

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 170, 2023, 47–82

doi: 10.4467/20833113PG.23.004.17492

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

## EKSTREMA CIEPŁA W ZMIENIAJĄCYM SIĘ KLIMACIE EUROPY: DEFINICJE, PRZYCZYNY, TENDENCJE, SKUTKI

*Agnieszka Sulikowska*, *Agnieszka Wypych*

### Hot and warm extremes in Europe's changing climate: definitions, causes, trends, impacts

*Abstract:* Hot or warm extremes are days with exceptionally high air temperatures in a given place and/or season. They may have significant impacts on human health and life, the natural environment, and the economy. The global rise in near-surface air temperatures translates into increases in the frequency, intensity, and duration of such events, which contributes to the intensive development of research on them. This review aims to summarize the state of knowledge of hot and warm extremes in Europe, with a special focus on their definitions, physical drivers and impacts, long-term variability and trends. The study demonstrates that research on temperature extremes is making remarkable progress, but there are still issues to be explored to understand these complex events.

*Keywords:* heat waves, warm spells, air temperature, atmospheric circulation, climate change

*Zarys treści:* Ekstrema ciepła to dni z wyjątkowo wysoką temperaturą powietrza w danym miejscu i/lub porze roku. Często wiążą się one z negatywnymi konsekwencjami dla zdrowia i życia człowieka, a także środowiska przyrodniczego, rolnictwa i gospodarki. Globalnemu ociepleniu klimatu towarzyszy wzrost częstości ekstremów ciepła, co przyczynia się do intensywnego rozwoju badań na ich temat. W tym opracowaniu podjęto próbę podsumowania stanu wiedzy na temat ekstremów ciepła w Europie, ze szczególnym uwzględnieniem metod ich

identyfikacji, rozpoznania ich przyczyn i następstw oraz oceny ich zmienności wieloletniej i trendów. Zestawienie wyboru prac na temat tych złożonych zdarzeń może pomóc w zidentyfikowaniu zagadnień, które wciąż wymagają zgłębienia i wyjaśnienia, tym samym stanowiąc wstęp do dalszych rozważań.

*Słowa kluczowe:* fale upałów, dni ciepłe, temperatura powietrza, cyrkulacja atmosferyczna, zmiany klimatu

## Wprowadzenie

Ekstrema pogodowe to zdarzenia związane ze skrajnymi wartościami elementów meteorologicznych, występujące rzadko w danym miejscu i/lub porze roku. Często są one niebezpieczne dla zdrowia ludzi i zwierząt oraz mają negatywne konsekwencje środowiskowe i gospodarcze. Ocenia się, że podatność społeczeństw na skutki ekstremów pogodowych rośnie, przez co są one uznawane za jedno z najpoważniejszych zagrożeń naturalnych (Stephenson 2008; IPCC 2021). Wśród nich często wymienia się zdarzenia związane z wyjątkowo wysoką temperaturą powietrza. Zalicza się do nich zdarzenia ekstremalne zarówno bezwzględne, a więc dni z absolutnie najwyższą temperaturą powietrza, jak i względne, obejmujące dni, w których temperatura powietrza jest wyjątkowo wysoka w danym miejscu i/lub porze roku (Coelho i in. 2008; Stephenson 2008). Tragiczne skutki upałów z początku bieżącego stulecia (Kovats, Hajat 2008; Barriopedro i in. 2011) oraz liczne doniesienia o ich rosnącej częstości występowania w wielu regionach Ziemi (Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020; IPCC 2021) przyczyniły się do intensywnego rozwoju badań na ten temat.

W pracach podejmujących tematykę ekstremów ciepła można wyróżnić kilka wiodących podejść badawczych. Najliczniejszy zbiór prac zdają się tworzyć analizy zmienności wieloletniej i tendencji zmian tych zdarzeń, które są rozpatrywane w skalach od lokalnej po globalną. Dużą grupę badań stanowią te szukające przyczyn ekstremów, uwzględniające zwłaszcza ich tło cyrkulacyjne, choć coraz częściej zgłębiające także inne, dodatkowe uwarunkowania ich występowania. Kolejna grupa prac podejmuje tematykę skutków, skupiając się przede wszystkim na wpływie upałów na zdrowie człowieka, ale coraz częściej rozważając także środowiskowe i gospodarcze następstwa nadmiernego ciepła nie tylko latem, ale i w innych porach roku. Wyróżnić można także opracowania rozpatrujące projekcje klimatyczne, zgodnie wskazujące na duże prawdopodobieństwo wzrostu częstości ekstremów ciepła w przyszłości. Tak więc badacze rozpatrują ekstrema ciepła z wielu perspektyw, a co za tym idzie, z użyciem różnorodnych podejść metodycznych. Mnogość stosowanych metod prowadzi do wyróżnienia ostatniej, stosunkowo niewielkiej grupy opracowań, skupiających się na porównaniu metod identyfikacji ekstremów oraz projektowaniu syntetycznych wskaźników służących ich ocenie.

Celem tej pracy jest podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy o ekstremach ciepła w Europie, ze szczególnym uwzględnieniem problemu ich definiowania i rozpoznania ich atrybutów, określenia ich przyczyn i następstw, a także oceny współczesnych tendencji zmian. Zestawienie i usystematyzowanie wielowątkowych i wielowymiarowych wyników badań na temat ekstremów ciepła pomoże wskazać luki w wiedzy, których wypełnienie doprowadziłoby do pełniejszego zrozumienia tych złożonych zdarzeń. W pracy uwzględniono publikacje z całego świata, skupiając się jednak przede wszystkim na analizach obejmujących Europę.

## Definicje, metody identyfikacji i charakterystyki ekstremów ciepła

### Ekstremalny, czyli jaki?

W *Słowniku meteorologicznym* (2003) pojęcie *ekstrema* jest wyjaśnione jako „wartości skrajne – maksymalne lub minimalne – określonego elementu meteorologicznego”, czyli na przykład temperatury powietrza. Dodatkowo wyróżnione są *absolutne ekstrema*, czyli „największe lub najmniejsze (skrajne) wartości elementu meteorologicznego, zmierzone kiedykolwiek w danym miejscu lub na danym obszarze”. Do takiego znaczenia *ekstremum* ogranicza się także definicja Amerykańskiego Towarzystwa Meteorologicznego (American Meteorological Society, AMS 2023). Z kolei Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ekstremalne zdarzenie pogodowe definiuje jako wartość elementu klimatu powyżej lub poniżej progę, cechującego się niskim prawdopodobieństwem wystąpienia w danym miejscu i czasie (IPCC 2012, 2021). Taką też definicję przyjmuje za IPCC Światowa Organizacja Meteorologiczna (World Meteorological Organization; WMO 2023).

W znakomitej większości współczesnych badań na temat ekstremów ciepła przyjmuje się, w zgodzie z IPCC i WMO, że są to dni, w których temperatura powietrza przekracza założoną wartość progową. Takie podejście umożliwia określenie atrybutów tych zdarzeń, to jest intensywności i zasięgu oddziaływania, a także badanie częstości ich występowania i ocenę trendów, co daje niezwykle cenną informację w dobie zmieniającego się klimatu (Stephenson 2008). Ponadto często rozpatrywane są ciągi takich dni, nazywane falami ciepła lub falami upałów (w zależności od pory roku i obszaru geograficznego), a analiza zostaje wzbogacona o kolejny atrybut ekstremów, jakim jest ich czas trwania.

## Bezwzględny próg temperatury powietrza

Sposób definiowania progu, powyżej którego temperatura powietrza jest uznana za ekstremalnie wysoką, podlega szerokiej dyskusji w literaturze klimatologicznej (Perkins 2015; Piticar i in. 2019). Latem ekstrema ciepła w większości regionów Ziemi nazywane są dniami gorącymi lub upalnymi (ang. *hot days*, *heat events*), a ich ciągi to fale upałów (ang. *heatwaves*). Według *Słownika meteorologicznego* (2003) dzień upalny to taki, w którym maksymalna temperatura powietrza jest wyższa od 30°C, a fala upałów to „kilkudniowy lub kilkutygodniowy okres, w którym maksymalna temperatura powietrza przekracza 30°C, przedzielony krótkimi okresami chłodniejszymi”. Jest to przykład definicji stosującej arbitralnie wybraną, stałą wartość temperatury powietrza – w istocie, próg 30°C często służy do identyfikacji upałów w Europie Środkowej (Kyselý 2002; Holtanová i in. 2014; Wibig 2017, Hoy i in. 2017, 2020; Krzyżewska, Dyer 2019; Tomczyk, Bednorz 2019). Podejście takie cechuje się prostotą, ale stałe progi temperatury powietrza są użyteczne tylko w określonych regionach i czasie; ich wartości zmieniają się z szerokością geograficzną i warunkami klimatycznymi oraz w zależności od pory roku. Pozwalają one uchwycić lokalne i sezonowe zmiany klimatu, ale utrudniają porównania między regionami odmiennymi pod względem klimatycznym. I tak na przykład stały próg stosowany do identyfikacji upałów w Wielkiej Brytanii to wartość między 25,0°C a 32,0°C – w zależności od regionu geograficznego i opracowania (McCarthy i in. 2019; Beckett, Sanderson 2021).

Zarazem jednak wybór stałego progu może być umotywowany potencjalnymi skutkami jego przekroczenia, gdy znana jest reakcja jakiegoś układu na wysoką temperaturę powietrza. Podejście takie znajduje zastosowanie w badaniach interdyscyplinarnych, w tym biometeorologicznych, w których na przykład poszukuje się wartości temperatury powietrza grożącej istotnym wzrostem śmiertelności w danym regionie. Wartości te są odmienne w różnych obszarach geograficznych ze względu na aklimatyzację do warunków klimatycznych. Na przykład w hiszpańskiej Sewilli obserwuje się wzrost zachorowalności i śmiertelności, gdy temperatura powietrza przekracza 41,0°C, a w Paryżu poziom śmiertelności wzrasta, kiedy temperatura powietrza w ciągu dnia przekroczy 31,0°C i nie spadnie poniżej 21,0°C nocą (Díaz i in. 2002; Pascal i in. 2006, 2013). W kontekście obciążenia organizmu upalną pogodą biometeorolodzy często oprócz temperatury powietrza uwzględniają także jego wilgotność. I tutaj wyznaczono próg temperatury termometru zwilżonego (ang. *wet bulb temperature*) wynoszący 35,0°C, który stanowi biologiczną granicę tolerancji człowieka i innych ssaków na upalną i parną pogodę (Sherwood, Huber 2010; Matzarakis, Nastos 2011; Coffel i in. 2018). Warto zauważyć, że w takim właśnie tonie falę upałów (ang. *heat wave*, *hot wave*, *warm wave*) definiuje AMS, rozumiejąc ją jako okres niezwykle gorącej i parnej pogody wiążącej się z odczuciem dyskomfortu.

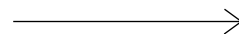
W definicji zaznaczono, że kryteria komfortu różnią się w zależności od obszaru geograficznego, ale nie podano sposobu ich określania (AMS 2023).

## Względny próg temperatury powietrza

Ograniczenia stałych progów temperatury powietrza w identyfikacji ekstremów ciepła są przyczyną poszukiwania innych, bardziej względnych metod. Niektórzy przyjmują, że ekstremum występuje, gdy temperatura powietrza jest wyższa od wartości średniej o daną wielkość, na przykład o 5,0°C (Frich i in. 2002; Unkašević, Tošić 2009). Kryterium takie nie może być jednak stosowane w obszarach lub porach roku o różnym zakresie zmienności temperatury powietrza, ponieważ gdy jest on stosunkowo duży, szansa na przewyższenie średniej temperatury powietrza o daną wielkość (na przykład o 5,0°C) jest większa niż w przypadku, gdy zróżnicowanie termiczne jest mniejsze. Z tej przyczyny powszechne uznanie zyskały metody oparte na rozkładzie prawdopodobieństwa temperatury powietrza, uwzględniające zarówno jej zakres, jak i zmienność w danym miejscu i porze roku, a więc bazujące na percentylach. Takie podejście oznacza, że część pomiarów temperatury powietrza (na przykład 10% w przypadku użycia 90. percentyla) jest z definicji ekstremalna. Wyznaczona wartość temperatury powietrza dzieli serię danych na dwie części: (1) wartości ekstremalnie wysokie i (2) nieekstremalne. Zaletą tej metody, poza porównywalnością wyników badań, jest możliwość równoważnej – w sensie statystycznym – identyfikacji ekstremów termicznych we wszystkich porach roku. Do ograniczeń należy natomiast z góry założona częstość zdarzeń oraz to, że niekoniecznie są one ekstremalne ze względu na konsekwencje (Zhang i in. 2011). Identyfikacja ekstremów termicznych z użyciem percentyli jest rekomendowana przez IPCC oraz WMO (WMO 2009; IPCC 2012) i jest najpowszechniej stosowaną metodą we współczesnych badaniach klimatologicznych podejmujących tę tematykę (Perkins 2015; Piticar i in. 2019). Do wyznaczenia ekstremów ciepła najczęściej służą percentyle od 90. do 99. (Sulikowska, Wypych 2020a), jednak w literaturze można spotkać także inne, na przykład 75. (Carril i in. 2008) czy 80. (Della-Marta i in. 2007). Wybór rygorystycznego kryterium (na przykład percentyla 99.) zwiększa szansę identyfikacji zdarzeń o potencjalnie groźnych skutkach, choć analiza zmian ich częstości jest obciążona dużą niepewnością ze względu na rzadkie występowanie. Natomiast wybór łagodniejszego kryterium (na przykład percentyla 90.) zapewnia większą próbę statystyczną, korzystną z punktu widzenia analizy trendów, ale zwiększa ryzyko, że w badaniach uwzględnione będą zdarzenia o stosunkowo niewielkiej szkodliwości. Wybór percentyla jest arbitralny i zależy od celu i przeznaczenia badań, ale często stanowi on kompromis między dostateczną liczbą zidentyfikowanych zdarzeń a stopniem ich ekstremalności (Zhang i in. 2011; Perkins, Alexander 2013).

W metodzie percentyli płynny jest także wybór wskaźników temperatury powietrza oraz odcinków czasu, wykorzystanych do wyznaczenia percentyla (Sulikowska, Wypych 2020a). Do identyfikacji ekstremów ciepła najczęściej jest wybierana dobowo maksymalna temperatura powietrza, przy czym w niektórych publikacjach przyjmuje się, że zdarzenia takie to ekstremalnie ciepłe dni, w przeciwieństwie do – wyróżnianych z użyciem temperatury minimalnej – ekstremalnie ciepłych nocy (Alexander i in. 2006; Bartholy, Pongrácz 2007; Perkins i in. 2012; Spinoni i in. 2015). Rozróżnienie takie ma znaczenie nie tylko w kontekście pory wystąpienia dobowego maksimum i minimum temperatury powietrza, ale także ze względu na różną genezę zdarzeń w tych dwóch porach doby. Procesy związane z nagrzewaniem powietrza w dzień są bowiem odmienne od tych związanych z nocnym wychładzaniem (Chromow 1973). Innym, rzadko spotykanym podejściem, jest identyfikacja ekstremów ciepła, kiedy zarówno dobowo maksymalna, jak i minimalna temperatura powietrza przekraczają odpowiednie progi (Lavaysse i in. 2018).

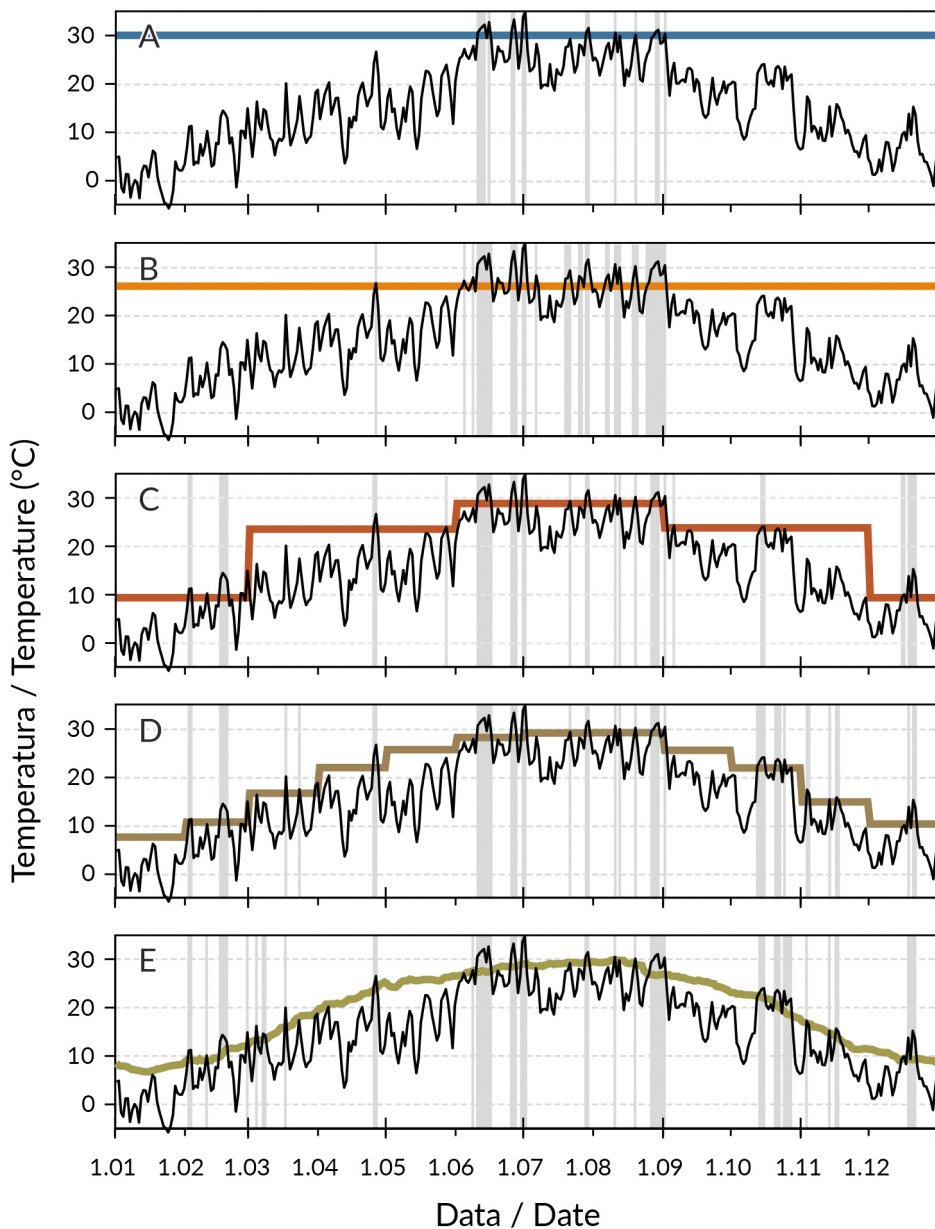
Kolejną zmienną jest próba statystyczna, z jakiej wyznaczony jest percentyl. Po pierwsze, percentyle wyznaczone są w różnych okresach wieloletnich (bazowych, referencyjnych), po drugie – w różnych okresach w skali roku. Za okres bazowy czasem przyjmuje się całe rozpatrywane wielolecie (Stefanon i in. 2012; Lavaysse i in. 2018), ale częściej – zgodnie z zaleceniami WMO (2009) – jeden z przyjętych trzydziestoletnich okresów normalnych, na przykład 1961–1990 czy 1981–2010 (Alexander i in. 2006; Russo i in. 2015; Sanderson i in. 2017). Z reguły, z powodu postępującego ocieplenia klimatu, percentylowe progi temperatury powietrza są wyższe w młodszych okresach bazowych w porównaniu do tych starszych, ale zdarza



Ryc. 1. Wpływ różnych progów maksymalnej temperatury powietrza (gruba, kolorowa linia) na identyfikację ekstremów ciepła na przykładzie punktu gridowego 50°N, 20°E (przybliżona lokalizacja Krakowa) w 2019 roku (cienka, czarna linia). A – stały próg 30°C, B–E – percentyl 95. (1961–1990) wyznaczony w: (B) całym roku kalendarzowym, (C) każdej porze roku, (D) każdym miesiącu, (E) każdym dniem kalendarzowym z użyciem 15-dniowego ruchomego okna. Ekstrema ciepła zaznaczono szarymi polami

Fig. 1. The effect of applying different thresholds of maximum air temperature (thick, coloured line) on the identification of hot or warm extremes on the example of the gridpoint 50°N, 20°E (the approximate location of Kraków, Poland) in 2019 (thin, black line). A a constant 30°C threshold, B–E the 95th percentile threshold (1961–1990): (B) annual, (C) seasonal, (D) monthly, (E) daily (15-day moving window). The hot or warm extremes are marked with grey areas

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych E-OBS v25.0e (Haylock i in. 2008; Cornes i in. 2018).  
Source: own work based on E-OBS v25.0e gridded dataset (Haylock et al. 2008; Cornes et al. 2018).



się, że jest odwrotnie (Sulikowska, Wypych 2020a). Dodatkowo percentyle mogą być obliczone w różnych okresach w skali roku, na przykład w całym roku, poszczególnych porach roku lub miesiącach. Takie podejście skutkuje stałą wielkością progów w tym czasie, to jest w roku, porze roku lub danym miesiącu (ryc. 1). Inną metodą jest wyznaczenie percentyli w każdym dniu kalendarzowym, pozwalające uwzględnić sezonową zmienność temperatury powietrza. W takiej sytuacji wartość „progów ekstremalności” płynnie zmienia się w ciągu roku (ryc. 1). Wybór parametrów metody zależy ściśle od celu badań i rodzaju ekstremów, jakimi zainteresowany jest badacz, ale należy mieć świadomość, że zastosowanie różnych kryteriów wpływa na wyniki analiz (Fenner i in. 2019; Sulikowska, Wypych 2020a).

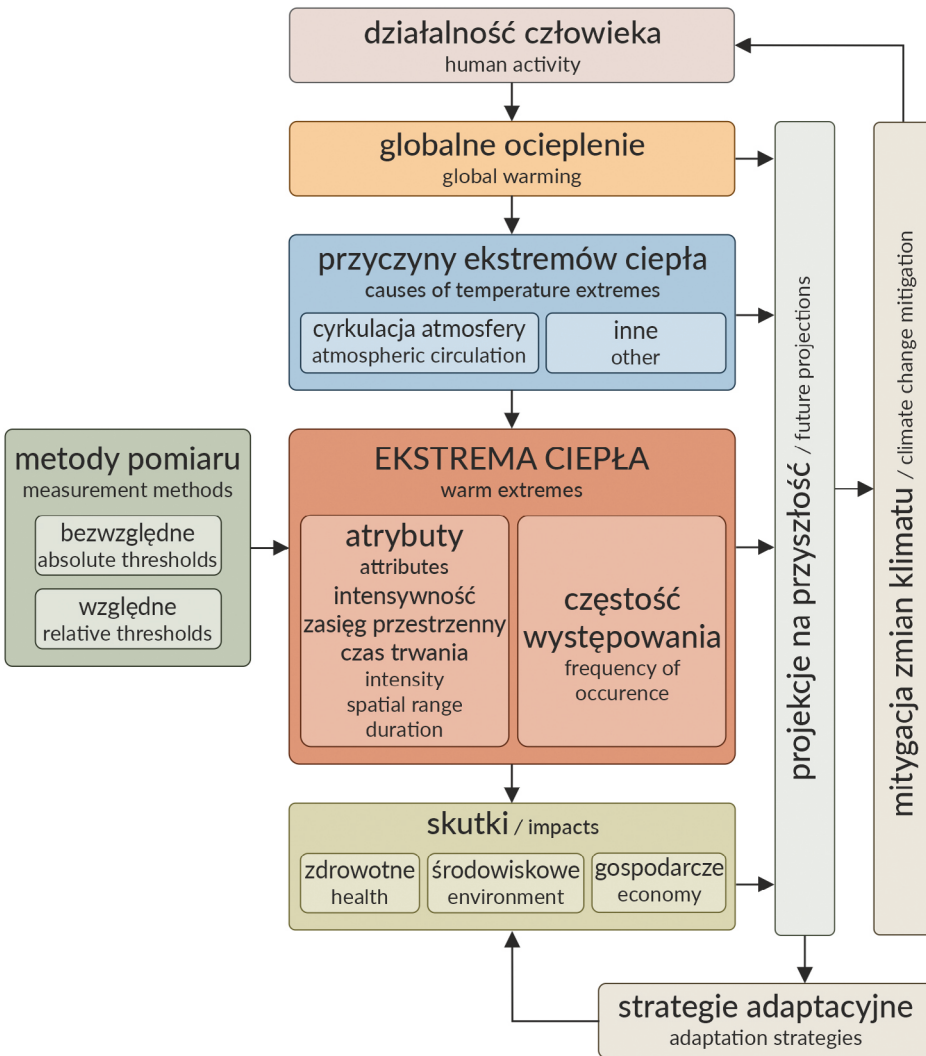
### Atrybuty ekstremów ciepła

Własności ekstremów ciepła, takie jak intensywność, czas trwania i zasięg przestrzennego oddziaływania, bezpośrednio wpływają na skalę negatywnych skutków tych zdarzeń (ryc. 2). Z tej przyczyny często są one przedmiotem szczegółowych badań, również w kontekście zmienności wieloletniej i trendów.

Istnieje wiele sposobów definiowania intensywności ekstremum (ang. *intensity*, *magnitude*, *severity*). Czasem stosowana jest średnia lub maksymalna temperatura powietrza podczas zdarzenia (Perkins, Alexander 2013; Keggenhoff i in. 2015; Buckley, Huey 2016), ale coraz częściej używane jest odchylenie temperatury powietrza od „progów ekstremalności”, które może być wyrażone w formie skumulowanej – w czasie trwania ekstremum lub na obszarze objętym jego oddziaływaniem (ang. *cumulative temperature excess*). Wielu badaczy wskazuje, że takie podejście pozwala ocenić ilość nadmiarowego (w stosunku do przyjętego progów) ciepła, które trafia do środowiska i może przyczyniać się do negatywnych skutków tych zdarzeń (Kyselý 2002; Nairn, Fawcett 2013; Rusticucci i in. 2016; Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020).

Czas trwania ekstremów ciepła (ang. *duration*) jest rozpatrywany w przypadku tak zwanych fal ciepła lub fal upałów i jest wyrażony liczbą dni, w których temperatura powietrza przewyższa dany próg. Wskaźnik ten jest prosty, jednak dylematy metodyczne dotyczące oceny długości fal ciepła pojawiają się jeszcze na etapie ich identyfikacji. Badacze przyjmują bowiem różny minimalny czas utrzymywania się wyjątkowo wysokiej temperatury powietrza, aby zdarzenie zaklasyfikować jako falę. IPCC (2012, 2021) rozumie falę ciepła/upałów (ang. *warm spell* / *heat wave*) jako okres wyjątkowo ciepły/upalny, zaznaczając, że w literaturze naukowej funkcjonuje wiele definicji tych pojęć. Z kolei WMO (2023) podaje, że fala ciepła/upałów to wyraźne ocieplenie lub adwekcja bardzo ciepłego powietrza nad duży obszar, trwające najczęściej od kilku dni do kilku tygodni. W przytoczonej wcześniej definicji fal upałów według AMS przyjęto, że trwa ona przynajmniej jeden dzień, ale najczęściej od kilku dni do kilku tygodni (AMS, 2023). W literaturze





Ryc. 2. Wzajemne powiązania pomiędzy różnymi aspektami ekstremów ciepła

Fig. 2. Links between various aspects of hot or warm extremes

Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.

naukowej istnieje pewna dowolność co do minimalnego czasu trwania fal ciepła, niektórzy przyjmują, że są to dwa dni (Jaeger, Seneviratne 2011; Barnett i in. 2012), inni, że sześć (Fischer, Schär 2010; Efthymiadis i in. 2011), ale najczęściej wybieranym kryterium są trzy dni (Kyselý 2002, 2010; Meehl, Tebaldi 2004; Perkins i in. 2012). Osobnym problemem metodycznym jest dopuszczanie w falach ciepła przerw w postaci chłodniejszych dni. Podejście takie zaproponowano na przykład w przytoczonej już definicji fal upałów według *Słownika meteorologicznego* (2003). Nie jest to często spotykane rozwiązanie, choć niektórzy badacze je stosują (Krzyżewska, Dyer 2018; Lavaysse i in. 2018).

Ostatnim z atrybutów ekstremów jest zasięg ich przestrzennego oddziaływania. Jest on stosunkowo słabo rozpoznany, bowiem większość badań skupia się na analizie temperatury powietrza w izolowanych punktach, najczęściej na stacjach meteorologicznych (de Lima i in. 2013; Busuioc i in. 2015; Barcena-Martin i in. 2018). Jednak, dzięki intensywnemu rozwojowi metod interpolacyjnych oraz rosnącej dostępności wysokiej jakości danych przestrzennych (gridowych), coraz częściej podejmowane są próby rozpoznania przestrzennych własności ekstremów, rozumianych przede wszystkim jako wielkość obszaru będącego pod wpływem wyjątkowo wysokiej temperatury powietrza (Stefanon i in. 2012; Russo i in. 2015; Sulikowska, Wypych 2020a, b).

## Wskaźniki kompleksowe

W celu ujednoczenia metod badawczych w skali międzynarodowej w literaturze zaproponowano kilka rozbudowanych zestawów wskaźników służących identyfikacji i ocenie ekstremów termicznych (Perkins 2015). Najpowszechniej stosowany jest ten zaproponowany w ramach projektu *Climate Variability and Predictability* (CLIVAR), realizowanego we współpracy Komisji Klimatologicznej WMO oraz Światowego Programu Badań Klimatu (World Climate Research Programme, WCRP). Zestaw ten, opracowany przez zespół specjalistów pod nazwą Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices, obecnie jest znany jako wskaźniki ETCCDI (Perkins 2015) i służy do oceny częstości oraz poszczególnych atrybutów ekstremów (Klein Tank, Können 2003). Wskaźniki ETCCDI znajdują zastosowanie w badaniach o zasięgu zarówno globalnym (Alexander i in. 2006), jak i regionalnym czy krajowym (Spinoni i in. 2015; Popov i in. 2018).

W ostatnich latach w literaturze pojawiła się tendencja opracowywania kompleksowych wskaźników służących identyfikacji i ocenie ekstremów, które łączyłyby w sobie informacje na temat dwóch lub trzech ich atrybutów. Większość z nich bazuje na metodzie percentyli. I tak na przykład wskaźnik HWMI (Heat Wave Magnitude Index) umożliwia ocenę fal upałów pod względem intensywności i czasu trwania (Russo i in. 2014), a wskaźnik EHF (Extreme Heat Factor) dodatkowo uwzględnia

poziom aklimatyzacji organizmu w kontekście ekspozycji na wysoką temperaturę powietrza (Nairn, Fawcett 2013, 2014). Powstają także wskaźniki uwzględniające zasięg przestrzenny ekstremum, jak na przykład  $I_{hw}$  (Heat Wave Extremity Index), służący do oceny fal upałów pod kątem wszystkich trzech atrybutów, wykorzystywany do analizy zdarzeń występujących w Europie Środkowej (Lhotka, Kyselý 2015a). Jednocześnie wskaźniki takie jak HWCA (Heatwave Cumulative Area) czy EI (Extremity Index) łączą w sobie informację o zasięgu przestrzennym i czasie trwania lub intensywności ekstremum, ale są uniwersalne w kontekście zastosowania w obszarach geograficznych, różniących się pod względem warunków klimatycznych i wielkości (Beckett, Sanderson 2021; Sulikowska, Wypych 2021).

## Przyczyny występowania ekstremów ciepła

Kluczowe znaczenie w kształtowaniu pogody ma rozmieszczenie ośrodków barycznych oraz procesy związane z cyrkulacją atmosfery (Brönnimann i in. 2009). To od nich zależą kierunek adwekcji mas powietrza i położenie frontów atmosferycznych, które wpływają na wartości i przebieg elementów pogody na danym obszarze. Dlatego to w cyrkulacji atmosferycznej upatruje się przyczyn ekstremalnych zdarzeń pogodowych, w tym ekstremów ciepła. Dodatkowo na uwarunkowania cyrkulacyjne nakładają się inne czynniki oddziałujące w różnych skalach przestrzennych i czasowych, które mogą sprzyjać ewolucji lub modyfikować przebieg tych zdarzeń (Horton i in. 2016; ryc. 2).

Uwarunkowania cyrkulacyjne ekstremów ciepła są najlepiej rozpoznane latem. Kluczową rolę w występowaniu upałów w Europie pełni południkowy gradient ciśnienia atmosferycznego. Ponadto silnie sprzyja im zaleganie nad regionem wyżu barycznego, któremu towarzyszy niemal bezwietrzna i bezchmurna pogoda umożliwiająca intensywne radiacyjne nagrzewanie się podłoża i powietrza (Andrade i in. 2012). Duże znaczenie ma proces osiadania powietrza w ośrodku wyżowym, który prowadzi do adiabatycznego ogrzewania się powietrza i ogranicza jego wychładzanie. W rezultacie im silniejsze osiadanie powietrza, tym większy wzrost jego temperatury (Zschenderlein i in. 2019). Występowaniu upałów w Europie sprzyja adwekcja ciepłych mas powietrza z sektora południowego i ze wschodu – w zależności od regionu geograficznego (Ustrnul i in. 2010; Andrade i in. 2012; Tomczyk, Bednorz 2016; Tomczyk i in. 2017a, b), a czas ich trwania i intensywność rosną, jeśli typy cyrkulacji sprzyjające ich występowaniu utrzymują się przez dłuższy czas (Kyselý 2008). Szczególnie znaczenie w powstawaniu i rozwoju fal upałów mają wyżowe sytuacje blokadowe, polegające właśnie na długotrwałym stacjonowaniu ośrodka wysokiego ciśnienia atmosferycznego nad danym obszarem (Porębska, Zdunek 2013). Upały w Europie Zachodniej często wiążą się z wyżem blokującym nad Wyspami Brytyjskimi,

a sytuacje blokadowe nad Europą Środkową odpowiadają za pogodę upalną w tym regionie. Wyże blokujące z jednej strony skutkują utrzymaniem się słonecznej pogody i adwekcją ciepłych mas powietrza, a z drugiej ograniczają („blokują”) przemieszczanie się niżów znad Północnego Atlantyku nad kontynent, co sprzyjałoby napływowi chłodniejszego powietrza i wzrostowi zachmurzenia (Andrade i in. 2012; Porębska, Zdunek 2013; Wibig 2017; Tomczyk, Bednorz 2019; Zschenderlein i in. 2019). Blokady wyżowe przyczyniły się między innymi do tragicznych w skutkach upałów latem 2003 roku w Europie Zachodniej oraz upałów i suszy latem 2010 r. w Europie Wschodniej (Black i in. 2004; Schneidereit i in. 2012). Co ciekawe, w Europie Południowej blokady wyżowe mogą wiązać się z pogodą chłodniejszą niż zwykle, a występowaniu wyjątkowo wysokiej temperatury powietrza latem sprzyja zaleganie subtropikalnego wału wysokiego ciśnienia oraz adwekcja gorącego i suchego powietrza saharyjskiego (Sousa i in. 2018, 2019, 2020).

Korzystne uwarunkowania cyrkulacyjne są kluczowe, ale ewolucja i przebieg upałów zależy również od procesów związanych ze sprzężeniami zwrotnymi na linii powierzchnia Ziemi – atmosfera. Okazuje się, że fale upałów w Europie często są poprzedzone anomalnie niskimi sumami opadów atmosferycznych, skutkującymi deficytem wilgoci w glebie (Della-Marta i in. 2007; Fischer i in. 2007a, b; Jaeger, Seneviratne 2011; Sousa i in. 2020). Znaczne ograniczenie ochładzania podłoża i powietrza przez ewapotranspirację sprzyja intensywnemu nagrzewaniu się powierzchni gleby i jej dalszemu wysuszeniu, co w odpowiednich warunkach cyrkulacyjnych przyczynia się do rozwoju fali upałów (Alexander 2011; Jaeger, Seneviratne 2011). Co ciekawe, deficyt wilgoci glebowej odgrywa znaczącą rolę w ewolucji fal upałów zarówno w miejscu wystąpienia tego deficytu, jak w oddalonych regionach Europy (Fischer i in. 2007a; Vautard i in. 2007; Zampieri i in. 2009). Wykazano, że czynnik ten miał udział w rozwoju fal upałów w latach 2003 i 2010 (Fischer i in. 2007a; Miralles i in. 2014). Inne interakcje na linii powierzchnia Ziemi – atmosfera, które są brane pod uwagę jako czynniki sprzyjające rozwojowi upałów w Europie, są związane z anomaliami temperatury powierzchni mórz i oceanów (Della-Marta i in. 2007; Carril i in. 2008; Feudale, Shukla 2011) oraz silnym zanikiem lodu i śniegu w Arktyce i w strefie subpolarnej (Tang i in. 2014).

Uwarunkowania ekstremalnie ciepłych zdarzeń w porach roku innych niż lato są słabiej rozpoznane, ale ich występowanie w niektórych regionach powiązано z fazami poszczególnych układów telekonekcyjnych. W Europie Środkowej i Wschodniej zimą i wiosną sprzyja im rozkład ciśnienia atmosferycznego odpowiadający pozytywnej fazie Oscylacji Północnoatlantyckiej (North Atlantic Oscillation, NAO), związany z intensywną adwekcją ciepłych i wilgotnych mas powietrza znad północnego Atlantyku (Andrade i in. 2012; Tomczyk i in. 2019). W Europie Środkowej i Południowowschodniej niezwykle ciepłe dni współwystępują z pozytywną fazą wskaźnika wschodniego Atlantyku (East Atlantic, EA), skutkującego napływem ciepłego

powietrza z południowego zachodu. W tym regionie znaleziono także powiązanie ekstremów ciepła jesienią z niżem barycznym zlokalizowanym nad Atlantykiem, na zachód od Wysp Brytyjskich. Ekstremom ciepła zimą i wiosną na wschodnich wybrzeżach Morza Śródziemnego towarzyszy pozytywna faza wskaźnika euroazjatyckiego EATL/WRUS (Eurasia-2 lub East Atlantic / Western Russia). Z kolei jego negatywna faza przynosi wyjątkowo ciepłą pogodę w Europie Zachodniej. W obu przypadkach wiąże się to z adwekcją ciepłych mas powietrza nad dany region (Andrade i in. 2012).

Ciekawa jest zmienna rola wyżów blokujących w występowaniu ekstremów termicznych wiosną. Sytuacje blokadowe latem wiążą się z pogodą upalną, natomiast zimą przyczyniają się do występowania długo utrzymujących się mrozów (Cattiaux i in. 2010). Wiosna jest więc okresem przejściowym, podczas którego związek blokad wyżowych z ekstremami termicznymi ulega odwróceniu: na początku wiosny sprzyjają one silnym mrozom, natomiast już w kwietniu wiążą się z występowaniem fal ciepła. Kluczowy jest zarówno czas wystąpienia wyżu blokującego, jak i jego lokalizacja, warunkująca kierunki przepływu mas powietrza o różnych cechach termiczno-wilgotnościowych (Brunner i in. 2017).

## Zmienność wieloletnia i trendy ekstremów ciepła w Europie

W wielu obszarach Ziemi ociepleniu klimatu towarzyszy rosnąca częstość ekstremów ciepła (ryc. 2), przy czym ich trendy, podobnie jak w przypadku temperatury powietrza, są zróżnicowane regionalnie i sezonowo (Alexander i in. 2006; Perkins i in. 2012). Najwięcej uwagi poświęcono letnim upałom, wykazując globalny wzrost częstości ich występowania, istotny statystycznie w większości regionów świata, w tym w Europie, którego tempo przyspiesza w ostatnich dziesięcioleciach (Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020; IPCC 2021). W badaniach obejmujących niemal całą lądową powierzchnię Ziemi dowiedziono, że fale upałów są coraz dłuższe, ale trend ten jest istotny głównie w obszarach pozaeuropejskich. Średnia intensywność upałów nie wykazuje znaczących zmian, jednak ich coraz częstsze występowanie skutkuje globalnie rosnącą ilością ciepła trafiającego do środowiska (Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020). Wyniki te znajdują potwierdzenie na gruncie badań europejskich, w których wykazano, że średnia liczba dni gorących w Europie potroiła się w ostatnich 70 latach (Lorenz i in. 2019), a na większości obszaru przybywa średnio 1–2 takich dni rocznie (Andrade i in. 2012). Ponadto potwierdzono, że w skali kontynentalnej tempo tych zmian przyspiesza. Najsilniejszy wzrost częstości i intensywności ekstremów ciepła odnotowano w Europie Środkowej i Wschodniej, natomiast najslabszy w Europie Północnej, gdzie sporadycznie odnotowano nawet istotny statystycznie spadek wybranych charakterystyk (Morabito i in. 2017;

Lorenz i in. 2019; Perkins-Kirkpatrick, Lewis 2020; Sulikowska, Wypych 2021). Wyniki te są zgodne z badaniami regionalnymi i lokalnymi. Rosnące trendy częstości, intensywności i czasu trwania upałów zostały dobrze udokumentowane, zwłaszcza w Europie Środkowej (Kyselý 2010; Tomczyk, Bednorz 2016; Tomczyk, Sulikowska 2018; Fenner i in. 2019; Sulikowska, Wypych 2021), w tym w Polsce (Graczyk i in. 2017; Wibig 2017, 2021), gdzie udowodniono także zwiększanie się zasięgu oddziaływania ekstremalnie wysokiej temperatury powietrza podczas upałów (Wypych i in. 2017a). Tendencje wzrostowe częstości wyjątkowo ciepłych dni w lecie, a nierzadko także ich intensywności oraz czasu trwania fal upałów, stwierdzono także w Europie Wschodniej (Kažys i in. 2011; Shevchenko i in. 2014; Sulikowska, Wypych 2021) i Południowo-Wschodniej (Bartholy, Pongrácz 2007; Unkašević, Tošić 2009; Corobov i in. 2010; Busuioc i in. 2015; Spinoni i in. 2015; Croitoru i in. 2016; Popov i in. 2018; Galanaki i in. 2022) oraz w rejonie Morza Śródziemnego i na Półwyspie Iberyjskim (Kuglitsch i in. 2010; Efthymiadis i in. 2011; de Lima i in. 2013; Tomczyk i in. 2017b; Rasilla i in. 2019). Spośród krajów Europy Zachodniej najwięcej badań dotyczy Wielkiej Brytanii, gdzie udokumentowano wzrost częstości, intensywności i zasięgu przestrzennego upałów (Sanderson i in. 2017; Chapman i in. 2019; Beckett, Sanderson 2021; Sulikowska, Wypych 2021). W Europie Północnej, w zależności od regionu, obserwuje się niewielki wzrost lub spadek częstości dni z wyjątkowo wysoką temperaturą powietrza w lecie (Kivinen i in. 2017; Tomczyk i in. 2017a), choć w ostatnich latach istotnie wzrasta intensywność tych zdarzeń (Sulikowska, Wypych 2021).

Badania dotyczące ekstremalnie wysokiej temperatury powietrza latem często stanowią studium wybranych przypadków. Najgłośniejszym echem w literaturze europejskiej odbiły się tragiczne w skutkach upały w sierpniu 2003 r. w Europie Zachodniej, szczególnie dotkliwe we Francji (Beniston 2004; Trigo i in. 2005; Garcia-Herrera i in. 2010; Vantorren i in. 2006) oraz w lipcu 2010 r. w Europie Wschodniej, z katastrofalnymi skutkami zwłaszcza w zachodniej Rosji (Russo i in. 2015; Grumm 2011). Te megafale upałów (ang. *mega-heatwaves*), jak zostały nazwane w literaturze ze względu na swoją intensywność, obszar oddziaływania i długotrwałość, wiązały się z liczbą ofiar śmiertelnych szacowaną nawet na 70 000 (2003 r.) i 50 000 (2010 r.) osób oraz z ogromnymi stratami ekonomicznymi (Barriopedro i in. 2011). Przykładami innych, czasem również tragicznych w skutkach zdarzeń, które opisano, były upały w lipcu 2006 r. w Europie Zachodniej (Fouillet i in. 2008; Rebetez i in. 2009), w sierpniu 2012, 2013 i 2015 r. w Europie Środkowej (Holtanová i in. 2014; Lhotka, Kyselý 2015b; Sulikowska i in. 2016; Hoy i in. 2017; Krzyżewska, Dyer 2018), w czerwcu 2017 r. w Europie Południowo-Zachodniej (Sánchez-Benítez i in. 2018), a także w sierpniu 2018 r. i czerwcu oraz lipcu 2019 r. w Europie Południowo-Zachodniej i Środkowej (Sousa i in. 2019; Ma i in. 2020; Sulikowska, Wypych 2020b; Błażejczyk i in. 2022). Możliwe, że te niedawne

czerwcowe fale upałów są oznaką coraz wcześniej rozpoczynającego się lata w Europie (García 2015; Peña-Ortiz i in. 2015).

Ekstrema ciepła w porach roku innych niż lato są słabiej rozpoznane. W badaniach obejmujących znaczną część lądów i lata 1951–2003 wykazano, że na większości obszarów częstość wyjątkowo ciepłych dni zimą i wiosną rośnie, natomiast jesienią tendencja ta obejmuje mniejszą powierzchnię (Alexander i in. 2006). W badaniach europejskich największą uwagę poświęcono wyjątkowo ciepłym dniom zimą, których częstość, a w wielu regionach także intensywność i zasięg przestrzenny, rosną. Co ciekawe, tempo tych zmian w ostatnich dziesięcioleciach znacznie przyspieszyło, zwłaszcza w Europie Wschodniej, na Półwyspie Iberyjskim i na Wyspach Brytyjskich (Sulikowska, Wypych 2021). Oszacowano, że w latach 1961–2010 średnio w Europie przybywał jeden wyjątkowo ciepły dzień zimą rocznie (Andrade i in. 2012). Badania regionalne wykazały, że zimowych ekstremów ciepła przybywa w Europie Środkowej (Tomczyk i in. 2019) i Północnej (Kivinen i in. 2017; Sui i in. 2020), a także na stacjach wysokogórskich w szwajcarskich Alpach i w Pirenejach (Beniston 2005; López-Moreno i in. 2014). W przypadku zimowych fal ciepła ich częstość i czas trwania w środkowej Anglii uległy potrojeniu w latach 1882–2015 (Chapman i in. 2019), a w Karpatach, oprócz częstości i czasu trwania, zwiększyła się także ich intensywność (Spinoni i in. 2015). W przejściowych porach roku zmiany są mniej jednoznaczne; wyniki badań różnią się w zależności od przyjętych metod i okresu badawczego oraz są zróżnicowane regionalnie. Jak dowiedziono w badaniach obejmujących okres 1950–2021, liczba, intensywność i zasięg przestrzenny dni ciepłych wiosną i jesienią rosły w wielu regionach Europy, przy czym tempo zmian wiosną było wyraźnie większe. Wykazano także przyspieszenie tych zmian w ostatnich czterdziestu latach (Sulikowska, Wypych 2021). W zgodzie z tymi wynikami zanotowano wzrost częstości wiosennych fal ciepła (Brunner i in. 2017). Z kolei analizy obejmujące lata 1961–2010 wykazały spadek częstości ekstremów ciepła wiosną na znacznym obszarze Europy, nawet o dwa dni na rok, przy rosnącej liczbie tych zdarzeń jesienią o jeden dzień rocznie (Andrade i in. 2012). W badaniach fal ciepła w regionie karpackim nie zaobserwowano znaczących zmian w przypadku wiosny, natomiast jesienią tendencje były wzrostowe, ale nieistotne ze statystycznego punktu widzenia (Spinoni i in. 2015). Inaczej tendencje przedstawiają się w Europie Południowo-Wschodniej, gdzie zanotowano istotny wzrost wyjątkowo ciepłych dni wiosną, ale nie jesienią (Busuioc i in. 2015; Popov i in. 2018). Z kolei w północnej części Półwyspu Skandynawskiego dowiedziono znacznie zwiększonej liczby ekstremalnie ciepłych dni zarówno w kwietniu, jak i w październiku w ostatnich dwóch dekadach stulecia 1914–2013 (Kivinen i in. 2017).

Stosunkowo nieliczne są opracowania na temat zmienności wieloletniej ekstremów ciepła w okresie od jesieni do wiosny. Najczęściej są to analizy szczególnych przypadków. Zatem wyjątkowo ciepła jesień roku 2006 i zima roku 2007 w Europie

były najcieplejsze od ponad 500 lat (Luterbacher i in. 2007). Z kolei wyjątkowo ciepły okres od kwietnia do października 2018 r., w tym wiosna i jesień, podczas których wystąpiło niezwykle dużo dni z temperaturą powietrza powyżej 20,0°C, a nawet 25,0°C, został w literaturze nazwany „bezkresnym latem” (ang. *endless summer*) (Hoy i in. 2020; Tomczyk, Bednorz 2020). Bardzo ciepło było też w lutym 2019 r. w Wielkiej Brytanii, Francji i Holandii, gdzie temperatura powietrza przekroczyła 18,0°C, ustanawiając nowe rekordy (Young, Galvin 2020). Ekstremalnie pod względem termicznym zaczął się 2023 r. w Europie Środkowej. 1 stycznia średnia dobowa temperatura powietrza na wielu stacjach meteorologicznych w Polsce przekroczyła 15°C, co oznacza, że w miejscach tych zaznaczyło się termiczne lato. Maksymalnie temperatura powietrza wzrosła do 19,0°C, przewyższając dotychczasowy krajowy rekord stycznia o 0,4°C (IMGW-PIB 2023).

## Skutki ekstremów ciepła

Temperatura przy powierzchniowej warstwy powietrza ma zasadnicze znaczenie zarówno dla procesów zachodzących w środowisku przyrodniczym, jak i dla życia i działalności człowieka, a jej wyjątkowo wysokie wartości, niezależnie od pory roku, mogą prowadzić do zaburzeń w systemach zarówno naturalnych, jak i tworzonych i regulowanych przez ludzi (ryc. 2). Najlepiej rozpoznane są skutki letnich upałów, które uznaje się za jedno z najbardziej śmiertelnych zagrożeń meteorologicznych (IPCC 2022). Wysoka temperatura powietrza obciąża przede wszystkim układ sercowo-naczyniowy i oddechowy, ale jest groźna także dla mózgu, układu pokarmowego oraz nerek, prowadząc do wzrostu zachorowalności i śmiertelności (Mora i in. 2017a, b). Narażone są szczególnie dzieci, osoby starsze i cierpiące na choroby przewlekłe, zwłaszcza te o ograniczonej mobilności i bez dostępu do klimatyzacji (Vandentorren i in. 2006). Zagrożenie rośnie z czasem trwania i intensywnością upałów (Barnett i in. 2012; Xu i in. 2016; Urban i in. 2017), przy czym bardzo niekorzystna jest wysoka temperatura powietrza nocą, utrudniająca regenerację organizmu (tak zwane noce tropikalne, z temperaturą minimalną powyżej 20°C). Takie warunki w sierpniu 2003 r. w Europie Zachodniej przyczyniły się do śmierci kilkudziesięciu tysięcy osób (Valleron, Boumendil 2004; Robine i in. 2008; Garcia-Herrera i in. 2010). Udowodniono, że wysoka wilgotność powietrza podczas upałów dodatkowo obciąża procesy termoregulacyjne organizmu, zwiększając dyskomfort, a w skrajnych sytuacjach zwiększając śmiertelność (Basu, Samet 2002; Mora i in. 2017b). Znaczenie ma także pora wystąpienia upałów – są one groźniejsze na początku ciepłej pory roku niż w pełni lata, co wynika z braku aklimatyzacji (Baccini i in. 2008; Brooke Anderson, Bell 2011), ale siła tego efektu zmienia się w zależności od regionu geograficznego (D’Ippoliti i in. 2010). Dodatkowo podatność na skutki upałów zwiększa się



w terenach zurbanizowanych, gdzie zjawisko miejskiej wyspy ciepła potęguje wzrost temperatury powietrza (Founda, Giannakopoulos 2009; Gabriel, Endlicher 2011; Katavoutas, Founda 2019), a gorąca, słoneczna i bezwietrzna pogoda sprzyja wzrostowi zanieczyszczenia powietrza niekorzystnym dla zdrowia ozonem (Dear i in. 2005; Solberg i in. 2008; Nuvolone i in. 2018; Rasilla i in. 2019).

Upały stanowią zagrożenie także dla środowiska przyrodniczego, a ich negatywne konsekwencje nierzadko są potęgowane współwystępującą suszą, która skutkuje zmniejszeniem dostępności i jakości wody oraz zwiększeniem ryzyka pożarów. Te z kolei przynoszą bezpośrednie zagrożenie życia oraz powodują wzrost zanieczyszczenia powietrza (Pereira i in. 2005; Turco i in. 2017; Parente i in. 2018). Na przykład w lipcu 2010 r. w Europie Wschodniej przyczyniło się to do zwiększenia liczby ofiar upałów (Barriopedro i in. 2011). Wysoka temperatura powietrza szkodzi także zwierzętom dziko żyjącym, przyczyniając się do lokalnych, masowych wzrostów ich śmiertelności z powodu hipertermii i odwodnienia, a także do zmniejszenia ich sprawności fizycznej i zmian w ich zachowaniu (Saunders i in. 2011; du Plessis i in. 2012; Ratnayake i in. 2019; Soravia i in. 2021; McKechnie i in. 2021; Quintana i in. 2022). Z powodu upałów cierpią też zwierzęta hodowlane (Thornton i in. 2009; Gaughan, Cawdell-Smith 2015), a pogorszenie ich dobrostanu w połączeniu z negatywnym oddziaływaniem upałów na uprawy rolne zmniejszają produktywność rolnictwa, by ostatecznie zagrażać bezpieczeństwu żywnościowemu (Battisti, Naylor 2009; Trnka i in. 2011; Vogel i in. 2019; Brás i in. 2021; Potopová i in. 2021). Szkody odnotowywane są także w sektorze energetycznym. Wzmoczone chłodzenie wewnątrz budynków skutkuje zwiększonym zapotrzebowaniem na energię, podczas gdy wysoka temperatura powietrza powoduje problemy zarówno z jej wytwarzaniem, jak i przesyłaniem (Linnerud i in. 2011; Rübhelke, Vögele 2011; McEvoy i in. 2012). Wskutek upałów dochodzi ponadto do niszczenia infrastruktury drogowej i kolejowej, co stwarza niebezpieczeństwo i przynosi straty finansowe (Dobney i in. 2009; McEvoy i in. 2012; Chinowsky i in. 2019). Niekorzystne skutki upałów są odczuwalne także w innych gałęziach gospodarki, gdyż wysoka temperatura powietrza obniża kondycję psychofizyczną człowieka, a tym samym wydajność jego pracy (Kjellstrom i in. 2009; Zander i in. 2015).

Następstwa letnich upałów mogą być bardzo dotkliwe, jednak wyjątkowo wysoka temperatura powietrza w innych porach roku również wiąże się z zagrożeniami i potencjalnymi stratami, zarówno zdrowotnymi, jak i ekologicznymi czy gospodarczymi. Zimą w regionach, gdzie tworzy się pokrywa śnieżna, bardzo ciepłe dni powodują jej nagłe topnienie. Pozbawiona warstwy izolacyjnej gleba jest eksponowana na mrozy i przymrozki, co może powodować zmniejszenie plonów zbóż ozimych, obumieranie korzeni roślin i wzmoczone wymywanie składników odżywczych (Brooks i in. 2011; Grimm i in. 2013; Zhu i in. 2022; Kersebaum 2022). Przyspieszony odpływ wód roztopowych oraz zmniejszona retencja w postaci pokrywy śnieżnej sprzyjają

z kolei wiosennej suszy (Potopová i in. 2016; McEvoy, Hatchett 2022). Ponadto wskutek ciepłej pogody skróceniu ulega sezon narciarski, co generuje straty w sektorze turystyki zimowej (Gilaberte-Búrdalo i in. 2014). Wyjątkowo wysoka temperatura powietrza późną zimą i wczesną wiosną przyczynia się do wystąpienia efektu tak zwanej fałszywej wiosny (ang. *false spring*), kiedy po fali ciepła skutkującej rozpoczęciem wiosennej wegetacji następuje silne oziębienie. Efekt ten znacznie zwiększa wrażliwość roślin na późnowiosenne przymrozki, przynoszące straty w ekosystemach, a także w rolnictwie i sadownictwie (Wypych i in. 2017b; Vitasse, Rebetez 2018; Chamberlain i in. 2019; Flanigan i in. 2020). Fale ciepła w tym okresie mogą także modyfikować terminy rozpoczęcia faz fenologicznych, powodując niedopasowania między dostępnością zasobów roślinnych a potrzebami gatunków żywiących się nimi (Menzel i in. 2011; Allstadt i in. 2015; Siegmund i in. 2016; Ladwig i in. 2019). Badania wskazują również na związek przedwczesnej i intensywnej wegetacji ze wzmocnieniem suszy oraz występowaniem pożarów lasów w lecie (Westerling 2016; Bastos i in. 2020). Wysoka temperatura powietrza jesienią zmienia przebieg zjawisk fenologicznych, opóźniając dojrzewanie owoców i opad liści oraz wpływając na sezonowe migracje i zachowania zwierząt, co niesie kolejne implikacje środowiskowe (Gallinat i in. 2015; Xie i in. 2018). Ponadto wyjątkowo ciepłe dni w okresie od jesieni do wiosny ułatwiają niektórym gatunkom roślin i zwierząt kolonizację nowych obszarów geograficznych i wypieranie gatunków rodzimych, co przyczynia się do trwałych zmian w ekosystemach (Fridley 2012; Williams i in. 2015). Z taką pogodą wiąże się też zwiększona przeżywalność szkodników i patogenów zagrażających rolnictwu (Sutherst i in. 2011), a także gatunków owadów roznoszących choroby groźne dla zdrowia ludzi i zwierząt, przede wszystkim komarów i kleszczy. W Europie zanotowano już na przykład stabilne populacje komara tygrysięgo, będącego wektorem wirusów wywołujących groźne choroby takie jak denga, chikungunya czy żółta febra (Bennet i in. 2006; Roiz i in. 2011; Caminade i in. 2012; Parola, Musso 2020).

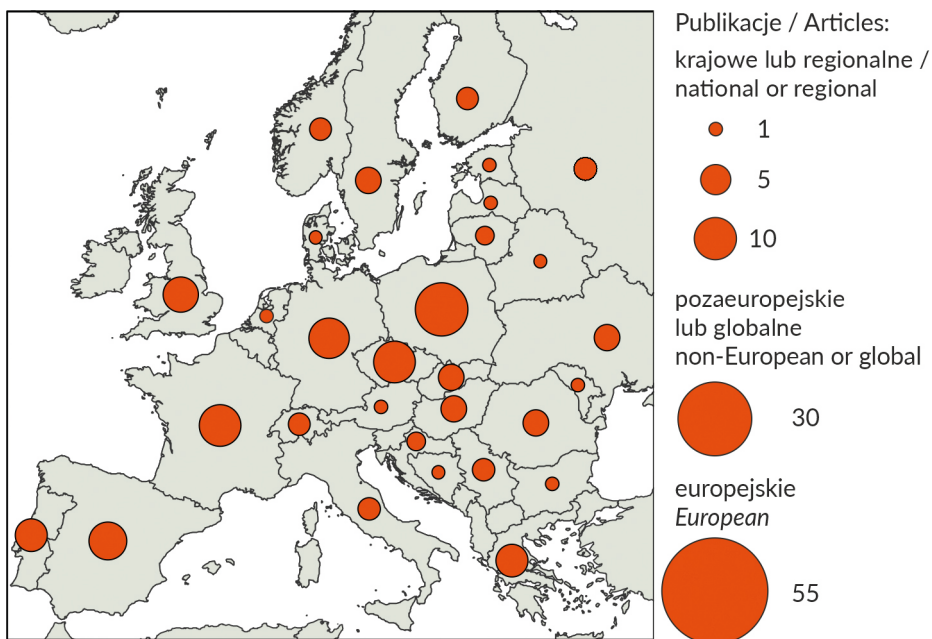
## Podsumowanie i możliwe przyszłe kierunki badań

W niniejszym przeglądzie podjęto próbę podsumowania stanu wiedzy na temat współczesnych ekstremów ciepła w Europie. W czterech rozdziałach poruszono kolejno tematykę definicji ekstremów, ich przyczyn, skutków oraz zmian wieloletnich, ukazując wszechstronność analiz, mnogość kontekstów oraz skal czasowych i przestrzennych, w jakich te zdarzenia są rozpatrywane. Literatura naukowa na temat ekstremalnych zdarzeń termicznych jest niezwykle bogata i wielowątkowa, przez co niniejsze opracowanie obejmuje pewien wybór publikacji i dlatego powinno być traktowane jako wstęp do dalszych rozważań. Niemniej jednak to zestawienie pozwala wskazać kierunki badań, które przynajmniej częściowo mogą pomóc w wypełnieniu luk we współczesnym stanie wiedzy.

W kontekście aktualnie stosowanych definicji i metod identyfikacji ekstremów ciepła, powszechne uznanie zdobyły miary percentylowe, a obecny rozwój metod badawczych dąży w kierunku kompleksowego opisu tych zdarzeń oraz doskonalenia sposobów oceny ich atrybutów. Pomimo wielu propozycji, w literaturze wciąż brakuje szeroko akceptowanej metody identyfikacji ekstremów ciepła. Opracowanie jednolitej metody, która spełniałaby potrzeby badań o różnym przeznaczeniu, nie jest możliwe, ale powszechnie uznany model analizy i oceny ekstremów ciepła znacznie zwiększyłby miarodajność badań (Perkins 2015). Wiedza na temat procesów fizycznych leżących u podstaw ekstremów ciepła jest bogata i obejmuje przede wszystkim różnorodne uwarunkowania cyrkulacyjne oraz interakcje na linii powierzchnia Ziemi – atmosfera, które wpływają na wymianę energii między tymi układami. Znamienne jest to, że zainteresowania klimatologów skupiają się na letnich upałach, w związku z czym przyczyny ekstremów ciepła w innych porach roku są słabiej rozpoznane. Podobna tendencja dotyczy badań nad skutkami tych zdarzeń. Wpływ upałów na zdrowie człowieka jest dobrze udokumentowany, choć badania na ten temat koncentrują się w wybranych regionach globu, przede wszystkim w krajach wysoko rozwiniętych, położonych w umiarkowanych szerokościach geograficznych, o małej lub średniej gęstości zaludnienia. W skali Europy jej północna i wschodnia część jest w tym obszarze badawczym reprezentowana niedostatecznie (Hajat, Kosatky 2010; Campbell i in. 2018), a jak niejednokrotnie udowodniono, wpływ wysokiej temperatury powietrza na zdrowie człowieka ściśle zależy od adaptacji do danych warunków klimatycznych. Negatywne skutki upałów są stosunkowo dobrze rozpoznane w rolnictwie, gospodarce i energetyce, w których to sektorach największe spustoszenie powodują w połączeniu z suszą. Korzystne byłyby więc badania nad powiązaniem między tymi dwoma zjawiskami, zwłaszcza, że susza z jednej strony może sprzyjać rozwojowi upałów, a z drugiej strony – być ich skutkiem. Próby wspólnej analizy tych zdarzeń są podejmowane, a badania takie mają duży potencjał wykorzystania w doskonaleniu prognoz i w przygotowaniu środków prewencyjnych (Mueller, Seneviratne 2012; Perkins 2015). Konsekwencje ekstremów ciepła w porach roku innych niż lato są słabiej zbadane, a ze względu na mnogość powiązań środowiskowych, z jakimi są skojarzone, nie powinny być marginalizowane. W tej sferze potrzeba analiz interdyscyplinarnych, łączących klimatologię z innymi obszarami wiedzy, które pozwolą lepiej zrozumieć liczne współzależności środowiskowe, jak również środowiskowo-gospodarcze. Historyczne obserwacje ekstremalnych zdarzeń termicznych w Europie świadczą o postępującym ociepleniu klimatu w tej części świata i są zgodne z tendencjami globalnymi (Coumou i in. 2013), jednak rozpoznanie ich sezonowego i regionalnego zróżnicowania jest wciąż niepełne. W porównaniu do letnich upałów ekstremom ciepła w zimie poświęcono w literaturze mniej uwagi, ale wiedzy brakuje przede wszystkim na temat tych występujących wiosną i jesienią, pomimo udokumentowanych zmian temperatury

powietrza w tych porach roku (Wypych i in. 2017b; Pokorná i in. 2018). Badania całoroczne, prowadzone w różnych regionach umożliwiłyby rzetelną ocenę kierunków i nasilenia trendów w skali kontynentu.

W pracy tej przedstawiono bogaty, choć z pewnością niewyczerpujący zagadnienia zakres badań nad ekstremami ciepła w Europie (ryc. 3). Poza poruszonymi tematami badań podejmowane są między innymi próby oceny wpływu człowieka na ich występowanie (Dong i in. 2017), a także opracowywane są projekcje klimatyczne



Ryc. 3. Liczba prac na temat ekstremów ciepła w danym kraju, które były cytowane w tym przeglądzie. Na tę liczbę składają się prace krajowe i regionalne, przy czym te ostatnie obejmują najwyżej sześć państw. Pokazano też liczbę prac europejskich oraz dotyczących innych regionów Ziemi. Uwzględniono wyłącznie prace, które dotyczą konkretnego obszaru geograficznego

Fig. 3. The number of articles cited in this review on hot or warm extremes in a particular country. This figure is made up of local and regional studies, the latter covering up to six countries. The number of European works and those concerning other regions of the Earth are also shown. Only works that relate to a specific geographical area are included

Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.

w różnych skalach przestrzennych i czasowych (Fischer, Schär 2010; Amengual i in. 2014; Coffel i in. 2018; Cardell i in. 2020). Te zgodnie wskazują na kontynuację rosnących tendencji występowania ekstremów ciepła w przyszłości. W tym kontekście ciekawe zdają się być sugestie na temat biologicznych zdolności adaptacyjnych człowieka, które być może zmniejszą negatywny wpływ upałów na jego zdrowie. Nadal bardzo trudno ocenić, czy skutki przewidywanego wzrostu częstości upałów będą tak dotkliwe, jak obrazują projekcje, niemniej jednak obserwowane tendencje są jednogłośnie oceniane jako niezwykle niepokojące (Perkins 2015). Jak wykazano w niniejszym artykule przeglądowym, badania naukowe nad tymi złożonymi zdarzeniami intensywnie postępują naprzód. Liczne analizy prowadzone w ostatnich dziesięcioleciach przyniosły rozwój metod badawczych oraz znacząco poszerzyły wiedzę na temat przyczyn występowania, skutków oraz tendencji zmian tych zdarzeń. Wyniki tych badań są nieocenione w kontekście poprawy prognoz ekstremów oraz przygotowywania strategii adaptacyjnych mających na celu zapobieganie ich negatywnym skutkom. Wiedza w tej dziedzinie nie jest jednak w żadnym wypadku kompletna i wciąż pozostaje wiele zagadnień wymagających zgłębienia i wyjaśnienia.

## Literatura

- Alexander L., 2011, *Climate science: Extreme heat rooted in dry soils*, Nature Geoscience, 4, 12–13. DOI: 10.1038/ngeo1045.
- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A.M.G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.G., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L., 2006, *Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 111, 1–22. DOI: 10.1029/2005JD006290.
- Allstadt A.J., Vavrus S.J., Heglund P.J., Pidgeon A.M., Thogmartin W.E., Radeloff V.C., 2015, *Spring plant phenology and false springs in the conterminous US during the 21st century*, Environmental Research Letters, 10(10). DOI: 10.1088/1748-9326/10/10/104008.
- Amengual A., Homar V., Romero R., Brooks H.E., Ramis C., Gordaliza M., Alonso S., 2014, *Projections of heat waves with high impact on human health in Europe*, Global and Planetary Change, 119, 71–84. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.05.006.
- AMS, 2023, Glossary of Meteorology, terminy: *extreme, heat wave, hot wave, warm wave*, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Welcome> (dostęp: 11.12.2022).
- Andrade C., Leite S.M., Santos J.A., 2012, *Temperature extremes in Europe: Overview of their driving atmospheric patterns*, Natural Hazards and Earth System Science, 12, 1671–1691. DOI: 10.5194/nhess-12-1671-2012.

- Baccini M., Biggeri A., Accetta G., Kosatsky T., Katsouyanni K., Analitis A., Ross Anderson H., Bisanti L., D'Ippoliti D., Danova J., Forsberg B., Medina S., Paldy A., Rabczenko D., Schindler C., Michelozzi P., 2008, *Heat effects on mortality in 15 European cities*, *Epidemiology*, 19, 711–719. DOI: 10.1097/EDE.0b013e318176bfcd.
- Barcena-Martin E., Molina J., Ruiz-Sinoga J.D., 2018, *Issues and challenges in defining a heat wave: A Mediterranean case study*, *International Journal of Climatology*, 1–12. DOI: 10.1002/joc.5809.
- Barnett A.G., Hajat S., Gasparri A., Rocklöv J., 2012, *Cold and heat waves in the United States*, *Environmental Research*, 112, 218–224. DOI: 10.1016/j.envres.2011.12.010.
- 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, 220–224. DOI: 10.1126/science.1201224.
- Bartholy J., Pongrácz R., 2007, *Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001*, *Global and Planetary Change*, 57, 83–95. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.002.
- Bastos A., Ciais P., Friedlingstein P., Sitch S., Pongratz J., Fan L., Wigneron J.P., Weber U., Reichstein M., Fu Z., Anthoni P., Arneeth A., Haverd V., Jain A.K., Joetzer E., Knauer J., Lienert S., Lougharn T., McGuire P.C., Tian H., Viovy N., Zaehle S., 2020, *Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity*, *Science Advances*, 6, 1–14. DOI: 10.1126/sciadv.aba2724.
- Basu R., Samet J.M., 2002, *Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence*, *Epidemiologic Reviews*, 24(2), 190–202. DOI: 10.1093/epirev/mxf007.
- Battisti D.S., Naylor R.L., 2009, *Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat*, *Science* 323, 240–244. DOI: 10.1126/science.1164363.
- Beckett A.D., Sanderson M.G., 2021, *Analysis of historical heatwaves in the United Kingdom using gridded temperature data*, *International Journal of Climatology*, 1–12. DOI: 10.1002/joc.7253.
- Beniston M., 2004, *The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations*, *Geophysical Research Letters*, 31(2). DOI: 10.1029/2003GL018857.
- Beniston M., 2005, *Warm winter spells in the Swiss Alps: strong heat waves in a cold season? A study focusing on climate observations at the Saentis high mountain site*, *Geophysical Research Letters*, 32(1). DOI: 10.1029/2004GL021478.
- Bennet L., Halling A., Berglund J., 2006, *Increased incidence of Lyme borreliosis in southern Sweden following mild winters and during warm, humid summers*, *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, 25, 426–432. DOI: 10.1007/s10096-006-0167-2.
- Black E., Blackburn M., Harrison G., Hoskins B., Methven J., 2004, *Factors contributing to the summer 2003 European heatwave*, *Weather*, 59, 217–223. DOI: 10.1256/wea.74.04.
- Błażejczyk K., Twardosz R., Wałach P., Czarnecka K., Błażejczyk A., 2022, *Heat strain and mortality effects of prolonged central European heat wave – an example of June 2019 in Poland*, *International Journal of Biometeorology*, 66(1), 149–161. DOI: 10.1007/s00484-021-02202-0.

- Brás T.A., Seixas J., Carvalhais N., Jägermeyr J., 2021, *Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe*, Environmental Research Letters, 16, 065012, 1–13. DOI: 10.1088/1748-9326/abf004.
- Brönnimann S., Ewen T., Luterbacher J., 2009, *Variability of the global atmospheric circulation during the past 100 years*, Meteorologische Zeitschrift, 18, 365–368. DOI: 10.1127/0941-2948/2009/0392.
- Brooke Anderson G., Bell M.L., 2011, *Heat waves in the United States: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities*, Environmental Health Perspectives, 119, 210–218. DOI: 10.1289/ehp.1002313.
- Brooks P.D., Grogan P., Templer P.H., Groffman P., Öquist M.G., Schimel J., 2011, *Carbon and nitrogen cycling in snow-covered environments*, Geography Compass, 5, 682–699. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2011.00420.x.
- Brunner L., Hegerl G.C., Steiner A.K., 2017, *Connecting atmospheric blocking to European temperature extremes in spring*, Journal of Climate, 30, 585–594. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0518.1.
- Buckley L.B., Huey R.B., 2016, *Temperature extremes: geographic patterns, recent changes, and implications for organismal vulnerabilities*, Global Change Biology, 22, 3829–3842. DOI: 10.1111/gcb.13313.
- Busuioc A., Dobrinescu A., Birsan M.V., Dumitrescu A., Orzan A., 2015, *Spatial and temporal variability of climate extremes in Romania and associated large-scale mechanisms*, International Journal of Climatology, 35, 1278–1300. DOI: 10.1002/joc.4054.
- Caminade C., Medlock J.M., Ducheyne E., McIntyre K.M., Leach S., Baylis M., Morse A.P., 2012, *Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito Aedes albopictus: Recent trends and future scenarios*, Journal of the Royal Society Interface, 9, 2708–2717. DOI: 10.1098/rsif.2012.0138.
- Campbell S., Remenyi T.A., White C.J., Johnston F.H., 2018, *Heatwave and health impact research: A global review*, Health and Place, 53, 210–218. DOI: 10.1016/j.healthplace.2018.08.017.
- Cardell M.F., Amengual A., Romero R., Ramis C., 2020, *Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches*, International Journal of Climatology, 40(11), 4800–4827. DOI: 10.1002/joc.6490.
- Carril A.F., Gualdi S., Cherchi A., Navarra A., 2008, *Heatwaves in Europe: Areas of homogeneous variability and links with the regional to large-scale atmospheric and SSTs anomalies*, Climate Dynamics, 30, 77–98. DOI: 10.1007/s00382-007-0274-5.
- Cattiaux J., Vautard R., Cassou C., Yiou P., Masson-Delmotte V., Codron F., 2010, *Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate*, Geophysical Research Letters, 37, 1–6. DOI: 10.1029/2010GL044613.
- Chamberlain C.J., Cook B.I., García de Cortázar-Atauri I., Wolkovich E.M., 2019, *Rethinking false spring risk*, Global Change Biology, 25(7), 2209–2220. DOI: 10.1111/gcb.14642.
- Chapman S.C., Murphy E.J., Stainforth D.A., Watkins N.W., 2020, *Trends in winter warm spells in the central England temperature record*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 59, 1069–1076. DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0267.1.

- Chapman S.C., Watkins N.W., Stainforth D.A., 2019, *Warming trends in summer heatwaves*, Geophysical Research Letters, 46, 1634–1640. DOI: 10.1029/2018GL081004.
- Chinowsky P., Helman J., Gulati S., Neumann J., Martinich J., 2019, *Impacts of climate change on operation of the US rail network*, Transport Policy, 75, 183–191. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.05.007.
- Chromow S.P., 1973, *Meteorologia i klimatologia*, Wydanie II, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Coelho C.A.S., Ferro C.A.T., Stephenson D.B., Steinskog D.J., 2008, *Methods for exploring spatial and temporal variability of extreme events in climate data*, Journal of Climate, 21, 2072–2092. DOI: 10.1175/2007JCLI1781.1.
- Coffel E.D., Horton R.M., de Sherbinin A., 2018, *Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century*, Environmental Research Letters, 13, 014001, 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/aaa00e.
- Cornes R.C., van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M.M., Jones P.D., 2018, *An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123, 9391–9409. DOI: 10.1029/2017JD028200.
- Corobov R., Sheridan S., Overcenco A., Terinte N., 2010, *Air temperature trends and extremes in Chisinau (Moldova) as evidence of climate change*, Climate Research, 42, 247–256. DOI: 10.3354/cr00922.
- Coumou D., Robinson A., Rahmstorf S., 2013, *Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures*, Climatic Change, 118(3–4), 771–782. DOI: 10.1007/s10584-012-0668-1.
- Croitoru A.E., Piticar A., Ciupertea A.F., Roșca C.F., 2016, *Changes in heat waves indices in Romania over the period 1961–2015*, Global and Planetary Change, 146, 109–121. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.08.016.
- Díaz J., García R., Velázquez De Castro F., Hernández E., López C., Otero A., 2002, *Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986 to 1997*, International Journal of Biometeorology, 46(3), 145–149. DOI: 10.1007/s00484-002-0129-z.
- D'Ippoliti D., Michelozzi P., Marino C., 2010, *The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the Euro HEATproject*, Environmental Health, 9(37), 1–9. DOI: 10.1186/1476-069X-9-37.
- De Lima M.I.P., Santo F.E., Ramos A.M., De Lima J.L.M.P., 2013, *Recent changes in daily precipitation and surface air temperature extremes in mainland Portugal, in the period 1941–2007*, Atmospheric Research, 127, 195–209. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.10.001.
- Dear K., Ranmuthugala G., Kjellström T., Skinner C., Hanigan I., 2005, *Effects of temperature and ozone on daily mortality during the August 2003 heat wave in France*, Archives of Environmental and Occupational Health, 60(4), 205–212. DOI: 10.3200/AEOH.60.4.205-212.
- Della-Marta P.M., Luterbacher J., von Weissenfluh H., Xoplaki E., Brunet M., Wanner H., 2007, *Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability*, Climate Dynamics, 29, 251–275. DOI: 10.1007/s00382-007-0233-1.



- Dobney K., Baker C.J., Quinn A.D., Chapman L., 2009, *Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom*, Meteorological Applications, 16(2), 245–251. DOI: 10.1002/met.114.
- Dong B., Sutton R.T., Shaffrey L., 2017, *Understanding the rapid summer warming and changes in temperature extremes since the mid-1990s over Western Europe*, Climate Dynamics, 48, 1537–1554. DOI: 10.1007/s00382-016-3158-8.
- du Plessis K.L., Martin R.O., Hockey P.A.R., Cunningham S.J., Ridley A.R., 2012, *The costs of keeping cool in a warming world: Implications of high temperatures for foraging, thermoregulation and body condition of an arid-zone bird*, Global Change Biology, 18(10), 3063–3070. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02778.x.
- Efthymiadis D., Goodess C.M., Jones P.D., 2011, *Trends in Mediterranean gridded temperature extremes and large-scale circulation influences*, Natural Hazards and Earth System Science, 11, 2199–2214. DOI: 10.5194/nhess-11-2199-2011.
- Fenner D., Holtmann A., Krug A., Scherer D., 2019, *Heat waves in Berlin and Potsdam, Germany – Long-term trends and comparison of heat wave definitions from 1893 to 2017*, International Journal of Climatology, 39, 2422–2437. DOI: 10.1002/joc.5962.
- Feudale L., Shukla J., 2011, *Influence of sea surface temperature on the European heat wave of 2003 summer. Part I: An observational study*, Climate Dynamics, 36, 1691–1703. DOI: 10.1007/s00382-010-0788-0.
- Fischer E.M., 2014, *Autopsy of two mega-heatwaves*, Nature Geoscience, 7, 332–333. DOI: 10.1038/ngeo2148.
- Fischer E.M., Schär C., 2010, *Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves*, Nature Geoscience, 3, 398–403. DOI: 10.1038/ngeo866.
- Fischer E.M., Seneviratne S.I., Lüthi D., Schär C., 2007a, *Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves*, Geophysical Research Letters, 34, 1–6. DOI: 10.1029/2006GL029068.
- Fischer E.M., Seneviratne S.I., Vidale P.L., Lüthi D., Schär C., 2007b, *Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave*, Journal of Climate, 20, 5081–5099. DOI: 10.1175/JCLI4288.1.
- Flanigan N.P., Bandara R., Wang F., Jastrzębowski S., Hidayati S.N., Walck J.L., 2020, *Germination responses to winter warm spells and warming vary widely among woody plants in a temperate forest*, Plant Biology, 22, 1052–1061. DOI: 10.1111/plb.13152.
- Fouillet A., Rey G., Wagner V., Laaidi K., Empereur-Bissonnet P., Le Tertre A., Frayssinet P., Bessemoulin P., Laurent F., De Crouy-Chanel P., Jouglé E., Hémon D., 2008, *Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave*, International Journal of Epidemiology, 37, 309–317. DOI: 10.1093/ije/dym253.
- Founda D., Giannakopoulos C., 2009, *The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece – A typical summer in the future climate?*, Global and Planetary Change, 67, 227–236. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.03.013.

- 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 twentieth century*, *Climate Research*, 19(3), 193–212. DOI: 10.3354/cr019193.
- Fridley J.D., 2012, *Extended leaf phenology and the autumn niche in deciduous forest invasions*, *Nature*, 485, 359–362. DOI: 10.1038/nature11056.
- Gabriel K.M.A., Endlicher W.R., 2011, *Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany*, *Environmental Pollution*, 159, 2044–2050. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.016.
- Galanaki E., Giannaros C., Kotroni V., Lagouvardos K., Papavasileiou G., 2022, *Spatio-temporal analysis of heatwaves characteristics in Greece from 1950 to 2020*, *Climate*, 11(1), 5. DOI: 10.3390/cli11010005.
- Gallinat A.S., Primack R.B., Wagner D.L., 2015, *Autumn, the neglected season in climate change research*, *Trends in Ecology and Evolution*, 30, 169–176. DOI: 10.1016/j.tree.2015.01.004.
- 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, 267–306. DOI: 10.1080/10643380802238137.
- García M.J.L., 2015, *Recent warming in the balearic sea and Spanish Mediterranean coast. Towards an earlier and longer summer*, *Atmosfera*, 28, 149–160. DOI: 10.20937/atm.2015.28.03.01.
- Gaughan J., Cawdell-Smith A.J., 2015, *Impact of climate change on livestock production and reproduction*, [w:] V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard, C. Prasad (red.), *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation*, Springer, New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London, 51–60. DOI: 10.1007/978-81-322-2265-1\_4.
- Gilaberte-Búrdalo M., López-Martín F., Pino-Otín M.R., López-Moreno J.I., 2014, *Impacts of climate change on ski industry*, *Environmental Science and Policy*, 44, 51–61. DOI: 10.1016/j.envsci.2014.07.003.
- Graczyk D., Pińskwar I., Kundzewicz Z.W., Hov Ø., Førland E.J., Szwed M., Choryński A., 2017, *The heat goes on – changes in indices of hot extremes in Poland*, *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 459–471. DOI: 10.1007/s00704-016-1786-x.
- Grimm N.B., Chapin F.S., Bierwagen B., Gonzalez P., Groffman P.M., Luo Y., Melton F., Nadelhoffer K., Parris A., Raymond P.A., Schimel J., Williamson C.E., 2013, *The impacts of climate change on ecosystem structure and function*, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 474–482. DOI: 10.1890/120282.
- Grumm R.H., 2011, *The Central European and Russian Heat Event of July-August 2010*, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(10), 1285–1296.
- Hajat S., Kosatky T., 2010, *Heat-related mortality: A review and exploration of heterogeneity*, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 64(9), 753–760. DOI: 10.1136/jech.2009.087999.
- 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*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D20119, 1–12. DOI: 10.1029/2008JD010201.

- Holtanová E., Valeriánová A., Crhová L., Racko S., 2014, *Heat wave of August 2012 in the Czech Republic: comparison of two approaches to assess high temperature event*, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 159–172. DOI: 10.1007/s11200-014-0805-6.
- Horton R.M., Mankin J.S., Lesk C., Coffel E., Raymond C., 2016, *A review of recent advances in research on extreme heat events*, *Current Climate Change Reports*, 2, 242–259. DOI: 10.1007/s40641-016-0042-x.
- Hoy A., Hänsel S., Maugeri M., 2020, *An endless summer: 2018 heat episodes in Europe in the context of secular temperature variability and change*, *International Journal of Climatology*, 40(15), 6315–6336. DOI: 10.1002/joc.6582.
- Hoy A., Hänsel S., Skalak P., Ustrnul Z., Bochníček O., 2017, *The extreme European summer of 2015 in a long-term perspective*, *International Journal of Climatology*, 37, 943–962. DOI: 10.1002/joc.4751.
- IMGW-PIB, 2023, *Wyjątkowo ciepły przelom roku*, <https://www.imgw.pl/wydarzenia/wyjatkowo-ciepły-przelom-roku> (dostęp: 8.01.2023).
- IPCC, 2012, *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*, 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 (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK–New York, NY, USA.
- IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK–New York, NY, USA.
- IPCC, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (red.), Cambridge University Press, Cambridge, UK–New York, NY, USA. DOI: 10.1017/9781009325844.
- Jaeger E.B., Seneviratne S.I., 2011, *Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model*, *Climate Dynamics*, 36, 1919–1939. DOI: 10.1007/s00382-010-0780-8.
- Katavoutas G., Founda D., 2019, *Response of urban heat stress to heatwaves in Athens (1960–2017)*, *Atmosphere*, 10(9), 483, 31–16. DOI: 10.3390/atmos10090483.
- Kažys J., Stankunavičius G., Rimkus E., Bukantis A., Valiukas D., 2011, *Long-range alternation of extreme high day and night temperatures in Lithuania*, *Baltica*, 24(2), 72–81.
- Keggenhoff I., Elizbarashvili M., King L., 2015, *Heat wave events over Georgia since 1961: Climatology, changes and severity*, *Climate*, 3, 308–328. DOI: 10.3390/cli3020308.

- Kersebaum K.C., 2022, *Frost risk by dwindling snow cover*, *Nature Climate Change*, 12, 421–423. DOI: 10.1038/s41558-022-01334-4.
- Kivinen S., Rasmus S., Jylhä K., Laapas M., 2017, *Long-term climate trends and extreme events in northern Fennoscandia (1914–2013)*, *Climate*, 5(16). DOI: 10.3390/cli5010016.
- Kjellstrom T., Kovats R.S., Lloyd S.J., Holt T., Tol R.S.J., 2009, *The direct impact of climate change on regional labor productivity*, *Archives of Environmental and Occupational Health*, 64, 217–227. DOI: 10.1080/19338240903352776.
- Klein Tank A.M.G., Können G.P., 2003, *Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1948–99*, *Journal of Climate*, 16, 3665–3680. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2.
- Kovats R.S., Hajat S., 2008, *Heat stress and public health: A critical review*, *Annual Review of Public Health*, 29, 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- Krzyżewska A., Dyer J., 2018, *The August 2015 mega-heatwave in Poland in the context of past events*, *Weather*, 73, 207–214. DOI: 10.1002/wea.3244.
- Krzyżewska A., Dyer J., 2019, *Local-scale analysis of temperature patterns over Poland during heatwave events*, *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 261–277. DOI: 10.1007/s00704-017-2364-6.
- Kuglitsch F.G., Toreti A., Xoplaki E., Della-Marta P.M., Zerefos C.S., Trke M., Luterbacher J., 2010, *Heat wave changes in the Eastern Mediterranean since 1960*, *Geophysical Research Letters*, 37, 1–5. DOI: 10.1029/2009GL041841.
- Kyselý J., 2002, *Temporal fluctuations in heat waves at Prague-Klementinum, The Czech Republic, from 1901–97, and their relationships to atmospheric circulation*, *International Journal of Climatology*, 22, 33–50. DOI: 10.1002/joc.720.
- 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, 147–163. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.01.003.
- Kyselý J., 2010, *Recent severe heat waves in Central Europe: how to view them in a long-term prospect?*, *International Journal of Climatology*, 30, 89–109. DOI: 10.1002/joc.1874.
- Ladwig L.M., Chandler J.L., Guiden P.W., Henn J.J., 2019, *Extreme winter warm event causes exceptionally early bud break for many woody species*, *Ecosphere*, 10(1), e02542. DOI: 10.1002/ecs2.2542.
- Lavaysse C., Cammalleri C., Dosio A., Van Der Schrier G., Toreti A., Vogt J., 2018, *Towards a monitoring system of temperature extremes in Europe*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 91–104. DOI: 10.5194/nhess-18-91-2018.
- Lhotka O., Kyselý J., 2015a, *Characterizing joint effects of spatial extent, temperature magnitude and duration of heat waves and cold spells over Central Europe*, *International Journal of Climatology*, 35, 1232–1244. DOI: 10.1002/joc.4050.
- Lhotka O., Kyselý J., 2015b, *Hot Central-European summer of 2013 in a long-term context*, *International Journal of Climatology*, 35, 4399–4407. DOI: 10.1002/joc.4277.

- Linnerud K., Mideksa T.K., Eskeland G.S., 2011, *The impact of climate change on nuclear power supply*, The Energy Journal, 32(1), 149–168. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol32-No1-6.
- López-Moreno J.I., El-Kenawy A., Revuelto J., Azorin-Molina C., Moran-Tejeda E., Lorenzo-Lacruz J., Zabalza J., Vicente-Serrano S.M., 2014, *Observed trends and future projections for winter warm events in the Ebro basin, northeast Iberian Peninsula*, International Journal of Climatology, 34, 49–60. DOI: 10.1002/joc.3665.
- Lorenz R., Stalhandske Z., Fischer E.M., 2019, *Detection of a climate change signal in extreme heat, heat stress, and cold in Europe from observations*, Geophysical Research Letters, 46, 8363–8374. DOI: 10.1029/2019GL082062.
- Luterbacher J., Liniger M.A., Menzel A., Estrella N., Della-Marta P.M., Pfister C., Rutishauser T., Xoplaki E., 2007, *Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts*, Geophysical Research Letters, 34, 1–6. DOI: 10.1029/2007GL029951.
- Ma F., Yuan X., Jiao Y., Ji P., 2020, *Unprecedented Europe heat in June–July 2019: Risk in the historical and future context*, Geophysical Research Letters, 47, 1–10. DOI: 10.1029/2020GL087809.
- Matzarakis A., Nastos P.T., 2011, *Human-biometeorological assessment of heat waves in Athens*, Theoretical and Applied Climatology, 105(1), 99–106. DOI: 10.1007/s00704-010-0379-3.
- McCarthy M., Armstrong L., Armstrong N., 2019, *A new heatwave definition for the UK*, Weather, 74(11), 382–387. DOI: 10.1002/wea.3629.
- McEvoy D., Ahmed I., Mullett J., 2012, *The impact of the 2009 heat wave on Melbourne's critical infrastructure*, Local Environment, 17, 783–796. DOI: 10.1080/13549839.2012.678320.
- McEvoy D.J., Hatchett B., 2022, *Spring heat waves drive record western United States snow melt in 2021*, Environmental Research Letters, 18, 014007, 1–10. DOI: 10.1088/1748-9326/aca8bd.
- McKechnie A.E., Rushworth I.A., Myburgh F., Cunningham S.J., 2021, *Mortality among birds and bats during an extreme heat event in eastern South Africa*, Austral Ecology, 46(4), 687–691. DOI: 10.1111/aec.13025.
- Meehl G.A., Tebaldi C., 2004, *More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century*, Science, 305, 994–997. DOI: 10.1126/science.1098704.
- Menzel A., Seifert H., Estrella N., 2011, *Effects of recent warm and cold spells on European plant phenology*, International Journal of Biometeorology, 55, 921–932. DOI: 10.1007/s00484-011-0466-x.
- Miralles D.G., Teuling A.J., Van Heerwaarden C.C., De Arellano J.V.G., 2014, *Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation*, Nature Geoscience, 7, 345–349. DOI: 10.1038/ngeo2141.
- Mora C., Counsell C.W.W., Bielecki C.R., Louis L.V., 2017a, *Twenty-seven ways a heat wave can kill you: Deadly heat in the era of climate change*, Circulation: Cardiovascular Quality and Outcomes, 10(11), e004233, 1–3. DOI: 10.1161/CIRCOUTCOMES.117.004233.

- Mora C., Dousset B., Caldwell I.R., Powell F.E., Geronimo R.C., Bielecki C.R., Counsell C.W.W., Dietrich B.S., Johnston E.T., Louis L.V., Lucas M.P., McKenzie M.M., Shea A.G., Tseng H., Giambelluca T.W., Leon L.R., Hawkins E., Trauernicht C., 2017b, *Global risk of deadly heat*, Nature Climate Change, 7(7), 501–506. DOI: 10.1038/nclimate3322.
- Morabito M., Crisci A., Messeri A., Messeri G., Betti G., Orlandini S., Raschi A., Maracchi G., 2017, *Increasing heatwave hazards in the southeastern European Union capitals*, Atmosphere, 8(115). DOI: 10.3390/atmos8070115.
- Mueller B., Seneviratne S.I., 2012, *Hot days induced by precipitation deficits at the global scale*, PNAS, 109(31), 12398–12403. DOI: 10.1073/pnas.1204330109.
- Nairn J.R., Fawcett R.J.B., 2013, *Defining heatwaves: heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia*, CAWCR technical report No. 060, The Centre for Australian Weather and Climate Research, Australia.
- Nairn J.R., Fawcett R.J.B., 2014, *The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 12, 227–253. DOI: 10.3390/ijerph120100227.
- Nuvolone D., Petri D., Voller F., 2018, *The effects of ozone on human health*, Environmental Science and Pollution Research, 25(9), 8074–8088. DOI: 10.1007/s11356-017-9239-3.
- Parente J., Pereira M.G., Amraoui M., Fischer E.M., 2018, *Heat waves in Portugal: Current regime, changes in future climate and impacts on extreme wildfires*, Science of the Total Environment, 631–632, 534–549. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.044.
- Parola P., Musso D., 2020, *Zika, dengue, chikungunya and yellow fever infections in Europe? – Winter is over, warm days are coming – So hedge your bets*, Travel Medicine and Infectious Disease, 35(101614), 1–2. DOI: 10.1016/j.tmaid.2020.101614.
- Pascal M., Laaidi K., Ledrans M., Baffert E., Caserio-Schönemann C., le Tertre A., Manach J., Medina S., Rudant J., Empereur-Bissonnet P., 2006, *France's heat health watch warning system*, International Journal of Biometeorology, 50(3), 144–153. DOI: 10.1007/s00484-005-0003-x.
- Pascal M., Wagner V., le Tertre A., Laaidi K., Honoré C., Bénichou F., Beaudeau P., 2013, *Definition of temperature thresholds: The example of the French heat wave warning system*, International Journal of Biometeorology, 57(1), 21–29. DOI: 10.1007/s00484-012-0530-1.
- Peña-Ortiz C., Barriopedro D., García-Herrera R., 2015, *Multidecadal variability of the summer length in Europe*, Journal of Climate, 28, 5375–5388. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00429.1.
- Pereira M.G., Trigo R.M., da Camara C.C., Pereira J.M.C., Leite S.M., 2005, *Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal*, Agricultural and Forest Meteorology, 129(1–2), 11–25. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.12.007.
- Perkins S.E., 2015, *A review on the scientific understanding of heatwaves – Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale*, Atmospheric Research, 164–165, 242–267. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.05.014.
- Perkins S.E., Alexander L.V., 2013, *On the measurement of heat waves*, Journal of Climate, 26, 4500–4517. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00383.1.

- 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, 1–5. DOI: 10.1029/2012GL053361.
- Perkins-Kirkpatrick S.E., Lewis S.C., 2020, *Increasing trends in regional heatwaves*, *Nature Communications*, 11, 1–8. DOI: 10.1038/s41467-020-16970-7.
- Piticar A., Cheval S., Frighenciu M., 2019, *A review of recent studies on heat wave definitions, mechanisms, changes, and impact on mortality*, *Forum Geografic*, 18(2), 96–114. DOI: 10.5775/fg.2019.019.d.
- Pokorná L., Kučerová M., Huth R., 2018, *Annual cycle of temperature trends in Europe, 1961–2000*, *Global and Planetary Change*, 170, 146–162. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.08.015.
- Popov T., Gnjato S., Trbić G., Ivanišević M., 2018, *Recent trends in extreme temperature indices in Bosnia and Herzegovina*, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13, 211–224. DOI: 10.26471/cjees/2018/013/019.
- 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, 533–540. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0455.
- Potopová V., Boroneanț C., Možný M., Soukup J., 2016, *Driving role of snow cover on soil moisture and drought development during the growing season in the Czech Republic*, *International Journal of Climatology*, 36, 3741–3758. DOI: 10.1002/joc.4588.
- Potopová V., Lhotka O., Možný M., Musiolková M., 2021, *Vulnerability of hop-yields due to compound drought and heat events over European key-hop regions*, *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2136–E2158. DOI: 10.1002/joc.6836.
- Quintana F., Uhart M.M., Gallo L., Mattera M.B., Rimondi A., Gómez-Laich A., 2022, *Heat-related massive chick mortality in an Imperial Cormorant *Leucocarbo atriceps* colony from Patagonia, Argentina*, *Polar Biology*, 45(2), 275–284. DOI: 10.1007/s00300-021-02982-6.
- Rasilla D., Allende F., Martilli A., Fernández F., 2019, *Heat waves and human well-being in Madrid (Spain)*, *Atmosphere*, 10(5), 1–21. DOI: 10.3390/atmos10050288.
- Ratnayake H.U., Kearney M.R., Govekar P., Karoly D., Welbergen J.A., 2019, *Forecasting wildlife die-offs from extreme heat events*, *Animal Conservation*, 22, 386–395. DOI: 10.1111/acv.12476.
- Rebetez M., Dupont O., Giroud M., 2009, *An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003*, *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 1–7. DOI: 10.1007/s00704-007-0370-9.
- Robine J.M., Cheung S.L.K., le Roy S., van Oyen H., Griffiths C., Michel J.P., Herrmann F.R., 2008, *Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003*, *Comptes Rendus – Biologies*, 331(2), 171–178. DOI: 10.1016/j.crv.2007.12.001.
- Roiz D., Neteler M., Castellani C., Arnoldi D., Rizzoli A., 2011, *Climatic factors driving invasion of the tiger mosquito (*Aedes albopictus*) into new areas of Trentino, Northern Italy*, *PLoS ONE*, 6, 4–11. DOI: 10.1371/journal.pone.0014800.
- Rübelke D., Vögele S., 2011, *Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector*, *Environmental Science and Policy*, 14, 53–63. DOI: 10.1016/j.envsci.2010.10.007.

- Russo S., Dosio A., Graversen R.G., Sillmann J., Carrao H., Dunbar M.B., Singleton A., Montagna P., Barbola P., Vogt J.V., 2014, *Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 12500–12512. DOI: 10.1002/2014JD022098.
- Russo S., Sillmann J., Fischer E.M., 2015, *Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades*, Environmental Research Letters, 10(124003), 1–15. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/124003.
- Rusticucci M., Kysely J., Almeida G., Lhotka O., 2016, *Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires*, Theoretical and Applied Climatology, 124, 679–689. DOI: 10.1007/s00704-015-1445-7.
- Sánchez-Benítez A., García-Herrera R., Barriopedro D., Sousa P.M., Trigo R.M., 2018, *June 2017: The earliest European summer mega-heatwave of reanalysis period*, Geophysical Research Letters, 45, 1955–1962. DOI: 10.1002/2018GL077253.
- Sanderson M., Economou T., Salmon K., Jones S., 2017, *Historical trends and variability in heat waves in the United Kingdom*, Atmosphere, 8(10), 191, 1–17. DOI: 10.3390/atmos8100191.
- Saunders D.A., Mawson P., Dawson R., 2011, *The impact of two extreme weather events and other causes of death on Carnaby's Black Cockatoo: A promise of things to come for a threatened species?*, Pacific Conservation Biology, 17(2), 141–148. DOI: 10.1071/PC110141.
- Schneider A., Schubert S., Vargin P., Lunkeit F., Zhu X., Peters D.H.W., Fraedrich K., 2012, *Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: Summer 2010*, Monthly Weather Review, 140, 2967–2981. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00249.1.
- Sherwood S.C., Huber M., 2010, *An adaptability limit to climate change due to heat stress*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107(21), 9552–9555. DOI: 10.1073/pnas.0913352107.
- Shevchenko O., Lee H., Snizhko S., Mayer H., 2014, *Long-term analysis of heat waves in Ukraine*, International Journal of Climatology, 34, 1642–1650. DOI: 10.1002/joc.3792.
- Siegmund J.F., Wiedermann M., Donges J.F., Donner R.V., 2016, *Impact of temperature and precipitation extremes on the flowering dates of four German wildlife shrub species*, Biogeosciences, 13, 5541–5555. DOI: 10.5194/bg-13-5541-2016.
- Słownik meteorologiczny*, 2003, T. Niedźwiedz (red.), Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Solberg S., Hov Ø., Søvde A., Isaksen I.S.A., Coddeville P., de Backer H., Forster C., Orsolini Y., Uhse K., 2008, *European surface ozone in the extreme summer 2003*, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(7), D07307, 1–16. DOI: 10.1029/2007JD009098.
- Soravia C., Ashton B.J., Thornton A., Ridley A.R., 2021, *The impacts of heat stress on animal cognition: Implications for adaptation to a changing climate*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 12(4), 1–29. DOI: 10.1002/wcc.713.
- Sousa P.M., Barriopedro D., García-Herrera R., Ordóñez C., Soares P.M.M., Trigo R.M., 2020, *Distinct influences of large-scale circulation and regional feedbacks in two exceptional 2019 European heatwaves*, Communications Earth & Environment, 1, 48, 1–13. DOI: 10.1038/s43247-020-00048-9.



- Sousa P.M., Barriopedro D., Ramos A.M., García-Herrera R., Espírito-Santo F., Trigo R.M., 2019, *Saharan air intrusions as a relevant mechanism for Iberian heatwaves: The record breaking events of August 2018 and June 2019*, *Weather and Climate Extremes*, 26(100224), 1–13. DOI: 10.1016/j.wace.2019.100224.
- Sousa P.M., Trigo R.M., Barriopedro D., Soares P.M.M., Santos J.A., 2018, *European temperature responses to blocking and ridge regional patterns*, *Climate Dynamics*, 50, 457–477. DOI: 10.1007/s00382-017-3620-2.
- Spinoni J., Lakatos M., Szentimrey T., Bihari Z., Szalai S., Vogt J., Antofie T., 2015, *Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010*, *International Journal of Climatology*, 35, 4197–4209. DOI: 10.1002/joc.4279.
- Stéfanon M., D’Andrea F., Drobinski P., 2012, *Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region*, *Environmental Research Letters*, 7, 1–9. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/014023.
- Stéfanon M., Drobinski P., D’Andrea F., Lebeaupin-Brossier C., Bastin S., 2014, *Soil moisture-temperature feedbacks at meso-scale during summer heat waves over Western Europe*, *Climate Dynamics*, 42, 1309–1324. DOI: 10.1007/s00382-013-1794-9.
- Stephenson D.B., 2008, *Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events*, *Climate Extremes and Society*, 340, 11–23. DOI: 10.1017/CBO9780511535840.003.
- Sui C., Yu L., Vihma T., 2020, *Occurrence and drivers of wintertime temperature extremes in Northern Europe during 1979–2016*, *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 72, 1–19. DOI: 10.1080/16000870.2020.1788368.
- Sulikowska A., Wypych A., 2020a, *Summer temperature extremes in Europe: how does the definition affect the results?*, *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1–2), 19–30. DOI: 10.1007/s00704-020-03166-8.
- Sulikowska A., Wypych A., 2020b, *How unusual were June 2019 temperatures in the context of European climatology?*, *Atmosphere*, 11(7), 1–19. DOI: 10.3390/atmos11070697.
- Sulikowska A., Wypych A., 2021, *Seasonal variability of trends in regional hot and warm temperature extremes in Europe*, *Atmosphere*, 12(5), 1–21. DOI: 10.3390/atmos12050612.
- Sulikowska A., Wypych A., Woszczyk I., 2016, *Fale upałów latem 2015 roku i ich uwarunkowania cyrkulacyjne*, *Badania Fizjograficzne, Seria A: Geografia Fizyczna* 7(A67), 205–223. DOI: 10.14746/bfg.2016.7.16.
- Sutherst R.W., Constable F., Finlay K.J., Harrington R., Luck J., Zalucki P.M., 2011, *Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate*, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 220–237. DOI: 10.1002/wcc.102.
- Tang Q., Zhang X., Francis J.A., 2014, *Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere*, *Nature Climate Change*, 4, 45–50. DOI: 10.1038/nclimate2065.
- Thornton P.K., van de Steeg J., Notenbaert A., Herrero M., 2009, *The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know*, *Agricultural Systems*, 101, 113–127. DOI: 10.1016/j.agsy.2009.05.002.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2016, *Heat waves in Central Europe and their circulation conditions*, *International Journal of Climatology*, 36, 770–782. DOI: 10.1002/joc.4381.

- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2019, *Heat waves in Central Europe and tropospheric anomalies of temperature and geopotential heights*, International Journal of Climatology, 39, 4189–4205. DOI: 10.1002/joc.6067.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2020, *The extreme year – analysis of thermal conditions in Poland in 2018*, Theoretical and Applied Climatology, 139, 251–260. DOI: 10.1007/s00704-019-02968-9.
- Tomczyk A.M., Piotrowski P., Bednorz E., 2017a, *Warm spells in Northern Europe in relation to atmospheric circulation*, Theoretical and Applied Climatology, 128, 623–634. DOI: 10.1007/s00704-015-1727-0.
- Tomczyk A.M., Pólrólniczak M., Bednorz E., 2017b, *Circulation conditions' effect on the occurrence of heatwaves in Western and Southwestern Europe*, Atmosphere, 8(31), 1–17. DOI: 10.3390/atmos8020031.
- Tomczyk A.M., Sulikowska A., 2018, *Heat waves in lowland Germany and their circulation-related conditions*, Meteorology and Atmospheric Physics, 130, 499–515. DOI: 10.1007/s00703-017-0549-2.
- Tomczyk A.M., Sulikowska A., Bednorz E., Pólrólniczak M., 2019, *Atmospheric circulation conditions during winter warm spells in Central Europe*, Natural Hazards, 96, 1413–1428. DOI: 10.1007/s11069-019-03621-4.
- Trigo R.M., García-Herrera R., Díaz J., Trigo I.F., Valente M.A., 2005, *How exceptional was the early August 2003 heatwave in France?*, Geophysical Research Letters, 32, 1–4. DOI: 10.1029/2005GL022410.
- Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjelv g A.O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rötter R., Iglesias A., Orlandini S., Dubrovský M., Hlavinka P., Balek J., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vučetić V., Nejedlik P., Kumar S., Lalic B., Mestre A., Rossi F., Kozyra J., Alexandrov V., Semerádová D., Žalud Z., 2011, *Agroclimatic conditions in Europe under climate change*, Global Change Biology, 17, 2298–2318. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x.
- Turco M., von Hardenberg J., AghaKouchak A., Llasat M.C., Provenzale A., Trigo R.M., 2017, *On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe*, Scientific Reports, 7(1), 1–10. DOI: 10.1038/s41598-017-00116-9.
- Unkašević M., Tošić I., 2009, *An analysis of heat waves in Serbia*, Global and Planetary Change, 65, 17–26. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.10.009.
- Urban A., Hanzlíková H., Kyselý J., Plavcová E., 2017, *Impacts of the 2015 heat waves on mortality in the Czech Republic – a comparison with previous heat waves*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 14, 1–19. DOI: 10.3390/ijerph14121562.
- Ustrnul Z., Czekierda D., Wypych A., 2010, *Extreme values of air temperature in Poland according to different atmospheric circulation classifications*, Physics and Chemistry of the Earth, 35, 429–436. DOI: 10.1016/j.pce.2009.12.012.
- Valleron A.J., Boumendil A., 2004, *Épidémiologie et canicules: Analyses de la vague de chaleur 2003 en France*, Comptes Rendus – Biologies, 327(12), 1125–1141. DOI: 10.1016/j.crv.2004.09.009.

- Vandendorren S., Bretin P., Zeghnoun A., Mandereau-Bruno L., Croisier A., Cochet C., Ribéron J., Siberan I., Declercq B., Ledrans M., 2006, *August 2003 heat wave in France: Risk factors for death of elderly people living at home*, *European Journal of Public Health*, 16(6), 583–591. DOI: 10.1093/eurpub/ckl063.
- Vautard R., Yiou P., D’Andrea F., de Noblet N., Viovy N., Cassou C., Polcher J., Ciais P., Kageyama M., Fan Y., 2007, *Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit*, *Geophysical Research Letters*, 34, 1–5. DOI: 10.1029/2006GL028001.
- Vitasse Y., Rebetez M., 2018, *Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017*, *Climatic Change*, 149, 233–246. DOI: 10.1007/s10584-018-2234-y.
- Vogel E., Donat M.G., Alexander L.V., Meinshausen M., Ray D.K., Karoly D., Meinshausen N., Frieler K., 2019, *The effects of climate extremes on global agricultural yields*, *Environmental Research Letters*, 14(054010), 1–12. DOI: 10.1088/1748-9326/ab154b.
- Westerling A.L., Hidalgo H.G., Cayan D.R., Swetnam T.W., 2006, *Warming and earlier spring increase Western U.S. forest wildfire activity*, *Science*, 313, 940–943. DOI: 10.1126/science.1128834.
- Wibig J., 2017, *Heat waves in Poland in the period 1951–2015: trends, patterns and driving factors*, *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6, 1–10. DOI: 10.26491/mhwm/78420.
- Wibig J., 2021, *Hot Days and Heat Waves in Poland in the Period 1951–2019 and the Circulation Factors Favoring the Most Extreme of Them*, *Atmosphere*, 12(640), 1–19. DOI: 10.3390/atmos12030340.
- Williams C.M., Henry H.A.L., Sinclair B.J., 2015, *Cold truths: How winter drives responses of terrestrial organisms to climate change*, *Biological Reviews*, 90, 214–235. DOI: 10.1111/brv.12105.
- WMO, 2009, *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72, Geneva, Switzerland.
- WMO, 2023, *UNTERM The United Nations Terminology Database*, *terminy: extreme, heat wave*, <https://unterm.un.org/unterm2/en/> (dostęp: 1.01.2023).
- Wypych A., Sulikowska A., Ustrnul Z., Czekierda D., 2017a, *Temporal variability of summer temperature extremes in Poland*, *Atmosphere*, 8(51), 1–16. DOI: 10.3390/atmos8030051.
- Wypych A., Ustrnul Z., Sulikowska A., Chmielewski F.M., Bochenek B., 2017b, *Spatial and temporal variability of the frost-free season in Central Europe and its circulation background*, *International Journal of Climatology*, 37, 3340–3352. DOI: 10.1002/joc.4920.
- Xie Y., Wang X., Wilson A.M., Silander J.A., 2018, *Predicting autumn phenology: How deciduous tree species respond to weather stressors*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251, 127–137. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.12.259.
- Xu Z., FitzGerald G., Guo Y., Jalaludin B., Tong S., 2016, *Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: a systematic review and meta-analysis*, *Environment International*, 89–90, 193–203. DOI: 10.1016/j.envint.2016.02.007.

- Young M., Galvin J., 2020, *The record-breaking warm spell of February 2019 in Britain, the Channel Islands, France and the Netherlands*, *Weather*, 75, 36–45. DOI: 10.1002/wea.3664.
- Zampieri M., D’Andrea F., Vautard R., Ciais P., De Noblet-Ducoudré N., Yiou P., 2009, *Hot European summers and the role of soil moisture in the propagation of Mediterranean drought*, *Journal of Climate*, 22, 4747–4758. DOI: 10.1175/2009JCLI2568.1.
- Zander K.K., Botzen W.J.W., Oppermann E., Kjellstrom T., Garnett S.T., 2015, *Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia*, *Nature Climate Change*, 5, 647–651. DOI: 10.1038/nclimate2623.
- Zhang X., Alexander L.V., Hegerl G.C., Jones P., Klein Tank A.M.G., Peterson T.C., Trewin B., Zwiers F.W., 2011, *Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data*, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2, 851–870. DOI: 10.1002/wcc.147.
- Zhu P., Kim T., Jin Z., Lin C., Wang X., Ciais P., Mueller N.D., Aghakouchak A., Huang J., Mualla D., Makowski D., 2022, *The critical benefits of snowpack insulation and snowmelt for winter wheat productivity*, *Nature Climate Change*, 12, 485–490. DOI: 10.1038/s41558-022-01327-3.
- Zschenderlein P., Fink A.H., Pfahl S., Wernli H., 2019, *Processes determining heat waves across different European climates*, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 2973–2989. DOI: 10.1002/qj.3599.

Agnieszka Sulikowska  
Zakład Klimatologii  
Uniwersytet Jagielloński  
ul. Gronostajowa 7, 30–387 Kraków  
agn.sulikowska@uj.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-2930-728X

Agnieszka Wypych  
Zakład Klimatologii  
Uniwersytet Jagielloński  
ul. Gronostajowa 7, 30–387 Kraków  
agnieszka.wypych@uj.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-5379-5834