

**Dominik Gargol** (dominik.gargol@gmail.com) \*

**Aleksandra Jakubowska** (aleksandra2.jakubowska@uj.edu.pl) \*\*

\* *Koło Geografów Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie*

*ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków, Polska*

\*\* *Stowarzyszenie Klimatologów Polskich, Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN w Krakowie*

*ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków, Polska*

## **Uwarunkowania cyrkulacyjne ekstremalnych obciążeń cieplnych w Krakowie**

### **Extreme bioclimatic conditons in Kraków in relation to the atmospheric circulation**

#### **STRESZCZENIE**

W niniejszym opracowaniu dokonano oceny roli cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu ekstremalnych przypadków obciążeń cieplnych w Krakowie. W tym celu posłużono się Uniwersalnym Wskaźnikiem Obciążeń Cieplnych (UTCI) oraz kalendarzem typów cyrkulacji atmosferycznej dla dorzecza górnej Wisły T. Niedźwiedzia. Do obliczenia wskaźnika wykorzystano codzienne dane meteorologiczne z terminu południowego (12 UTC) z lat 1981-2010, pochodzące ze stacji klimatologicznej IGiGP UJ, zlokalizowanej w Ogrodzie Botanicznym w Krakowie. Dane dotyczyły wartości temperatury powietrza, prędkości wiatru, prężności pary wodnej i zachmurzenia. Wykonano obliczenia wartości wskaźnika UTCI dla każdego dnia, klasyfikacji do skali obciążeń cieplnych, a następnie powiązano dni, kiedy wystąpiły ekstremalne obciążenia cieplne z typami sytuacji synoptycznych oraz masami powietrza na podstawie kalendarza T. Niedźwiedzia. Dodatkowo obliczono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia wybranych obciążeń cieplnych podczas określonych typów cyrkulacji i adwekcji mas powietrznych. W kolejnej części dokonano analizy poszczególnych przypadków ekstremalnych obciążeń cieplnych z wykorzystaniem map topografii barycznej względnej (1000-500 hPa) Niemieckiej Służby Meteorologicznej (DWD). W kontekście obciążeń ekstremalnych (UTCI) można stwierdzić, że zimą w przypadku *bardzo silnego stresu zimna* najchłodniejsze warunki utrzymują się nie dłużej niż przez jeden dzień, zawsze podczas sytuacji, gdy prędkość wiatru wynosi więcej niż 5 m/s, a temperatura powietrza utrzymuje się poniżej -5,5°C. Zazwyczaj taka sytuacja ma miejsce podczas adwekcji mas powietrznych z północy, jak i południowego wschodu, zwykle przy sytuacji wyżowej. W przypadku *silnego stresu zimna* sprzyjająca jest sytuacja antycyklonalna z napływem mas powietrznych ze wschodu, południowego wschodu, a także klin antycyklonalny. *Bardzo silny stres ciepła* trwa przeważnie dłużej niż 1 dzień i jest wynikiem dużej insolacji oraz małego zachmurzenia – występuje najczęściej podczas antycyklonalnych typów cyrkulacji. *Silny stres ciepła* pojawiał się przede wszystkim podczas klina antycyklonalnego i bruzdy cyklonalnej. Wysokie prawdopodobieństwo (70%) wystąpienia tego obciążenia odnotowuje się w przypadku sytuacji antycyklonalnej z adwekcją mas powietrznych z południa.

## ABSTRACT

In this thesis, the atmospheric background of extreme bioclimatic conditions in Cracow was evaluated. One bioclimatic indicant – Universal Thermal Climate Index (UTCI) was employed, as well as the calendar of circulation types for the Upper Vistula Basin by T. Niedźwiedź. Daily data (12 UTC) from 1981-2010 were collected in the Botanic Garden of the Jagiellonian University in Cracow. They included the values of air temperature, vapour pressure, cloudiness and wind speed. Firstly, the extreme thermal stress, which occurred during particular days, was correlated with the types of atmospheric circulation and air masses, stated in the calendar by T. Niedźwiedź. In the next step the conditional probability of extreme thermal stress appearance in the circulation type and during the advection of air masses was calculated. Moreover, by using the weather charts of relative topography 1000-500 hPa and geopotential height of 500 hPa pressure level from Deutsche Wetter Dienst (DWD), the analysis of the particular days with the extreme thermal stress was done. Taking extreme conditions into consideration, it can be stated that in winter, *very strong cold stress* occur no longer than for one day and almost always during the wind speed above 5 m/s and air temperature below -5,5°C. Moreover the air masses advection from north, and southeast during anticyclones is distinctive for that case. For *strong cold stress*, the air masses advection from east, southwest during anticyclones and an anticyclonic wedge or ridge of high pressure is essential. *Very strong heat stress* last usually longer than a day and was the result of large insolation and small cloudiness – generally during the anticyclones. Strong heat stress appeared mostly during an anticyclonic wedge or ridge of high pressure, and a trough of the low pressure. High values of conditional probability (70%) for *strong heat stress* is characteristic for south air masses advection during anticyclones.

**Słowa kluczowe:** warunki bioklimatyczne, ekstremalne obciążenia cieplne, UTCI, cyrkulacja atmosferyczna

**Key words:** bioclimatic conditions, extreme thermal stresses, UTCI, atmospheric circulation

## WSTĘP

Pierwsza nowożytna definicja biometeorologii stworzona przez Aleksandra von Humboldta w 1827 roku mówiła o „zespolu czynników atmosferycznych, które działają na receptory zmysłowe człowieka” (Kozłowska-Szczęsna i in., 1997). Współcześnie Międzynarodowe Towarzystwo Bioklimatologii i Biometeorologii rozumie ją podobnie, jako „badanie wpływu klimatu i pogody na człowieka” (Kozłowska-Szczęsna, Błażejczyk, 2010). Według Kozłowskiej-Szczęsnej i in. (2004) spośród warunków biometeorologicznych największe znaczenie mają zjawiska ekstremalne, gdyż stanowią zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi. Odzwierciedleniem tego stanowiska są liczne publikacje dotyczące na przykład relacji warunków pogodowych i umieralności (Błażejczyk, McGregor, 2007; Błażejczyk, Kunert, 2010a; Kuchcik, Błażejczyk, 2001) czy oddziaływania na człowieka warunków ekstremalnie chłodnych (Biem i in., 2003; Tanaka, Tokudome, 1991) lub ciepłych (Błażejczyk, Kunert, 2010b). Zagadnieniem często poruszonym w bioklimatologii jest problem porównywania danych w różnych miejscach na świecie. Związany jest on z dużą ilością używanych wskaźników bioklimatycznych, a także ich ograniczonym zastosowaniem w poszczególnych strefach klimatycznych. W odpowiedzi na to zapotrzebowanie został stworzony Uniwersalny Wskaźnik Obciążeń Cieplnych (UTCI) zaproponowany

przez Błażejczyka i in. (2010a). Łączy on podstawowe elementy meteorologiczne w wartość jednowymiarową wyrażoną w stopniach Celsjusza. Uwzględnia wielowęzłowy przepływ ciepła we wnętrzu organizmu człowieka, jego warstwie podskórnej oraz pomiędzy powierzchnią ciała a otoczeniem (Błażejczyk i in., 2010b; Fiala i in., 2012). Jego aplikacyjność w różnych strefach klimatycznych została potwierdzona w wielu opracowaniach (Abdel-Ghany i in., 2013; Broede i in., 2012; Kędzierski, 2013; Pantavou i in., 2013). W Rządowym Centrum Bezpieczeństwa [RCB] (2013) wskaźnik ten znajduje zastosowanie do określania zagrożeń i podejmowania działań w zakresie ochrony życia i zdrowia w sezonie zimowym, zależnie od stopnia zagrożenia. Rozpatrując pojawianie się ekstremalnych obciążeń cieplnych organizmu, należy wziąć pod uwagę także tło synoptyczne. Jak potwierdzają Huth i in., (2008) czy Kyselý (2008) cyrkulacja atmosferyczna jest czynnikiem mogącym w sprzyjających warunkach powodować występowanie ekstremalnych wartości elementów meteorologicznych.

Głównym celem niniejszego opracowania jest określenie częstości występowania ekstremalnych obciążeń cieplnych w Krakowie na podstawie wskaźnika UTCI wraz z ich uwarunkowaniami cyrkulacyjnymi. Dodatkowo obliczono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia takich zjawisk, a także zanalizowano wybrane przykłady ekstremalne niebezpieczne dla człowieka.

## MATERIAŁY I METODY

Do realizacji niniejszej pracy posłużono się danymi z terminu 12 UTC, z trzydziestolecia 1981-2010, pochodzącymi ze stacji meteorologicznej Uniwersytetu Jagiellońskiego zlokalizowanej w Ogrodzie Botanicznym, przy ul. Kopernika 27 ( $\varphi=50^{\circ}04'N$ ,  $\lambda=19^{\circ}58'E$ ,  $h=206$  m n.p.m.). Dotyczyły one: temperatury powietrza ( $^{\circ}C$ ), zachmurzenia (%), prężności pary wodnej (hPa) oraz prędkości wiatru (m/s). Dodatkowo uzupełniono je informacjami o wysokości tarczy słonecznej w każdym dniu roku. Wykorzystano także kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej dla dorzecza górnej Wisły T. Niedźwiedzia (2013). Wykorzystując program Bioklima 2.6 obliczono wartości wskaźnika UTCI dla poszczególnych dni. W dalszej kolejności zaklasyfikowano poszczególne wartości wskaźnika do skali obciążeń cieplnych UTCI (Błażejczyk i in. 2010a). Następnie przyporządkowano typy cyrkulacji atmosferycznej z kalendarza Niedźwiedzia (2013) kolejnym dniom z obciążeniami cieplnymi.

W rezultacie materiał wyjściowy stanowiły rodzaje obciążeń cieplnych, jakie wystąpiły w poszczególnych dniach wraz z ich tłem synoptycznym, czyli typem cyrkulacji oraz rodzajem masy powietrznej. W kolejnym etapie obliczono prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia wybranych obciążeń cieplnych podczas określonych typów cyrkulacji i adwekcji mas powietrznych. Wykorzystano w tym celu zmodyfikowany wzór na obliczanie prawdopodobieństwa warunkowego za Koronackim i Mielniczukiem (2001). Zanalizowano cztery rodzaje obciążeń cieplnych (UTCI): *bardzo silny* i *silny stres zimna* oraz *bardzo silny* i *silny stres ciepła*. Pominięto najbardziej skrajne obciążenia cieplne – *nieznośny stres ciepła* i *zimna*, gdyż nie wystąpiły w badanym wieloleciu w Krakowie. Kryterium doboru ekstremalnych obciążeń cieplnych spośród ośmiostopniowej skali (Błażejczyk i in. 2010a) polegało na

przedstawieniu tych przypadków, które są najbardziej niebezpieczne dla zdrowia i życia człowieka. Według Raportu RCB (2013) *silny stres zimna* był przyczyną 49% zgonów wskutek wychłodzenia organizmu (2010-2012), zaś *bardzo silny stres zimna* – 33%. *Bardzo silny stres ciepła* stwarzał duże zagrożenie udarem słonecznym i przegrzaniem. Dodatkowo zanalizowano *silny stres ciepła*, gdyż podnosi on o 25% ryzyko zgonu w wyniku dysfunkcji układu krążenia w okresie od maja do września w stosunku do sytuacji termoneutralnych (Sadowski i in., 2012). Na podstawie map topografii barycznej względnej (1000-500 hPa) Niemieckiej Służby Meteorologicznej (DWD) zanalizowano wybrane przykłady występowania dni z bardzo silnym stresem ciepła i zimna. Kryterium doboru polegało na przedstawieniu najdłuższego ciągu dni z ekstremalnymi obciążeniami cieplnymi. W przypadku *bardzo silnego stresu zimna*, wybrano przykład najbardziej zbliżony do jednego z charakterystycznych typów zimowej cyrkulacji atmosferycznej nad Europą wg klasyfikacji Zwieriewa (1965).

## WYNIKI

Rozpatrując częstość występowania typów cyrkulacji można stwierdzić, że na obszarze dorzecza górnej Wisły w latach 1981 – 2010 przeważały sytuacje antycyklonalne (54%) nad cyklonalnymi (44%). Najczęściej pojawiającym się typem cyrkulacji był klin antycyklonalny (14% dni wielolecia) oraz bruzda cyklonalna (12%). Ponadto, głównie zimą, nad badany obszar napływały masy powietrzne z zachodu – przy sytuacji cyklonalnej (10%) i antycyklonalnej (9%). Dość rzadko pojawiała się sytuacja cyklonalna ze wschodu (2%), najrzadziej zaś wystąpiła sytuacja centralna cyklonalna (0,5%) (Tab. 1). Najczęściej nad obszar dorzecza górnej Wisły napływało powietrze polarne morskie (53,9%), z czego największy udział stanowiło powietrze stare przetransformowane (30,1%), kolejno powietrze świeże (16,4%) oraz powietrze polarne morskie ciepłe (7,5%). Najmniejszy udział w kształtowaniu warunków pogodowych nad obszarem Krakowa miało powietrze zwrotnikowe (2,3%).

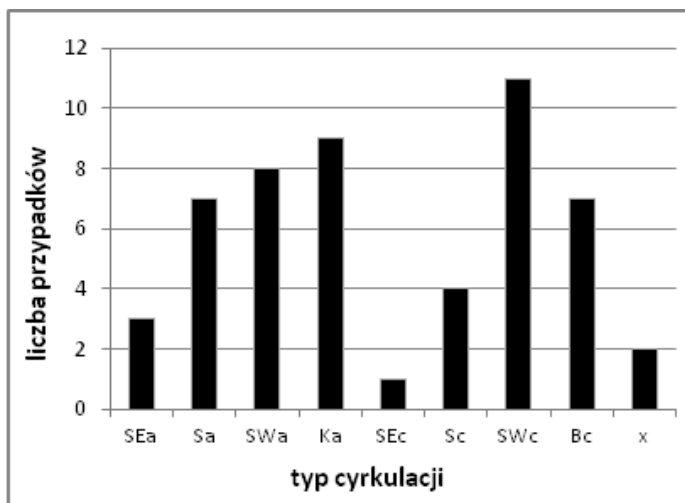
Analizując miesięczny rozkład występowania *bardzo silnego stresu ciepła* w badanym wieloleciu można stwierdzić, że najczęściej pojawia się on w lipcu (25 przypadków) i sierpniu (19 przypadków), co stanowi około 85% dni z tym obciążeniem. Zdecydowanie rzadziej występuje w czerwcu i maju – łącznie 8 przypadków.

Ponad połowa dni (52%) z *bardzo silnym stresem ciepła* wystąpiła podczas sytuacji cyklonalnych, głównie z adwekcją powietrza z sektora południowego (SWc – 11 dni, Sc – 4 dni, SEc – 1 dzień), a także przy bruzdzie cyklonalnej (Bc – 7 dni) (Ryc. 1). Sytuacje antycyklonalne stanowiły w sumie 44% przypadków. Były to również typy z napływem mas powietrznych z sektora południowego (SWa, Sa, SEa), a także klin antycyklonalny (Ka) i bruzda cyklonalna (Bc) (Ryc. 1). Wartości prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia tego obciążenia w lipcu są najwyższe dla typów Sa (21%), SWa (21%) oraz Sc (17%), natomiast w sierpniu dla Sa (15%) i SWc (16%). Pozwala to na przykładowe stwierdzenie, że jeżeli w lipcu wystąpi którykolwiek z powyższych typów cyrkulacji (Sa, SWa, Sc), to średnio w 2 na 10 przypadków pojawi się *bardzo silny stres ciepła*. Warto także zaznaczyć, że w przypadku klina antycyklonalnego i bruzdy cyklonalnej wartość prawdopodobieństwa wynosi jedynie około 2%.

Tab. 1. Liczba przypadków poszczególnych typów cyrkulacji w dorzeczu górnej Wisły (1981-2010). (źródło: opracowanie własne na podstawie kalendarza typów cyrkulacji Niedźwiedzia (2013))

Tab. 1. Number of particular atmospheric circulation types in the region of Upper Vistula Basin (1981-2010). (source: own elaboration based on calendar of atmospheric circulation types (Niedźwiedź, 2013))

L.p.	Typ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Suma
1	Na	22	32	35	27	42	53	33	20	21	29	22	19	355
2	NEa	17	23	27	31	66	35	70	41	37	18	10	19	394
3	Ea	37	38	65	67	45	27	36	44	38	22	24	41	484
4	SEa	42	45	68	40	42	9	12	39	45	62	52	40	496
5	Sa	28	15	20	17	19	13	14	20	34	39	40	29	288
6	SWa	42	34	35	29	17	21	23	34	56	78	72	61	502
7	Wa	170	113	65	26	28	50	67	75	92	102	102	122	1012
8	NWa	55	49	49	29	40	67	61	44	59	52	45	67	617
9	Ca	33	26	17	8	13	11	15	22	24	31	18	26	244
10	Ka	124	75	105	132	119	154	181	164	114	130	99	109	1506
11	Nc	13	24	18	39	28	33	24	21	23	11	15	14	263
12	NEc	16	17	13	25	35	31	22	17	23	6	11	9	225
13	Ec	13	21	16	26	16	21	14	12	16	9	10	15	189
14	SEc	8	20	22	45	34	16	7	23	15	19	21	22	252
15	Sc	12	18	22	59	43	12	12	9	23	37	49	22	298
16	SWc	63	64	59	51	57	29	31	38	51	73	64	71	651
17	Wc	123	97	109	55	56	74	87	85	79	96	107	116	1084
18	NWc	40	37	49	46	37	70	65	54	35	26	45	38	542
19	Cc	6	4	4	16	7	2	3	1	4	4	4	5	60
20	Bc	51	75	108	133	163	153	141	154	94	67	74	70	1283
21	X	15	20	24	19	23	19	12	13	17	19	16	15	212



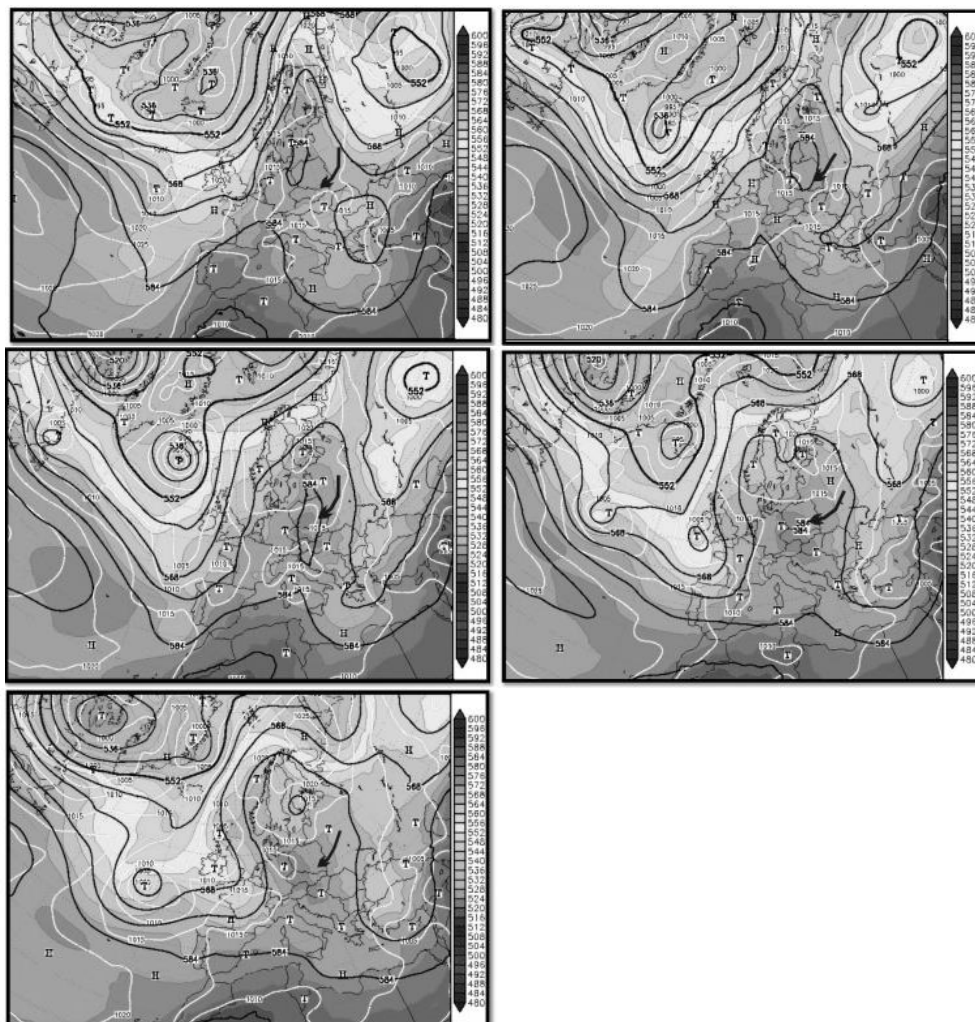
Ryc. 1. Liczba dni z *bardzo silnym stresem ciepła* w różnych typach cyrkulacji atmosferycznej w Krakowie (1981-2010) (źródło: opracowanie własne)

Fig. 1. Number of days with *very strong heat stress* during different atmospheric circulation types in Krakow (1981-2010) (source: own elaboration)

Stosunkowo duża liczba przypadków omawianego obciążenia podczas tych typów cyrkulacji wynika w dużej mierze ze zdecydowanie większej częstości występowania Ka i Bc latem, a nie jak mylnie można wnioskować, z kształtowania przez tą sytuację znacznej liczby ekstremalnych obciążeń cieplnych.

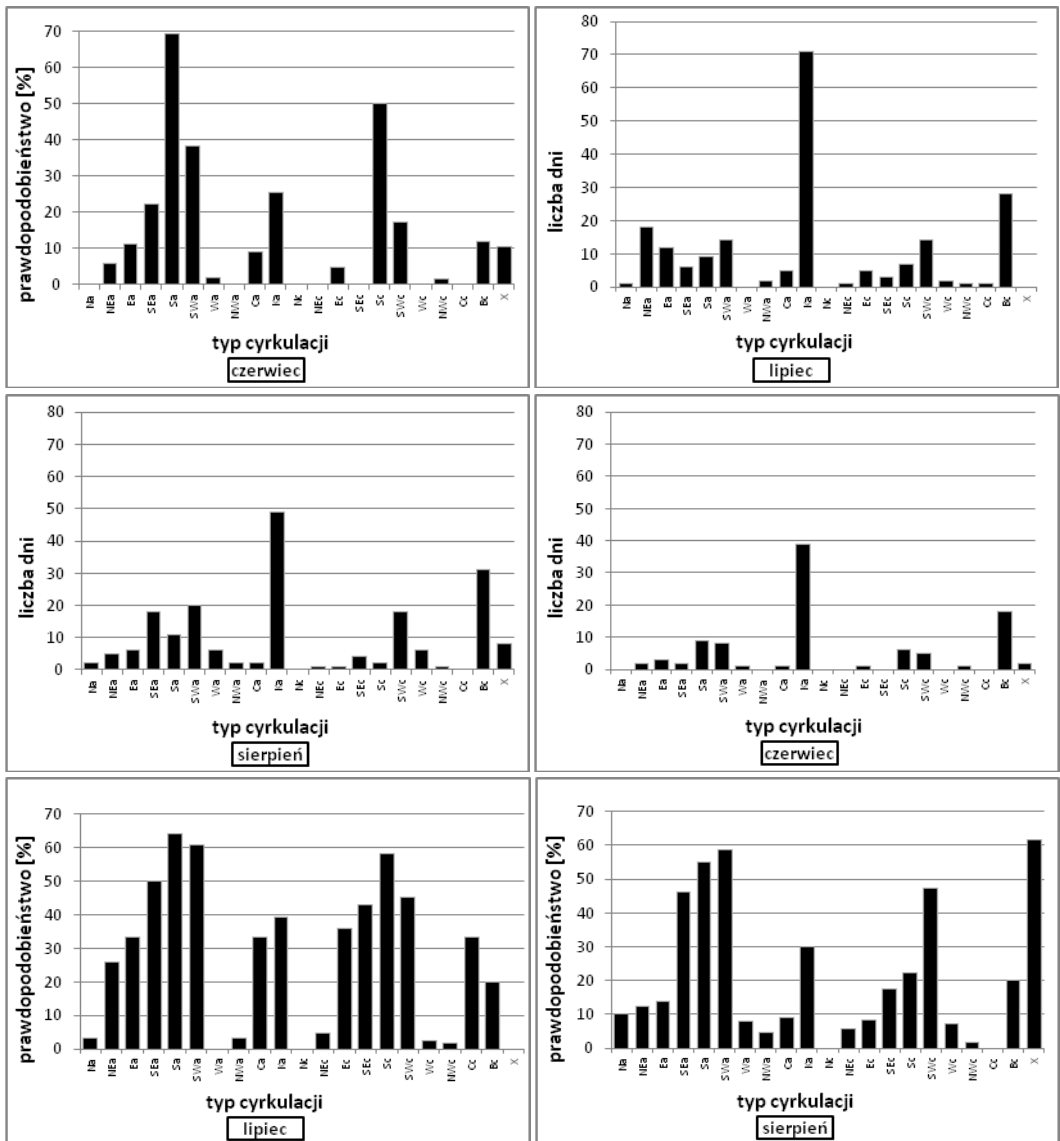
Napływ mas powietrza zwrotnikowego towarzyszył występowaniu *bardzo silnego stresu ciepła* aż w 71% przypadków (37 dni, w tym 17 w lipcu i 12 w sierpniu). Obciążenie to pojawiało się także podczas spływu mas powietrza polarnego kontynentalnego (25% przypadków – 13 dni). Przy adwekcji powietrza polarnego morskiego ciepłego i różnych mas powietrza bardzo silny stres ciepła pojawiał się sporadycznie. Najwyższe prawdopodobieństwo wystąpienia *bardzo silnego stresu ciepła* charakterystyczne jest dla powietrza zwrotnikowego – w lipcu wyniosło około 30%, natomiast w sierpniu 40%. Średni czas występowania *bardzo silnego stresu ciepła* to 1,6 dnia. *Bardzo silny stres ciepła* najdłużej utrzymywał się od 28 lipca do 1 sierpnia 1994 roku. Sytuacja synoptyczna była wówczas stabilna. Począwszy od 25 lipca, Polska znajdowała się w zasięgu klina antycyklonalnego (Niedźwiedź, 2013) nasuwającego się z południa pomiędzy rozległy układ Niżu Islandzkiego na zachodzie i układ cyklonalny z centrum w okręgu Chanty Mansyjskim w Rosji na wschodzie (Ryc. 2). Był to charakterystyczny rozkład pól barycznych dla układu omega, w którym pole izohips do wysokości około 6 km i więcej (n.p.m.) przypomina wyglądem dużą grecką literę omega. Układ ten stanowił blokadę dla strefowej cyrkulacji atlantyckiej, w wyniku czego niż atlantyckie obiegały układ po łuku daleko na północ wokół Centralnej Europy, a dalej nad Spitsbergen lub nad obszar Morza Śródziemnego. Dzięki takiej sytuacji, możliwy był napływ powietrza polarnego kontynentalnego, które powodowało wzrost temperatury powietrza powyżej 34,0°C, słaby wiatr o prędkości 1 m/s, który w jednym tylko dniu osiągnął 3 m/s oraz maksymalne zachmurzenie nieba o wielkości 1 oktantu. W przypadku zachmurzenia istotną rolę pełnił rodzaj chmur. W tych dniach, podobnie jak w zdecydowanej większości pozostałych przypadków pojawiały się chmury o budowie pionowej – Cumulus. Jak twierdzi Podstawczyńska (2004, 2007), w związku z odbiciem promieniowania słonecznego od bocznych krawędzi chmur wzrasta promieniowanie rozproszone, zaś według Monteitha i Unswortha (1988) rozbudowane chmury konwekcyjne mogą podnosić wartość promieniowania całkowitego w stosunku do warunków bezchmurnego nieba średnio od 5 do 15%, a w niektórych przypadkach nawet o 50%. *Silny stres ciepła* pojawiał się od maja i utrzymywał do września, średnio około 19 razy w roku (557 dni w wieloleciu). Najwięcej przypadków tego obciążenia zanotowano w lipcu (200 dni), sierpniu (192 dni) i czerwcu (98 dni) (Ryc. 3). Najrzadziej wystąpiło w maju (42 dni) i wrześniu (24 dni). Sytuacje te występowały głównie, gdy nad południową Polską znajdował się klin antycyklonalny (166 dni) oraz bruzda cyklonalna (85 dni). Relatywnie dużą część przypadków stanowiły również masy powietrzne napływające z południowego zachodu – cyklonalne i antycyklonalne (109 dni). Ponadto w lipcu widoczny jest nieco większy udział niż w innych miesiącach sytuacji NEa (18 dni). Masy powietrza polarnego kontynentalnego występowały zdecydowanie częściej niż masy powietrza zwrotnikowego (w czerwcu o 16%, lipcu o 65% a w sierpniu aż o 86%). Najwyższe wartości prawdopodobieństwa wystąpienia *silnego stresu ciepła*

w czerwcu charakterystyczne są dla typów związanych z adwekcją mas powietrznych z południa. Podczas sytuacji antycyklonalnej (Sa) prawdopodobieństwo wynosi 69%, zaś podczas cyklonalnej (Sc) 50%. W lipcu wartości prawdopodobieństwa dla typów Sa i Sc wynoszą odpowiednio 64% i 58%. Dodatkowo, względem czerwca, zauważa się zdecydowany wzrost udziału mas powietrznych związanych z adwekcją powietrza z południowego zachodu (SWa – 61%, SWc – 45%). W sierpniu charakterystyczny jest duży spadek wartości prawdopodobieństwa względem czerwca i lipca dla typu Sc (22%). Wartość dla pozostałych sytuacji w sierpniu kształtuje się podobnie jak w lipcu.



Ryc. 2. Sytuacja baryczna nad Europą (12 UTC), (ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza – hPa, wysokość powierzchni 500 hPa – gpdam, topografia baryczna 500-1000 hPa – gpdam) wraz z zaznaczonym kierunkiem adwekcji powietrza w dniach (kolejno od lewego górnego rogu) 28.07, 29.07, 30.07, 31.07, 1.08.1994 r. (źródło: <http://www.wetter3.de/Archiv/>)

Fig. 2. Baric situation over Europe (12 UTC), (atmospheric pressure – hPa, height of 500 hPa geopotential – gpdam, baric topography 500-1000 hPa – gpdam) with direction of air masses advection on (from left up corner): 28.07, 29.07, 30.07, 31.07, 1.08.1994 r. (source: <http://www.wetter3.de/Archiv/>).



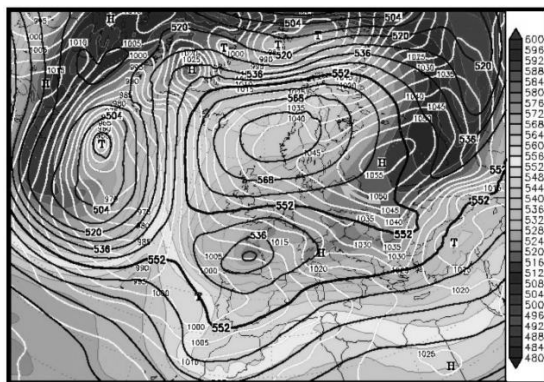
Ryc. 3. Liczba dni i prawdopodobieństwo warunkowe (%) wystąpienia silnego stresu ciepła w wybranych miesiącach w różnych typach cyrkulacji atmosferycznej w Krakowie (1981-2010).  
 Fig. 3. Number of days and conditional probability (%) of strong heat stress occurrences in particular months and different atmospheric circulation types in Krakow (1981-2010).

W przypadku mas powietrznych najwyższym prawdopodobieństwem wystąpienia *silnego stresu ciepła* w czerwcu charakteryzuje się powietrze zwrotnikowe (65%), ponad dwukrotnie przeważając nad polarnym kontynentalnym (28%). W lipcu wartości prawdopodobieństwa bardziej się wyrównują przyjmując 52% dla powietrza polarnego kontynentalnego i 60% dla powietrza zwrotnikowego, natomiast w sierpniu 47% dla powietrza polarnego kontynentalnego i 50% dla powietrza zwrotnikowego.



*Bardzo silny stres zimna* pojawił się zaledwie 6 razy w wieloleciu. Dwukrotnie podczas adwekcji powietrza arktycznego i polarnego kontynentalnego, jednokrotnie podczas adwekcji powietrza polarnego morskiego przetransformowanego oraz różnych mas powietrznych. Towarzyszyły temu sytuacje Ea, Na, Nc, NWA, SEc, SEa. Występował zawsze gdy prędkość wiatru wynosiła więcej niż 5 m/s, a temperatura powietrza mniej niż -5,5°C.

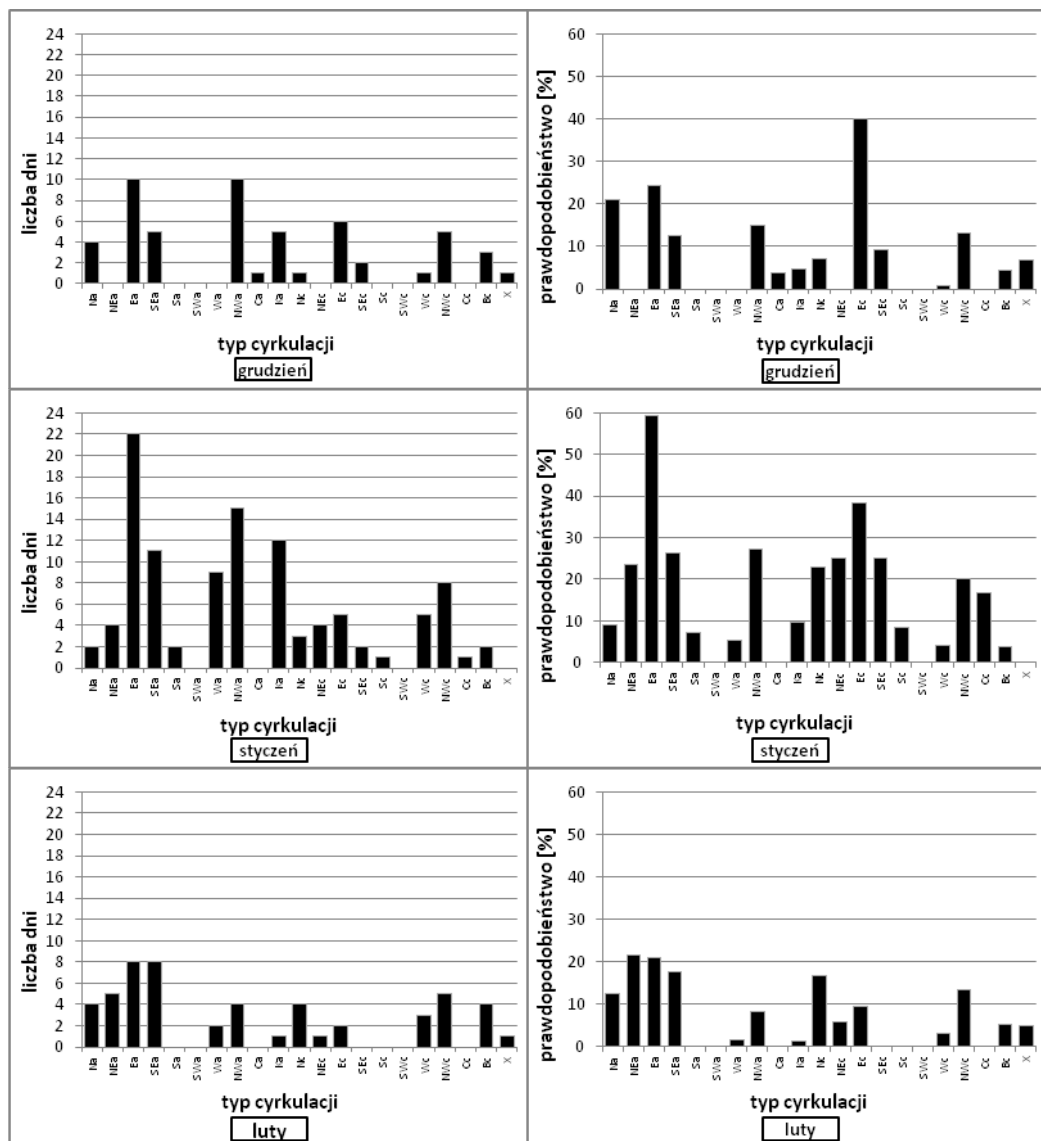
Zanalizowano przypadek z 16.12.1997 r. Wówczas w północnej części kontynentu występował wyż rosyjski i skandynawski, a w południowej niż śródziemnomorski. Rozległy układ wysokiego ciśnienia wypełniając niż śródziemnomorski transportował masy chłodnego powietrza polarnego kontynentalnego z nad kontynentu azjatyckiego (Ryc. 4). Tego dnia nad obszar południowej Polski masy powietrzne napływały z kierunku południowo wschodniego, tak jak zostało to określone przez Niedźwiedzia (2013) (Ryc. 4). W związku z położeniem Polski blisko centrum wyżu, wystąpiły sprzyjające warunki do rozwoju zachmurzenia o charakterze konwekcyjnym – *Cumulus fractus* i *humilis* (2 oktanty). Suche i zimne kontynentalne masy powietrza spowodowały gwałtowny spadek temperatury powietrza do -13,3°C. Relatywnie duża wartość gradientu barycznego wpłynęła na dużą prędkość wiatru (6 m/s). Na podstawie powyższego przykładu, jak i całego wielolecia, można stwierdzić, że duże znaczenie w kształtowaniu *bardzo silnego stresu zimna* należy przypisać ochładzającej działalności wiatru. W badanym trzydziestoleciu analizowane obciążenie nie występowało, pomimo iż pojawiały się niższe temperatury powietrza, a wielkość zachmurzenia była zbliżona do wielkości w dniu 16.12.1997 r. Podobne wnioski wysunął Novak (2013) na podstawie przeprowadzonych badań w Republice Czeskiej.



Ryc. 4. Sytuacja baryczna nad Europą (12 UTC, 16.12.1997 r.), (ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza – hPa, wysokość powierzchni 500 hPa – gpdam, topografia baryczna 500-1000 hPa – gpdam), wraz z zaznaczonym kierunkiem adwekcji powietrza (źródło: <http://www.wetter3.de/Archiv/>)  
 Fig. 4. Baric situation over Europe (12 UTC 16.12.1997 r.), (atmospheric pressure at sea level – hPa, height of 500 hPa geopotential – gpdam, baric topography 500-1000 hPa – gpdam) with direction of air masses advection (source: <http://www.wetter3.de/Archiv/>)

*Silny stres zimna* pojawiał się od listopada i utrzymywał do marca (244 dni w wieloleciu). Najwięcej przypadków obciążenia zanotowano w grudniu (54 dni), styczniu (108 dni) oraz lutym (52 dni) (Ryc. 5). Wówczas nad obszar Krakowa

napływały masy powietrzne ze wschodu (Ea – 43 dni) lub południowego wschodu (SEa – 30 dni). Relatywnie dużą część przypadków stanowiły również masy napływające z północnego zachodu zarówno podczas sytuacji cyklonalnej i antycyklonalnej (54 dni) (Ryc. 5). Masy powietrza polarnego kontynentalnego we wszystkich miesiącach przeważały nad masami powietrza arktycznego (w grudniu o 30%, w styczniu o 59%, a w lutym o 37%). Wśród pozostałych mas powietrznych kształtujących to obciążenie (33 dni w trzydziestoleciu) relatywnie duże znaczenie miały masy powietrza polarnego



Ryc. 5. Liczba dni i prawdopodobieństwo warunkowe (%) wystąpienia silnego stresu zimna w wybranych miesiącach w różnych typach cyrkulacji atmosferycznej w Krakowie (1981-2010).  
 Fig. 5. Number of days and conditional probability (%) of strong cold stress occurrences in particular months and different atmospheric circulation types in Krakow (1981-2010).

starego (przetransformowanego nad lądem). Najwyższe wartości prawdopodobieństwa warunkowego wystąpienia silnego stresu zimna w grudniu związane są z adwekcją powietrza ze wschodu, zarówno podczas sytuacji cyklonalnej ( $E_c - 40\%$ ), jak i antycyklonalnej ( $E_a - 24\%$ ), ponadto również z napływem powietrza z północy ( $N_a - 21\%$ ) (Ryc. 5). W styczniu, prawdopodobieństwo w różnych typach cyrkulacji jest zbliżone do siebie. Adwekcja powietrza ze wschodu, cyklonalna jak i antycyklonalna, o około 20% zwiększa szanse zaistnienia obciążenia w styczniu, aniżeli w grudniu. Przy sytuacjach  $NE_a$ ,  $SE_a$ ,  $NW_a$ ,  $N_c$ ,  $SE_c$ ,  $NW_c$ ,  $C_c$  prawdopodobieństwo z jakim wystąpi silny stres zimna wynosi średnio 25%. W lutym wartości prawdopodobieństwa są zdecydowanie niższe. Maksymalne wartości oscylujące wokół 20% charakterystyczne są dla typów  $NE_a$ ,  $E_a$ ,  $SE_a$ , a także  $N_c$  (Ryc. 5). Analiza prawdopodobieństwa występowania silnego stresu zimna podczas napływu określonego rodzaju mas powietrznych pokazuje, iż nie ma wyraźnie przeważającej masy powietrznej odpowiedzialnej za występowanie tego obciążenia. Masy powietrza arktycznego, jak i polarnego kontynentalnego osiągają maksymalną wartość w styczniu, oscylującą wokół 20%. Wartości prawdopodobieństwa dla pozostałych mas powietrznych mają marginalne znaczenie.

## **PODSUMOWANIE**

W pracy wykazano znaczącą rolę cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu częstości występowania ekstremalnych obciążeń cieplnych w Krakowie. Analiza dobitnie wykazała, że zarówno masy powietrzne jak i poszczególne typy cyrkulacji w różny sposób kształtują warunki bioklimatyczne Krakowa. Interpretacja wartości prawdopodobieństwa warunkowego występowania ekstremalnych obciążeń cieplnych w różnych typach cyrkulacji i masach powietrza może stanowić cenną informację dla mieszkańców Krakowa, umożliwiającą przygotowanie się na skutki zdrowotne tychże obciążeń cieplnych. Ponadto ma zastosowanie również dla władz województwa oraz samorządów, gdyż według Rządowego Centrum Bezpieczeństwa (2013) władze lokalne są zobowiązane do podjęcia konkretnych działań w momencie wystąpienia bardzo silnego i silnego stresu zimna. Zastosowanie UTCL w badaniu ekstremalnych warunków bioklimatycznych Krakowa umożliwia także porównanie bioklimatu Krakowa z innymi miastami w Polsce i na świecie. Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań, należy stwierdzić, że obciążenia ekstremalnie ciepłe występują w typach wyżowych, bez wyraźnej adwekcji powietrza, gdy często nad obszarem dorzecza górnej Wisły występuje rozmyte pole ciśnienia atmosferycznego. Ponadto wartości prawdopodobieństwa, wskazują na duże powiązanie pomiędzy występowaniem ekstremalnie ciepłych obciążeń a adwekcją mas powietrza z sektora południowego. Dominujące znaczenie dla występowania ekstremalnie chłodnych obciążeń cieplnych mają sytuacje cyklonalne i antycyklonalne z napływem powietrza z sektora wschodniego oraz antycyklonalne z północnego zachodu. Określając warunki bioklimatyczne Krakowa, należy wziąć pod uwagę, iż jest to teren różnorodny środowiskowo, zatem czynniki lokalne mogą dodatkowo modyfikować zróżnicowanie przestrzenne warunków bioklimatycznych. Zdaniem autorów niniejszego opracowania

warto rozważyć studia zróżnicowania przestrzennego warunków bioklimatycznych, w oparciu o wskaźnik UTCI z wykorzystaniem metod GIS.

#### LITERATURA:

Abdel-Ghany A.M., Al-Helal, I.M., Shady M.R. (2013). *Human thermal comfort and heat stress in an outdoor urban arid environment: a case study*. Advances in Meteorology, vol. 2013, 1-7.

Biem J., Koehncke N., Classen D., Dosman J. (2003). *Out of the cold: management of hypothermia and frostbite*. Canadian Medical Association Journal, vol. 168, 3, 305-311.

Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B. (2010a). *UTCI – Nowe narzędzie badania warunków bioklimatycznych w różnych skalach czasowych i przestrzennych*. Przegląd Geofizyczny, LV, 1-2, 5-19.

Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Kunert A. (2010b). *Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale*. Miscellanea Geographica 14, 91-102.

Błażejczyk K., McGregor G. (2007). *Warunki biotermiczne a umieralność w wybranych aglomeracjach europejskich*. Przegląd Geograficzny, 79, 3/4, 401-423.

Błażejczyk K., Kunert A. (2010a). *Obciążenie cieplne organizmu człowieka podczas letnich i zimowych wędrówek po Tatrach*. Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem, t. III, 61-68.

Błażejczyk K., Kunert A. (2010b). *Warunki bioklimatyczne wybranych aglomeracji Europy i Polski*. W: E. Bednorz, L. Kolendowicz (red.), „Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje” (93-106). Poznań: Studia i Prace z Geografii i Geologii, 16, Bogucki Wyd. Naukowe.

Bröde P., Krüger E.L., Rossi F.A., Fiala D. (2012). *Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI – a case study in Southern Brazil*. International Journal of Biometeorology, 56 (3), 471-480.

Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky, G. (2012). *UTCI-Fiala multinode model of human heat transfer and temperature regulation*. International Journal of Biometeorology, 56(3), 429-441.

Huth R., Beck Ch., Philipp A., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynova M., Kysely J., Tveito O.E. (2008). *Classifications of Atmospheric Circulation Patterns – Recent advances and applications*. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1146, 105-152.

Kędzierski M. (2013). *Bioklimat Andamanów*. Maszynopis pracy magisterskiej, Instytut Geografii, Uniwersytet Pedagogiczny, Kraków.

Koronacki, J., Mielniczuk, J. (2001). *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.

Kozłowska-Szcześna T., Błażejczyk K. (2010). *Wpływ środowiska atmosferycznego na społeczeństwo jako przedmiot badań biometeorologii społecznej*. Przegląd Geograficzny, 82, 1, s. 5-48.

Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B. (1997). *Bioklimatologia człowieka. Metody i ich zastosowania w badaniach bioklimatu Polski*. Monografie, 1, IGiPZ PAN.

Kozłowska-Szczęśna T., Kuchcik M., Krawczyk B. (2004). *Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka*. Monografie, 4, IGiPZ PAN.

Kuchcik M., Błażejczyk K. (2001). *Wpływ warunków pogodowych na zachorowalność i umieralność mieszkańców Krakowa*, W: Krawczyk B., Węclawowicz G. (red.), „Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej”. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 180, 71-81.

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.

Monteith J.L., Unsworth M.H. (1988). *Principles of Environmental Physics*. London: Edward Arnold.

Niedźwiedz T. (2013). *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy*. Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.

Novak M. (2013). *Use of UTCI in the Czech Republic*. Geographica Polonica, 86, 1, 21-28.

Pantavou K., Theoharatos G., Santamouris M., Asimakopoulos D. (2013). *Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI*. Building and Environment, vol. 66, 82-95.

Podstawczyńska A. (2004). *Ultrafioletowe i całkowite promieniowanie słoneczne w Łodzi w latach 1997–2001*. Acta Geogr. Lodziensia, 100 lat obserwacji meteorologicznych w Łodzi, 89, 161–178.

Podstawczyńska A. (2007). *Cechy solarne klimatu Łodzi*. Acta Geogr. Lodziensia, Folia Geogr. Phys., 7.

Tanaka M. i Tokudome S., (1991). *Accidental hypothermia and death from cold in urban areas*. International Journal of Biometeorology, 34, 242-6.

Zwieriew A.S. (1965). *Meteorologia synoptyczna*. Warszawa: WKŁ.

#### **Źródła internetowe:**

Sadowski M., Romańczak A., Siwiec E., (2012). *Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu Synteza Etap II*, Warszawa: IOŚ-PIB. Pozyskano z <http://tnij.org/hpoji5w> [dostęp z dnia: 12.03.2014]

Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Wydział Analiz RCB (2013). *Zagrożenia okresowe występujące w Polsce*. Pozyskano z <http://rcb.gov.pl/wp-content/uploads/RCB-Zagro%C5%BCenia-okresowe-w-Polsce-aktualizacja.pdf> [http://rcb.gov.pl/?page\\_id=14](http://rcb.gov.pl/?page_id=14) [dostęp z dnia: 12.03.2014]