

Krzysztof BARTOSZEK^a,
Bogusław M. KASZEWSKI^b,
Krzysztof SIWEK^c

^aUniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie, Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku
e-mail: k.bartoszek@umcs.pl
ORCID: 0000-0002-8676-003X

^bAkademia Nauk Stosowanych Wincentego Pola
w Lublinie, Wydział Nauk Społecznych
e-mail: kaszewski.b@wssp.edu.pl
ORCID: 0000-0002-0797-4284

^cUniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie, Instytut Nauk o Ziemi i Środowisku
e-mail: krzysztof.siwek@mail.umcs.pl
ORCID: 0000-0003-1953-7142

Prace i Studia Geograficzne
ISSN: 0208–4589; ISSN (*online*): 2543–7313
2024, t. 69.3, s. 7–24
DOI: 10.48128/pisg-2024-69.3-01

ZRÓŻNICOWANIE WARUNKÓW BIOKLIMATYCZNYCH MIĘDZY CENTRUM LUBLINA I OBSZAREM PODMIEJSKIM W PÓŁROCZU LETNIM

**Differences in bioclimatic conditions between the center of Lublin and the suburban area
in the warm half of the year**

Abstract: The aim of this study is to assess the differences in the occurrence of harsh bioclimatic conditions between the center of Lublin and non-urban areas in the warm half of the year (April–September) and to determine the rate of changes in these conditions in both analysed meteorological stations in the years 1973–2022. To assess the bioclimatic conditions, the biometeorological index Humidex was used. In the first part of the study period, the number of days with unfavourable bioclimatic conditions prevailed in the city center, while in the last two decades the differences have decreased, mainly as a result of the development of concentrated buildings in the suburban area. In both measurement points, there was a significant increase in the number of days with strong thermal and hygric loads on the human body. The study also presents the reasons for the occurrence of selected cases with significant differences in the index values in the Lublin region, as well as the synoptic conditions on the day with the highest recorded Humidex value during the study period.

Key words: bioclimatic conditions, Humidex, urban climate, climate change, Lublin

Wpłynęło: 08.02.2024

Zaakceptowano: 11.06.2024

Zalecany sposób cytowania / Cite as: Bartoszek K., Kaszewski B.M., Siwek K., 2024, Zróżnicowanie warunków bioklimatycznych między centrum Lublina i obszarem podmiejskim w półroczu letnim, *Prace i Studia Geograficzne*, 69.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 7–24, DOI: 10.48128/pisg-2024-69.3-01.

© Copyright by Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego & Autorzy



Artykuł opublikowany przez SCIENDO
i objęty licencją Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

WSTĘP

W ostatnich trzech dekadach w wielu rejonach świata zaobserwowano wzrost liczby cieplejszych dni i nocy (Vose i in. 2005; Morak i in. 2011; Wu i in. 2023). Na kontynencie europejskim w XXI w. zwiększyła się także częstość występowania okresów z długotrwałymi falami upałów (Rebetz i in. 2009; Zhang i in. 2020). Podczas dni z anomalnie wysokimi wartościami temperatury powietrza odnotowany był istotny wzrost liczby zgonów, głównie wśród mieszkańców miast (np. okres letni 2003 r. w Europie Zachodniej, 2010 r. w europejskiej części Rosji oraz w 2022 r. w krajach południowej Europy). Również w Polsce w ostatnich latach zaznaczyła się wyraźnie większa liczba dni upalnych, parnych oraz nocy gorących i tropikalnych, a więc tendencja do coraz częstszego pojawiania się warunków pogodowych o niekorzystnym oddziaływaniu na zdrowie i samopoczucie człowieka (Krzyżewska, Dyer 2019; Tomczyk i in. 2020). Ich nasilenie notuje się przede wszystkim w aglomeracjach miejskich.

Głównym celem niniejszej pracy jest ocena różnic w występowaniu uciążliwych warunków bioklimatycznych między centrum Lublina a obszarem pozamiejskim w ciepłej połowie roku (kwiecień–wrzesień) w latach 1973–2022. Do badań wykorzystano biometeorologiczny wskaźnik Humidex (HD), który odzwierciedla temperaturę odczuwaną przez człowieka, kształtującą się pod wpływem warunków termiczno-wilgotnościowych otoczenia (Błażejczyk, Kunert 2011). W związku z tym na wstępie niezbędne było przeanalizowanie wieloletnich zmian temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej, które to dwa elementy meteorologiczne istotnie wpływają na bioklimat danego obszaru. Pozostałe szczegółowe cele pracy to: określenie częstości występowania klas wskaźnika Humidex w poszczególnych miesiącach, zmiany liczby dni tych klas w wieloleciu oraz przyczyny wystąpienia wybranych przypadków ze znacznymi różnicami wartości wskaźnika na badanym obszarze.

Jak wynika z szeregu badań, głównymi czynnikami wpływającymi na komfort klimatyczny człowieka są: temperatura powietrza, wilgotność powietrza, prędkość wiatru i promieniowanie słoneczne. Z tych czterech czynników największy wpływ mają dwa pierwsze, tzn. temperatura i wilgotność powietrza (Fallah-Ghalhari i in. 2022). Te dwa elementy wykorzystuje stosunkowo prosty wskaźnik komfortu cieplnego, jakim jest Humidex. Stosuje się go w okresie ciepłym podczas wysokiej temperatury powietrza. Wartości wskaźnika, wyrażone w °C, obrazują temperaturę odczuwaną przez człowieka, która kształtuje się pod wpływem warunków termiczno-wilgotnościowych otoczenia (Błażejczyk, Kunert 2011). Ponadto wartości te są powiązane z odpowiadającymi stopniami komfortu cieplnego, dzięki czemu wskaźnik jest łatwy do interpretacji. Humidex jest także prostszy do obliczenia niż bardziej złożone wskaźniki (np. Uniwersalny wskaźnik odczuć cieplnych – UTCI), ponieważ wymaga tylko dwóch parametrów wejściowych (temperatury i wilgotności powietrza), które są powszechnie mierzone przez stacje meteorologiczne (Sirangelo i in. 2020). Warto jednak pamiętać, że wskaźnik Humidex poza tym, że nie uwzględnia wspomnianych wcześniej innych czynników wpływających na stres ciepła, to nie ma także bezpośredniego odniesienia do reakcji fizjologicznych zachodzących w organizmie pod wpływem zmieniających się warunków termicznych otoczenia oraz używanej odzieży (d' Ambrosio Alfano i in. 2007; Błażejczyk, Kunert 2011). Wspomniana łatwość w interpretacji tego wskaźnika powoduje, że w krajach południowej Europy, Stanach Zjednoczonych i Kanadzie, w dni upalne wartości Humidex są podawane do wiadomości mieszkańców (Krzeszowiak, Pawlas 2015).

Za pomocą tego wskaźnika prowadzone były badania warunków bioklimatycznych wielu miast na świecie, np. w Mar del Plata (García 2019), Atenach (Charalampopoulos i in. 2012) czy Wenecji (Mastrangelo i in. 2007). W Polsce tego typu badania przy wykorzystaniu wskaźnika Humidex były stosowane w Krakowie (Matuszko, Piotrowicz 2007), Lublinie (Dobek i in. 2008), Białymstoku i Suwałkach (Górniak 2021) oraz Zwierzyńcu (Kaszewski 2006). Badania związku wartości tego wskaźnika z typami cyrkulacji atmosferycznej, masami powietrznymi i frontami atmosferycznymi w Krakowie prowadziła D. Ciaranek (2013). Humidex używany jest także do oceny zmian warunków termiczno-wilgotnościowych w dłuższych okresach. Na przykład K. Błażejczyk i R. Twardosz (2010)

badali zmienność warunków bioklimatycznych w Krakowie w latach 1826–2006, a É. Mekis i inni (2015) w wybranych stacjach meteorologicznych Kanady w latach 1953–2012.

Inne zastosowanie wskaźnika Humidex to badania dotyczące komfortu cieplnego człowieka w wybranych obszarach miejskich o różnej strukturze zabudowy i udziale zieleni, np. w Atenach (Charalampopoulos i in. 2012) oraz w Brnie (Geletiĉ i in. 2018). Podobnych badań, ale w terenie pozamiejskim, pod kątem oceny warunków wypoczynku człowieka w otoczeniu zbiornika Sulejowskiego dokonali L. Chojnacka-Ożga i W. Ożga (2013). Z kolei ocenę zróżnicowania wartości wskaźnika Humidex wewnątrz pomieszczeń przeprowadzili F.R. d' Ambrosio Alfano i inni (2007). Najnowsze wyniki badań pokazały ponadto związek warunków bioklimatycznych, określonych na podstawie wartości wskaźnika Humidex, z występowaniem m.in. dziecięcej astmy, chorobami dłoni, stóp i jamy ustnej, czerwonką prątkową, alergicznym zapaleniem spojówek oraz wpływem na zdrowie psychiczne człowieka (Zhou 2023; Zhao i in. 2023).

MATERIAŁ I METODY

W niniejszym opracowaniu wykorzystano wartości temperatury powietrza i aktualnego ciśnienia pary wodnej z tzw. II terminu obserwacji, tj. z godz. 12 UTC, które zestawiono dla okresu od kwietnia do września z lat 1973–2022. Wartości elementów meteorologicznych z tego terminu są uważane w bioklimatologii za reprezentatywne dla pory doby o największej aktywności człowieka (Kozłowska-Szczęśna i in. 1997).

Dane pochodziły z dwóch punktów pomiarowych: z Obserwatorium Meteorologicznego Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej na Placu Litewskim w Lublinie ($\varphi = 51^{\circ}14'54''\text{N}$, $\lambda = 22^{\circ}33'38''\text{E}$, $h = 195$ m n.p.m.; ryc. 1a) oraz stacji synoptycznej Lublin-Radawiec ($\varphi = 51^{\circ}13'00''\text{N}$, $\lambda = 22^{\circ}24'23''\text{E}$, $h = 238$ m n.p.m.; ryc. 1b) należącej do IMGW-PIB. Stacja Plac Litewski położona jest na zadrzewionym skwerze w centrum Lublina. Jej lokalizacja w analizowanym okresie uległa niewielkiej zmianie, tj. klatka meteorologiczna została przesunięta na wschód o kilkanaście metrów, ale jej najbliższe otoczenie ma podobny charakter. Należąca do IMGW-PIB stacja w Radawcu oddalona jest o 12 km od tego punktu w kierunku południowo-zachodnim (ryc. 1c). Stacja ta położona jest na terenie Lotniska Aeroklubu Lubelskiego i charakteryzuje obszar pozamiejski. Do analizy wybranych przypadków wykorzystano również dane pomiarowe z obu stacji w rozdzielczości 10-minutowej oraz mapy odbiciowości radarowej (CAPPI) pozyskane z IMGW-PIB.

Wartości wskaźnika Humidex z godziny 12 UTC obliczono z następującego wzoru (za: d'Ambrosio Alfano i in. 2011):

$$HD = t_a + \frac{5}{9} \times (p_{as} - 10)$$

gdzie:

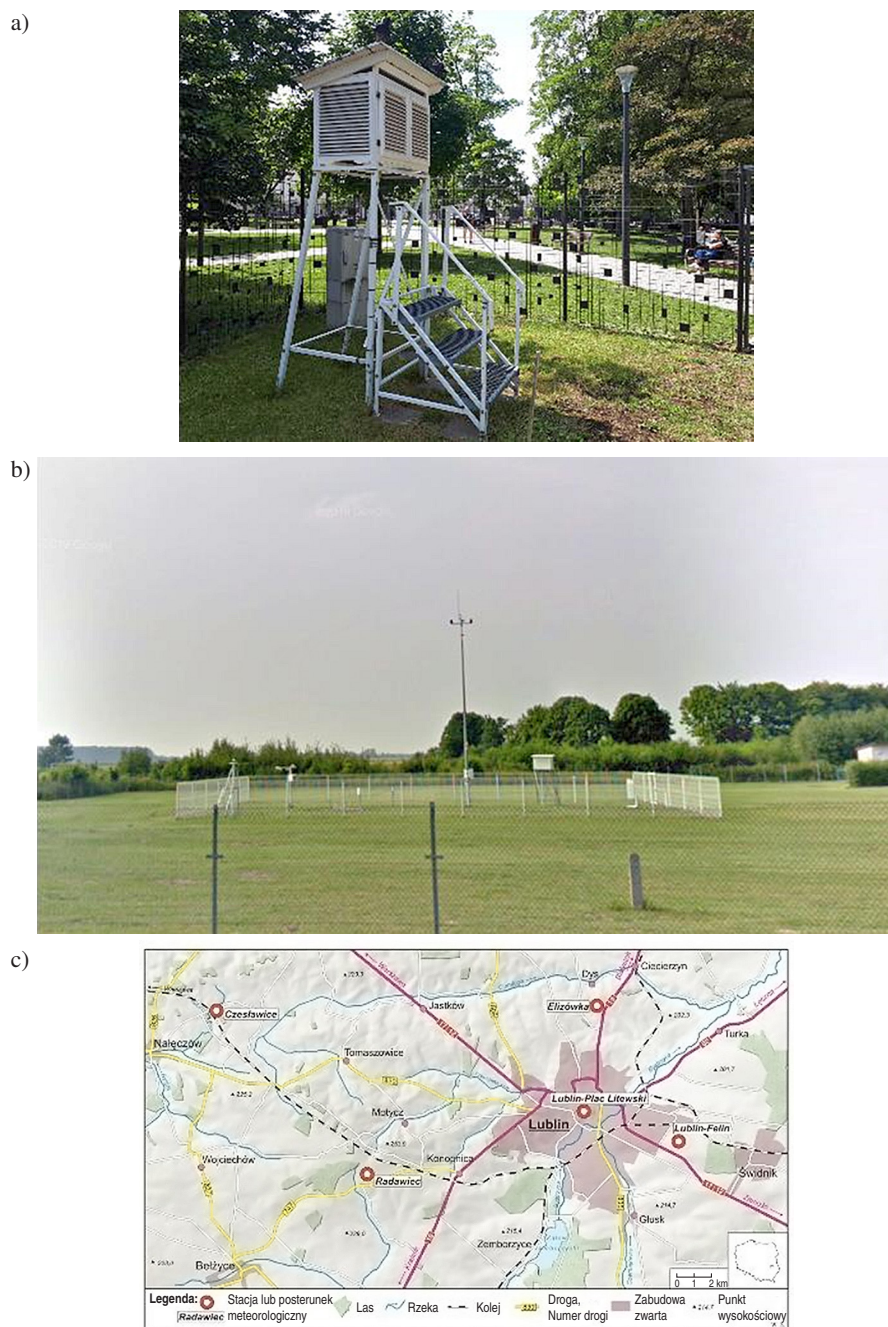
HD – wskaźnik Humidex ($^{\circ}\text{C}$);

t_a – temperatura powietrza ($^{\circ}\text{C}$);

p_{as} – aktualne ciśnienie pary wodnej (hPa).

Następnie wszystkie wartości wskaźnika Humidex zostały zakwalifikowane do jednej z czterech klas wydzielonych na podstawie skali zagrożenia termicznego i wilgotnościowego (tabela 1). W porównaniu do skali przedstawionej w opracowaniu K. Błażejczyka (2004) przedział $29 \leq HD < 39$ podzielono za J. Kravchenko i innymi (2013) na dwie odrębne klasy.

Czasową zmienność liczby dni z klasami wskaźnika Humidex oraz różnice między dwiema stacjami meteorologicznymi przedstawiono zarówno w ujęciu wieloletnim, jak i w okresach pięcioletnich. Istotność statystyczną trendów oceniono stosując test Manna-Kendalla przy poziomach istotności $p < 0,001$, $p < 0,01$ i $p < 0,05$, a wielkość zmian w czasie (współczynnik kierunkowy) obliczono



Ryc. 1. Stacja meteorologiczna Lublin-Plac Litewski (a), stacja synoptyczna Lublin-Radawiec (b) oraz lokalizacja obu stacji pomiarowych (c)

Źródło: (a) i (b) fotografia własna; (c) mapę opracował W. Ładniak.

Fig. 1. Lublin-Plac Litewski meteorological station (a), Lublin-Radawiec synoptic station (b), and the location of both measurement stations (c)

Source: (a) and (b) own photo; (c) map prepared by W. Ładniak.

Tabela 1. Skala zagrożenia termiczno-wilgotnościowego opracowana na podstawie wartości wskaźnika Humidex**Table 1.** The scale of thermal and hygric loads developed on the basis of the Humidex index value

Klasa Class	Zakres wartości wskaźnika Humidex (°C) Range of Humidex values (°C)	Stopień zagrożenia Degree of hazard	Odczuwalne objawy Perceived symptoms
1	$23 \leq HD < 29$	poziom ostrzegawczy warning level	Niewielki dyskomfort. Długotrwały wysiłek może doprowadzić do stanu przemęczenia. <i>Mild discomfort. Prolonged exertion may lead to fatigue.</i>
2	$29 \leq HD < 34$	wzrost zagrożenia increased risk	Zauważalny dyskomfort. Niewielki wysiłek może doprowadzić do stanu przemęczenia. <i>Noticeable discomfort. Light exertion may lead to fatigue.</i>
3	$34 \leq HD < 39$	duże zagrożenie high risk	Znaczny dyskomfort. Długotrwały wysiłek może doprowadzić do udaru cieplnego. <i>Significant discomfort. Prolonged exertion may lead to heat stroke.</i>
4	$39 \leq HD < 54$	bardzo duże zagrożenie very high risk	Duży dyskomfort. Niebezpieczeństwo udaru cieplnego podczas niewielkiego wysiłku fizycznego. <i>Severe discomfort. Risk of heat stroke during light physical activity.</i>

Źródło: opracowanie własne.
Source: prepared by the authors.

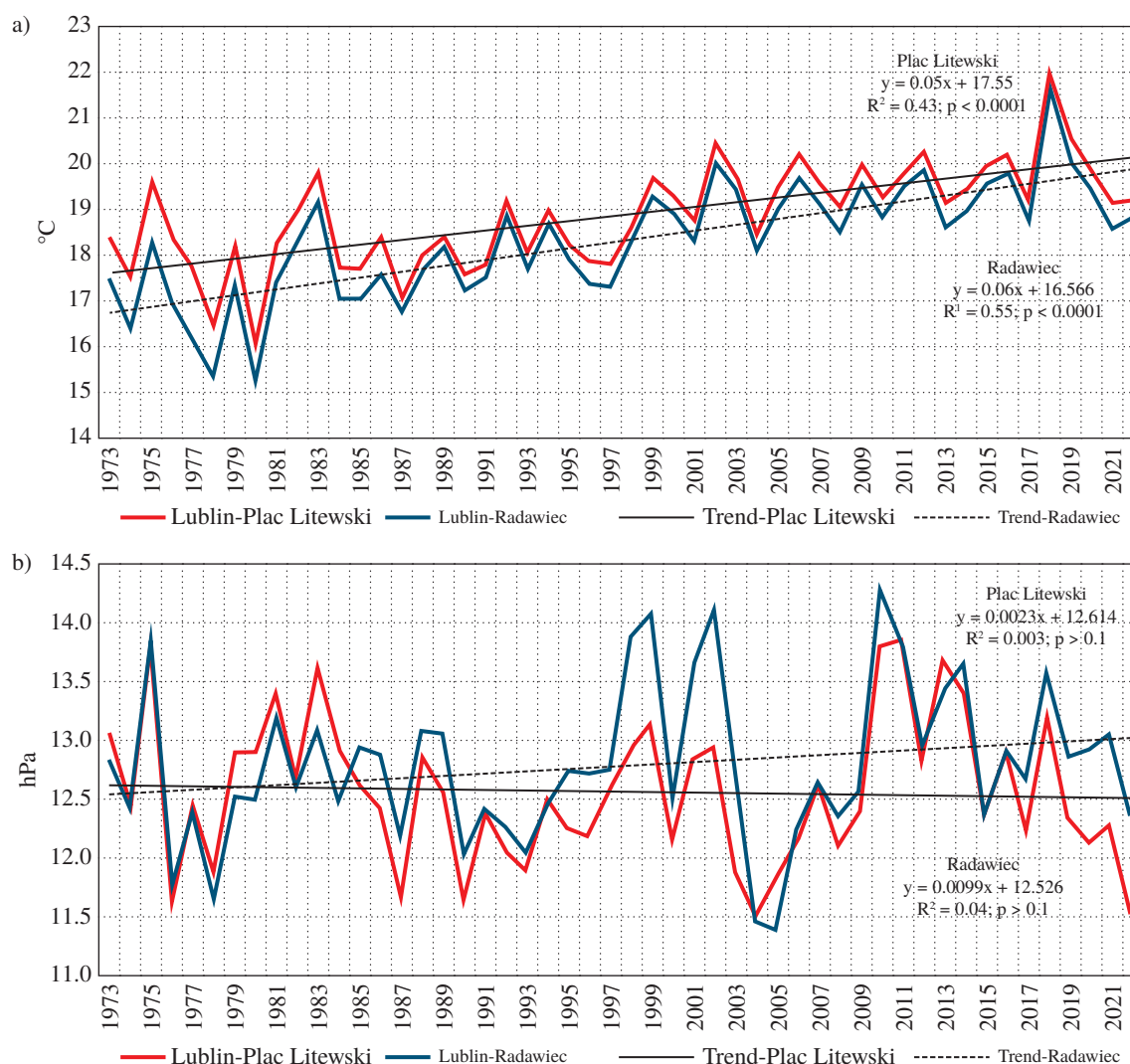
metodą Sena (Sen 1968; Kendall 1975). Ponadto do określenia istotności statystycznej różnic liczby dni z poszczególnymi klasami w obu punktach pomiarowych wykorzystano test U Manna-Whitneya podając wartość statystyki testu (U) oraz poziom istotności statystycznej (p-value).

Do oceny uwarunkowań cyrkulacyjnych oraz bioklimatycznych nad Europą, podczas dnia z najwyższą zanotowaną wartością wskaźnika Humidex, wykorzystano dane dotyczące wysokości powierzchni izobarycznej 500 hPa oraz wartości temperatury powietrza i temperatury punktu rosy (2 m n.p.g.) z godziny 12 UTC, pochodzące z reanalizy ERA5 (Hersbach i in. 2023).

WYNIKI

Zmienność czasowa temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej

W badanym wieloleciu średnia temperatura powietrza z godziny 12 UTC odznaczała się w okresie od kwietnia do września bardzo dużą współzmiennością na obu analizowanych stacjach meteorologicznych (współczynnik korelacji $r = 0,97$; ryc. 2a). W latach 1973–2022 przeciętna jej wartość wynosiła na Placu Litewskim $18,9^{\circ}\text{C}$, a w Radawcu $18,3^{\circ}\text{C}$, przy czym największa różnica średniej temperatury między pierwszą a drugą stacją została zanotowana w 1976 r. ($+1,5^{\circ}\text{C}$), najmniejsza zaś w 1989 r. ($+0,2^{\circ}\text{C}$). W tych dwóch punktach pomiarowych zaznaczył się bardzo silny trend wzrostu temperatury powietrza wynoszący odpowiednio $+0,65^{\circ}\text{C}$ i $+0,52^{\circ}\text{C}$ na 10 lat ($p < 0.001$). Najwyższe średnie wartości temperatury powietrza zanotowano w 2018 r. ($22,2^{\circ}\text{C}$ na Placu Litewskim i $21,8^{\circ}\text{C}$ w Radawcu), które przekraczały średnią wieloletnią odpowiednio o $+3,3^{\circ}\text{C}$ i $+3,5^{\circ}\text{C}$. Z kolei najniższe średnie wartości wystąpiły w 1980 r. (odpowiednio $15,9^{\circ}\text{C}$ i $15,2^{\circ}\text{C}$), odbiegając od wartości przeciętnych o $-3,0^{\circ}\text{C}$ i $-3,1^{\circ}\text{C}$.



Ryc. 2. Wieloletnia zmienność średniej temperatury powietrza (a) i ciśnienia pary wodnej (b) na stacji meteorologicznej Lublin-Plac Litewski i Lublin-Radawiec w okresie kwiecień–wrzesień (12 UTC)

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 2. Multiannual variability of mean air temperature (a) and water vapor pressure (b) at the Lublin-Plac Litewski and Lublin-Radawiec meteorological stations in April–September (12 UTC)

Source: prepared by the authors.

W okresie kwiecień–wrzesień przeciętna wieloletnia wartość ciśnienia pary wodnej wynosiła w Radawcu 12,8 hPa, a na Placu Litewskim 12,6 hPa. W tym przypadku wieloletni przebieg wartości z godziny 12 UTC charakteryzował się w obu stacjach meteorologicznych nieco mniejszą zgodnością (współczynnik korelacji $r = 0,81$; ryc. 2b). Do połowy lat 80. XX w. średnie wartości ciśnienia pary wodnej były nieco wyższe w centrum miasta (maksymalna różnica w 1983 r.: +0,6 hPa), natomiast w kolejnych latach sytuacja była odmienna (np. w 2002 r. w Radawcu średnia wartość tej charakterystyki była wyższa o 1,2 hPa niż na Placu Litewskim). Na obu stacjach meteorologicznych nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów, a wieloletnie tempo zmian było bardzo niewielkie ($-0,02$ hPa/10 lat na Placu Litewskim oraz $+0,10$ hPa/10 lat w Radawcu). Ponadto, inaczej niż w przypadku temperatury powietrza, najwyższe i najniższe średnie wartości wystąpiły w obu miej-

scach w różnych latach. W Radawcu było to odpowiednio: 14,3 hPa (w 2010 r.) i 11,4 hPa (w 2005 r.), a na Placu Litewskim 13,9 hPa (w 2011 r.) i 11,5 hPa (w 2022 r.).

Wieloletnie zmiany wskaźnika Humidex w poszczególnych klasach

Zarówno na Placu Litewskim, jak i w Radawcu, w analizowanym wieloleciu wystąpił wyraźny wzrost liczby dni z odczuwalnymi obciążeniami termiczno-wilgotnościowymi organizmu człowieka (tabela 2). Wpływ na to miało przede wszystkim coraz częstsze pojawianie się przypadków ze znacznym dyskomfortem (klasa 2 i 3 wskaźnika Humidex), a ich wzrost był w tempie około 2 dni na 10 lat. Należy zauważyć, że silniejszy wzrost liczby dni, niezależnie od analizowanej klasy, zaznaczył się na stacji podmiejskiej, czego skutkiem były zmniejszające się różnice w występowaniu niekorzystnych warunków bioklimatycznych między dwoma punktami pomiarowymi (tabela 3).

Tabela 2. Istotność statystyczna trendów liczby dni z klasami wskaźnika Humidex od kwietnia do września w latach 1973–2022 na obu stacjach meteorologicznych

Table 2. Statistical significance of trends in the number of days with Humidex index classes from April to September in 1973–2022 at both meteorological stations

	Wszystkie klasy Humidex łącznie <i>All Humidex classes combined</i>		Klasa 1 <i>Class 1</i>		Klasa 2 <i>Class 2</i>		Klasa 3 <i>Class 3</i>	
	Plac Litewski	Radawiec	Plac Litewski	Radawiec	Plac Litewski	Radawiec	Plac Litewski	Radawiec
Zmiana liczby dni na 10 lat <i>Change in the number of days per 10 years</i>	4,8	6,3	0,5	1,6	1,6	2,2	1,6	1,7
Istotność trendu <i>Significance of the trend</i>	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p > 0,05$	$p > 0,05$	$p < 0,05$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$

Źródło: opracowanie własne.
Source: prepared by the authors.

Tabela 3. Różnica średniej liczby dni z klasami (od 1 do 3) wskaźnika Humidex między Placem Litewskim a Radawcem w kolejnych okresach 5-letnich

Table 3. Difference in the average number of days with classes (from 1 to 3) of the Humidex index between Plac Litewski and Radawiec in subsequent 5-year periods

Okres <i>Period</i>	1973–1977	1978–1982	1983–1987	1988–1992	1993–1997	1998–2002	2003–2007	2008–2012	2013–2017	2018–2022
Klasa 1 <i>Class 1</i>	6,8	5,2	0,8	1,0	–0,4	1,0	–1,2	0,6	0,0	–0,4
Klasa 2 <i>Class 2</i>	4,8	5,0	3,0	0,4	2,4	0,3	2,0	0,5	1,8	1,4
Klasa 3 <i>Class 3</i>	1,6	1,4	1,4	0,0	0,6	0,0	0,8	1,6	2,4	0,0

Źródło: opracowanie własne.
Source: prepared by the authors.



Ryc. 3. Wieloletnia zmienność dni z klasami (od 1 do 4) wskaźnika Humidex na obu stacjach meteorologicznych

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 3. Multi-year variability of days with classes (from 1 to 4) of the Humidex index at both meteorological stations

Source: prepared by the authors.

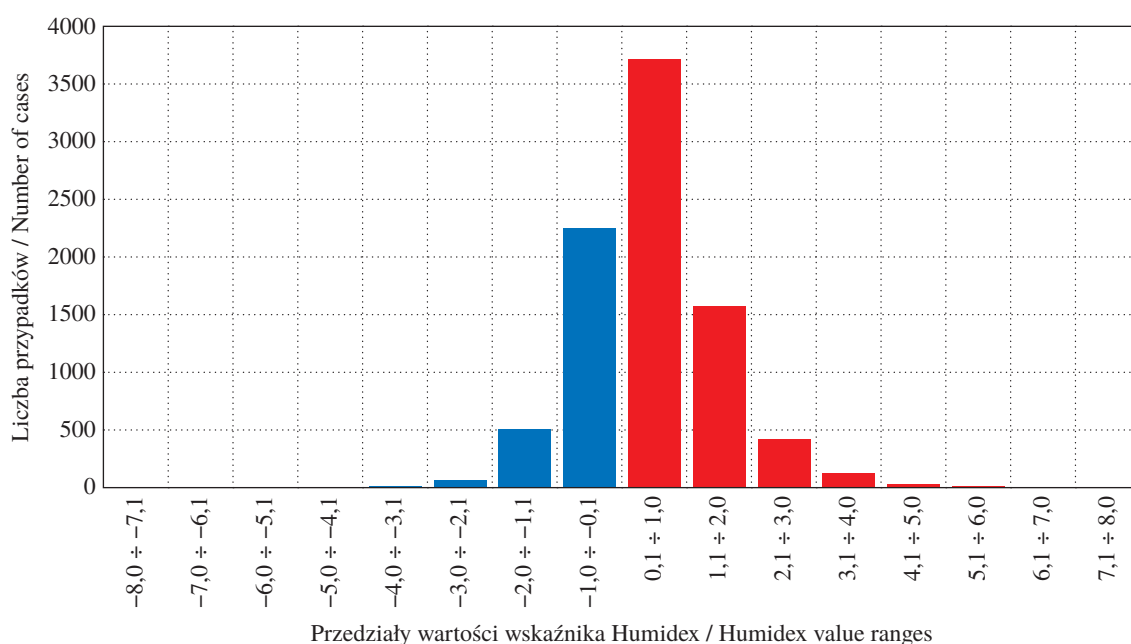
Analizując łączną liczbę dni, które zakwalifikowano do klas od 1 do 4, to najczęściej wystąpiło ich w 2018 r. – na Placu Litewskim było to 115, a w Radawcu 113 przypadków. Zwraca uwagę to, że wśród 10 lat z największą liczbą dni z dyskomfortem termiczno-wilgotnościowym, aż 6 z nich pojawiło się po 2010 r. Najrzadziej tego rodzaju dni wystąpiły w 1978, 1980, 1987 i 1990 r. (od 34 do 49 dni).

Po podziale na poszczególne klasy wskaźnika Humidex, istotna różnica między pierwszą a drugą częścią badanego okresu jest zauważalna szczególnie w przypadku klasy 3 (ryc. 3). Po raz pierwszy 10 lub więcej takich dni zanotowano dopiero w 1994 r., natomiast w ostatniej dekadzie występowały one przeciętnie co dwa lata. W centrum miasta największą liczbę dni z klasą 3 zanotowano w 2012, 2015 i 2010 r. (odpowiednio 18, 17 i 15 dni), a w Radawcu w latach 2012, 2015 i 2021 (po 15 dni). Z kolei w 1978 i 1980 r. na obu stacjach nie wystąpiły one ani razu (na Placu Litewskim nie pojawiły się też w 1990 r., a w Radawcu w latach 1973, 1975, 1977, 1979 i 1982).

Szczególne uwagę zwracają przypadki wystąpienia dni z klasą 4, które zanotowano w Lublinie i okolicy dopiero w 1998 r., a potem pojawiły się jeszcze w 10 innych latach (ryc. 3). W niemal wszystkich przypadkach nie było to więcej niż 2 dni między czerwcem a sierpniem, z wyjątkiem 2015 r., w którym na Placu Litewskim było ich 9 (od 5 do 13 sierpnia), a w Radawcu 5 (od 7 do 11 sierpnia).

Zróźnicowanie wartości wskaźnika Humidex między stacjami pomiarowymi

W 93% wszystkich dni wielkość różnic wartości wskaźnika Humidex o godzinie 12 UTC między stacją na Placu Litewskim i w Radawcu zawierała się w zakresie od $-3,0^{\circ}$ do $+3,0^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4). Mimo



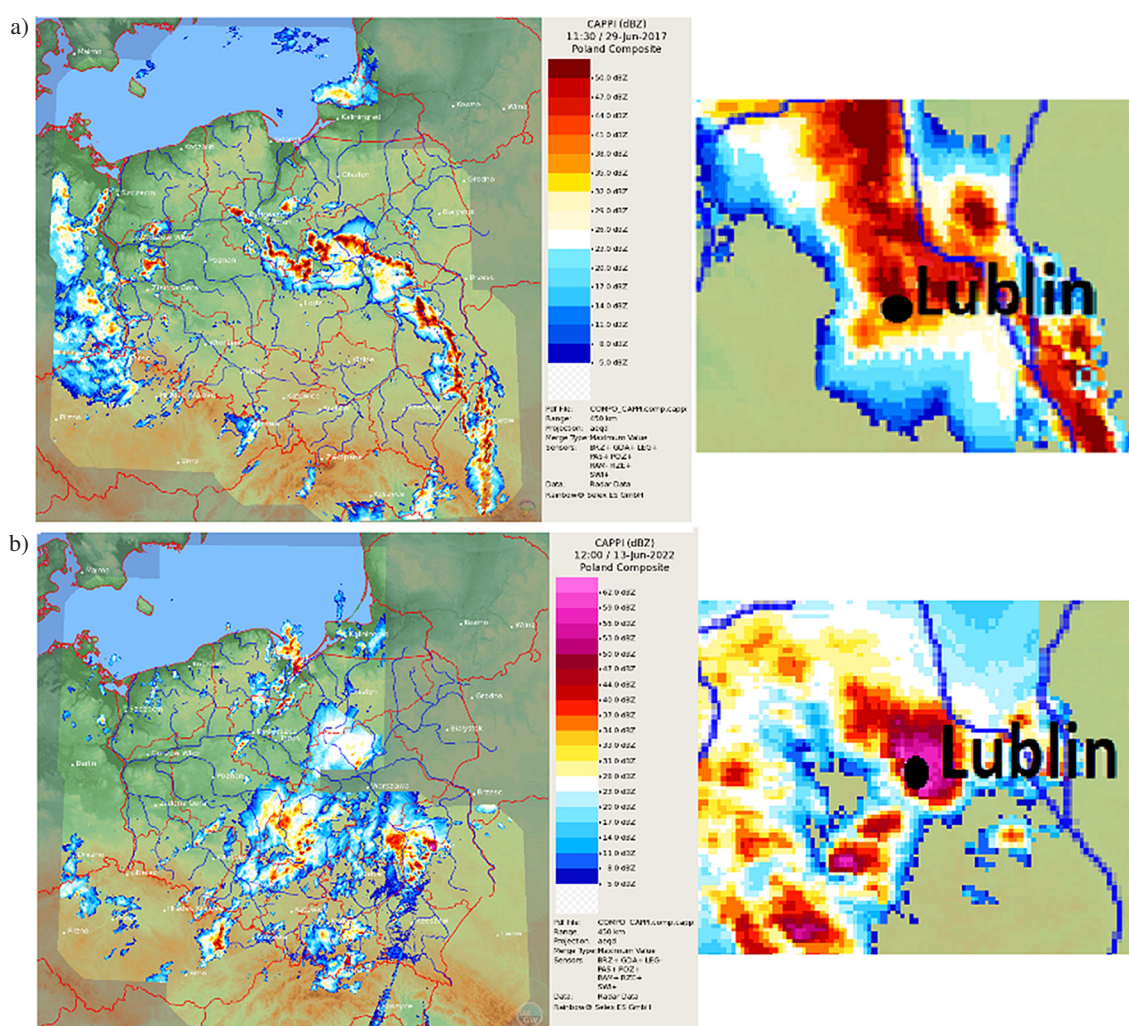
Ryc. 4. Histogram różnic wartości wskaźnika Humidex między stacjami o godzinie 12 UTC. Odchylenia dodatnie (wyższe wartości wskaźnika w centrum miasta) zaznaczono kolorem czerwonym, odchylenia ujemne – niebieskim

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 4. Histogram of differences in Humidex values between stations at 12 UTC. Positive deviations (higher index values in the city center) are marked in red, negative deviations in blue
Source: prepared by the authors.

dość niewielkiej odmienności średnich wieloletnich wartości wskaźnika obliczonych dla obu stacji, to w około 65% przypadków różnice miały znak dodatni (tj. wyższe wartości wskaźnika notowano w centrum miasta), a podczas 361 dni (około 4% przypadków) różnice nie wystąpiły. Największą dodatnią różnicę między Placem Litewskim a Radawcem zanotowano 20 maja 1983 r. (+10,4°C), natomiast ujemną 29 czerwca 2017 r. (−7,9°C).

Szczegółowa analiza występowania w południowym terminie obserwacji dużych różnic wartości wskaźnika Humidex wykazała, że główną przyczyną takich sytuacji jest występowanie opadu na jednym z punktów pomiarowych. We wcześniej wspomnianym 29 czerwca 2017 r. około godziny 12 UTC w rejonie Lublina przemieszczały się liczne komórki burzowe, które powstały na linii zbieżności między powietrzem polarnym ciepłym (PPmc) a zwrotnikowym (PZ) (ryc. 5a). Przesunięcie czasowe występowania opadu deszczu i gradu w obu punktach przyczyniło się do znacznych różnic wartości wskaźnika Humidex w tym samym momencie czasowym (ryc. 6a).



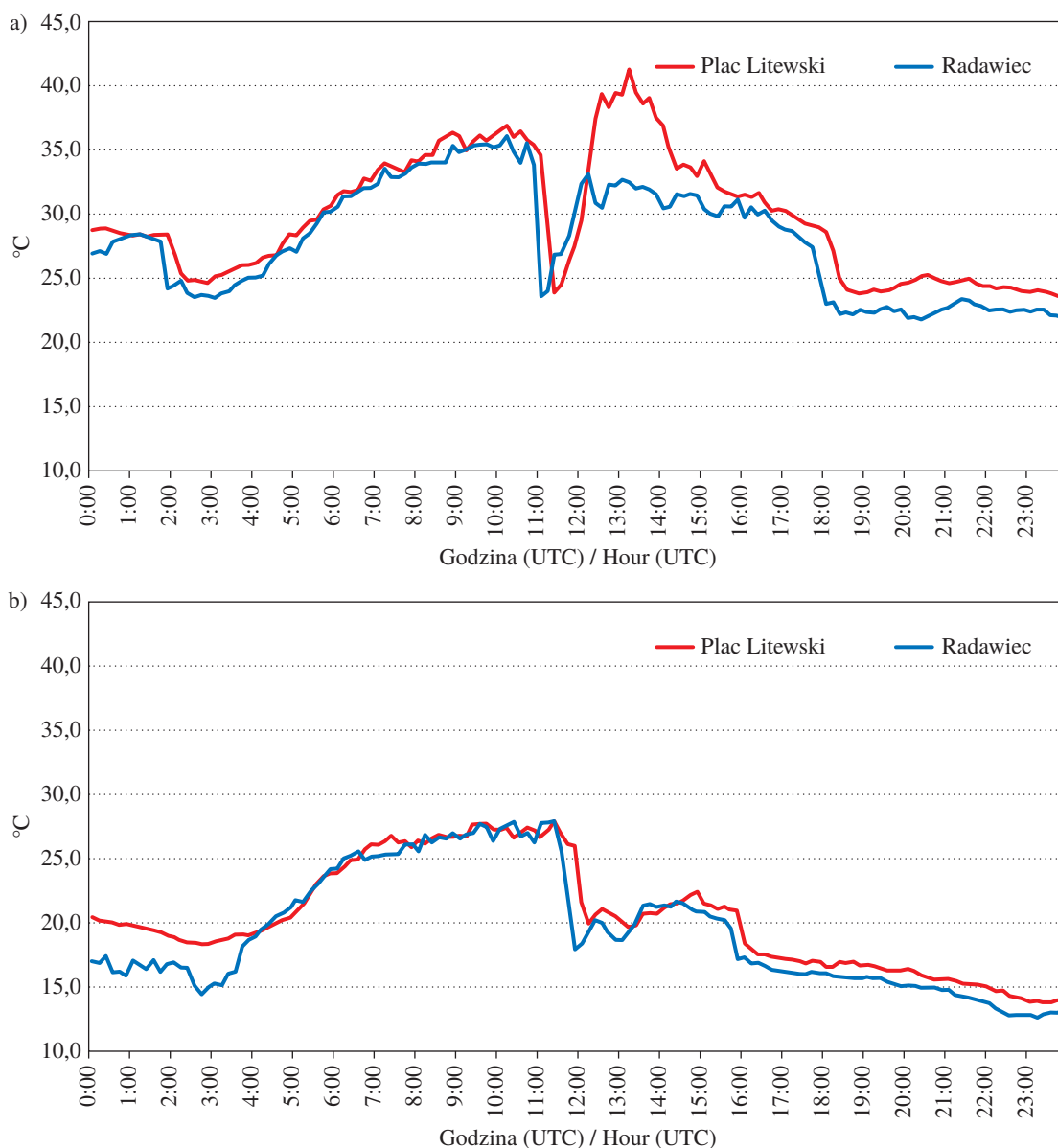
Ryc. 5. Mapa odbiciowości radarowej (CAPPI) o godzinie 12 UTC dla Polski i okolic Lublina w dniu 29 czerwca 2017 (a) oraz 13 czerwca 2022 (b)

Źródło: <https://danepubliczne.imgw.pl/pl/datastore> – dostęp: 11.12.2023.

Fig. 5. CAPPI radar reflectivity map at 12 UTC for Poland and the Lublin area on June 29, 2017 (a) and June 13, 2022 (b)

Source: <https://danepubliczne.imgw.pl/pl/datastore> – accessed: 11.12.2023.

Druga podobna sytuacja miała miejsce 13 czerwca 2022 r., gdy nad środkową Polską znajdowało się centrum ośrodka niżowego, a nad wschodnią i południowo-wschodnią częścią kraju w godzinach okołopołudniowych przechodził chłodny front atmosferyczny ze strefą burz (ryc. 5b). Również w tym przypadku intensywny opad wystąpił najpierw na stacji pozamiejskiej – między 11:40 a 11:50 UTC suma opadu wyniosła 11,2 mm. Skutkiem było to, że o godzinie 11:50 UTC różnica wartości wskaźnika Humidex między centrum miasta a Radawcem wynosiła 8,1°C (ryc. 6b).



Ryc. 6. Dobowy przebieg 10-minutowych wartości wskaźnika Humidex na obu stacjach meteorologicznych 29 czerwca 2017 r. (a) i 13 czerwca 2022 r. (b)

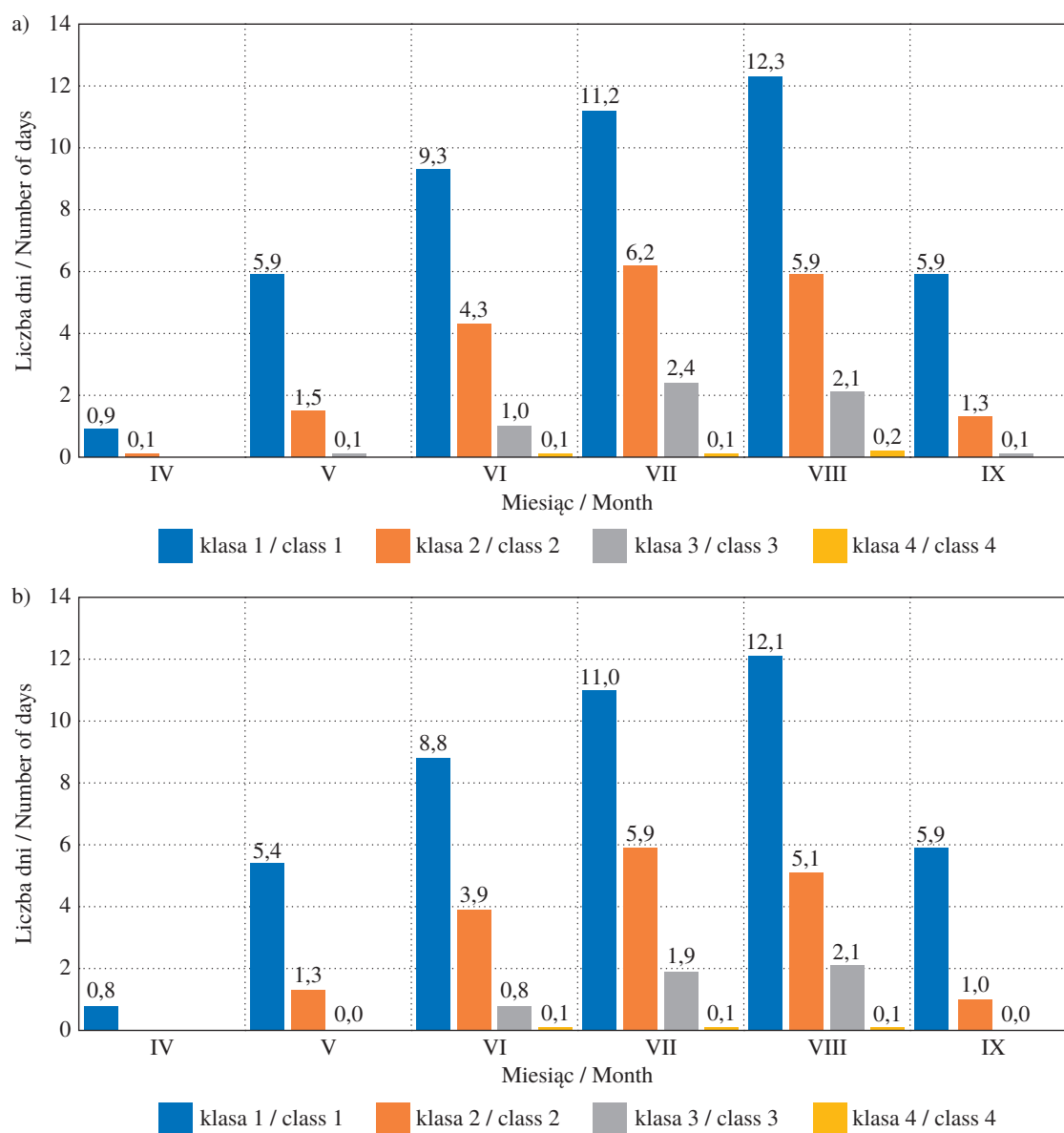
Źródło: opracowanie własne.

Fig. 6. Daily course of 10-minute Humidex index values at both meteorological stations on June 29, 2017 (a) and June 13, 2022 (b)

Source: prepared by the authors.

Częstość występowania wskaźnika Humidex w poszczególnych klasach

Porównując miesięczne sumy dni z poszczególnymi klasami wskaźnika Humidex w analizowanych latach (od 1973 do 2022) nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic między stacją z centrum miasta a Radawcem ($U = 1019$, $p = 0,112$). Uśrednione wartości z poszczególnych miesięcy wykazują jedynie niewiele większy udział dni z dyskomfortem termiczno-wilgotnościowym na Placu Litewskim (ryc. 7).



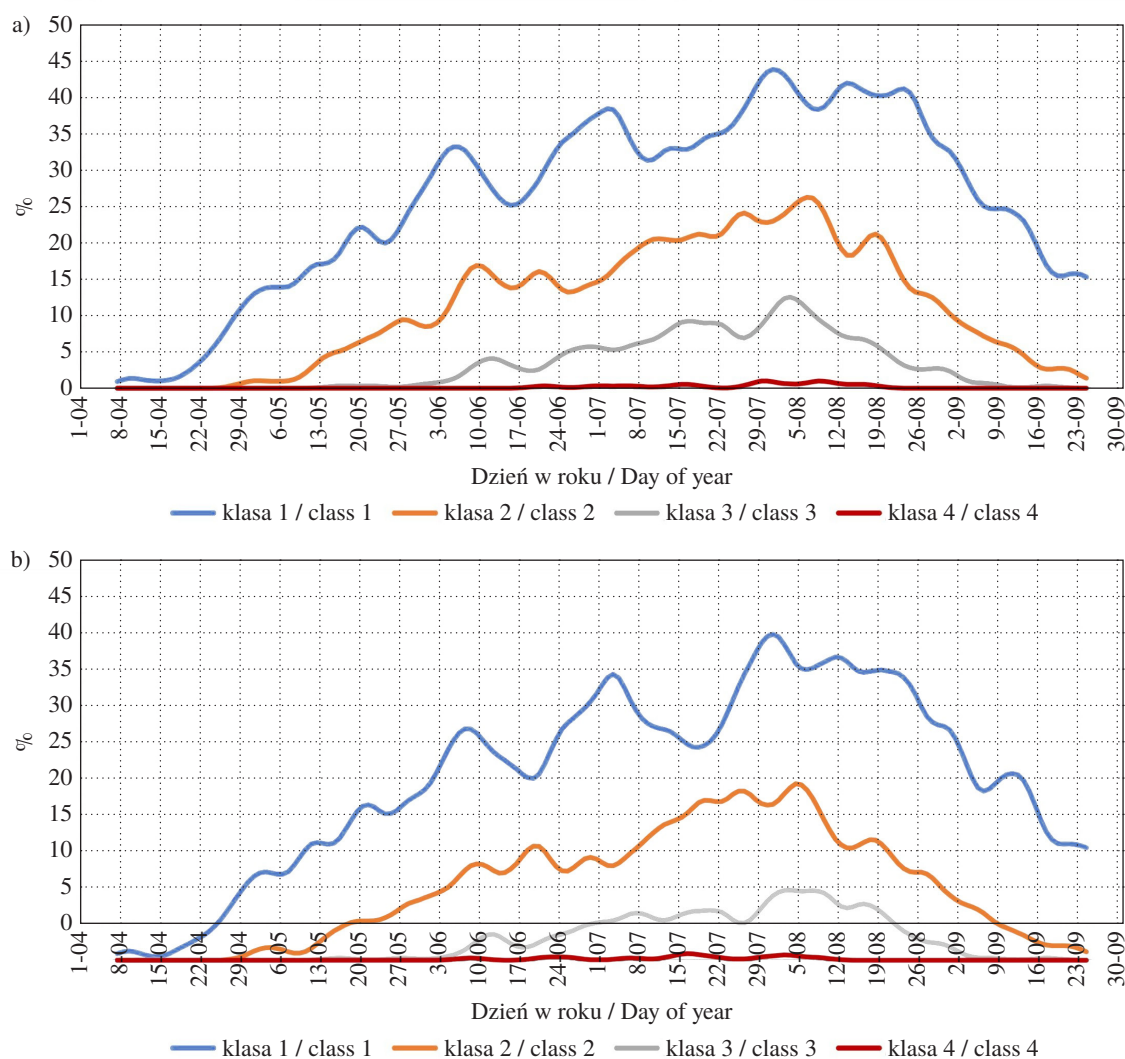
Ryc. 7. Średnia miesięczna liczba dni z klasami wskaźnika Humidex na stacji meteorologicznej Lublin-Plac Litewski (a) i Lublin-Radawiec (b)

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 7. Mean monthly number of days with Humidex index classes at the Lublin-Plac Litewski (a) and Lublin-Radawiec (b) meteorological stations

Source: prepared by the authors.

Największa liczba dni z klasą 1 w obu punktach występowała w sierpniu (średnio było to około 12 dni) i lipcu (około 11 dni), przy czym najwyższe prawdopodobieństwo ich pojawienia się przypadało na przełom obu tych miesięcy (ryc. 7). W tym okresie najczęściej występują również dni z silniejszymi obciążeniami termiczno-wilgotnościowymi, tj. prawdopodobieństwo pojawienia się dnia z klasą 2 wynosi wówczas 25%, a z klasą 3 to około 10% (ryc. 8). Zarówno w lipcu, jak i sierpniu tego rodzaju dni pojawiają się przeciętnie w roku 6 razy (klasa 2) i 2 razy (klasa 3). W maju i wrześniu występują one jedynie sporadycznie, a w kwietniu nie były notowane ani razu (ryc. 7). W całym analizowanym okresie dni z bardzo dużym zagrożeniem termiczno-wilgotnościowym dla organizmu człowieka (klasa 4) było niewiele. W centrum miasta zanotowano w całym badanym okresie łącznie 24, a w Radawcu 15 takich dni, przy czym pojawiały się tylko od czerwca do sierpnia.



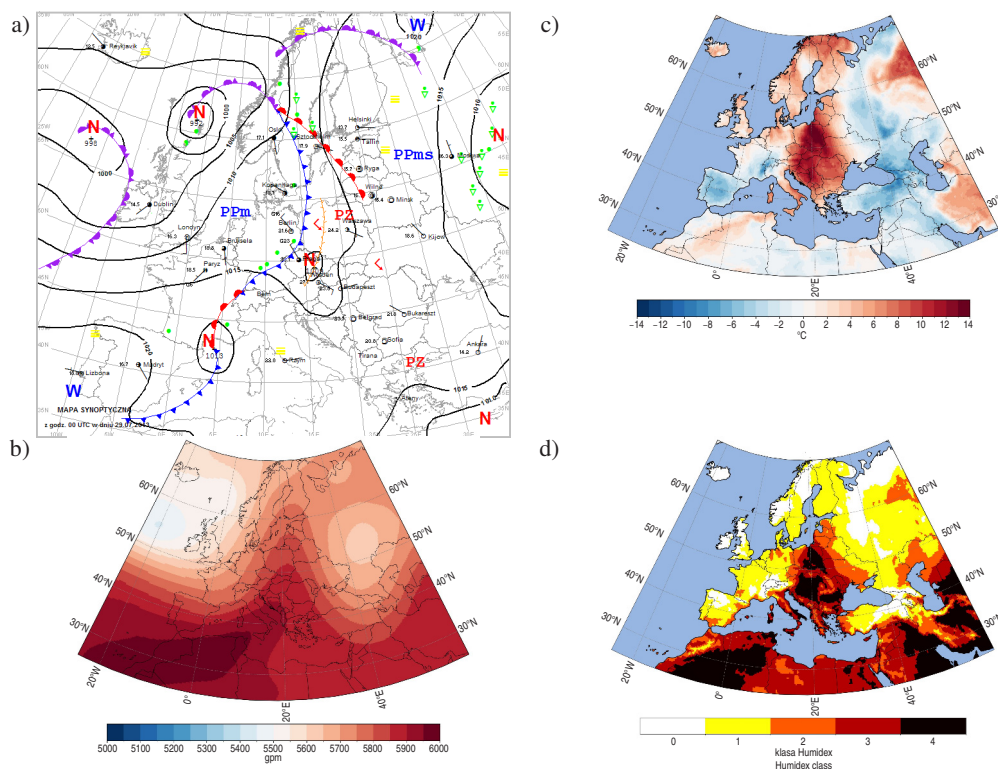
Ryc. 8. Prawdopodobieństwo (%) występowania dni z klasami od 1 do 4 wskaźnika Humidex w kolejnych dniach roku na stacji meteorologicznej Lublin-Plac Litewski (a) i Lublin-Radawiec (b)

Źródło: opracowanie własne.

Fig. 8. Probability (%) of occurrence of days with classes 1 to 4 of the Humidex index on subsequent days of the year at the Lublin-Plac Litewski (a) and Lublin-Radawiec (b) meteorological stations

Source: prepared by the authors.

W badanym okresie najwyższe wartości wskaźnika Humidex o godzinie 12 UTC na Placu Litewskim i w Radawcu zanotowano 29 lipca 2013 r. (odpowiednio 42,0°C i 40,5°C). Wschodnia część Polski znajdowała się wówczas w ciepłym wycinku niżu z centrum nad Morzem Norweskim (ryc. 9a). Nad Europą Środkową przebiegała oś grzbietu fali w polu geopotencjału 500 hPa, sięgająca aż do Półwyspu Skandynawskiego, która rozgraniczała ośrodki niskiego ciśnienia znad Atlantyku i Europy Wschodniej (ryc. 9b). Przy tego typu rozkładzie przestrzennym izohips powierzchni izobarycznej 500 hPa (tzw. układ Omega) występowała adwekcja nad Polskę gorącej i wilgotnej masy powietrza zwrotnikowego z południowego zachodu, tj. znad obszarów zachodniej części Morza Śródziemnego i podzwrotnikowych szerokości geograficznych Atlantyku. Skutkiem były znaczne dodatnie anomalie wartości wskaźnika Humidex ($>10^{\circ}\text{C}$), które rozciągały się od Bałkanów po kraje nadbałtyckie (ryc. 9c). Na większej części tego obszaru, w tym w Polsce Wschodniej, warunki termiczno-wilgotnościowe odpowiadały klasie 4 wskaźnika Humidex, która występowała wówczas także nad zachodnią częścią Sahary oraz w krajach z Bliskiego Wschodu (ryc. 9d).



Ryc. 9. Mapa synoptyczna (a), wysokość powierzchni izobarycznej 500 hPa (b), odchylenia wartości wskaźnika Humidex od normy (c) oraz występowanie klas wskaźnika Humidex (d) w dniu 29 lipca 2013 r. (12 UTC)

Źródło: (a) <https://danepubliczne.imgw.pl/pl/datastore> – dostęp: 11.12.2023; (b), (c) i (d) opracowanie własne na podstawie danych z reanalizy ERA5.

Fig. 9. Synoptic map (a), geopotential height of 500 hPa (b), anomalies of the Humidex index values (c) and occurrence of Humidex index classes (d) on July 29, 2013 (12 UTC)

Source: (a) <https://danepubliczne.imgw.pl/pl/datastore> – accessed: 11.12.2023; (b), (c) and (d) prepared by the authors based on ERA5 reanalysis data.

DYSKUSJA I WNIOSKI

W pracy przeanalizowano warunki bioklimatyczne panujące w centrum Lublina (stacja Plac Litewski) i na obszarze pozamiejskim (stacja Lublin Radawiec) w terminie południowym (godzina 12 UTC) w latach 1973–2022. Skoncentrowano się na sezonie ciepłym (kwiecień–wrzesień), ponieważ o tej porze roku dochodzi do stresu związanego z występowaniem wysokiej temperatury powietrza, której odczuwanie przez człowieka zależy w dużym stopniu od wilgotności powietrza. Do oceny tych warunków wykorzystano wskaźnik Humidex, w którym uwzględniana jest temperatura i wilgotność powietrza.

Na obu stacjach meteorologicznych niekorzystne warunki bioklimatyczne najczęściej występują w miesiącach letnich z maksimum przypadającym na przełom lipca i sierpnia. Rzadziej pojawiają się one w maju i we wrześniu, a najmniej licznie w kwietniu. W przypadku sum miesięcznych dni z poszczególnymi klasami wskaźnika Humidex największa suma na obu stacjach wystąpiła w sierpniu (20,5 dnia w centrum Lublina i 19,4 dnia w Radawcu). Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic między centrum miasta a Radawcem, zaznacza się jedynie niewiele większy udział dni z dyskomfortem termiczno-wilgotnościowym na Placu Litewskim. Można to wiązać ze stosunkowo małą intensywnością miejskiej wyspy ciepła w Lublinie określaną na podstawie danych z tych dwóch stacji (Sachindra i in. 2023). Przyczyną może być stosunkowo duży udział terenów zielonych w mieście (około 40%) oraz spadek liczby ludności w Lublinie, a zarazem jej wzrost w okolicach Radawca. Jednocześnie D.A. Sachindra i inni (2023) uważają, że na obszarze Lublina istnieją cieplejsze niż Plac Litewski tereny, np. zlokalizowane w gęściej zabudowanych obszarach, gdzie ciepło jest zatrzymywane, co skutkuje większym wzrostem temperatury powietrza. Wymaga to jednak potwierdzenia w badaniach terenowych i satelitarnych.

Zarówno na Placu Litewskim, jak i na obszarze pozamiejskim w analizowanym wieloleciu wystąpił wyraźny wzrost liczby dni z silnymi obciążeniami termiczno-wilgotnościowymi organizmu człowieka, czego odzwierciedleniem było coraz częstsze pojawianie się dni ze znacznym dyskomfortem (klasa 3 i 4). Podobny trend zaznaczył się w Krakowie w latach 1961–2012, gdzie dni z wysokimi wartościami wskaźnika Humidex notowane były najczęściej podczas występowania nad Polską centrum wyżu lub klina wyżowego, którym towarzyszyła transformacja powietrza polarnego morskiego lub polarnego kontynentalnego (Ciaranek 2013). Wzrost częstości występowania w Polsce niekorzystnych warunków bioklimatycznych w półroczu letnim wykazany został także przy zastosowaniu innych wskaźników, jak np. UTCI i PET (Krzyżewska i in. 2021; Kuchcik 2021; Tomczyk, Bednorz 2023; Tomczyk, Matzarakis 2023).

Na częstsze występowanie niekorzystnych warunków bioklimatycznych w ciepłej połowie roku wpływ ma przede wszystkim wzrost temperatury powietrza w Polsce, który wyraźnie zaznaczył się w ostatnich latach, szczególnie w miesiącach wiosennych i letnich (Sachindra, Nowosad 2021; Ustrnul i in. 2021; Marosz i in. 2023). Jednocześnie w okresie od czerwca do sierpnia nad obszarem Europy Środkowej istotnie zwiększyła się także zawartość pary wodnej w powietrzu, jednakże wielkość tych zmian zależy w dużym stopniu od lokalnych uwarunkowań (Wypych 2021). W ostatnich dekadach stwierdzono także w Polsce znaczący spadek wielkości zachmurzenia przez chmury niskiego i zarazem wzrost usłonecznienia w ciepłej połowie roku (Bartoszek i in. 2021; Matuszko i in. 2022). Ponadto, jak wykazali K. Bartoszek i B.M. Kaszewski (2022), nastąpił też wówczas wyraźny wzrost częstości napływu nad Europę Środkowo-Wschodnią mas powietrznych z niższych szerokości geograficznych (mas powietrza zwrotnikowego i polarnego morskiego ciepłego).

W kolejnych badaniach do uzyskania bardziej szczegółowych informacji na temat zróżnicowania przestrzennego wartości wskaźnika Humidex w Lublinie i na terenach podmiejskich wymagane będzie wykorzystanie danych ze znacznie większej liczby punktów pomiarowych położonych w miejscach o różnych formach użytkowania terenu. Stacja na Placu Litewskim, chociaż usytuowana jest w centrum miasta, położona jest wśród zieleni wysokiej, a otoczenie stanowi stosunkowo niska zabu-

dowa. Dlatego też można przypuszczać, że wyniki pomiarów z tej stacji nie muszą być reprezentatywne dla innych terenów miasta o zwartej zabudowie i mniejszym udziale zieleni (Bokwa 2009).

Literatura

- Bartoszek K., Kaszewski B.M., 2022, Changes in the frequency and temperature of air masses over east-central Europe, *International Journal of Climatology*, 42, 16, 8214–8231, DOI: 10.1002/joc.7704.
- Bartoszek K., Matuszko D., Węglarczyk S., 2021, Trends in sunshine duration in Poland (1971–2018), *International Journal of Climatology*, 41, 1, 73–91, DOI: 10.1002/joc.6609.
- Błażejczyk K., 2004, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 192, Warszawa.
- Błażejczyk K., Kunert A., 2011, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, Monografie IGiPZ PAN, 13, Warszawa.
- Błażejczyk K., Twardosz R., 2010, *Long-term changes of bioclimatic conditions in Cracow (Poland)*, [w:] R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), *In The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*, Springer, Dordrecht, 235–246, DOI: 10.1007/978-90-481-3167-9_10.
- Bokwa A., 2009, Miejska wyspa ciepła na tle naturalnego zróżnicowania termicznego obszaru położonego we wklęsłej formie terenu (na przykładzie Krakowa), *Prace Geograficzne*, 122, 111–132.
- Charalampopoulos I., Tsiros I., Chronopoulou-Sereli A., Matzarakis A., 2012, Analysis of thermal bioclimate in various urban configurations in Athens, Greece, *Urban Ecosystems*, 16, 217–233, DOI: 10.1007/s11252-012-0252-5.
- Chojnacka-Ożga L., Ożga W., 2013, Ocena warunków wypoczynku człowieka nad zbiornikiem wodnym w świetle wybranych wskaźników bioklimatycznych – na przykładzie Zbiornika Sulejowskiego, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 15, 37, 239–244.
- Ciaranek D., 2013, Weather and circulation types accompanying thermal and humidity conditions unfavourable to the human health in summer in Krakow (Poland), *Aerul și Apa. Componente ale Mediului*, 2013, 323–329.
- d'Ambrosio Alfano F.R., Palalla B.I., Riccio G., 2011, Thermal Environment Assessment Reliability Using Temperature-Humidity Indices, *Industrial Health*, 49, 95–106, DOI: 10.2486/indhealth.MS1097.
- Dobek M., Siłuch M., Wereski S., Bartoszek K., Skiba K., 2008, *Czas trwania i częstość występowania uciążliwych warunków bioklimatycznych w Lublinie na podstawie wskaźnika Humidex*, [w:] K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 415–422.
- Fallah-Ghalhari G., Farhang Dehghan S., Asghari M., 2022, Trend analysis of Humidex as a heat discomfort index using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests, *Environmental Health. Engineering and Management Journal*, 9, 2, 165–176, DOI: 10.34172/EHEM.2022.18.
- García M.C., 2019, *Thermal Differences, Comfort/Discomfort and Humidex Summer Climate in Mar del Plata, Argentina*, [w:] C. Henríquez, H. Romero (red.), *Urban Climates in Latin America*, Springer, Cham, 83–109, DOI: 10.1007/978-3-319-97013-4_5.
- Geletiĉ J., Lehnert M., Saviĉ S., Milošević D., 2018, Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in local climate zones of the city of Brno, Czech Republic, *Science of the Total Environment*, 624, 385–395, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.076.
- Górniak A., 2021, *Klimat województwa podlaskiego w czasie globalnego ocieplenia*, Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, Białystok.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J-N., 2023, ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present, *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.
- Kaszewski B.M., 2006, *Ocena warunków bioklimatycznych Zwierzyńca za pomocą wskaźnika Humidex*, [w:] A. Świeca, K. Kałamucki (red.), *Turystyka aktywna i jej rozwój na Roztoczu – regionie pogranicza*, Wydawnictwo Kartpol, Lublin, 173–181.

- Kendall M.G., 1975, *Rank correlation measures*, Charles Griffin, London.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1997, *Bioklimatologia człowieka. Metody i ich zastosowanie w badaniach bioklimatu Polski*, Monografie IGiPZ PAN, 1, Warszawa.
- Kravchenko J., Abernethy A.P., Fawzy M., Lysterly H.K., 2013, Minimization of heatwave morbidity and mortality, *American Journal of Preventive Medicine*, 44, 3, 274–282, DOI: 10.1016/j.amepre.2012.11.015.
- Krzyszowski J., Pawlas K., 2015, Wpływ warunków meteorologicznych na organizm człowieka, *Medycyna Środowiskowa*, 18, 3, 47–55.
- 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.
- Krzyżewska A., Wereski S., Dobek M., 2021, Summer UTCI variability in Poland in the twenty-first century, *International Journal of Biometeorology*, 65, 1497–1513, DOI: 10.1007/s00484-020-01965-2.
- Kuchcik M., 2021, Mortality and thermal environment (UTCI) in Poland – long-term, multi-city study, *International Journal of Biometeorology*, 65, 1529–1541, DOI: 10.1007/s00484-020-01995-w.
- Marosz M., Miętus M., Biernacik D., 2023, Features of multiannual air temperature variability in Poland (1951–2021), *Atmosphere*, 14, 2, 282, 1–14, DOI: 10.3390/atmos14020282.
- Mastrangelo G., Fedeli U., Visentin C., Milan G., Fadda E., Spolaore P., 2007, Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study, *BMC Public Health*, 7, 200, 1–8, DOI: 10.1186/1471-2458-7-200.
- Matuszko D., Bartoszek K., Soroka J., 2022, Long-term variability of cloud cover in Poland (1971–2020), *Atmospheric Research*, 268, 106028, DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106028.
- Matuszko D., Piotrowicz K., 2007, *Warunki bioklimatyczne*, [w:] D. Matuszko (red.), *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 169–186.
- Mekis É., Vincent L.A., Shephard M.W., Zhang X., 2015, Observed Trends in Severe Weather Conditions Based on Humidex, Wind Chill, and Heavy Rainfall Events in Canada for 1953–2012, *Atmosphere–Ocean*, 53, 4, 383–397, DOI: 10.1080/07055900.2015.1086970.
- Morak S., Hegerl G.C., Kenyon J., 2011, Detectable regional changes in the number of warm nights, *Geophysical Research Letters*, 38, 17, L17703, DOI: 10.1029/2011GL048531.
- Rebetz 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, 1/2, 1–7, DOI: 10.1007/s00704-007-0370-9.
- Sachindra D.A., Nowosad M., 2021, Characteristics of air temperature in Poland from 1994 to 2019 based on hourly data, *International Journal of Climatology*, 41, 8, 4359–4385, DOI: 10.1002/joc.7077.
- Sachindra D.A., Ullah S., Zaborski P., Nowosad M., Dobek M., 2023, Temperature and urban heat island effect in Lublin city in Poland under changing climate, *Theoretical and Applied Climatology*, 151, 667–690, DOI: 10.1007/s00704-022-04285-0.
- Sen P.K., 1968, Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63, 324, 1379–1389, DOI: 10.2307/2285891.
- Sirangelo B., Caloiero T., Coscarelli R., Ennio Ferrari E., Fusto F., 2020, Combining stochastic models of air temperature and vapour pressure for the analysis of the bioclimatic comfort through the Humidex, *Scientific Reports*, 10, 11395, DOI: 10.1038/s41598-020-68297-4.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., 2023, Thermal stress during heat waves and cold spells in Poland, *Weather and Climate Extremes*, 42, 100612, DOI: 10.1016/j.wace.2023.100612.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., Matzarakis A., 2020, Human-biometeorological conditions during heat waves in Poland, *International Journal of Climatology*, 40, 12, 5043–5055, DOI: 10.1002/joc.6503.
- Tomczyk A.M., Matzarakis A., 2023, Characteristic of bioclimatic conditions in Poland based on Physiologically Equivalent Temperature, *International Journal of Biometeorology*, 67, 1991–2009, DOI: 10.1007/s00484-023-02557-6.
- Ustrnul Z., Wypych A., Czekierda D., 2021, *Air Temperature Change*, [w:] M. Falarz (red.), *Climate Change in Poland*, Springer Climate, 275–330, DOI: 10.1007/978-3-030-70328-8_11.
- Vose R.S., Easterling D.R., Gleason B., 2005, Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004, *Geophysical Research Letters*, 32, 23, L23822, DOI: 10.1029/2005GL024379.

- Wu S., Luo M., Zhao R., Li J., Sun P., Liu Z., Wang X., Wang P., Zhang H., 2023, Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves, *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 1, 36, DOI: 10.1038/s41612-023-00365-8.
- Wypych A., 2021, *Air Humidity Change*, [w:] M. Falarz (red.), *Climate Change in Poland*, Springer Climate, 331–348, DOI: 10.1007/978-3-030-70328-8_12.
- Zhang R., Sun C., Zhu J., Zhang R., Li W., 2020, Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic Sea ice and Eurasian snow cover, *npj Climate and Atmospheric Science*, 3, 7, 1–9, DOI: 10.1038/s41612-020-0110-8.
- Zhao H., Yang Y., Feng C., Wang W., Yang C., Yin Y., Gong L., Lin T., 2023, Nonlinear effects of humidex on risk of outpatient visit for allergic conjunctivitis among children and adolescents in Shanghai, China: A time series analysis, *Journal of Global Health*, 3, 13, 04132, DOI: 10.7189/jogh.13.04132.
- Zhou Y., Ji A., Tang E., Liu J., Yao Ch., Liu X., Xu C., Xiao H., Hu Y., Jiang Y, Li D., Du N., Li Y., Zhou L., Cai T., 2023, The role of extreme high humidex in depression in chongqing, China: A time series-analysis, *Environmental Research*, 222, 115400, 1–10, DOI: 10.1016/j.envres.2023.115400.