



Obciążenia cieplne człowieka podczas niezwykle ciepłych miesięcy letnich w Krakowie

Human thermal stress during exceptionally warm summer months in Kraków (Poland)

Robert Twardosz 

Uniwersytet Jagielloński
Wydział Geografii i Geologii
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków
r.twardosz@uj.edu.pl

Zarys treści. W pracy scharakteryzowano obciążenia cieplne człowieka w trzech najgorętszych miesiącach, które wystąpiły w Krakowie na początku XXI w., a mianowicie w lipcu 2006 r., sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r. Podstawę badań stanowiły wartości wskaźnika UTCI obliczone na bazie czterech elementów meteorologicznych z trzech terminów obserwacji w ciągu doby (6, 12 i 18 UTC). Jako okres referencyjny przyjęto ostatnie trzydziestolecie 1991-2020. W opracowaniu wykorzystano także kalendarz typów cyrkulacji i mas powietrznych nad południową Polską (Niedźwiedź, 1981, 2023).

Na postawie średnich wartości charakterystyk termicznych, jak i wskaźnika UTCI, wykazano, że warunki odczuwalne w 3 niezwykle ciepłych miesiącach były podobne. Ogólnie dni ze stresem ciepła (o 12 UTC) było rekordowo dużo: od 70% w sierpniu 2015 r. do 84% w czerwcu 2019 r. Przebieg obciążeń z dnia na dzień był nieco odmienny. Potwierdziło się, zgodnie z dotychczasową wiedzą, że o nasileniu gorąca zadecydowały zarówno charakter cyrkulacji, jak i kierunek adwekcji i typ masy powietrznej. Podczas niezwykle ciepłych miesięcy w dniach z najsilniejszym stresem ciepła przeważała cyrkulacja antycyklonalna z sektora południowego (Sa i SWa), sprządzająca gorące masy powietrza zwrotnikowego.

Słowa kluczowe: UTCI, stres ciepła, niezwykle ciepły miesiąc, cyrkulacja atmosferyczna, masa powietrzna, Kraków.

Keywords: *UTCI, heat stress, exceptionally warm month, atmospheric circulation, air masses, Kraków, Poland.*

Wstęp

Od połowy lat 80. XX w. stwierdza się w Europie, w tym w Polsce, silny trend wzrostowy temperatury powietrza we wszystkich porach roku (Twardosz et al., 2021; Ustrnul et al., 2021). Z punktu widzenia statystycznego jest on najbardziej stabilny latem, co jest oczywistą konsekwencją mniejszej zmienności temperatury w tej porze roku. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że jest to największy wzrost temperatury, jaki pojawił się w ciągu ostatnich 2000 lat (Luterbacher et al., 2016). Ocieplenie objawia się rosnącą częstością występowania ekstremalnych zjawisk natury klimatycznej, takich jak fale upałów, czy też okresami miesięcznymi, a nawet całymi porami roku z temperaturą znacznie przekraczającą średnią wieloletnią, tj. o 3, a nawet o 4 odchylenia standardowe (Twardosz i Kossowska-Cezak, 2021; Skrzyńska i Twardosz, 2023). Do takich okresów, które trwale

zapisaly się w pamięci Europejczyków, był niezwykle ciepły sierpień 2003 r. w zachodniej części kontynentu. Występujące wtedy przez kilkanaście dni ekstremalnie wysokie wartości temperatury maksymalnej i minimalnej były pośrednią przyczyną nadumieralności wśród mieszkańców zachodniej Europy, zwłaszcza we Francji (Twardosz, 2009). Zjawisko to dobitnie pokazało, że postępujące ocieplenie zmienia klimat odczuwalny (Twardosz i Kossowska-Cezak, 2021). Dlatego też od początku XXI w. nasiliły się badania biometeorologiczne przy wykorzystaniu uniwersalnego klimatycznego wskaźnika termicznego (UTCI), w którym uwzględniono m.in. procesy termoregulacyjne organizmu człowieka w różnych warunkach termicznych otoczenia (Błażejczyk et al., 2010a, b; Błażejczyk et al., 2012). Półklosiem tych badań były liczne publikacje odnoszące się do różnych państw Europy, m.in. Węgier i Czech (Nemeth, 2011; Novak, 2013), a nawet całego kontynentu europejskiego (np. Di Napoli et al., 2018; Vinogradova, 2021).

W Polsce badania bioklimatyczne na podstawie UTCI prowadziło wielu autorów. Dotyczyły one różnej skali czasowej i przestrzennej (Dobek, 2013; Dobek et al., 2013; Dobek i Krzyżewska, 2015; Pórolniczak et al., 2016; Krzyżewska et al., 2021; Błażejczyk et al., 2022) oraz uwarunkowań cyrkulacyjnych (Nowosad et al., 2013; Krzyżewska et al., 2016; Owczarek, 2019; Tomczyk i Owczarek, 2020).

Celem tej pracy jest charakterystyka obciążeń cieplnych człowieka w trzech najgorętszych miesiącach letnich, które wystąpiły w Krakowie na początku XXI w., a mianowicie w lipcu 2006 r., sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r. (kolejność chronologiczna). Cel ten sprostado się do odpowiedzi na pytanie, jak dalece te obciążenia odbiegały od warunków przeciętnych i jakie były ich uwarunkowania cyrkulacyjne. Jak pokazały badania, wybrane miesiące należały do kategorii anomalnych pod względem termicznym, a więc z temperaturą przekraczającą znacznie (przynajmniej 2 odchylenia standardowe, SD) średnią wieloletnią (Twardosz i Kossowska-Cezak, 2021). Warto tu podkreślić, że według regionalnych badań epidemiologicznych wartości temperatury różniące się o 2 SD są potencjalnie odpowiedzialne za ponad 10% wzrost śmiertelności w Europie (Quesada, 2014).

Wybrane do analizy miesiące letnie były nie tylko niezwykle gorące, ale też anomalnie suche (Twardosz, 2017; Krzyżewska i Dyer, 2018; Twardosz i Wałach, 2020; Krzyżewska et al., 2021; Błażejczyk et al., 2022). Susza, która towarzyszyła tym upałom, wpłynęła niekorzystnie na gospodarkę, w szczególności na rolnictwo (Kuchcik, 2017). Występowanie tak dużych anomalii termicznych i opadowych należy do największych zagrożeń naturalnych w Polsce (Pociask-Karteczka et al., 2018).

Dane i metody opracowania

Podstawowy materiał wyjściowy do analizy stanowiły temperatura i wilgotność względna powietrza, prędkość wiatru i wielkość zachmurzenia z 3 terminów obserwacyjnych, tzn. z godziny 6, 12 i 18 UTC z miesięcy letnich (czerwiec-sierpień) z trzydziestolecia 1991-2020. Dane te pochodzą ze stacji klimatologicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, z terenu Ogrodu Botanicznego położonego w centrum miasta. Na podstawie tego zestawu danych dokonano charakterystyki obciążeń cieplnych człowieka w 3 niezwykle ciepłych miesiącach (NCM) tej pory roku: w lipcu 2006 r., sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r. na tle wielolecia. Do określenia obciążeń cieplnych wykorzystano wskaźnik UTCI, który jest oparty na tzw. modelach wielowęzłowych, zwłaszcza na modelu Fiali (Fiala et al.,

2001). Sposób opracowania tego wskaźnika został szczegółowo przedstawiony w wielu publikacjach (Błażejczyk et al., 2010a, b; 2012). Obliczenia UTCI wykonano w programie BioKlima2.6 (Błażejczyk i Błażejczyk, 2010). W zależności od wartości wskaźnika UTCI (°C) opracowana została skala obciążeń (Błażejczyk et al., 2010a, b):

>46,0 – nieznosny stres ciepła,

38,1-46,0 – bardzo silny stres ciepła,

32,1-38,0 – silny stres ciepła,

26,1-32,0 – umiarkowany stres ciepła,

9,1-26,0 – brak obciążeń cieplnych,

0,1-9,0 – łagodny stres zimna.

Dalsza część skali obciążeń znajduje zastosowanie do miesięcy chłodniejszych, więc nie jest tu przytaczana. Skala ta jest oparta na obiektywnych zmianach parametrów fizjologicznych organizmu, zachodzących pod wpływem warunków środowiskowych (Błażejczyk et al., 2010a, b).

Drugi zestaw danych wykorzystanych w badaniach stanowiły wartości temperatury maksymalnej i minimalnej z tej samej stacji w Krakowie z lat 1991-2020. Na ich podstawie dokonano charakterystyki termicznej wymienionych NC miesięcy letnich na tle ostatniego trzydziestolecia. Obejmuje ona analizę występowania dni gorących ($t_{max} > 25^{\circ}\text{C}$), upalnych ($t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) i bardzo upalnych ($t_{max} > 35^{\circ}\text{C}$) oraz nocy gorących (tropikalnych) ($t_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) i dob tropikalnych ($t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ i $t_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) (Twardosz, 2009; Kossowska-Cezak i Skrzypczuk, 2011).

Do pokazania wielkości anomalii temperatury powietrza w rozpatrywanych 3 niezwykle ciepłych miesiącach na tle wielolecia wykorzystano średnie miesięczne wartości temperatury powietrza z tej samej stacji w Krakowie z lat 1792-2020. Ponieważ dane pochodzą ze stacji klimatologicznej, więc średnie te były liczone na podstawie wartości z 3 terminów obserwacji.

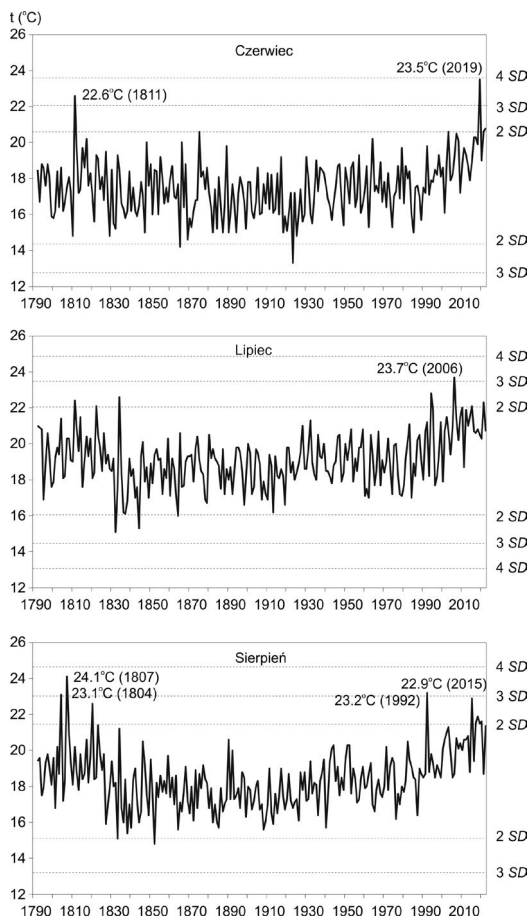
Do charakterystyki warunków cyrkulacyjnych wykorzystano kalendarz typów cyrkulacji oraz mas powietrznych Niedźwiedzia (1981, 2023). Odzwierciedla on procesy dynamiki atmosfery na obszarze południowej Polski. Najważniejszymi elementami wydzielonych typów cyrkulacji są kierunek adwekcji lub brak adwekcji oraz rodzaj układu barycznego. Łącznie Niedźwiedź wydzielił 20 typów cyrkulacji atmosfery, w tym 16 typów adwekcyjnych, po 8 antycyklonalnych i cyklonalnych. Pozostałe cztery typy stanowią sytuacje bezadwekcyjne lub sytuacje o zróżnicowanych kierunkach adwekcji. Są to: Ca – sytuacja centralna antycyklonalna, brak adwekcji, centrum wyżu nad południową Polską, Ka – klin antycyklonalny, Cc – sytuacja centralna cyklonalna, centrum niżu nad południową Polską, Bc – bruzda cyklonalna. Symbolem X (21 kod liczbowy) oznaczone zostały siodła baryczne i sytuacje niesklasyfikowane. Wydzielone przez Niedźwiedzia (1981) masy powietrzne nawiązują do powszechnie przyjętej w światowej służbie meteorologicznej klasyfikacji mas powietrza według obszaru źródłowego masy. Autor wyróżnił sześć rodzajów mas powietrznych: powietrze arktyczne (PA), powietrze polarne morskie świeże (PPm), stare (PPms) i ciepłe (PPmc), powietrze polarne kontynentalne (PPk), powietrze zwrotnikowe (PZ). Dni, w których wystąpiła więcej niż jedna masa powietrzna, Niedźwiedź (2023) ozna-

Wyniki

Charakterystyka termiczna niezwykle ciepłych miesięcy

Lipiec 2006 r., sierpień 2015 r. i czerwiec 2019 r. były najgorętszymi miesiącami w Krakowie w pierwszym dwudziestoleciu XXI w. (ryc. 1). W czerwcu i lipcu wystąpiła podobna wartość średniej temperatury powietrza (odpowiednio 23,5 i 23,7°C), w sierpniu była niewiele niższa (22,9°C). Trzeba tu podkreślić, że tak wysoka temperatura w Polsce w czerwcu (23,5°C) odpowiada przeciętnej temperaturze, jaka występuje w południowej części basenu Morza Śródziemnego (np. Tunis 23,6°C) (Twardosz i Wałach, 2020).

O wyjątkowym nasileniu gorąca w rozpatrywanych trzech NC miesiącach świadczy wielkość anomalii średniej temperatury na tle średniej wieloletniej z trzydziestolecia 1991-2020. Rekordowa anomalia temperatury ($\Delta t=6,0^{\circ}\text{C}$ i 3,9 SD) wystąpiła w czerwcu. Była to największa anomalia temperatury, jaka zdarzyła się w tym miesiącu od początku pomiarów instrumentalnych w Krakowie, czyli od 1792 r. (ryc. 1). Analiza materiałów historycznych wykonana przez Kossowską-Cezak i Twardosza (2017) pokazała, że tak niezwykle gorące czerwce zdarzały się w Polsce w wiekach wcześniejszych, co zostało upa-



Ryc. 1. Średnia temperatura powietrza (°C) w czerwcu, lipcu i sierpniu w Krakowie (1792-2022); linią przerywaną zaznaczono wielokrotność odchylenia standardowego (SD) *Average (°C, 1792-2022) air temperature for Kraków in June, July and August; multiplied values for standard deviations (SD) are marked with a dashed line*

miętnione w kronikach, jak np. czerwiec 1332: „W tym roku panowały w Polsce tak wielkie upały, że przed dniem św. Jana Chrzciciela (24 czerwca) zboża podochodziły i zupełnie były do użytku zdadne; wody powysychały i rzeki poopuszczaly swoje łoża. Starzy ludzie nie pamiętali podobnego gorąca i posuchy, a stąd uważali je za jakieś dziwy” (Girguś i Strupczewski, 1965).

Lipiec 2006 r. też był najgorętszym lipcem w całym okresie pomiarów, jednak wielkość anomalii była nieco mniejsza ($\Delta t=4,6^{\circ}\text{C}$ i 3,1 SD) niż w czerwcu 2019 r. Sierpień 2015 r. z anomalią $\Delta t=4,5^{\circ}\text{C}$ i 2,8 SD uplasował się na 4 miejscu po sierpniu 1807, 1992 i 1804. W wymienionych 3 sierpniach anomalia średniej temperatury powietrza przekroczyła aż 3 SD.

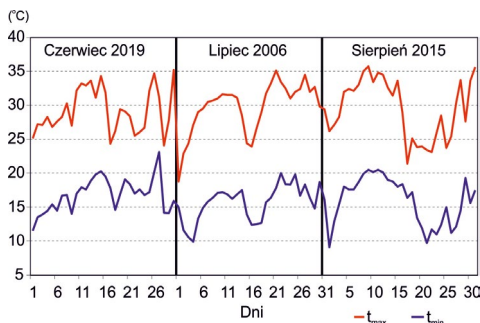
Jak bardzo gorące były to miesiące świadczy zestawienie charakterystyk termicznych w tych miesiącach na tle odpowiednich wartości średnich trzydziestoletnich 1991-2020, które pokazano w tabeli 1. Na ich podstawie widać, że gorąca pogoda utrzymywała się przez większość dni tych miesięcy; dni z $t_{max}>25^{\circ}\text{C}$ stwierdzono w ponad 80% w każdym z nich. W porównaniu do odpowiednich wartości średnich trzydziestoletnich było ich zdecydowanie więcej (w czerwcu dwukrotnie) (tab. 1). W przypadku dni upalnych $t_{max}>30^{\circ}\text{C}$ te różnice były jeszcze większe, a mianowicie w lipcu 2006 i sierpniu 2015 było ich trzykrotnie więcej, a w czerwcu 2019 nawet czterokrotnie (12, przeciętnie 3 w roku). W każdym z NC miesięcy pojawiły się po 1-2 dni z $t_{max}>35^{\circ}\text{C}$. W trzydziestoleciu 1991-2020 taka temperatura zdarza się raz na 10 lat w czerwcu, a raz na 2 lata w lipcu i sierpniu. Uciążliwość gorąca potęgowało występowanie nocy tropikalnych, czyli dni z $t_{min}>20^{\circ}\text{C}$ – od 3 w czerwcu 2019 do 4 w sierpniu 2015 r.; w lipcu 2006 r. wystąpiła tylko jedna taka noc. W czerwcu 2019 r. pojawiły się 3 gorące noce spośród 6, które wystąpiły w całym trzydziestoleciu 1991-2020. Takie wyjątkowo obciążające organizm człowieka warunki z temperaturą maksymalną przekraczającą 30°C w ciągu dnia i temperaturą minimalną wyższą od 20°C w ciągu nocy – tzw. doby tropikalne – utrzymywały się od 9 do 12 sierpnia 2015 r. oraz 15 i 26-27 czerwca 2019 r. Najgorętsza noc wystąpiła 27 czerwca ($t_{min}=23,1^{\circ}\text{C}$) (ryc. 2). W takich skrajnych warunkach termicznych dodatkowym, istotnym czynnikiem silnie obciążającym organizm człowieka, zwłaszcza w dużych miastach, do których zalicza się Kraków, jest wzrost koncentracji zanieczyszczeń powietrza, w tym ozonu troposferycznego, jak również wagowy spadek zawartości tlenu w powietrzu (Twardosz, 2009).

Reasumując, analiza warunków termicznych w 3 niezwykle ciepłych miesiącach ujawniła ich duże podobieństwo. Z punktu widzenia klimatu bioklimatycznego należy jednak podkreślić, że najbardziej obciążające były warunki w czerwcu 2019 r., a więc w pierwszym miesiącu lata, kiedy organizm człowieka nie jest jeszcze zaaklimatyzowany do długotrwałej utrzymującej się skrajnie wysokiej temperatury powietrza.

Tabela 1. Charakterystyki termiczne niezwykle ciepłych miesięcy (NCM); w nawiasie podano wartości średnie z trzydziestolecia 1991-2020

Thermal characteristics of exceptionally warm months; average values for the 30 years 1991-2020 are given in parenthesis

| NCM | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | | Liczba dni z temperaturą | | | |
|------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | t_{min} | t_{max} | $t_{max}>25^{\circ}\text{C}$ | $t_{max}>30^{\circ}\text{C}$ | $t_{max}>35^{\circ}\text{C}$ | $t_{min}>20^{\circ}\text{C}$ |
| Lipiec 2006 r. | 9,9 | 35,1 | 26 (18,4) | 18 (5,7) | 1 (0,5) | 1 (0,6) |
| Sierpień 2015 r. | 9,1 | 35,7 | 25 (17,6) | 16 (5,6) | 2 (0,5) | 4 (0,5) |
| Czerwiec 2019 r. | 11,5 | 35,2 | 28 (13,0) | 12 (3,0) | 1 (0,1) | 3 (0,2) |



Ryc. 2. Temperatura maksymalna i minimalna w czerwcu 2019 r., lipcu 2006 r. i sierpniu 2015 r. w Krakowie
Maximum and minimum air temperature in Kraków in June 2019, July 2006 and August 2015

Obciążenia ciepłe organizmu człowieka podczas niezwykle ciepłych miesięcy

Pierwszym etapem oceny warunków biometeorologicznych podczas niezwykle ciepłych miesięcy na początku XXI w. jest analiza wartości średnich UTCI na tle ich odpowiednich wartości średnich z trzydziestolecia 1991–2020 (tab. 2). Widać wyraźnie, że warunki przeciętnego obciążenia ciepłego w terminie południowym ($UTCI_{12}$) były bardzo podobne ($UTCI$ około $30^{\circ}C$) w rozpatrywanych miesiącach.

Rzeczywisty obraz obciążeń ciepłych człowieka w porach dnia uzyskujemy na podstawie analizy częstości dni z poszczególnymi kategoriami stresu ciepłego w terminie okołopołudniowym (12 UTCI) oraz w terminie porannym i wieczornym na tle warunków przeciętnych występujących w przyjętym do badań okresie referencyjnym 1991–2020 (tab. 3, ryc. 3). Przede wszystkim daje się zauważyć mniejsza liczba klas obciążenia ciepłego w rozpatrywanych NC miesiącach w porównaniu do trzydziestolecia.

W terminie południowym były po 4 klasy obciążenia ciepłego w każdym miesiącu NC; w trzydziestoleciu było 5 klas. Świadczy to o mniejszej zmienności warunków meteorologicznych w tych niezwykle ciepłych miesiącach. Nie wystąpiły wtedy warunki łagodnego stresu zimna. W lipcu 2006 r. aż w ponad połowie dni pojawiały się warunki silnego stresu ciepła (55%; średnio 21%). W sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r. dni z tak obciążającymi warunkami było prawie po 40%. W tym ostatnim NC miesiącu częstość takich warunków przekroczyła trzykrotnie średnią trzydziestoletnią. W każdym z 3 NC miesięcy wystąpiły warunki bardzo silnego stresu ciepła, przy czym w NC czerwcu było ich trzykrotnie więcej niż przeciętnie, a w sierpniu nawet czterokrotnie. Największa liczba dni ze stresem ciepła wszystkich kategorii (83%) wystąpiła w czerwcu 2019 r.; dni z brakiem obciążeń ciepłych było 3,5 razy mniej niż przeciętnie.

W godzinach porannych i wieczornych wystąpiły po 2 klasy odczuwalnego stresu termicznego (w trzydziestoleciu 3–4 klasy w zależności od miesiąca): brak obciążeń ciepłych

Tabela 2. Średnie miesięczne wartości wskaźnika UTCI ($^{\circ}C$) o godzinie 6, 12 i 18 UTC oraz ich błęd standardowy; w nawiasie podane wartości średnie z trzydziestolecia 1991–2020
Average monthly UTCI values ($^{\circ}C$) at 6, 12 and 18 UTC along with their standard errors; average values from the 30 years 1991–2020 are given in parenthesis

| NCM | $UTCI_6$ | $UTCI_{12}$ | $UTCI_{18}$ |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Lipiec 2006 r. | 24,9±0,7 (21,0±0,2) | 31,2±0,9 (26,4±0,2) | 22,9±0,7 (20,0±0,2) |
| Sierpień 2015 r. | 22,5±0,9 (20,1±0,2) | 30,3±1,3 (26,6±0,2) | 22,6±0,8 (19,2±0,1) |
| Czerwiec 2019 r. | 24,9±0,7 (19,1±0,2) | 30,8±0,9 (24,0±0,2) | 23,4±0,7 (18,0±0,2) |

Tabela 3. Częstość (%) obciążeń cieplnych o godzinie 6, 12 i 18 UTC według wskaźnika UTCI w NCM
Percentage frequency of occurrence of heat stress at 6, 12 and 18 UTC, by reference to UTCI values in exceptionally warm months

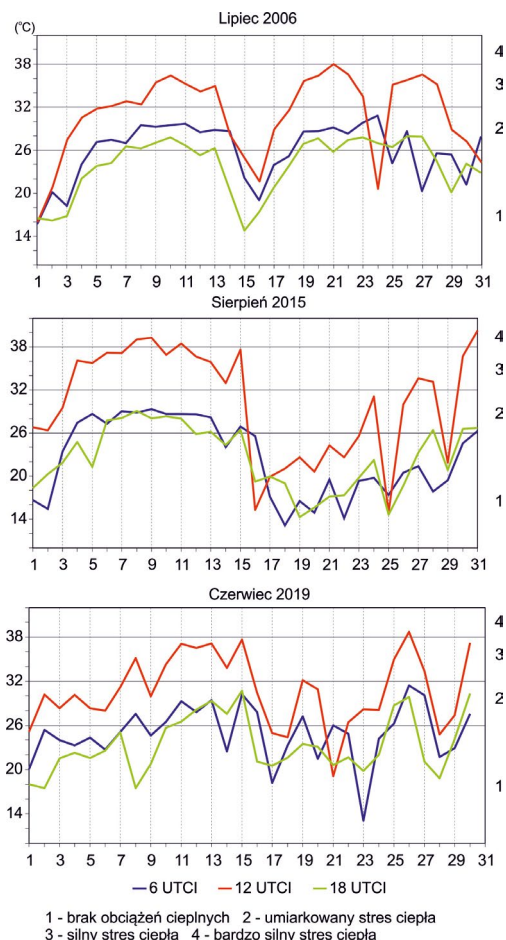
| Obciążenia cieplne | | UTC | Lipiec | | Sierpień | | Czerwiec | |
|--------------------|---------------------------|-----|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| UTCI (°C) | Klasa | | 2006 | 30-lecie | 2015 | 30-lecie | 2019 | 30-lecie |
| 0,1-9,0 | łagodny stres zimna | 6 | – | 0,9 | – | 1,4 | – | 5,4 |
| | | 12 | – | 0,1 | – | 0,5 | – | 1,1 |
| | | 18 | – | 1,0 | – | 0,9 | – | 3,2 |
| 9,1-26,0 | brak obciążeń cieplnych | 6 | 45,2 | 80,9 | 61,3 | 87,7 | 56,6 | 82,6 |
| | | 12 | 19,4 | 44,6 | 32,3 | 43,9 | 16,7 | 57,7 |
| | | 18 | 77,4 | 90,0 | 64,5 | 93,0 | 73,3 | 92,1 |
| 26,1-32,0 | umiarkowany stres ciepła | 6 | 54,8 | 18,1 | 38,7 | 10,9 | 43,3 | 12,0 |
| | | 12 | 22,6 | 31,5 | 16,1 | 30,8 | 43,3 | 28,4 |
| | | 18 | 22,6 | 9,0 | 35,5 | 6,3 | 26,7 | 4,7 |
| 32,1-38,0 | silny stres ciepła | 6 | – | 0,1 | – | – | – | – |
| | | 12 | 54,8 | 20,6 | 38,7 | 22,2 | 36,6 | 11,7 |
| | | 18 | – | – | – | – | – | – |
| 38,1-46,0 | bardzo silny stres ciepła | 6 | – | – | – | – | – | – |
| | | 12 | 3,2 | 3,2 | 12,9 | 2,7 | 3,3 | 1,1 |
| | | 18 | – | – | – | – | – | – |
| Liczba klas | | 6 | 2 | 4 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| | | 12 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| | | 18 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |

i umiarkowany stres ciepła. O godzinie 18 UTC warunki obciążenia umiarkowanym stresem towarzyszyły organizmowi człowieka przez około 10 dni w sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r., czyli sześciokrotnie więcej niż przeciętnie.

Przebieg z dnia na dzień wartości terminowych wskaźnika UTCI zobrazowano na rycinie 3. Na jego podstawie można dokonać analizy zmienności z dnia na dzień, jak i w ciągu dnia wartości UTCI oraz wyróżnić okresy o podobnych warunkach obciążenia cieplnego.

W lipcu 2006 r. długotrwałe i najbardziej obciążające warunki stresem ciepła w ciągu całego dnia wystąpiły w 2 okresach: 5-13 i 18-23. W tych dniach dominował bowiem silny stres ciepła w porze okołopołudniowej oraz umiarkowany stres ciepła w porze porannej i wieczornej. W takich sytuacjach rekomendowane jest korzystanie z miejsc zacienionych i okresowe zmniejszanie wysiłku fizycznego oraz uzupełnianie płynów w organizmie (Błażejczyk et al., 2010a, b). Obciążenia silnym stresem utrzymywały się jeszcze pod koniec miesiąca (25-28), ale wystąpiły one głównie w południe. W pozostałych porach dnia przeważał brak obciążeń cieplnych organizmu człowieka. Skutkowało to wyraźnie mniejszym obciążeniem mechanizmów termoregulacji u człowieka w tych dniach. W 5 dniach lipca 2006 r. (1, 2, 15, 16 i 31) przez cały dzień występowały warunki z brakiem obciążeń cieplnych.

W sierpniu 2015 w porze południowej przez pierwszą połowę miesiąca (1-15) utrzymywał się stres ciepła, przy czym już od 4 dnia miał on nasilenie silne. W tych dniach organizm człowieka narażony był także na umiarkowany stres ciepła w pozostałych porach dnia. Najbardziej obciążające warunki wystąpiły 8 i 9 sierpnia o 12 UTC (bardzo silny stres ciepła). Podczas takich sytuacji pogodowych konieczne jest okresowe korzystanie z po-



Ryc. 3. Wartości wskaźnika UTCI w czerwcu 2019 r., lipcu 2006 r. i sierpniu 2015 r. w Krakowie
UTCI values for Kraków in June 2019, July 2006 and August 2015

mieszkań klimatyzowanych, uzupełnianie płynów w organizmie oraz ograniczenie wysiłku fizycznego. Po tej fali długotrwałego, niezwykle uciążliwego gorąca nastąpiło wyraźne złagodzenie warunków odczuwalnych, a mianowicie zaczęły dominować dni z brakiem obciążeń cieplnych we wszystkich 3 terminach. Taki okres komfortowej pogody utrzymywał się między 16 a 26 sierpnia. Pod koniec miesiąca ponownie pojawiły się obciążające warunki stresem ciepła, ale tylko w porze południowej. Łącznie w 10 dniach sierpnia 2015 r. (16-23, 25, 29) występowały warunki z brakiem obciążeń cieplnych.

W czerwcu 2019 r. od pierwszych dni miesiąca stopniowo narastało nasilenie stresu ciepła. W pierwszej dekadzie stres umiarkowany dominował tylko w terminie południowym. W pierwszej połowie drugiej dekady warunki osiągnęły kategorię silnego stresu ciepła w porze południowej, a umiarkowany stres utrzymywał się w pozostałych porach dnia. Podobnie było między 25 i 27 czerwca. Najbardziej obciążające warunki cieplne pojawiły się 26 czerwca; w terminie południowym wystąpił bardzo silny stres ciepła, a rano i wieczorem niewiele brakowało do osiągnięcia kategorii silnego stresu ciepła. W pozostałych dniach drugiej połowy miesiąca warunki odczuwalne były wyraźnie mniej obciążające w ciągu ca-

tego dnia. W 5 dniach czerwca 2019 r. (1, 17, 18, 21 i 28) występowały warunki komfortu termicznego przez cały dzień, czyli z brakiem obciążeń cieplnych.

Cyrkulacja atmosferyczna nad południową Polską w niezwykle ciepłych miesiącach

Występowanie długotrwałych okresów z bardzo wysoką temperaturą powietrza, czyli miesięcy, a nawet całych pór roku, wykazuje związek z cyrkulacją atmosferyczną (Twardosz i Bąkowska-Bielec, 2022). Bezpośrednią przyczyną ich pojawiania się są stacjonarne układy antycyklonalne, tworzące tzw. sytuacje blokadowe, obejmujące cały profil pionowy troposfery. Tak było m.in. w kwietniu i maju 2018 r. (Twardosz, 2019). Przy odpowiedniej lokalizacji głównych ośrodków ciśnienia, które sterują wymianą mas powietrznych, dochodzi do adwekcji bardzo ciepłego powietrza zwrotnikowego lub polarnego kontynentalnego nad Polskę.

W tabeli 4 zestawiono częstość typów cyrkulacji atmosferycznej nad południową Polską według Niedźwiedzia (1981, 2022). Średnio w trzydziestoleciu w każdym z miesięcy letnich występuje nieco większa częstość sytuacji antycyklonalnych niż cyklonalnych: od 50,3% w lipcu do 57,4% w sierpniu. Podczas NC miesiący letnich cyrkulacja o charakterze antycyklonalnym zdecydowanie przeważała. W lipcu 2006 r. było aż 27 dni z taką cyrkulacją (87%), a w sierpniu 2015 r. niewiele mniej 25 (81%). W takich warunkach cyrkulacyjnych zwykle dochodzi do silnego wzrostu temperatury powietrza, któremu sprzyja także duże usłonecznienie podczas bezchmurnej pogody wyżowej w długie letnie dni. O mniejszej zmienności warunków cyrkulacyjnych w tych dwóch NC miesiącach świadczy liczba typów cyrkulacji, a mianowicie w obu miesiącach pojawiło się po 8 typów. W lipcu 2006 r. przez prawie połowę dni (14) dominowała sytuacja klina antycyklonalnego (Ka) – ponad trzykrotnie częściej niż średnio w tym miesiącu, a w 7 dniach cyrkulacja w układzie antycyklonalnym z wycinka E-S (Ea, SEa, Sa; trzykrotnie częściej niż średnio). W sierpniu 2015 r. warunki cyrkulacyjne były zdominowane przez typy z wycinka E-SW, głównie antycyklonalne – 25 dni (średnio w trzydziestoleciu 5-6 dni). Warto tu zaznaczyć, że podczas napływu mas powietrznych z południa bariera orograficzna Karpat jest dodatkowym czynnikiem wzmagającym wzrost temperatury – efekt fenowy. W czerwcu 2019 r. wystąpiła większa liczba typów cyrkulacji niż we wcześniejszych NC miesiącach; było ich 12. Świadczy to o większej zmienności warunków cyrkulacyjnych w tym miesiącu. Maksimum częstości osiągnął typ Sc – 7 dni, a więc typ, który występuje w czerwcu bardzo rzadko, tzn. średnio w wieloleciu jeden dzień. Wyraźnie zwiększoną częstością (8 dni) odznaczały się też typy antycyklonalne z sektora wschodniego. Należy tu podkreślić, że kierunek napływu mas powietrznych nie zawsze decyduje o właściwościach termicznych. Ogólnie potwierdza się prawidłowość, że podczas cyrkulacji z południa wzrasta wartość wskaźnika UTCI, a podczas cyrkulacji z północy jego wartość obniża się (Nowosad et al., 2013).

Cyrkulacyjne przyczyny występowania rozpatrywanych NC miesięcy w pełni wyjaśnia analiza częstości mas powietrznych (tab. 5). Pokazuje ona dobitnie dominującą rolę powietrza zwrotnikowego (PZ) we wszystkich 3 miesiącach. W lipcu 2006 r. i sierpniu 2015 r. PZ występowało przez około połowę dni miesiąca, czyli pięciokrotnie częściej niż średnio w trzydziestoleciu w każdym z tych miesięcy. W czerwcu 2019 r. udział dni z PZ był nieco mniejszy (33%), ale za to zwiększyła się częstość dni z powietrzem polarnym morskim ciepłym (20%). We wszystkich dniach z bardzo silnym stresem ciepła o 12 UTC w NC miesiącach letnich występowało PZ, które napływało w układzie antycyklonalnym w sytuacji Sa i SWa.

Tabela 4. Częstość (%) typów cyrkulacji atmosferycznej według Niedźwiedzia w NCM
Percentage frequency of occurrence in the exceptionally warm months of types of atmospheric circulation after Niedźwiedź

| Typ cyrkulacji | | Lipiec | | Sierpień | | Czerwiec | |
|----------------|-----|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 2006 | 30-lecie | 2015 | 30-lecie | 2019 | 30-lecie |
| 1 | Na | 9,7 | 4,0 | – | 2,7 | 6,7 | 4,4 |
| 2 | NEa | 3,2 | 6,2 | – | 4,6 | 10,0 | 4,7 |
| 3 | Ea | 6,5 | 4,2 | 22,6 | 5,9 | 10,0 | 4,0 |
| 4 | SEa | 6,5 | 1,5 | 19,4 | 5,1 | 6,7 | 1,9 |
| 5 | Sa | 9,7 | 2,2 | 12,9 | 3,5 | 3,3 | 2,2 |
| 6 | SWa | – | 2,4 | 9,7 | 4,2 | 6,7 | 2,3 |
| 7 | Wa | – | 5,5 | – | 7,6 | – | 5,2 |
| 8 | NWa | 3,2 | 7,5 | – | 5,3 | 3,3 | 8,6 |
| 9 | Ca | – | 1,0 | 3,2 | 3,0 | – | 1,4 |
| 10 | Ka | 48,4 | 15,9 | 12,9 | 15,5 | 10,0 | 15,4 |
| 11 | Nc | – | 3,2 | – | 2,4 | 3,3 | 3,2 |
| 12 | NEc | – | 2,4 | – | 1,7 | – | 4,0 |
| 13 | Ec | – | 1,9 | – | 1,5 | – | 3,2 |
| 14 | SEc | – | 1,7 | 16,1 | 3,2 | – | 1,4 |
| 15 | Sc | – | 1,9 | – | 1,9 | 23,3 | 3,0 |
| 16 | SWc | – | 3,7 | – | 4,0 | 3,3 | 3,7 |
| 17 | Wc | – | 8,9 | – | 7,1 | – | 5,3 |
| 18 | NWc | – | 6,9 | – | 4,1 | – | 6,6 |
| 19 | Cc | – | 0,5 | – | 0,1 | – | 0,3 |
| 20 | Bc | 12,9 | 16,3 | 3,2 | 15,3 | 10,0 | 17,3 |
| 21 | X | – | 2,2 | – | 1,3 | 3,3 | 1,7 |
| 1-10 | A | 87,1 | 50,3 | 80,6 | 57,4 | 56,7 | 50,2 |
| 11-20 | C | 12,9 | 49,7 | 19,4 | 42,6 | 43,3 | 49,8 |

Tabela 5. Częstość (%) typów mas powietrznych według Niedźwiedzia w NCM
Percentage frequency of occurrence in the exceptionally warm months of types of air mass after Niedźwiedź

| Masy powietrzne | Lipiec | | Sierpień | | Czerwiec | |
|----------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | 2006 | 30-lecie | 2015 | 30-lecie | 2019 | 30-lecie |
| PA | – | 0,8 | – | 1,8 | – | 2,8 |
| PPm | 3,2 | 27,1 | 3,2 | 23,7 | 6,7 | 22,2 |
| PPms | 16,1 | 32,3 | 6,2 | 28,9 | 13,3 | 37,3 |
| PPmc | – | 7,0 | 3,2 | 5,6 | 20,0 | 6,4 |
| PPm+PPms+PPmc | 19,3 | 66,3 | 12,9 | 58,2 | 40,0 | 66,0 |
| PPk | 32,3 | 14,4 | 29,0 | 22,8 | 10,0 | 10,7 |
| PZ | 45,2 | 8,6 | 45,2 | 8,4 | 33,3 | 8,6 |
| Różne masy powietrza | 3,2 | 9,9 | 3,2 | 8,8 | 16,7 | 12,0 |

Podsumowanie

Na początku XXI w. w 3 miesiącach letnich wystąpiła w Krakowie i na większości obszaru Polski długotrwała niezwykle ciepła pogoda, podobna do tej w klimacie podzwrotnikowym południowej Europy, a nawet północnej Afryki (Twardosz i Wałach, 2020). Lipiec 2006 r. i czerwiec 2019 r. były najgorętszymi miesiącami od początku pomiarów meteorologicznych w Krakowie, czyli od 1792 r. Świadczy o tym wielkość anomalii średniej temperatury powietrza, która przekroczyła aż 3 odchylenia standardowe (SD), a na około dwóch trzecich obszaru Polski anomalia w czerwcu 2019 r. przekroczyła nawet 4 SD (Twardosz i Wałach, 2020). W sierpniu 2015 r. anomalia ta była niewiele niższa od 3 SD. Niezwykłe nasilenie gorąca znalazło odbicie nie tylko w dużej częstotliwości dni upalnych ($t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), ale przede wszystkim w pojawieniu się dni bardzo upalnych ($t_{max} > 35^{\circ}\text{C}$) i nocy tropikalnych ($t_{min} > 20^{\circ}\text{C}$), które w czerwcu należą do rzadkości.

Występowanie takich długotrwałych okresów ze skrajnie wysoką temperaturą jest wynikiem ocieplenia, które w Polsce, jak i całej Europie, utrzymuje się od połowy lat 80., a na początku XXI w. wyraźnie się nasiliło, zwłaszcza w miesiącach letnich (Twardosz i Kosowska-Cezak, 2021; Twardosz et al., 2021).

Konsekwencją ocieplenia jest wyraźna zmiana bioklimatu (Kuchcik et al., 2021), o którym decyduje w największym stopniu temperatura powietrza (Błażejczyk et al., 2010a, b). W miesiącach letnich zmiana ta polega na wzroście liczby dni z silnym i bardzo silnym stresem ciepła (o 12 UTC) na początku XXI w. w Polsce (Krzyżewska et al., 2021). Dobitnie potwierdziło się to w rozpatrywanych w tej pracy NC miesiącach w Krakowie, a mianowicie w lipcu 2006 r. dni takich było prawie 60%, a w sierpniu 2015 r. i czerwcu 2019 r. odpowiednio 51 i 40%. Oznacza to, że było ich 3-4 razy więcej niż przeciętnie w trzydziestolecu 1991-2020 w tych miesiącach. Ogólnie dni ze stresem ciepła (o 12 UTC) było rekordowo dużo: od 70% w sierpniu 2015 r. do 84% w czerwcu 2019 r. Tylko w kilku dniach tych NC miesięcy nie stwierdzono całodziennych obciążeń cieplnych organizmu człowieka: od 5 w lipcu 2006 r. i czerwcu 2019 r. do 10 w sierpniu 2015 r.

Największe nasilenie obciążenia cieplnego wystąpiło w pierwszej połowie sierpnia 2015 r., kiedy przez większość dni przeważał całodzienny stres ciepła, a w porze południowej był to silny stres, a 3 dniach nawet bardzo silny stres. W lipcu 2006 r. podobne warunki obciążenia cieplnego wystąpiły w dwóch, ale krótszych okresach: 5-13 i 18-23. W czerwcu 2019 r. od pierwszych dni miesiąca narastało nasilenie obciążenia stresem ciepła do osiągnięcia maksimum w pierwszej połowie drugiej dekady miesiąca oraz pod koniec miesiąca (25-27).

Na podstawie średnich wartości charakterystyk termicznych, jak i wskaźnika UTCI, stwierdzono, że warunki odczuwalne w 3 niezwykle ciepłych miesiącach były podobne. Ich przebieg z dnia na dzień był nieco odmienny w czasie.

Z analizy wynika jednoznacznie, że największe obciążenie stresem cieplnym organizmu człowieka było w czerwcu 2019 r., a więc w pierwszym miesiącu lata, kiedy organizm człowieka nie jest jeszcze w pełni przystosowany do długotrwałe utrzymującej się anomalnie wysokiej temperatury powietrza.

Przyczyny występowania niezwykle ciepłych miesięcy należy upatrywać nie tylko we współczesnym ocieplaniu się klimatu ziemskiego, ale także w zmienności cyrkulacji atmosferycznej. O nasileniu gorąca zdecydowały zarówno charakter cyrkulacji, jak i kierunek adwekcji i typ masy powietrznej. Podczas NC miesięcy w dniach z najsilniejszym

stresiem ciepła przeważała cyrkulacja antycyklonalna z sektora południowego (Sa i SWa), sprowadzająca gorące masy powietrza zwrotnikowego. Trzeba podkreślić, że w warunkach cyrkulacji antycyklonalnej dodatkowym czynnikiem wzmagającym wzrost temperatury jest także duże usłonecznienie podczas bezchmurnej pogody wyżowej w długie letnie dni, a także występowanie efektu fenowego. Uzyskane wyniki nawiązują do badań innych autorów, którzy zajmowali się cyrkulacyjnymi uwarunkowaniami pogody upalnej (Kossowska-Cezak i Skrzypczuk, 2011).

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródła, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Błażejczyk, K., & Błażejczyk, M. (2010). Bioklima2.6, Program komputerowy. Pobrane z: <https://www.igipz.pan.pl/BioKlima.html> (19.01.2023).
- Błażejczyk, K., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Ingvar, Holmér, I., Jendritzky, G., & Kampmann, B. (2010a). UTCI – nowe narzędzie badania warunków bioklimatycznych w różnych skalach czasowych i przestrzennych. *Przegląd Geofizyczny*, 55(1-2), 5-19.
- Błażejczyk, K., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Ingvar Holmér, I., Jendritzky, G., & Kampmann, B. (2010b). UTCI – Nowy wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka. *Przegląd Geograficzny*, 82(1), 49-68.
- Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56, 515-535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
- Błażejczyk, K., Twardosz, R., Wałach, P., Czarnecka, K., & Błażejczyk, A. (2022). Heat strain and mortality effects of prolonged Central European heatwave – an example of June 2019 in Poland. *International Journal of Biometeorology*, 66, 149-161. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02202-0>
- Di Napoli, C., Pappenberger, F., & Cloke, H.L. (2018). Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 62, 1155-1165. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>
- Dobek, M. (2013). Warunki biotermiczne Lublina (na podstawie wskaźnika obciążeń cieplnych UTCI). *Acta Balneologica*, 55, 141-145.
- Dobek, M., Demczuk, P., & Nowosad, M. (2013). Spatial variation of the Universal Thermal Climate Index in Lublin in specified weather scenarios. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B*, 68, 21-38.
- Dobek, M., & Krzyżewska, A. (2015). Wybrane zagadnienia z bioklimatu Lublina. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B*, 70(2), 117-129.
- Fiala, D., Lomas, K.J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45, 143-159.
- Girguś, R., & Strupczewski, W. (oprac.). (1965). *Wyjątki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI*. Warszawa: PIHM, WKiŁ.
- Kossowska-Cezak, U., & Skrzypczuk, J. (2011). Pogoda upalna w Warszawie (1947-2010). *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 139-146.

- Kossowska-Cezak, U., & Twardosz, R. (2017). Współczesne anomalie termiczne na historycznych ziemiach polskich. *Przegląd Geofizyczny*, 62(1-2), 29-43.
- Krzyżewska, A., Bartoszek, K., & Wereski, S. (2016). The meteorological conditions during particularly severe heatwave in Lublin in August 2015. *Przegląd Geofizyczny*, 61(3-4), 239-246.
- Krzyżewska, A., & Dyer, J. (2018). The August 2015 mega-heatwave in Poland in the context of past events. *Weather*, 73, 207-214. <https://doi.org/10.1002/wea.3244>
- Krzyżewska, A., Wereski, S., & Dobek, M. (2021). Summer UTCI variability in Poland in the twenty-first century. *International Journal of Biometeorology*, 65, 1497-151. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01965-2>
- Kuchcik, M. (2017). *Warunki termiczne w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na umieralność*. IGIPZ PAN, Warszawa.
- Kuchcik, M., Błażejczyk, K., & Halaś, A. (2021). Changes in Bioclimatic Indices. W: M. Falarz (red.), *Climate Change in Poland Past, Present, Future*. Shaanxi: Springer, 471-493.
- Luterbacher, J., Werner, J.P., Smerdon, J.E., Fernández-Donado, L., González-Rouco, F.J., Barriopedro, D., Ljungqvist, F.C., Büntgen, U., Zorita, E., Wagner, S., Esper, J., McCarroll, D., Toreti, A., Frank, D., Jungclauss, J.H., Barriendos, M., Bertolin, C., Bothe, O., Brázdil, R., Camuffo, D., Dobrovolný, P., Gagen, M., García-Bustamante, E., Ge, Q., Gómez-Navarro, J.J., Guiot, J., Hao, Z., Hegerl, G.C., Holmgren, K., Klimentko, V.V., Martín-Chivelet, J., Pfister, C., Roberts, N., Schindler, A., Schurer, A., Solomina, O., von Gunten, L., Wahl, J.E., Wanner, H., Wetter, O., Xoplaki, E., Yuan, N., Zanchettin, D., Zhang, H., & Zerefos, C. (2016). European summer temperatures since Roman times. *Environmental Research Letters*, 11(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024001>
- Nemeth, A. (2011). Changing thermal bioclimate in some Hungarian cities. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 44-45, 93-101.
- Niedźwiedź, T. (1981). *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*. Rozprawy habilitacyjne UJ, 58, Kraków.
- Niedźwiedź, T. (2023). Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej. Pobrane z: <http://www.kk.wnoz.us.edu.pl/nauka/kalendarz-typow-cyrkulacji> (31.01.2023).
- Novak, M. (2013). Use of the UTCI in the Czech Republic. *Geographia Polonica*, 86, 21-28.
- Nowosad, M., Rodzik, B., Wereski, S., & Dobek, M. (2013). The UTCI Index in Lesko and Lublin and its circulation determinants. *Geographia Polonica*, 86, 29-36.
- Owczarek, M. (2019). The influence of large-scale factors on the heat load on human beings in Poland in the summer months. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 855-869. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2633-z>
- Pociask-Karteczka, J., Kundzewicz, Z.W., Twardosz, R., & Rajwa-Kuligiewicz, A. (2018). Natural Hazards in Poland. W: D. Bartlett, R. Singh (red.), *Exploring Natural Hazards: A Case Study Approach*. Taylor & Francis Group, 315-343.
- Półrolniczak, M., Szyga-Pluta, K., & Kolendowicz, L. (2016). Bioklimat wybranych miast pasa pobrzeży południowobałtyckich na podstawie uniwersalnego wskaźnika obciążenia cieplnego. *Acta Geographica Lodziensis, Folia Geographica Physica*, 104, 147-161.
- Quesada, B. (2014). Extrêmes de températures en Europe: caractéristiques, rétroactions sol/atmosphère et prévisibilité. Thèse de doctorat, Versailles-St Quentin en Yvelines, ED129 – UVSQ.
- Skrzyńska, M., & Twardosz, R. (2023). Long-term changes in the frequency of exceptionally cold and warm months in Europe (1831-2020). *International Journal of Climatology*, 43, 2339-2351. <https://doi.org/10.1002/joc.7978>

- Tomczyk, A.M., & Owczarek, M. (2020). Occurrence of strong and very strong heat stress in Poland and its circulation conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 893-905.
<https://doi.org/10.1007/s00704-019-02998-3>
- Twardosz, R. (2009). Fale niezwyklej upałów w Europie na początku XXI wieku. *Przegląd Geofizyczny*, 54(3-4), 193-204.
- Twardosz, R. (2017). Zmiany częstości anomalii termicznych w Polsce w latach 1951-2015. *Polish Journal of Agronomy*, 31, 3-1.
- Twardosz, R. (2019). Anomalously warm months in 2018 in Poland in relation to airflow circulation patterns. *Weather*, 74(11), 374-382. <https://doi.org/10.1002/wea.3588>
- Twardosz, R., & Wałach, P. (2020). Niezwykłe ciepła pogoda w czerwcu 2019 roku w Polsce i jej przyuczyny cyrkulacyjne. *Przegląd Geofizyczny*, 65(3-4), 179-194.
- Twardosz, R. & Kossowska-Cezak, U. (2021). Large-area thermal anomalies in Europe (1951-2018). Temporal and spatial patterns. *Atmospheric Research*, 251.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105434>
- Twardosz, R., & Bielec-Bąkowska, Z. (2022). Continental-scale monthly thermal anomalies in Europe during the years 1951-2018 and their occurrence in relation to atmospheric circulation. *Geographia Polonica*, 95, 97-116. <https://doi.org/10.7163/GPol.0228>
- Twardosz, R., Walanus, A., & Guzik, I. (2021). Warming in Europe: recent trends in annual and seasonal temperatures. *Pure Applied Geophysics*, 178, 4021-4032.
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02860-6>
- Ustrnul, Z., Wypych, A., & Czekerda, D. (2021). Air temperature change. W: M. Falarz (red.), *Climate change in Poland. Past, Present, Future* (s. 275-330). Shaanxi: Springer.
- Vinogradova, V. (2021). Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia. *International Journal of Biometeorology*, 65, 1473-1483.
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>

Summary

This study aims to characterise heat-loading upon human organisms during the three hottest summer months recorded in Krakow at the beginning of the 21st century, i.e. July 2006, August 2015 and June 2019. This goal was capable of being reduced to questions as to how far the heat-loads in question deviated from average conditions and what the impacts of air circulation on that might have been. In the event, the work detailed here is able to demonstrate that the months in question were of a thermally anomalous category whereby the temperature exceeded the long-term average in a significant manner (by at least 2 standard deviations, SD). The basis for these findings lays in UTCI values calculated by taking account of four meteorological elements recorded at three times of the day (6:00, 12:00 and 18:00 UTC). The overall analysis was referenced against the latest 30-year period (1991-2020), and relied on the calendar of circulation types and air masses for southern Poland after T. Niedźwiedź.

The summer months selected for analysis proved to be, not merely extremely hot, but also anomalously dry. The drought accompanying the heatwaves exerted a negative impact on the economy, in particular agriculture and people; and a situation in which such major thermal and rainfall anomalies arise represents one of the greatest natural hazards facing Poland.

July 2006 and June 2019 were the hottest months since the beginning of meteorological measurements in Krakow, i.e. since 1792. This is evidenced by the size of the air temperature anomaly, which exceeded the average by as many as 3 standard deviations (SD) (though across about two-thirds of Poland, the anomaly of June 2019 even went beyond 4 SD). The size of the August 2015 anomaly was slightly below 3 SD. The unusual intensity of the heat was reflected, not only in the high frequency of occurrence of hot days ($t_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), but also and above all in the appearance of very hot days ($t_{max} > 35^{\circ}\text{C}$), and tropical nights ($t_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) – both rare phenomena for June.

A consequence of this kind of warming is a clear change in bioclimate, which is determined to the greatest extent by air temperature. In the summer months in Poland at the beginning of the 21st century, this change entailed increased numbers of days on which there is strong or very strong heat stress (by 12:00 UTC). This idea gained clear confirmation in the exceptionally warm months this paper considers. Thus, in July 2006, almost 60% of all days were in the above category, along with 51% and 40% in August 2015 and June 2019 respectively. This can be further taken to indicate that there were 3-4 times as many such days as there were on average in the given months across the whole 30-year period of 1991-2020. In general, days with heat stress (at 12:00 UTC) were record high: from 70% in August 2015 to 84% in June 2019. Furthermore, on only a few days in these exceptionally warm months were no all-day heat loads for the human body recorded, those numbers ranging between a mere 5 in the case of July 2006, and 10 in August 2015.

An outcome of the study was to show how the greatest intensity of heat load characterised the first half of August 2015, when all-day heat stress prevailed on most days, reaching strong stress levels coinciding with times of peak human activity, and including instances of severely strong stress conditions on three days of the period. Similar heat-load conditions arose in July 2006, albeit in the circumstances of two separate spells: 5-13 July and 18-23 July. In turn, in June 2019, the heat stress load began to grow at the beginning of that month, culminating in two peaks – at the beginning of the month's last 10-day period, and again between on 25th-27th.

When average temperatures and UTCI are looked at together, conditions experienced during the three exceptionally warm months under study are seen to be similar. Of course, the specifics from day to day proved to differ slightly, and from the point of view of direct impact on the human organism the greatest heat stress to the human body would have been experienced in June 2019, given the status as the first summer month, in which the human body has not yet adapted to long-term circumstances of extremely high air temperatures.

Causes for the occurrence of unusually warm months should not be sought solely in the overall warming of the Earth's climate, given likely mediation of effects via variability or change in atmospheric circulation. The intensity of heat can be influenced by the nature of the said circulation, by the direction of advection, and by the types of air mass involved. In fact, all the spells of days characterised by the strongest heat stress in the course of the three unusually warm months identified here were found to coincide with anticyclonic circulation from the southern sector (Sa and SWa), acting as a source of input into Poland of hot tropical masses of air.