkich 7 stacjach. W lipcu wzrost T_{MAX} wyniósł $0,4^{\circ}\text{C}/10$ lat w Legnicy, Poznaniu, Toruniu i Legionowie oraz $0,5^{\circ}\text{C}/10$ lat w Słubicach, Opolu i Krakowie. W sierpniu na każdej stacji osiągnął $0,4^{\circ}\text{C}/10$ lat, a jedynie w Słubicach $0,5^{\circ}\text{C}/10$ lat. Wzrostowi średniej T_{MAX} towarzyszył wzrost częstości występowania D_{TE} , który był bardziej wyraźny na południu i zachodzie kraju (m.in. Kraków) niż w jego środkowej części (m.in. Poznań) (ryc. 5). Latami cechującymi się wyjątkowo dużą liczbą D_{TE} były: 1992, 1994, 2006 i rekordowy rok 2015. W latach 1951–2015 na rozpatrywanych stacjach wystąpiło od 24 (Toruń) do 32 (Opole) fal upałów, które maksymalnie trwały 10 dni. Wyraźny wzrost częstości ich występowania jest widoczny po 1990 r., częściej pojawiały się też takie, które trwały dłużej (ryc. 5). Długimi falami upałów, trwającymi od 8 do 10 dni, na każdej z rozpatrywanych stacji cechował się rok 1994, natomiast stosunkowo dużą ich liczbą – rok 2015. Wyraźnym wzrostem, zwłaszcza po 1980 r., charakteryzowały się także sumy T_{MAX} od czerwca do sierpnia (średnio w skali kraju $27^{\circ}\text{C}/10$ lat, trend istotny statystycznie). Ich przebieg wieloletni na poszczególnych stacjach jest zbieżny z przebiegiem średniej T_{MAX} , a lata charakteryzujące się najwyższymi wartościami są tożsame z tymi, w których zaobserwowano największą liczbę D_{TE} .

Wraz ze wzrostem częstości D_{TE} i fal upałów po 1980 r. wzrosła częstość pojawiania się nocy tropikalnych, co jest najwyraźniej widoczne w Opolu i Krakowie (ryc. 6). Szczególnie dużo wystąpiło ich w latach 2010, 2012 i 2015. Ostatni z wymienionych okazał się być rekordowy pod tym względem. Noce tropikalne najczęściej pojawiały się w towarzystwie D_{TE} lub bezpośrednio po nich. Fale upałów miały umiarkowane znaczenie w ich pojawianiu się – od około 25% (w Legnicy i Krakowie) do 43% (w Słubicach) nocy tropikalnych wystąpiło podczas tych gorących okresów.

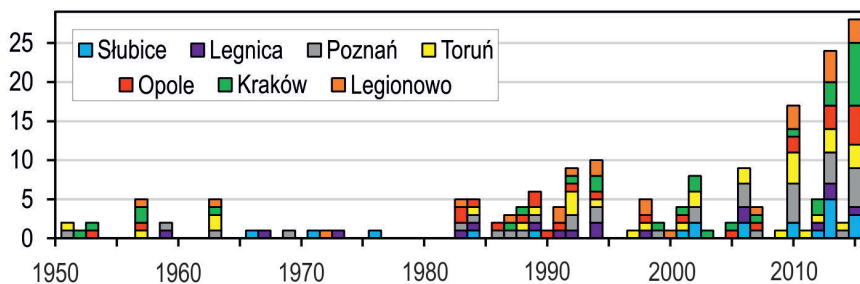
D_{TE} i fale upałów w Polsce a cyrkulacja atmosferyczna

Cyrkulacja atmosferyczna jest najczęściej wymienianym czynnikiem kształtującym warunki termiczne na danym obszarze, dlatego podjęto próbę oceny jej roli w pojawianiu się D_{TE} oraz fal upałów. D_{TE} występowały podczas wielu typów cyrkulacji wyróżnionych w obydwóch kalendarzach – Grosswetterlagen (GWL) i Niedźwiedzia (TN) (ryc. 7). Według kalendarza GWL łącznie ponad 50% z nich wystąpiło w trzech typach cyrkulacji: południowo-zachodnia cyklonalna (SWc), klin wyżowy nad Europą Środkową (BM), bruzda niżowa nad Europą Zachodnią (TrW). Na zbliżone typy cyrkulacji wskazuje kalendarz



Ryc. 5. Przebieg wieloletni średniej T_{MAX} latem, liczby dni z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) oraz fal upałów o określonej długości w Poznaniu i w Krakowie (1951–2015)

Fig. 5. Multiannual variability of summer mean T_{MAX} , the number of days with extremely high air temperature (D_{TE}) and heatwaves of particular duration in Poznan and Krakow (1951–2015)



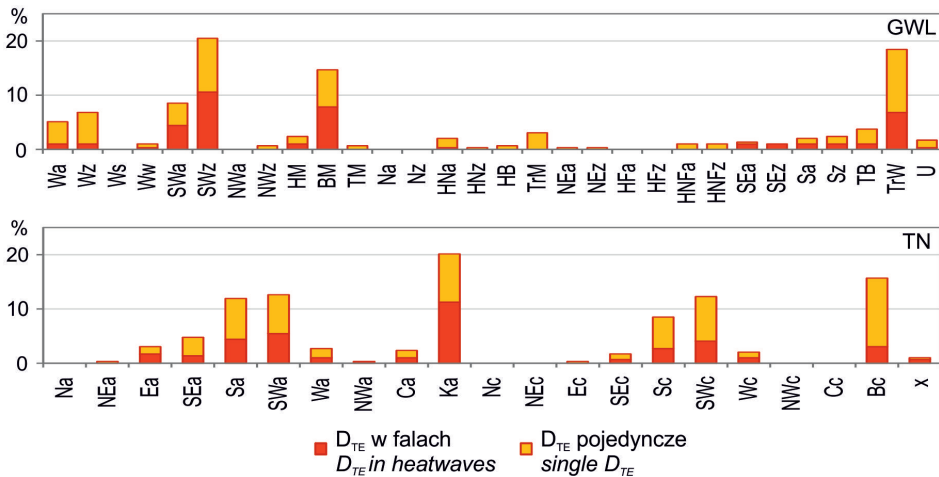
Ryc. 6. Przebieg wieloletni liczby nocy tropikalnych sumarycznie na siedmiu rozpatrywanych stacjach w Polsce (1951–2015)

Fig. 6. Multiannual variability of the number of tropical nights at seven station in Poland (1951–2015)

TN: klin wyżowy (Ka), bruzda niżowa (Bc), cyrkulacja południowo-zachodnia antycyklonalna (SWa) i cyklonalna (SWc) oraz południowa antycyklonalna (Sa) (łącznie ponad 70% D_{TE}). Spośród nich trudno wskazać takie, które szczególnie powodowałyby występowanie D_{TE} pojedynczych lub tworzących fale upałów.

Wyróżnione wyżej typy cyrkulacji atmosferycznej latem występują najczęściej, tak więc prawdopodobieństwo wystąpienia D_{TE} w ich towarzystwie jest duże. W celu określenia, jakie typy cyrkulacji szczególnie sprzyjają ich pojawianiu się, obliczono prawdopodobieństwo warunkowe. Informuje ono, jak często D_{TE} pojawiały się w poszczególnych typach cyrkulacji w zależności od częstości ich występowania (ryc. 8). W przypadku kalendarza GWL na znaczeniu zyskują typy związane z napływem mas powietrza z południa i południowego wschodu (cyrkulacja południowa i południowo-wschodnia cyklonalna i antycyklonalna; Sz, Sa, SEz, SEa). Ponieważ typy te występują niezwykle rzadko (sumarycznie ok. 100 przypadków w całym badanym materiale), prezentowane wartości należy interpretować z dużą ostrożnością. Rozkład prawdopodobieństwa występowania D_{TE} w typach cyrkulacji TN jest zbliżony do rozkładu częstości, z tą różnicą, że znacznie mniejszy jest udział typów klin wyżowy i bruzda niżowa (Ka, Bc) (ryc. 8).

Według analiz przeprowadzonych przy użyciu dwóch kalendarzy, różniących się przede wszystkim obszarem, dla którego są przeznaczone, występowaniu D_{TE} sprzyjają szczególnie sytuacje z napływem powietrza z sektora południowego (zarówno cyklonalne, jak i antycyklonalne). Powodem ich częstego pojawiania się podczas typów klin wyżowy i bruzda niżowa jest duża częstość występowania tych typów latem i występowanie innych sprzyjających uwarunkowań, takich jak bezchmurna i bezwietrzna pogoda.



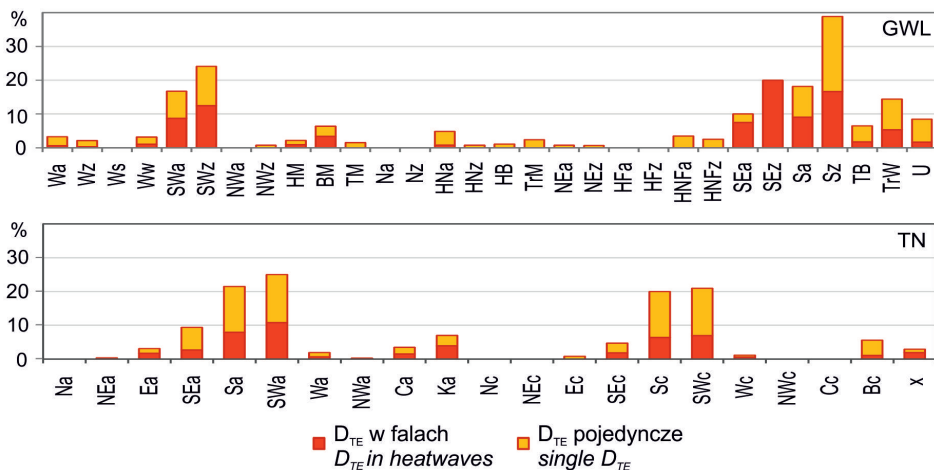
Ryc. 7. Częstość występowania dni z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) w poszczególnych typach cyrkulacji według kalendarzy Grosswetterlagen (GWL) i Niedzwiedzia (TN) w Krakowie (1951–2015)

Fig. 7. Frequency of days with extremely high air temperature (D_{TE}) in the particular circulation types of the Grosswetterlagen (GWL) and Niedzwiedź (TN) classifications in Krakow (1951–2015)

Zmienność typów cyrkulacji atmosferycznej GWL w trakcie fal upałów była mała – najczęściej przez cały czas ich trwania występował jeden typ. W innym razie były to zwykle typy zbliżone, np. wyż nad Europą Środkową (HM) i cyrkulacja zachodnia antycyklonalna (Wa). Nieco większą zmienność typów można zaobserwować w kalendarzu TN. Były one jednak zawsze pokrewne – różniły się bądź typem ośrodka barycznego przy tym samym kierunku napływu mas powietrza (np. cyrkulacja południowo-zachodnia antycyklonalna i cyklonalna; SWa, SWc), bądź ośrodek baryczny pozostawał ten sam, a niewielkim zmianom ulegał kierunek adwekcji (np. cyrkulacja południowa cyklonalna i południowo-wschodnia cyklonalna; Sc, SEc). Takie zmiany w typach cyrkulacji nie powodowały zauważalnych zmian w pogodzie. Wręcz przeciwnie – sprzyjały utrzymywaniu się wysokiej temperatury powietrza i trwaniu fal upałów.

Fale upałów 2015 r. w Polsce a cyrkulacja atmosferyczna

Jak wykazano, latem 2015 r. wystąpiły cztery odrębne gorące okresy, podczas których na poszczególnych stacjach wystąpiły fale upałów. Według GWL pierwszy z nich (trwający od 3 do 7.07) zdarzył się przy obecności wyżu nad Europą Środkową (HM) i cyrkulacji zachodniej antycyklonalnej (Wa). Kalendarz TN wskazuje na typy antycyklonalne z adwekcją powietrza z południa i południowego zachodu oraz klin wyżowy (Sa, SWa, Ka). Analiza map



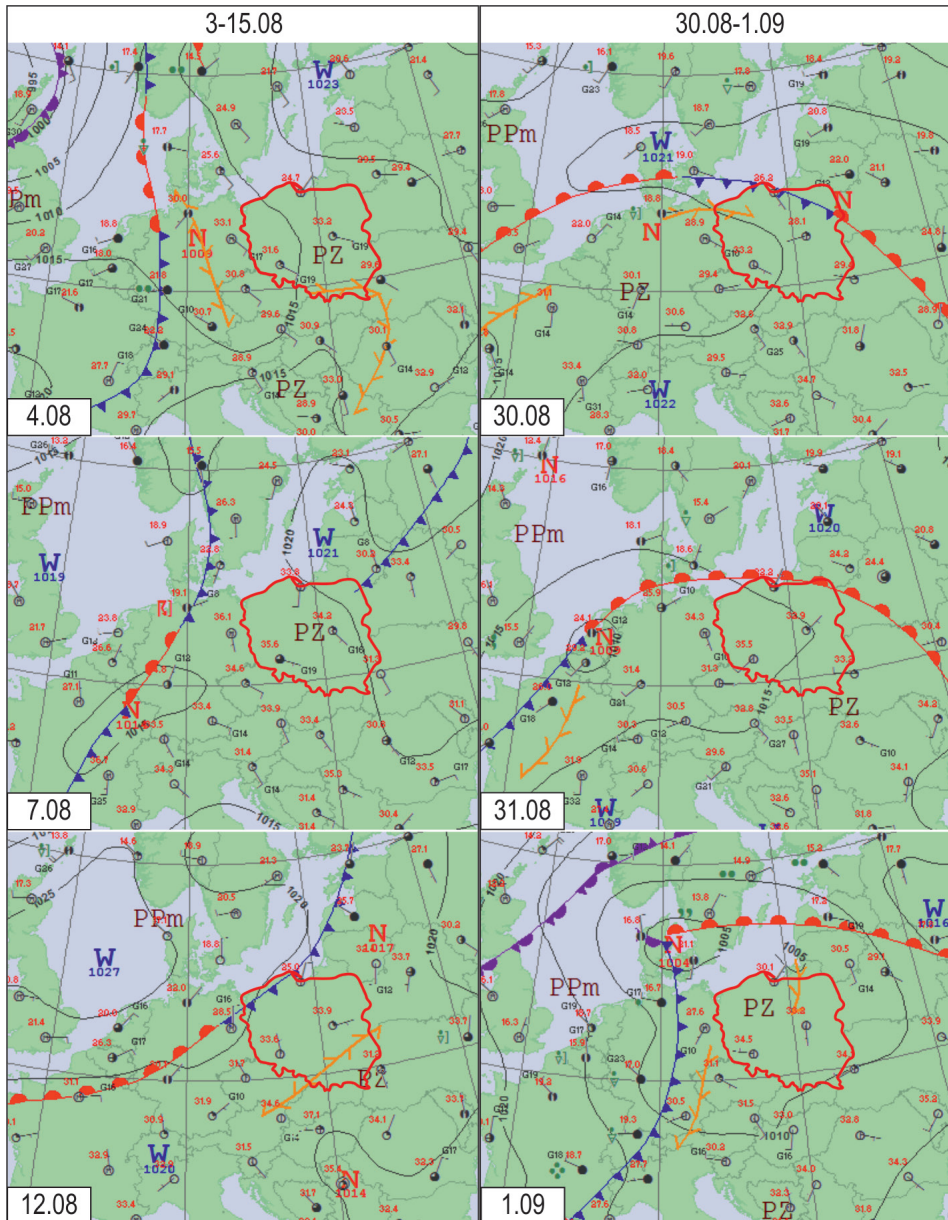
Ryc. 8. Prawdopodobieństwo warunkowe występowania dni z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) w poszczególnych typach cyrkulacji według kalendarzy Grosswetterlagen (GWL) i Niedzwiedzia (TN) w Krakowie (1951–2015)

Fig. 8. Conditional probability of days with extremely high air temperature (D_{TE}) in the particular circulation types of the Grosswetterlagen (GWL) and Niedzwiedź (TN) classifications in Krakow (1951–2015)

synoptycznych IMGW-PIB potwierdziła, że w tym okresie Polska znajdowała się pod wpływem ośrodka wysokiego ciśnienia, który przemieszczał się z południowego Bałtyku na wschód. Towarzyszył mu napływ zwrotnikowych mas powietrza z południa i południowego wschodu, co było przyczyną wystąpienia wysokich wartości T_{MAX} . Ich utrzymywaniu się przez kilka dni sprzyjała bezchmurna i bezwietrzna pogoda będąca konsekwencją sytuacji antycyklonalnej. W dniu 5.07 nad zachodnią część Polski dotarła linia zbieżności i ta część kraju znalazła się pod wpływem ośrodka niskiego ciśnienia. Wciąż jednak napływało powietrze zwrotnikowe z południa i południowego zachodu, dzięki czemu utrzymywała się wysoka T_{MAX} . Ten gorący okres skończył się 7.07, kiedy nad Polską przeszedł chłodny front atmosferyczny, za którym napłynęło powietrze polarno-morskie (NWa, cyrkulacja północno-zachodnia antycyklonalna).

Drugi okres z falami upałów w Legnicy i Opolu wystąpił w dniach 17–19.07. Wówczas nad Europą przez długi czas występowała cyrkulacja zachodnia antycyklonalna (Wa), a według TN typami kształtującymi pogodę w Polsce Południowej były klin wyżowy i bruzda niżowa (Ka, Bc), a więc typy występujące latem powszechnie. O upałach w Polsce zdecydował jednak nie wyż, a przemieszczający się nad jej obszarem ośrodek niskiego ciśnienia z rozwiniętym systemem frontów, w którego tzw. wycinku ciepła zalegały masy powietrza zwrotnikowego. Spadek temperatury powietrza nastąpił po przejściu chłodnego frontu atmosferycznego, za którym nad obszar Polski napłynęło powietrze polarne morskie.

Podczas trzeciego okresu z falami upałów (4–15.08), wystąpiły najwyższe wartości T_{MAX} tego lata. Według GWL w dniach 4–5.08, kiedy fala upałów rozpoczęła się w Legionowie, występował niż nad Wyspami Brytyjskimi (TB). W kolejnych trzech dniach, przy cyrkulacji południowo-zachodniej antycyklonalnej (SWa) i napływie powietrza zwrotnikowego, fale upałów rozpoczęły się na pozostałych stacjach. Trwały one w towarzystwie klina wyżowego nad Europą Środkową (BM), a następnie bruzdy niżowej nad Europą Zachodnią (TrW). Analiza map synoptycznych IMGW-PIB wskazuje, że ten upalny okres został zapoczątkowany napływem powietrza zwrotnikowego i oddziaływaniem rozległego wyżu z centrum nad Europą Wschodnią (ryc. 9). Niż nad Wyspami Brytyjskimi, na który wskazuje kalendarz GWL, nie miał więc znaczenia w kształtowaniu pogody w naszym kraju. W kolejnych dniach Polska była w zasięgu słabogradentowego obszaru podwyższonego ciśnienia i wciąż napływało powietrze zwrotnikowe, dzięki czemu upały utrzymywały się i możliwe było wystąpienie najwyższych wartości T_{MAX} tego lata (ryc. 9). Nieprzerwane trwanie takiej pogody zapewniły ośrodki wysokiego ciśnienia z centrum nad Rosją i południową Szwecją, pod działaniem których w kolejnych dniach znajdowała się przeważająca część kraju. Przyczyną wystąpienia na przełomie pierwszej i drugiej dekady sierpnia fal upałów i najwyższych wartości T_{MAX} tego lata była więc bezchmurna i bezwietrzna pogoda antycyklonalna i nieustający napływ



Ryc. 9. Sytuacja synoptyczna w Europie Środkowej w wybranych dniach podczas dwóch okresów, w których wystąpiły fale upałów latem 2015 r. w Polsce <www.pogodynka.pl/polska/mapa_synoptyczna>

Fig. 9. Synoptic conditions over Central Europe in selected days during two periods with the 2015 summer heatwaves in Poland <www.pogodynka.pl/polska/mapa_synoptyczna>

gorącego powietrza zwrotnikowego. Potwierdzają to typy cyrkulacji wyróżnione w kalendarzu TN, według którego w omawianych dniach wystąpiła cyrkulacja: południowo-wschodnia i wschodnia antycyklonalna, klin wyżowy, południowa antycyklonalna i południowo-wschodnia cyklonalna (SEa, Ea, Ka, Sa, SEc).

Ostatni okres z falami upałów, który wystąpił na przełomie sierpnia i września, jak wskazuje GWL, był spowodowany utrzymującą się cyrkulacją południowo-zachodnią antycyklonalną (SWa). Według TN typy cyrkulacji zmieniały się od południowej antycyklonalnej przez południowo-zachodnią antycyklonalną i cyklonalną do północno-zachodniej cyklonalnej (Sa, SWa, SWc, NWC). Oba kalendarze wskazują na adwekcję z południowego zachodu oraz obecność wyżu barycznego. Analiza map synoptycznych IMGW-PIB wykazała jednak, że wystąpienie upałów w tych dniach było spowodowane przez płytki układ niskiego ciśnienia, którego centrum przemieszczało się znad Holandii nad południową Szwecję i Norwegię (ryc. 9). Podobnie jak 17.07 fale upałów rozpoczęły się wraz z przejściem nad obszarem Polski ciepłego frontu atmosferycznego, za którym z południowego zachodu napływało gorące powietrze zwrotnikowe. W tej upalnej masie powietrza Polska pozostała do 2.09, kiedy nad obszarem kraju przeszedł chłodny front atmosferyczny, za którym napłynęło chłodniejsze powietrze polarno-morskie.

DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Obserwowanemu wzrostowi maksymalnej temperatury powietrza (T_{MAX}) w miesiącach letnich w Polsce towarzyszył wzrost częstości występowania ekstremalnych zdarzeń termicznych, takich jak dni z ekstremalnie wysoką temperaturą powietrza (D_{TE}) i fale upałów, a także często towarzyszących im nocy tropikalnych. Tendencje te są zbieżne z wynikami badań innych autorów, prowadzonych zarówno w skali globalnej (Perkins i in. 2012), w Europie (Kyselý 2010; Tomczyk, Bednorz 2016), jak i w Polsce (Kuchcik 2006a; Wibig i in. 2009; Bielec-Bąkowska, Piotrowicz 2013). Dotychczas jako niezwykle upalne sezony letnie w Polsce zapisały się te w latach: 1963, 1992, 1994 i 2006 (Kossowska-Cezak, Skrzypczuk 2011; Bielec-Bąkowska, Piotrowicz 2013). Jak wykazały wyniki przeprowadzonych badań, lato 2015 r. dorównało im z punktu widzenia odchylenia średniej T_{MAX} od średniej wieloletniej, a pod względem innych charakterystyk było rekordowe w badanym wieloleciu. Lato 2015 r. zaznaczyło się jako wyjątkowo upalne w całej Polsce, a najwyższe wartości średniej T_{MAX} wystąpiły na południowym zachodzie kraju. W Opolu lato 2015 r. było najgorętsze w całym badanym okresie, na pozostałych sześciu stacjach zajęło drugie miejsce po roku 1992 (jedynie w Poznaniu średnia T_{MAX} była zbliżona do tej osiągniętej w latach 2002, 2003 i 2006). Na wszystkich uwzględnionych stacjach, a zwłaszcza w południowej i południowo-zachodniej Polsce, tego lata

wystąpiła największa liczba D_{TE} w całym rozpatrywanym okresie – w Opolu aż 30, w Krakowie 27. Biorąc pod uwagę sumaryczną dla 7 stacji liczbę fal upałów oraz, stanowiących szczególne obciążenie dla organizmów żywych, nocy tropikalnych, okazuje się, że i pod tym względem rok ten był rekordowy w badanym wieloleciu. Pomimo że w większości przypadków T_{MAX} latem 2015 r. nie przekraczała absolutnych maksimów to duża częstość D_{TE} i fal upałów spowodowała, iż zapisało się ono jako jedno z najbardziej upalnych w minionym 65-leciu.

Analizy przeprowadzone przy użyciu dwóch różnych kalendarzy typów cyrkulacji atmosferycznej – mezoskalowego Grosswetterlagen (GWL) i lokalnego kalendarza Niedźwiedzia (TN) – wykazały, że ekstrema termiczne w Polsce występują najczęściej podczas sytuacji synoptycznych z adwekcją zwrotnikowych mas powietrza z sektora południowego (zarówno cyklonalnych, jak i antycyklonalnych), a także w obecności klina wyżowego lub bruzdy niżowej. Sytuacje te występują w sezonie letnim powszechnie, tak więc prawdopodobieństwo pojawienia się podczas nich D_{TE} i fal upałów jest stosunkowo duże. Wyniki te potwierdzają analizy przeprowadzone przez Wibig i innych (2009), którzy w celu określenia wpływu cyrkulacji na występowanie fal upałów zastosowali kalendarz Piotrowskiego, a także te wykonane przez Ustrnula i Wypych (2011), którzy ocenili rolę cyrkulacji atmosferycznej w występowaniu ekstremów termicznych w Polsce, stosując sześć różnych kalendarzy. Wymienieni autorzy zwracają uwagę na szczególne znaczenie typów antycyklonalnych z adwekcją zwrotnikowych mas powietrza, powodujących długotrwałe występowanie pogody bezchmurnej i bezwietrznej, sprzyjającej utrzymywaniu się upałów. Jak wykazała szczegółowa analiza typów cyrkulacji atmosferycznej podczas fal upałów w 2015 r., wystąpiły one w zdecydowanej większości w typach cyrkulacji, które najczęściej towarzyszą takim zdarzeniom w Polsce (cyrkulacja południowo-zachodnia cyklonalna i antycyklonalna, klin wyżowy i bruzda niżowa). Kluczowe znaczenie w kształtowaniu temperatury powietrza miały napływ gorących mas powietrza zwrotnikowego i duża częstość sytuacji antycyklonalnych, które sprzyjały podtrzymywaniu ekstremalnie wysokich wartości T_{MAX} przez długi czas.

Badania europejskie wskazują na dużą wrażliwość społeczeństw Europy Zachodniej i Środkowej na zdarzenia termiczne o charakterze ekstremalnym, do jakich należą D_{TE} i fale upałów, a szczególnie podatni na ich negatywne skutki są mieszkańcy dużych miast (Twardosz 2009; García-Herrera i in. 2010). Ze względu na obserwowany wzrost częstości występowania takich zdarzeń konieczne są dalsze badania w celu wyjaśniania ich przyczyn. Ich przyczyn należy upatrywać przede wszystkim w zmienności cyrkulacji atmosferycznej, ale także w lokalnych uwarunkowaniach geograficznych i środowiskowych modyfikujących jej wpływ na temperaturę powietrza.

LITERATURA

- Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., García-Herrera R., 2011: *The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe*, Science, 332, 6026, 220–224.
- Bielec-Bąkowska Z., Piotrowicz K., 2013: *Temperatury ekstremalne w Polsce w latach 1951–2006*, Prace Geograficzne, 132, 59–98.
- Biuletyn monitoringu klimatu Polski, Sierpień 2015, 2015: IMGW-PIB, ISSN 2391-6362.
- Biuletyn monitoringu klimatu Polski, Wrzesień 2015, 2015: IMGW-PIB, ISSN 2391-6362.
- Black E., Blackburn M., Harrison G., Hoskins B., Methven J., 2004: *Factors contributing to the summer 2003 European heatwave*, Weather, 59, 8, 217–223.
- Della-Marta P.M., Haylock M.R., Luterbacher J., Wanner H., 2007: *Doubled length of western European summer heat waves since 1880*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112, D15, doi:10.1029/2007JD008510.
- García-Herrera R., Díaz J., Trigo R.M., Luterbacher J., Fischer E.M., 2010: *A review of the European summer heat wave of 2003*, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 40, 4, 267–306.
- Informacja tygodniowa, Zagrożenia – Skutki – Ocena, 3 sierpnia–9 sierpnia 2015, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, 2015: <<http://rcb.gov.pl/wp-content/uploads/RCB-Informacja-o-stwierdzonych-i-prognozowanych-zagro%C5%BCeniach-10-08-2015.pdf>> [dostęp: 10.06.2016].
- Informacja tygodniowa, Zagrożenia – Skutki – Ocena, 17 sierpnia–23 sierpnia 2015, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, 2015: <<http://rcb.gov.pl/wp-content/uploads/RCB-Informacja-o-stwierdzonych-i-prognozowanych-zagro%C5%BCeniach-24-08-2015-2.pdf>> [dostęp: 10.06.2016].
- IPCC, 2007: *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2012: *Glossary of terms*, [w:] C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (eds), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 555–564.
- Kossowska-Cezak U., 1993: *Lato roku 1992 w Polsce na tle sezonów letnich ostatnich 120 lat*, Przegląd Geofizyczny, 1, 67–74.
- Kossowska-Cezak U., 2010: *Fale upałów i okresy upalne – metody ich wyróżniania i wyniki zastosowania*, Prace Geograficzne, 23, 143–149.
- Kossowska-Cezak U., 2014: *Zmiany wieloletnie liczby termicznych dni charakterystycznych w Warszawie (1951–2010)*, Prace Geograficzne, 136, 9–30.
- Kossowska-Cezak U., Skrzypczuk J., 2011: *Pogoda upalna w Warszawie (1947–2010)*, Prace i Studia Geograficzne, 47, 139–146.
- Krzyżewska A., 2015: *Szczególnie uciążliwe fale upałów w Lublinie*, Przegląd Geofizyczny, 3–4, 207–215.
- Kuchcik M., 2001: *Mortality in Warsaw: is there any connection with weather and air pollution?*, Geographia Polonica, 74, 1, 29–45.
- Kuchcik M., 2006a: *Fale upałów w Polsce w latach 1993–2002*, Przegląd Geograficzny, Polska Akademia Nauk, 3, 78, 397–412.
- Kuchcik M., 2006b: *Defining heat waves-different approaches*, Geographia Polonica, 79, 2, 47–64.
- Kuchcik M., Degórski M., 2009: *Heat-and cold-related mortality in the north-east of Poland as an example of the socio-economic effects of extreme hydrometeorological events in the Polish Lowland*, Geographia Polonica, 82, 1, 69–78.
- Kyselý J., 2008: *Influence of the persistence of circulation patterns on warm and cold temperature*

- anomalies in Europe: analysis over the 20th century*, *Global and Planetary Change*, 62, 1, 147–163.
- Kyselý J., 2010: *Recent severe heat waves in central Europe: how to view them in a long-term prospect?*, *International Journal of Climatology*, 30, 1, 89–109.
- Lhotka O., Kyselý J., 2015: *Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe*, *International Journal of Climatology*, 35, 7, 1232–1244.
- Meehl G.A., Tebaldi C., 2004: *More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century*, *Science*, 305, 5686, 994–997.
- Niedzwiedz T., 2016: *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Doliny Górnej Wisły (1873.09–2015.12)*, dostępny w: Zakład Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Będzinska 60, 41-200 Sosnowiec, Polska; tadeusz.niedzwiedz@us.edu.pl; <http://klimat.wnoz.us.edu.pl> [dostęp: 10.06.2016 r.].
- NOAA National Centers for Environmental Information, 2016: *State of the Climate: Global Analysis for Annual 2015*, <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513> [dostęp: 11.06.2016].
- Perkins S.E., Alexander L.V., 2013: *On the measurement of heat waves*, *Journal of Climate*, 26, 13, 4500–4517.
- Perkins S.E., Alexander L.V., Nairn J.R., 2012: *Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells*, *Geophysical Research Letters*, 39, 20, doi: 10.1029/2012GL053361.
- Peterson T.C., Heim Jr R.R., Hirsch R., Kaiser D.P., Brooks H., Diffenbaugh N.S., Dole M.D., Giovannetone J.P., Gurguis K., Karl T.R., Katz R.W., Kunkel K., Enmaier D.L., McCabe G.J., Paciorek C.J., Ryberg K.R., Schubert S., Silva V.B.S., Stewart B.C., Vecchia A.V., Villarini G., Vose R.S., Walsh J., Wehner M., Wolock D., Wolter K., Woodhouse C.A., Wuebbles D., 2013: *Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: state of knowledge*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 6, 821–834.
- Porębska M., Zdunek M., 2013: *Analysis of extreme temperature events in Central Europe related to high pressure blocking situations in 2001–2011*, *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 5, 533–540.
- Przybylak R., Maszewski R., Pospieszńska A., 2012: *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na ekstremalne wartości temperatury powietrza w regionie Bydgosko-Toruńskim w latach 1881–2005*, [w:] Z. Bielec-Bąkowska, E. Łupikasza, A. Widawski (red.), *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, 247–261.
- Robinson P.J., 2001: *On the definition of a heat wave*, *Journal of Applied Meteorology*, 40, 4, 762–775.
- Schneiderreit A., Schubert S., Vargin P., Lunkeit F., Zhu X., Peters D.H., Fraedrich K., 2012: *Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: summer 2010*, *Monthly Weather Review*, 140, 9, 2967–2981.
- Stephenson D.B., Diaz H.F., Murnane R.J., 2008: *Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events*, 348, Cambridge University Press, New York.
- Tomczyk A.M., 2014: *Cyrkulacyjne uwarunkowania fal upałów w Poznaniu*, *Przegląd Geograficzny*, 86, 1, 41–52.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2016: *Heat waves in Central Europe and their circulation conditions*, *International Journal of Climatology*, 36, 770–782.
- Twardosz R., 2009: *Fale niezwykłych upałów w Europie na początku XXI wieku*, *Przegląd Geofizyczny*, 3–4, 193–204.
- Ustrnul Z., Wypych A., 2011: *Ekstremalne wartości temperatury powietrza w Polsce w świetle różnych klasyfikacji typów cyrkulacji*, *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 87–95.
- Von Storch H., Zwiers R.W., 2003: *Statistical Analysis Climate Research*, <http://www.cam-

- bridge.org/ca/academic/subjects/earth-and-environmental-science/climatology-and-climate-change/statistical-analysis-climate-research> [dostęp: 10.06.2016 r.].
- Werner P.C., Gerstengarbe F.-W., 2010: *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, Potsdam, Offenbach*, <www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html> [dostęp: 10.06.2016 r.].
- Wibig J., Podstawczyńska A., Rzepa M., Piotrowski R., 2009: *Heatwaves in Poland-frequency, trends and relations to atmospheric circulation*, *Geographia Polonica*, 82, 1, 33–46.