

## BADANIA KLIMATU I BIOKLIMATU MIASTA PROWADZONE W IGiPZ PAN

### Studies of the city climate and bioclimate conducted at IGSO PAS

MAGDALENA KUCHCIK\*<sup>1</sup> , KRZYSZTOF BŁAŻEJCZYK\*<sup>2</sup> ,  
JAROSŁAW BARANOWSKI\*<sup>3</sup> , JAKUB SZMYD\*<sup>4</sup> 

**Zarys treści.** Klimat i bioklimat miasta jest przedmiotem badań klimatologów z IGiPZ PAN od lat 60. XX wieku., ale od końca lat 90. badania te opierają się na własnej sieci pomiarowej warunków termiczno-wilgotnościowych w aglomeracji warszawskiej. Liczebność sieci w różnych latach ulegała zmianom, a obecnie liczy 27 stanowisk. Głównymi przedmiotami badań są: zmiany czasowe i przestrzenne miejskiej wyspy ciepła pod wpływem zmian zagospodarowania przestrzennego, metody ograniczania miejskiej wyspy ciepła i adaptacji do niej, związek klimatu z udziałem terenów biologicznie czynnych, prognozy zasięgu i intensywności miejskiej wyspy ciepła na podstawie wybranych modeli zmian klimatu i scenariuszy zmian zagospodarowania przestrzennego. Znaczna część badań klimatologów z IGiPZ PAN dotyczy bioklimatologii człowieka, w tym warunków odczuwalnych w mieście, oddziaływania fal upałów i fal mrozów na zachorowalność i umieralność, roli zieleni w mieście: ochładzającej, ale też i alergizującej. Ich podstawowym celem jest próba określenia działań ograniczających negatywny wpływ klimatu miasta na ludzi oraz poprawiających jakość życia w mieście.

**Słowa kluczowe:** klimat i bioklimat miasta, miejska wyspa ciepła, warunki odczuwalne, użytkowanie terenu, Warszawa

**Abstract.** The climate and bioclimate of the city have been studied by the climatologists from IGSO PAS since the 1960s. Since the late 1990s, these studies have been based on the measurement network of thermal and humidity conditions in the Warsaw agglomeration. The number of measuring posts has been changed over the years, currently it consists of 27 posts. The main research issues are: temporal and spatial changes of urban heat island under the spatial development changes, methods of limiting the urban heat island and adaptation to it, the impact of biologically vital areas on local climate, forecasts for the urban heat island based on selected climate change models and scenarios of spatial development changes. A large number of studies by the IGSO PAS climatologists concern human bioclimatology, including the thermal sensation, the impact of heat waves and cold waves on morbidity and mortality, the role of greenery in the city (cooling, but also aggravating allergy). The main goal of this research is to determine the measures limiting the negative impact of the urban climate on people and to improve the quality of life in the city.

**Key words:** urban climate and bioclimate, urban heat island, perceived conditions, land use, Warsaw

## Wprowadzenie

Klimat miasta jest przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków naukowych i większości klimatologów polskich. Także w Instytucie Geografii Polskiej Akademii Nauk, przemianowanym w 1974 r. na Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN początek badań klimatu miasta datuje się na lata 60. XX wieku. Początkowo, w Zakładzie Klimatologii IGiPZ PAN (1954–2003), a po 2004 r. w Zakładzie Geoekologii i Klimatologii prowadzono różnorodne analizy klimatu, a z czasem bioklimatu miasta, zmieniające się wraz z rozwojem technik pomia-

rowych, metod badawczych i postępującymi zmianami klimatu.

Celem artykułu jest krótkie podsumowanie dokonań klimatologów z IGiPZ PAN w zakresie badań klimatu i bioklimatu miasta, z podziałem na prowadzone przed i po 2000 roku.

## Badania klimatu i bioklimatu miasta do 2000 roku

Pierwsze opracowania dotyczyły zmętnienia atmosfery w Warszawie. Pomiar natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego prowadzo-

\* Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Pracownia Badania Oddziaływań Klimatu, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa; e-mail: mkuchcik@twarda.pan.pl, k.blaz@twarda.pan.pl, j.bar@twarda.pan.pl, j.szmyd@twarda.pan.pl; <sup>1</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4000-3516>; <sup>2</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0439-6642>; <sup>3</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9176-5452>; <sup>4</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-7695>

ne w latach 1961–1963 na tarasie pałacu Staszica pozwoliły na wyznaczenie wskaźników zmętnienia w najczęstszych nad Warszawą masach powietrza. Największą przezroczystością cechowała się masa powietrza arktycznego w pierwszych dniach jej napływu, a największe zmętnienie dotyczyło powietrza polarno-morskiego „starego” (Krawczyk 1968). Kolejne prace dotyczyły ogólnych cech klimatu środowiska miejskiego, metodyki jego badań ze szczególnym naciskiem na badania warunków radiacyjnych (Paszyński i in. 1971; Michałowska-Smak 1982; Kozłowska-Szczęśna 1992; Kozłowska-Szczęśna, Podogrocki 1995).

Warte dokładniejszego opisu są prowadzone w Zakładzie, w latach 1977–1978 pionierskie badania rozkładu temperatury powierzchni czynnej dużej części miasta od Placu Zamkowego na północy po Las Kabacki na południu, zaś od ciągu ulic Marszałkowska-Puławska na zachodzie po dolinę Wisły na wschodzie. Obszar ten cechował się już wtedy bardzo zróżnicowanym użytkowaniem terenu i rodzajem zabudowy. W badaniach wykorzystano 3 obrazy termalne z kamer termowizyjnych zainstalowanych na pokładzie samolotu IŁ-14, który wykonywał przeloty w czasie bezchmurnych nocy w czerwcu i październiku. Równocześnie prowadzono naziemne pomiary temperatury powietrza na wysokości 1,5 m nad gruntem oraz temperaturę różnych powierzchni. Analiza gęstości optycznej atmosfery w powiązaniu z pomiarami naziemnymi pozwoliła m.in. na stwierdzenie, że zabudowa w śródmieściu czy place w centrum były średnio 6–8°C cieplejsze od gruntów rolnych czy łąk na południu Warszawy lub otwartego terenu wyścigów konnych na Służewiu. Bardzo zróżnicowany termicznie był ówczesny Plac Defilad oraz tereny zielone zlokalizowane wśród zabudowy, które średnio były chłodniejsze od otaczającej zabudowy o 4°C, ale bywały wśród nich miejsca chłodniejsze o 6–7°C. Maksymalne różnice temperatury powierzchni czynnej między centrum miasta a podmiejskim terenem otwartym występowały latem i sięgały 9–10°C (Kraujalis 1980).

Z czasem pojawiły się opracowania syntetyzujące wiedzę o klimacie miasta, m.in. „Atlas Warszawy, z. 4. Środowisko fizycznogeograficzne – niektóre zagadnienia” (Kozłowska-Szczęśna i in. 1996). Zawarte w Atlasie mapy zróżnicowania różnych elementów meteorologicznych zostały wykonane przy użyciu zarówno klasycznej metody izoliniowej, jak i z wykorzystaniem obrazów z satelity Landsat5, z zastosowaniem technik GIS. Po raz pierwszy w Atlasie pojawiły się także mapy zróżnicowania bioklimatycznego Warszawy, przedstawionego za pomocą subiektywnego od-

czucia cieplnego przy założeniu różnych warunków pogodowych.

Cyfrowe mapy topoklimatyczne Warszawy czy mapy odchyżeń temperatury promieniowania na obszarze Warszawy wykonane na podstawie zdjęć satelitarnych z wykorzystaniem metod teledetekcji oraz metod GIS były prezentowane w różnych publikacjach, także po 2000 r. (Adamczyk, Błażejczyk 1998; Błażejczyk 1996, 2011; Kozłowska-Szczęśna i in. 2001; Adamczyk 2002, 2005; Błażejczyk i in. 2013b).

## **Badania klimatu i bioklimatu miasta w XXI wieku**

Intensywny rozwój badań klimatu i bioklimatu miasta nastąpił na początku XXI wieku w ramach projektu KBN, kierowanego przez K. Błażejczyka, „Wpływ czynników cyrkulacyjnych i lokalnych na warunki bioklimatyczne w terenach zurbanizowanych (na przykładzie Aglomeracji Warszawskiej)”, realizowanego w latach 1998–2001. Na potrzeby tego projektu założono w 2000 r. sieć pomiarową temperatury i wilgotności powietrza, składającą się z 11 punktów zlokalizowanych w różnych jednostkach urbanistycznych, wśród zabudowy miejskiej oraz poza obszarami zabudowanymi. W 1998 r. na tarasie budynku przy ul. Twardej zainstalowano automatyczną stację meteorologiczną, z której wyniki porównywano z działającą znacznie dłużej pozamiejską stacją w Borowej Górze k. Serocka (Błażejczyk 2002, 2003; Błażejczyk, Baranowski 2003). Ponadto latem 2000 r. w 30 różnych jednostkach krajobrazu miejskiego prowadzono szczegółowe badania biotopoklimatyczne (Kuchcik 2002, 2003b).

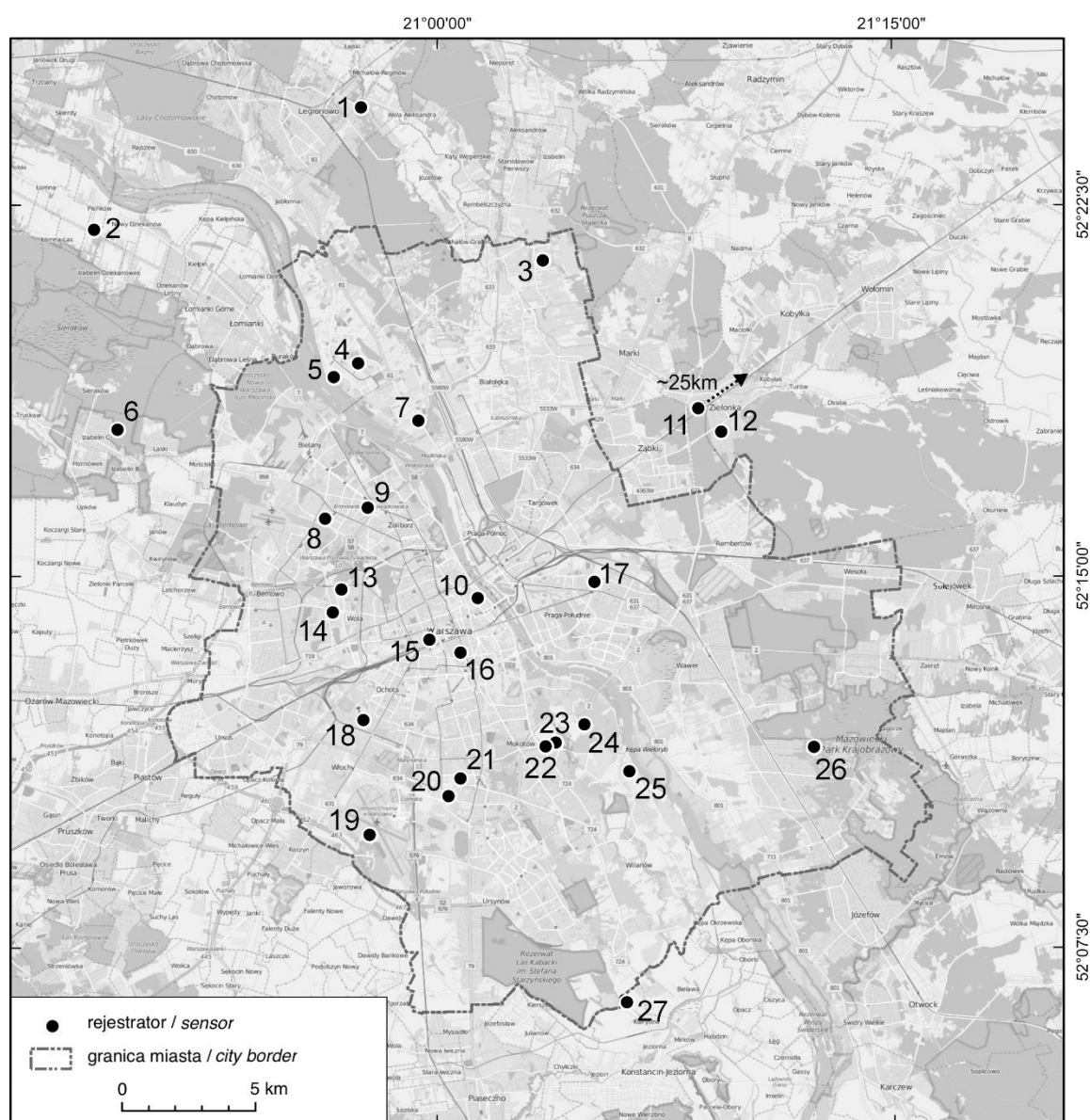
Badania klimatu i bioklimatu były także prowadzone w innych ośrodkach miejskich (zazwyczaj o charakterze uzdrowiskowym), o różnej wielkości i lokalizacji (Błażejczyk i in. 2006; Błażejczyk, Kunert 2006). Zaowocowało to wypracowaniem metody szacowania wielkości miejskiej wyspy ciepła na podstawie populacji zamieszkującej dane miasto (Kunert, Błażejczyk 2011).

Większość posterunków pomiarowych założonych w 2000 r. zostało w kolejnych latach zlikwidowanych. W roku 2006 ponownie rozpoczęto instalację rejestratorów termiczno-wilgotnościowych, często w wielu miejscach odległych od centrum miasta (m.in. Żerań, Kamionek, Powsin), jak i w miejscowościach wokół Warszawy (m.in. Legionowo, Izabelin, Dziekanów, Zielonka, Sulejówek) – w sumie 13 stanowisk (Kuchcik i in. 2008).

Kolejnych 18 stanowisk pomiarowych włączono do sieci w 2008 r. w związku z realizacją projektu finansowanego przez NCN: „Ocena Wskaźnika Terenów Biologicznie Czynnych jako standardu kształtowania struktury przestrzennej terenów mieszkaniowych” kierowanego przez B. Szulczewską ze Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Zlokalizowano je w osiedlach mieszkaniowych o różnym udziale terenów biologicznie czynnych (Kuchcik, Baranowski 2011; Szulczewska i in. 2014; Kuchcik 2015). Obecnie sieć IGiPZ PAN monitoringu klimatu Warszawy liczy 27 stanowisk (rys. 1), ale planowana jest jej weryfikacja i zmiany dostosowujące do nowych celów badawczych.

Celem powyższego projektu prowadzonego wspólnie z SGGW w latach 2007–2010 było znalezienie progu wielkości udziału powierzchni terenów biologicznie czynnych na osiedlach mieszkaniowych, zapewniającego sprzyjający ludziom klimat wewnątrz tych osiedli (rys. 2). Z analizy 18 osiedli warszawskich wynikało, że aby zachować jak najlepsze dla ludzi warunki klimatyczne w jego wnętrzu konieczne są:

- 1) udział terenów biologicznie czynnych, przynajmniej 42–45%;
- 2) fragmentacja płaskich powierzchni sztucznych, zamiast szerokich, asfaltowych ciągów komunikacyjnych;



Rys. 1. Rozmieszczenie rejestratorów temperatury powietrza w aglomeracji warszawskiej w 2018 r.

Distribution of air temperature measuring posts in the Warsaw metropolitan area in 2018

3) w przypadku osiedli sąsiadujących z parkami i innymi otwartymi terenami biologicznie czynnymi: układ budynków, który nie odgrodzi osiedla od wpływu terenów zewnętrznych, umożliwi przenikanie relatywnie czystego powietrza do wnętrza osiedla; zastąpienie murów wokół osiedla lżejszym, ażurowym ogrodzeniem, umożliwiającym przepływ powietrza i wpływ sąsiednich terenów otwartych na klimat wnętrza osiedla;

4) pasy zadrzewień wysokich, zwłaszcza liściastych, szczególnie wokół terenów rekreacyjnych i placów zabaw dla dzieci, ale także w bezpośrednim sąsiedztwie bloków mieszkalnych;

5) urządzenie przy budynkach ogródków o zróżnicowanych wysokościach gatunkach, z drzewami i krzewami liściastymi, a nie tylko płozącymi gatunkami iglastymi;

6) układ budynków, który nie wywołuje efektu tunelowego wiatru, ale też nie tworzy przestrzeni całkowicie zamkniętych na ruch powietrza (Szulczewska i in. 2014; Kuchcik 2015; Szulczewska 2015).

W latach 2011–2014 w Zakładzie Geoekologii i Klimatologii IGiPZ PAN w ramach programu „Europa Środkowa” prowadzony był międzynarodowy projekt „Wypracowanie i zastosowanie strategii adaptacyjnych i ograniczających oraz sposobów przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła (UHI)”. Na podstawie danych z 47 stanowisk pomiaru temperatury powietrza, w tym kilku należących do innych niż IGiPZ PAN podmiotów, dokonano nie tylko opisu zjawiska miejskiej wyspy ciepła (MWC) w Warszawie i jej dynamiki czasowej, ale wykonano także próbę prognozy jej natężenia i zasięgu w powiązaniu z prognozowanymi zmianami urbanistycznymi (Błażejczyk i in. 2014 a, b, c; Błażejczyk i in. 2016; Kuchcik i in. 2014, 2015). Jedną z miar miejskiej wyspy ciepła był indeks MWC, zdefiniowany jako różnica minimalnej dobowej temperatury powietrza między miastem i terenem na przedmieściach (stacja synoptyczna Warszawa-Okęcie). Zestawiając wyniki badań prowadzonych w latach 2001–2002 w projekcie K. Błażejczyka z wynikami badań z lat 2011–2012 stwierdzono, że w latach 2001–2012 wzrosła nie tylko intensywność miejskiej wyspy ciepła w centralnej części Warszawy (o ok. 1°C), ale także jej zasięg, co wynika z zabudowywania obszarów leżących na obrzeżach miasta (rys. 3). W latach 2011–2012 średnie roczne wartości indeksu MWC sięgały +2°C, ale jesienią MWC była najintensywniejsza i średni indeks MWC w Śródmieściu osiągał +2,5°C.

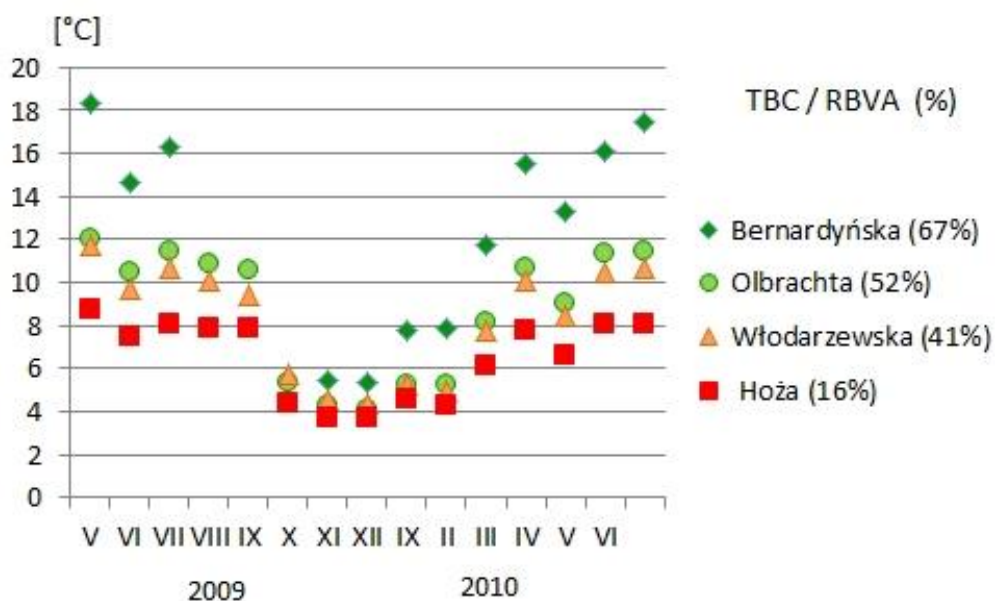
Na podstawie analizy sposobu zagospodarowania terenu wydzielono 6 kategorii obszarów

o różnej intensywności miejskiej wyspy ciepła. Nocą najsilniejsza MWC, osiągająca średnio 2–3°C, występuje wśród wysokiej, zwartej zabudowy w centrum miasta oraz w gęsto zabudowanych osiedlach Żoliborza, Pragi-Północ i Pragi-Południe, Woli, Ursusa i Mokotowa. W przypadku zrealizowania do 2070 r. prognozowanych inwestycji budowlanych w Warszawie rozkład miejskiej wyspy ciepła zmieni się wyraźnie. Zwiększeniu ulegną nie tylko obszary o największym natężeniu MWC (2–3°C), ale także te, gdzie nie jest tak intensywna (1–2°C). Znacznie ograniczone zostaną tereny, gdzie MWC nie występuje (rys. 4) (Błażejczyk i in. 2014a, d).

Natężenie miejskiej wyspy ciepła wyraźnie zmniejsza się wraz ze wzrostem powierzchni biologicznie czynnej w jednostkach urbanistycznych i wraz ze wzrostem odległości od centrum miasta, za które uznano Rondo Dmowskiego (rys. 5).

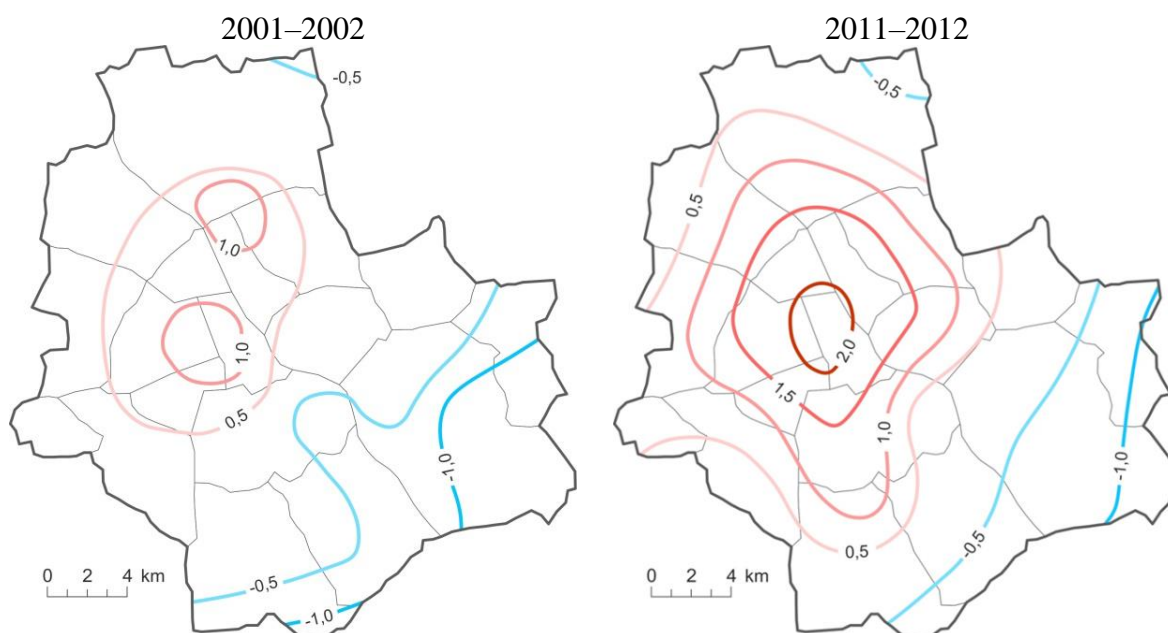
Ponadto w ramach projektu UHI zespół klimatologów z IGiPZ PAN obok monografii „Miejska wyspa ciepła w Warszawie” (Błażejczyk i in. 2014c) opublikował informator dotyczący miejskiej wyspy ciepła (Błażejczyk i in. 2014e) oraz przygotował seminaria upowszechniające wiedzę o klimacie i bioklimacie miasta skierowane do urzędników i mieszkańców miasta.

Jednym z ważniejszych aspektów klimatu miasta badanych w IGiPZ PAN są warunki odczuwane przez człowieka. Do oceny wpływu całego miasta oraz różnych typów zabudowy na klimat odczuwalny wykorzystano uniwersalny wskaźnik obciążeń cieplnych UTCI (Błażejczyk i in. 2010, 2014b, d; Bröde i in. 2012; Fiala i in. 2012; Psikuta i in. 2012), oparty na analizie bilansu cieplnego człowieka. Wskaźnik UTCI jest definiowany jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości, jak w warunkach rzeczywistych. Analizę rozkładu UTCI oparto zarówno na pomiarach prowadzonych w osiedlach mieszkaniowych, jak i na metodach pośrednich, czyli przekształcaniu map jednostek topoklimatycznych opracowanych z wykorzystaniem obrazów satelitarnych (Kozłowska-Szczęśna i in. 1996; Błażejczyk 2011). Poszczególne typy zabudowy i formy użytkowania terenu w Warszawie silnie oddziałują na możliwe obciążenia cieplne organizmu. Zakładając różne scenariusze pogodowe, od najbardziej typowych po występujące sporadycznie, określono rozkład obciążeń termalnych w mieście (rys. 6 – Błażejczyk 2013).



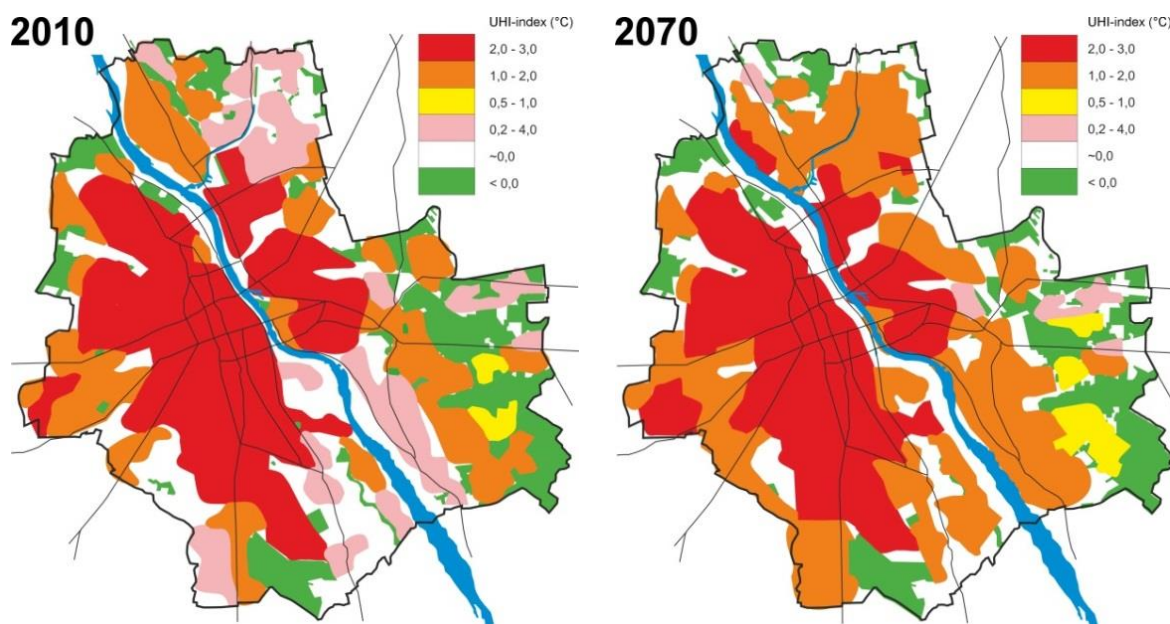
Rys. 2. Średnia dobowa amplituda temperatury powietrza w 4 osiedlach o różnym udziale terenów biologicznie czynnych (% TBC) (Kuchcik 2015)

Mean daily temperature amplitude in 4 housing estates with different Ratios of Biologically Vital Areas (% RBVA) (Kuchcik 2015)



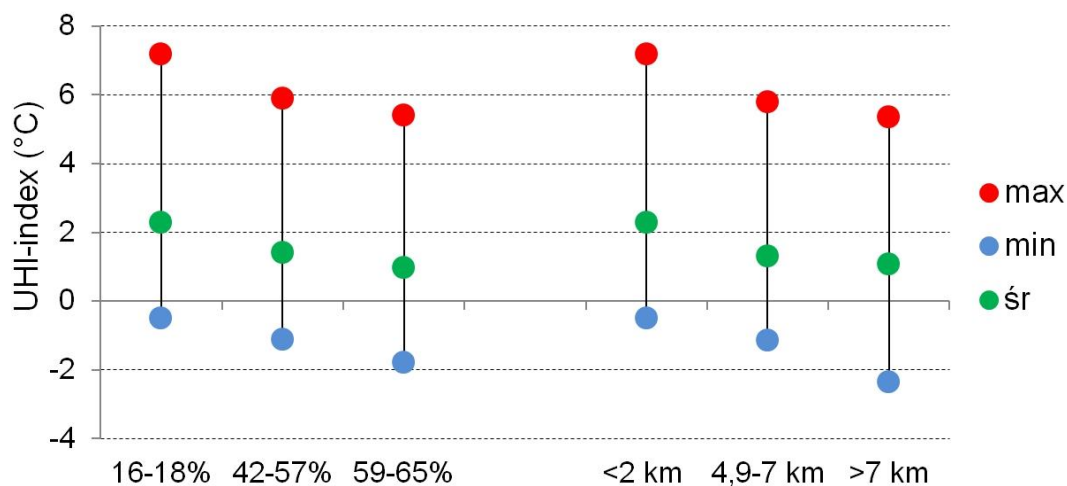
Rys. 3. Średnie roczne natężenie miejskiej wyspy ciepła w latach 2001–2002 i 2011–2012 (Błażejczyk i in. 2014d)

Mean yearly urban heat island intensity in the years 2001–2002 and 2011–2012 (Błażejczyk *et al.* 2014d)



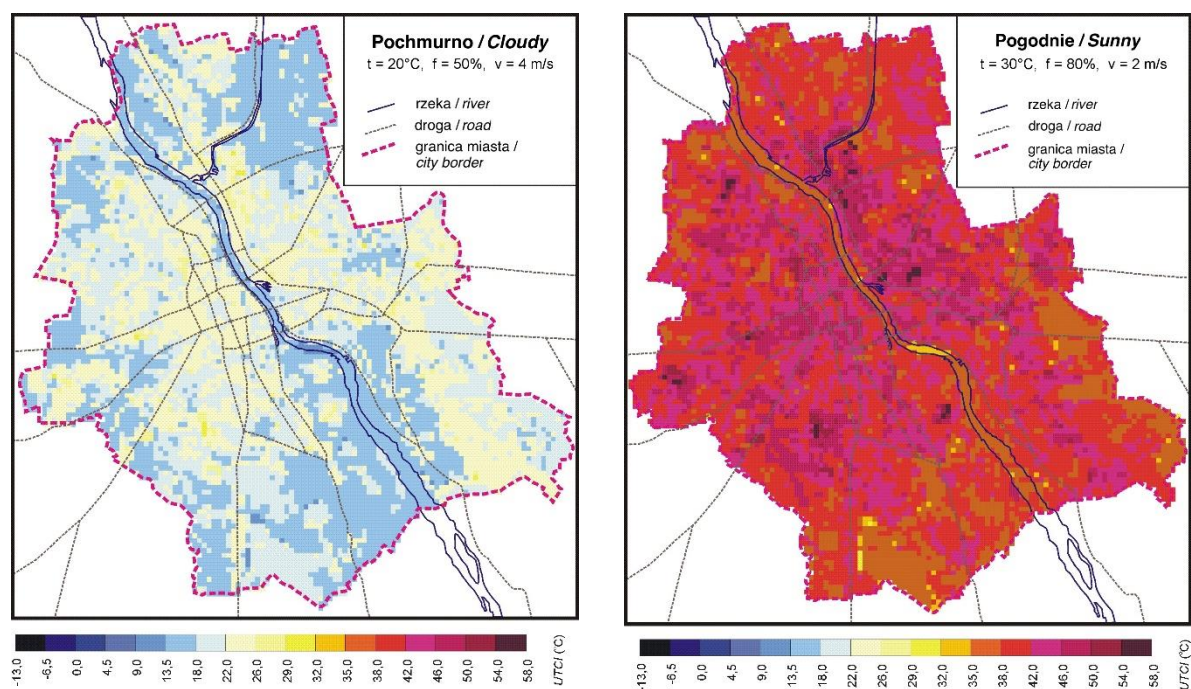
Rys. 4. Rozkład miejskiej wyspy ciepła nocą (indeks MWC) w Warszawie w 2010 r. i przy prognozowanym na 2070 r. zagospodarowaniu terenu (Błażejczyk i in. 2014d)

UHI-index night time distribution in Warsaw in 2010 and for planned land development in 2070 (Błażejczyk *et al.* 2014d)



Rys. 5. Minimalne, średnie i maksymalne wartości indeksu MWC w osiedlach o różnym udziale terenów biologicznie czynnych (%) oraz położonych w różnej odległości od centrum miasta (Błażejczyk i in. 2014d, zmienione)

Minimum, mean and maximum values of UHI-index in the housing estates with different Ratios of Biologically Vital Areas (%) and distances from city centre (km) (adapted from Błażejczyk *et al.* 2014d)



Rys. 6. Rozkład Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Ciepłych (UTCI) w Warszawie przy różnych scenariuszach pogodowych (Błażejczyk 2013, zmienione)

> 46°C – nieznosny stres ciepła, 38,1–46°C – bardzo silny stres ciepła, 32,1–38,0°C – silny stres ciepła, 26,1–32,0°C – umiarkowany stres ciepła, 9,1–26,0°C – brak obciążeń ciepłych, 0,1–9,0°C – łagodny stres zimna, –13,0–0°C – umiarkowany stres zimna, –27,0 – –13,1°C – silny stres zimna, –40,0 – –27,1°C – bardzo silny stres zimna, < –40,0°C – nieznosny stres zimna

Distribution of Universal Thermal Climate Index (UTCI) in Warsaw under different weather scenarios (adapted from Błażejczyk 2013)

> 46°C – extreme heat stress, 38,1–46°C – very strong heat stress, 32,1–38,0°C – strong heat stress, 26,1–32,0°C – moderate heat stress, 9,1–26,0°C – no thermal stress, 0,1–9,0°C – slight cold stress, –13,0–0°C – moderate cold stress, –27,0 – –13,1°C – strong cold stress, –40,0 – –27,1°C – very strong cold stress, < –40,0°C – extreme cold stress

Analiza obciążeń ciepłych ludzi w mieście jest nie mniej ważna niż badanie zmian temperatury pod wpływem zmian klimatu czy rozbudowy miasta. Szczególnie ważna jest analiza warunków odczuwalnych w miejscach zamieszkania ludzi, zwłaszcza w porze letniej, kiedy dzieci i osoby starsze spędzają więcej czasu na zewnątrz budynków.

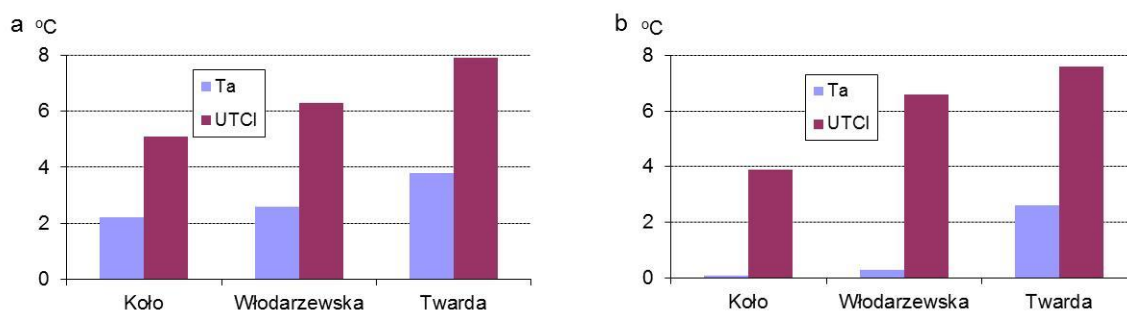
Pomiary w osiedlach mieszkaniowych wykazały, że warunki odczuwalne na osiedlach położonych w tej samej odległości od centrum miasta (4,7 km) i w sąsiedztwie parków, ale różniących się udziałem terenów biologicznie czynnych, rozwojem roślinności i układem budynków, mogą być zupełnie różne. Na osiedlu Koło wybudowanym w latach 1950–1970, o układzie budynków otwartym na sąsiadujący park Moczydło i 54% udziale terenów biologicznie czynnych, wartość UTCI była w południe średnio o 5,4°C niższa w porównaniu ze ścisłym centrum miasta (ul. Twarda) – a najchłodniejsze miejsce na osiedlu było zimniejsze nawet o 8,8°C. Na 20-letnim osiedlu Włod

darzewska, z 41% udziałem terenów biologicznie czynnych, większym wskaźnikiem intensywności zabudowy oraz zamkniętym układem budynków, oddzielającym osiedle od wpływu sąsiedniego Parku Szczyliwickiego – temperatura w najchłodniejszym miejscu była niższa od punktu w centrum miasta tylko o 2,9°C, a średnio w południe o 1,3°C (rys. 7). Na osiedlu Włodarzewska notowano miejsca z temperaturą wyższą niż w tym samym czasie w centrum miasta. Okazuje się zatem, że niewłaściwe zaprojektowanie osiedli wzmacnia zjawisko miejskiej wyspy ciepła, ale przede wszystkim pogarsza warunki odczuwalne przez ludzi tam mieszkających.

Unikalne wyniki dotyczące zieleni w mieście dało badanie alergienowości szaty roślinnej na osiedlach mieszkaniowych przeprowadzone we współpracy z alergologami z Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi (Błażejczyk i in. 2014d; Kuchcik i in. 2016a, b). Okazało się, że na osiedlu wybudowanym w latach 1950–1970

(Koło) udział drzew i krzewów o 2 i 3 klasie alergeności (brzoza brodawkowata, olcha czarna, leszczyna turecka czy topola), wyniósł łącznie 13%. Na osiedlu z przełomu XX i XXI w. (Włodarzewska), z mniejszym pokryciem roślinności, procentowy udział roślin alergicznych był znacznie niższy i wyniósł 6,8%. Na obydwu osiedlach drzewa o największym potencjale alergennym rosną w pobliżu placów zabaw i przedszkola, co jest bardzo niekorzystne dla przebywających tam osób (rys. 8). Na osiedlu Koło gatunki nieuczulające stanowią 25,7% roślin, zaś na osiedlu Włodarzewska –

48,2%. W ostatnich kilkudziesięciu latach wyraźnie zmienił się katalog sadzonych na osiedlach roślin. Na starym osiedlu wśród roślin uczulających rzadko dominują klon, świerk, lilak czy żywotnik, a na osiedlu młodszym – sosna, jałowiec i żywotnik. W ostatnich latach nasadzenia drzew w osiedlach obejmują przede wszystkim drzewa i krzewy nieuczulające, tj. jodła, modrzew, dereń, berberys, forsycja, lub uczulające bardzo rzadko, tj. jałowiec, sosna, żywotnik pospolity.



Rys. 7. Różnica temperatury powietrza (Ta) oraz Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Ciepłych (UTCI) między obszarami o różnym udziale terenów biologicznie czynnych i stacją w ogrodzie botanicznym w Powsinie rano (a) i po południu (b) (Błażejczyk i in. 2014d)

The difference of air temperature (Ta) and heat stress index (UTCI) between pilot areas with different Ratios of Biologically Vital Areas and the reference point in Botanical Garden in Powsin (a – morning hours, b – midday hours) (Błażejczyk *et al.* 2014d)



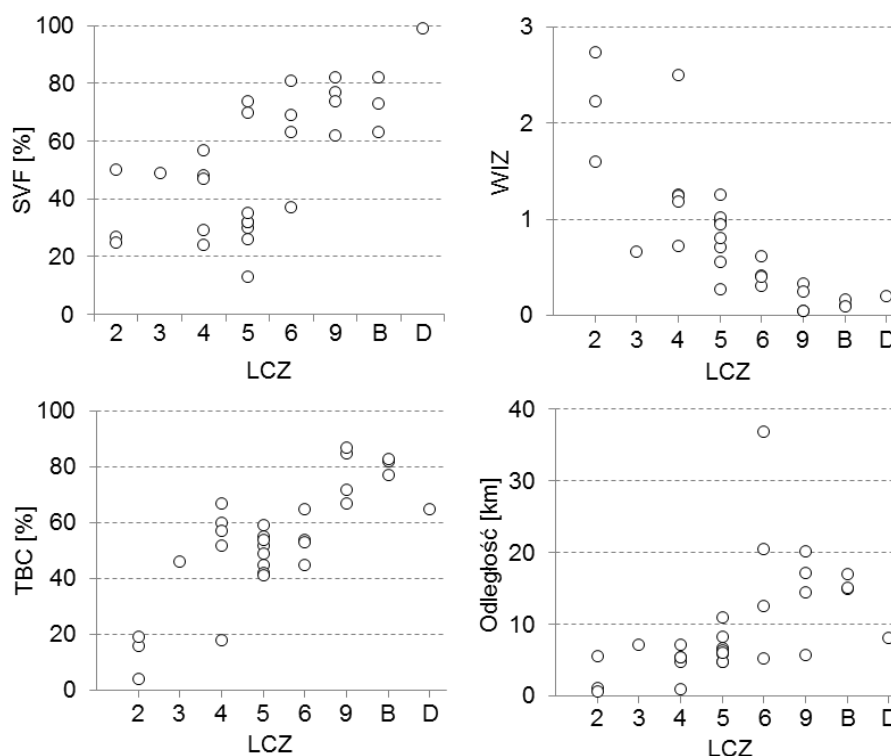
Rys. 8. Rozmieszczenie roślin rzadziej uczulających (klasa 2 alergeności) na osiedlu Koło (a) i Włodarzewska (b) (Błażejczyk i in. 2014c)

Location of plants of moderate allergenicity (Class 2) in the Koło (a) and Włodarzewska (b) estates (Błażejczyk *et al.* 2014c)



W ostatnich latach dokonano także próby analizy natężenia miejskiej wyspy ciepła w Warszawie z wykorzystaniem koncepcji typów klimatu lokalnego, tzw. *Local Climate Zones* (Stewart 2011a, b; Stewart i in. 2014). Stanowiska pomiarowe sieci warszawskiej IGiPZ PAN reprezentują obszary różniące się rodzajem i gęstością zabudowy, udziałem powierzchni czynnej, odległością od centrum miasta itd. Dla wszystkich stanowisk obliczono udział terenów biologicznie czynnych (TBC)<sup>5</sup>, wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ)<sup>6</sup> czy stopień odsłonięcia sfery nie-

bieskiej (SVF – symulacja w programie Rayman Pro) (Matzarakis 2010). Na podstawie powyższych wskaźników oraz analizy map, zdjęć satelitarnych i dzięki dobrej znajomości otoczenia punktów pomiarowych do każdego stanowiska przypisano odpowiedni typ klimatu lokalnego (LCZ), wynikający z rodzaju i formy zagospodarowania terenu w jego otoczeniu. Następnie dokonano analizy wartości powyższych wskaźników i indeksu MWC w zależności od zakwalifikowania do danego typu LCZ (rys. 9) (Kuchcik, Milewski 2016).



Rys. 9. Charakterystyka stanowisk pomiarowych prezentujących kolejne typy klimatu lokalnego (LCZ): stopień odsłonięcia horyzontu (SVF %), wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ), udział terenów biologicznie czynnych (TBC %) i odległość od centrum miasta (km)

krótki opis LCZ: 2 – gęsta zabudowa śródmiejska średniej wysokości, 3 – gęsta zabudowa niska, 4 – zabudowa mieszkaniowa wysoka, 5 – zabudowa mieszkaniowa średniej wysokości, 6 – zabudowa mieszkaniowa niska, jednorodzinna, 9 – zabudowa jednorodzinna rozproszona o charakterze podmiejskim, B – obszar rzadko zadrzewiony, D – obszar otwarty o przepuszczalnym podłożu

Characteristics of measuring posts qualified for different Local Climate Zones: sky view factor (SVF %), building intensity index (WIZ), Ratio of Biologically Vital Area (TBC %) and distance from city centre (km)

short description of LCZ: 2 – compact midrise, 3 – compact low-rise, 4 – open high-rise, 5 – open midrise, 6 – open low-rise, 9 – sparsely built, B – scattered trees, D – low plants

<sup>5</sup> Wskaźnik terenów biologicznie czynnych (TBC) (Szulczewska i in. 2014), uwzględnia grunt rodzimy pokryty roślinnością oraz wodą powierzchniową na działce budowlanej, zaś nie uwzględnia 50% sumy nawierzchni tarasów i stropodachów urządzonych jako stałe trawniki lub kwietniki na podłożu zapewniającym ich naturalną vegetację, o powierzchni nie mniejszej niż 10 m<sup>2</sup>.

<sup>6</sup> Wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ) wyraża stosunek powierzchni ogólnej budynków do powierzchni terenu, przy czym powierzchnia ogólna budynku to iloczyn powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków, z wyłączeniem balkonów, tarasów i liczby kondygnacji (Błażejczyk i in. 2014c).

Natężenie miejskiej wyspy ciepła w dużym stopniu zależy od odległości od centrum miasta (Rondo Dmowskiego), z którą wiąże się rodzaj zabudowy, o czym świadczy wysoki współczynnik determinacji równy 0,687 (Kuchcik, Milewski 2016). Linia regresji osiąga wartość indeksu MWC 0°C w odległości ok. 13 km od centrum miasta, co oznacza, że w nocy i nad ranem stacje położone dalej są w większości chłodniejsze niż Warszawa-Okęcie.

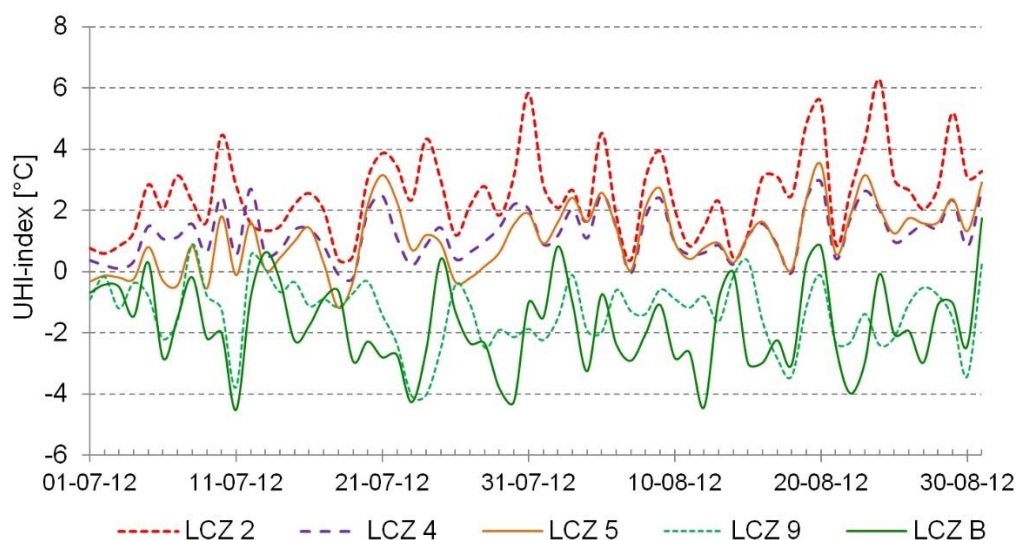
Także przebieg indeksu MWC w poszczególnych typach LCZ w dłuższym okresie pokazuje jak silnie różnią się od siebie te obszary (rys. 10). Wyraźnie najcieplejsza jest zwarta zabudowa w centrum miasta (LCZ 2), chłodniejsze osiedla mieszkaniowe z budynkami wielorodzinnymi o wysokości około 4–6 pięter (LCZ 5) oraz osiedla złożone z bloków 10-piętrowych (LCZ 4). Indeks MWC poniżej 0°C, który oznacza, że nad ranem obszary te są chłodniejsze niż stacja Warszawa-Okęcie cechuje zabudowę o charakterze podmiejskim i tereny zadrzewione poza centrum miasta.

Ponadto od 12 lat pracownicy IGiPZ PAN prowadzą sieć pomiarową dobowych sum opadu, która w różnych latach obejmowała 6-9 deszczomierzy Hellmanna zlokalizowanych w Warszawie i poza miastem (Baranowski i in. 2008). Obecnie codzienny opad mierzony jest na 6 stanowiskach: w centrum, na ul. Twardej, na północnym-wschodzie Warszawy (Białołęka), w pobliżu dworca kolejowego PKP Warszawa-Wschodnia oraz poza

miastem: w Radzyminie, Sulejówku, Borowej Górze i Tuszczu.

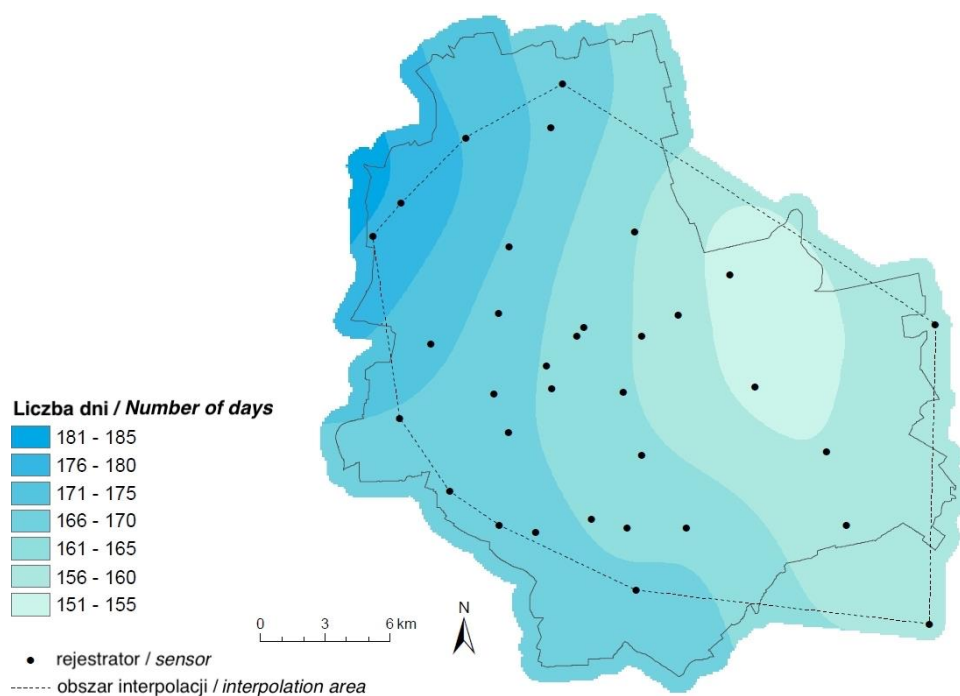
Sieć monitoringu warunków termicznych i opadowych Warszawy posłużyła także do opracowania map termicznych i opadowych w ramach projektu „Przygotowanie strategii adaptacji do zmian klimatu miasta metropolitalnego przy wykorzystaniu mapy klimatycznej i partycypacji społecznej”, w skrócie „ADAPTCITY”. Spośród 21 stanowisk pomiaru temperatury powietrza, na podstawie których kreślono mapy rozkładu liczby dni charakterystycznych termicznie i okresów mroźnych lub gorących o różnej długości aż 13 należało do sieci IGiPZ PAN, a kolejne 5 było stanowiskami innych operatorów (IMGW, WIOŚ, LAB-EL), ale pozyskanymi i opracowanymi przez zespół z IGiPZ PAN w celu uzupełnienia sieci. Pracownicy IGiPZ PAN dokonali wszelkich obliczeń dni charakterystycznych termicznie i ich ciągów, a dane z sieci oraz obliczenia były podstawą do wykonania w dalszej kolejności prognoz zmian warunków termicznych i opadowych dla miasta (rys. 11).

W projekcie ADAPTCITY wykorzystano także wybrane dane z sieci opadowej, które służyły do weryfikacji danych ze stacji monitoringu opadu Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Warszawie. Mapy te są dostępne na stronach: <http://adaptcity.pl/pobrania/publikacje/> oraz na stronach urzędu Miasta Stołecznego Warszawy: <http://www.mapa.um.warszawa.pl/mapaApp1/mapa?service=adaptcity>.



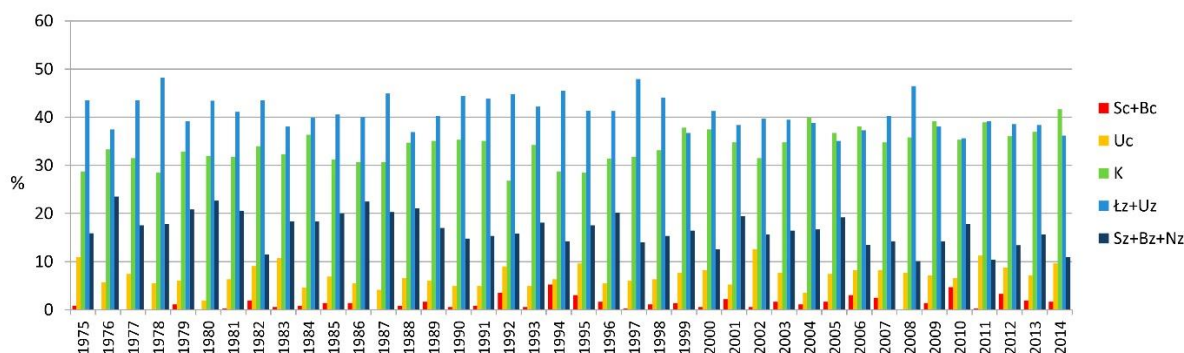
Rys. 10. Przebieg wartości indeksu MWC w wybranych typach klimatu lokalnego LCZ latem 2012 r. (Kuchcik, Milewski 2016)

The course of the UHI-index in chosen *Local Climate Zones* in summer 2012 (Kuchcik, Milewski 2016)



Rys. 11. Średnia roczna liczba dni z opadem  $\geq 0,1$  mm w Warszawie w latach 2008–2014 (opracowanie własne IGiPZ PAN dla projektu ADAPTCITY)

Average annual number of days with precipitation  $\geq 0.1$  mm in Warsaw in 2008–2014 (own study of IGSO PAS for ADAPTCITY project)



Rys. 12. Zmiany częstości kategorii obciążenia cieplnego wg UTCI w Warszawie o godz. 12 UTC w okresie 1975–2014 (Kuchcik 2017)

Bc – bardzo silny stres ciepła, Sc – silny stres ciepła, Uc – umiarkowany stres ciepła, K – brak obciążeń cieplnych, Łz – łagodny stres zimna, Uz – umiarkowany stres zimna, Sz – silny stres zimna, Bz – bardzo silny stres zimna, Nz – nieznosny stres zimna

The frequency of different categories of thermal stress according to UTCI in Warsaw, 12 UTC term over the period 1975–2014 (Kuchcik 2017)

Bc – very strong heat stress, Sc – strong heat stress, Uc – moderate heat stress, K – no thermal stress, Łz – slight cold stress, Uz – moderate cold stress, Sz – strong cold stress, Bz – very strong cold stress, Nz – extreme cold stress

Zainteresowanie miejską wyspą ciepła, falami upałów, czy nocami tropikalnymi wynika z ich uciążliwości dla człowieka oraz próbami zrozumienia i ograniczenia ich negatywnego oddziaływania na ludzi. Dlatego też osobną dziedziną badań bioklimatu miasta prowadzoną w IGiPZ PAN

jest analiza zależności zachorowalności i umiarkowości w Warszawie i innych miastach od warunków pogodowych czy zanieczyszczenia powietrza, które także jest elementem bioklimatu miasta. W licznych publikacjach z tego zakresu przedstawione są, często na podstawie bardzo długich

ciągów danych (np. 40 lat), częstości fal upałów i mrozów, czy zmiany warunków odczuwalnych w miastach (rys. 12). Pomimo, że głównym celem tych badań jest poznanie oddziaływania skrajnych warunków termicznych na człowieka, sama analiza wstępna warunków termicznych czy odczuwalnych w mieście dostarcza bogatej informacji o zmianach klimatu miasta (Kuchcik 2001, 2003a, 2017; Kuchcik, Błażejczyk 2001; Kuchcik, Degórski 2009; Błażejczyk i in. 2006, 2013a, b, 2015, 2018).

## Podsumowanie

Badania klimatu i bioklimatu Warszawy prowadzone przez zespół z IGiPZ PAN obejmowały w ciągu ostatnich 20 lat m.in. dokumentowanie zmian miejskiej wyspy ciepła pod wpływem zmian zagospodarowania terenu, analizy związku klimatu z wielkością udziału terenów biologicznie czynnych, warunków odczuwalnych w mieście, metod ograniczania miejskiej wyspy ciepła i adaptacji do niej, zestawiały ochładzającą rolę zieleni z jej oddziaływaniem alergizującym, ale także bardzo często skupiały się na określeniu wpływu klimatu na umieralność i zachorowalność.

Badania miały nie tylko charakter poznawczy – dzięki nim powstało kilka monografii poświęconych klimatowi Warszawy, ale także koncentrowały się na aspektach praktycznych, przede wszystkim na wpływie klimatu miasta na człowieka, czy próbach definiowania minimalnego udziału terenów biologicznie czynnych w jednostkach urbanistycznych. Wiele analiz dotyczyło prognoz zmian klimatu miasta.

Dokonujące się i planowane zmiany urbanistyczne Warszawy: zagęszczanie zabudowy w centralnych dzielnicach, „rozlewanie się” miasta na obszary podmiejskie, konsekwentna zabudowa korytarzy wymiany powietrza i zmniejszanie powierzchni skwerów i małych parków osiedlowych, nakładają się na obserwowane zmiany klimatyczne i powodują narastanie miejskiej wyspy ciepła oraz stałe pogarszanie warunków odczuwalnych w mieście. Analiza tych dynamicznych zjawisk oraz ich wpływu na człowieka będzie dalszym przedmiotem badań klimatologów z IGiPZ PAN.

## Literatura

Adamczyk A.B. 2002. Mapa odchyłeń temperatury promieniowania wykonana na podstawie zdjęcia satelitarnego. W: K. Błażejczyk – *Znaczenie*

*czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej. Dokumentacja Geograficzna* 26: 151-155.

Adamczyk A.B. 2005. Zróżnicowanie warunków termicznych powierzchni czynnej Warszawy i okolic (zastosowanie metod teledetekcji). Maszynopis rozprawy doktorskiej.

Adamczyk A.B., Błażejczyk K. 1998. Cyfrowe mapy topoklimatyczne Warszawy. *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica Physica* 3: 505-513.

Baranowski J., Kuchcik M., Adamczyk A.B., Błażejczyk K. 2008. Zróżnicowanie opadów atmosferycznych w Warszawie i okolicach. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 81-90.

Błażejczyk A., Błażejczyk K., Baranowski J., Kuchcik M. 2018. Heat stress mortality and desired adaptation responses of healthcare system in Poland. *International Journal of Biometeorology* 62, 3: 307-318.

Błażejczyk K. 1996. Topoklimat Warszawy. W: W. Stola, J. Grzeszczak (red.) *Przemiany struktury przestrzennej obszarów wiejskich w strefach podmiejskich Polski i Rumunii. Conference Papers* 25: 13-25.

Błażejczyk K. 2002. Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej. *Dokumentacja Geograficzna* 26: 1-161.

Błażejczyk K. 2003. Intensité de l'îlot de chaleur urbaine à Varsovie et circulation atmosphérique. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 15: 223-226.

Błażejczyk K. 2011. Mapping of UTCI in local scale (the case of Warsaw). *Prace i Studia Geograficzne* 47: 275-283.

Błażejczyk K. 2013. Distribution of Universal Thermal Climate Index (UTCI) in Warsaw. *Geographia Polonica* 86, 1: 79-80.

Błażejczyk K., Baranowski J. 2003. Solar and UV radiation in the Warsaw downtown. W: K. Kłysik, T. Oke, K. Fortuniak, S. Grimmond, J. Wibig (red.) *Fifth International Conference on Urban Climate*, 1-5 September, 2003, Łódź, Poland, Proceedings, Vol. 1. Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geographical Sciences, University of Łódź, Łódź: 263-266.

Błażejczyk K., Kunert A. 2006. Differentiation of bioclimatic conditions of urban areas (the case of Poland). 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, June 12-16 2006. Göteborg, Sweden. Preprints. Göteborg University, Göteborg: 213-216.

Błażejczyk K., Baranowski J., Błażejczyk A. 2015. Wpływ klimatu na stan zdrowia w Polsce: stan aktualny oraz prognoza do 2100 roku. Wydawnictwo Akademickie Sedno, Warszawa: 1-218.

- Błażejczyk K., Bąkowska M., Więclaw M. 2006. Urban heat island in large and small cities. 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, June 12-16 2006. Göteborg, Sweden. Preprints. Göteborg University, Göteborg: 794-797.
- Błażejczyk K., Błażejczyk A., Kuchcik M., Milewski P., Szmyd J. 2014a. Zmiany zagospodarowania Warszawy według Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego i ich możliwy wpływ na warunki mikroklimatyczne i jakość życia mieszkańców. *Studia Regionalne i Lokalne* 2 (56): 95-118.
- Błażejczyk K., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B. 2010. UTCI – Nowy wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka. *Przegląd Geograficzny* 82, 1: 49-71.
- Błażejczyk K., Idzikowska D., Błażejczyk A. 2013a. Forecast changes for heat and cold stress in Warsaw in the 21<sup>st</sup> century, and their possible influence on mortality risk. *Papers on Global Change IGBP* 20: 47-62.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Błażejczyk A., Milewski P., Szmyd J. 2014b. Assessment of urban thermal stress by UTCI – experimental and modeling studies: an example from Poland. *Die Erde* 145, 1-2: 16-33.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Milewski P., Szmyd J., Pałczyński C. 2016. Urban Heat Island and bioclimatic discomfort in Warsaw. W: *Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario*. Springer International Publishing: 305-321.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Błażejczyk A., Szmyd J. 2014c. Wyspy ciepła w Warszawie – przyczyny, zasięg i możliwości ograniczenia. *Przegląd Urbanistyczny* 8: 21-25.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Szmyd J., Degórska B., Pałczyński C. 2014d. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. Wydawnictwo Akademickie Sedno, Warszawa: 1-171.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Szmyd J., Dudek W., Błażejczyk A., Kręcisz B. 2014e. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Informator. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa: 1-31.
- Błażejczyk K., Lindner-Cendrowska K., Błażejczyk A. 2013b. Assessment of heat stress at various outdoor spaces in the city. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, 11-15 February 2013. Queenstown, New Zealand. International Society for Environmental Ergonomics, Queenstown: 211-214.
- Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G. 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56, 3: 481-494.
- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology* 56, 3: 429-441.
- Kozłowska-Szczęśna T. 1992. Uwagi o metodach badań klimatu miast. *Zeszyty IGiPZ PAN* 6: 5-14.
- Kozłowska-Szczęśna T., Podogrocki J. 1995. Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 87-97.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B. 1996. Atlas Warszawy. Zeszyt 4. Środowisko fizycznogeograficzne – niektóre zagadnienia. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa: 1-84.
- Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Błażejczyk K. 2001. Charakterystyczne cechy klimatu Warszawy. W: B. Krawczyk, G. Węclawowicz (red.) *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji Warszawskiej. Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 180: 39-56.
- Kraujalis M.W. 1980. Zróżnicowanie termiczne podłoża atmosfery na obszarze miasta. W: *Metody opracowań topoklimatycznych. Dokumentacja Geograficzna* 3: 84-88.
- Krawczyk B. 1968. Badania zmętnienia atmosfery w Warszawie w latach 1961–1963. *Przegląd Geograficzny* 40, 4: 823-832.
- Kuchcik M. 2001. Mortality in Warsaw: is there any connection with weather and air pollution? *Geographia Polonica* 74, 1: 29-45.
- Kuchcik M. 2002. Wyniki szczegółowych badań klimatu odczuwalnego w Warszawie. W: K. Błażejczyk – *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej. Dokumentacja Geograficzna* 26: 139-149.
- Kuchcik M. 2003a. The influence of aerosanitary and bio-meteorological conditions on the health and mortality of the inhabitants of Warsaw. W: M. Stopa-Boryczka (red.) *Studies on the climate of Warsaw*. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa: 155-166.
- Kuchcik M. 2003b. Topoclimatic conditions at various urban structures in Warsaw. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 484-492.
- Kuchcik M. 2015. Klimat osiedli mieszkaniowych i możliwości jego kształtowania. W: B. Szulcowska (red.) *Osiedle mieszkaniowe w strukturze przyrodniczej miasta*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 64-79.
- Kuchcik M. 2017. Warunki termiczne w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na

- umieralność. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 263: 1-279.
- Kuchcik M., Baranowski J. 2011. Różnice termiczne między osiedlami mieszkaniowymi o różnym udziale powierzchni czynnej biologicznie. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 365-372.
- Kuchcik M., Błażejczyk K. 2001. Wpływ warunków pogodowych na zachorowalność i umieralność mieszkańców Warszawy. W: B. Krawczyk, G. Węclawowicz (red.) *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej. Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 180: 71-87.
- Kuchcik M., Degórski M. 2009. Heat- and cold-related mortality in the north-east of Poland as an example of the socio-economic effects of extreme hydrometeorological events in the Polish Lowland. *Geographia Polonica* 82, 1: 69-78.
- Kuchcik M., Milewski P. 2016. Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones. *Acta Geographica Lodziensia* 104: 21-33.
- Kuchcik M., Baranowski J., Adamczyk A.B., Błażejczyk K. 2008. The network of atmospheric measures in Warsaw agglomeration. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 123-128.
- Kuchcik M., Błażejczyk K., Milewski P., Szmyd J. 2014. Urban climate research in Warsaw: the results of microclimatic network measurements. *Geographia Polonica* 87, 4: 491-504.
- Kuchcik M., Błażejczyk K., Milewski P., Szmyd J. 2015. Zagospodarowanie terenu a zróżnicowanie termiczne Warszawy. W: *Miasto idealne – miasto zrównoważone. Planowanie przestrzenne terenów zurbanizowanych i jego wpływ na ograniczenie skutków zmian klimatu*. Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Zrównoważonym Rozwojem, Warszawa: 153-158.
- Kuchcik M., Błażejczyk K., Milewski P., Dudek W. 2016a. Odczucie ciepłe a potencjał alergenny. *Przegląd Komunalny* 8: 45-49.
- Kuchcik M., Dudek W., Błażejczyk K., Milewski P., Błażejczyk A. 2016b. Two faces to the greenery on housing estates-mitigating climate but aggravating allergy. A Warsaw case study. *Urban Forestry & Urban Greening* 16: 170-181.
- Kunert A., Błażejczyk K. 2011. Zróżnicowanie temperatury powietrza w skali lokalnej w różnych typach krajobrazu Polski. *Przegląd Geograficzny* 83, 1: 69-90.
- Matzarakis A. 2010. RayMan. <http://www.urbanclimate.net/rayman/> [dostęp 31.10.2011]
- Michałowska-Smak H. 1982. Wiekowe i sezonowe zmiany zmętnienia atmosfery w Warszawie i w Belsku w okresie 1957–1980. Materiały V Seminarium Fitoaktywności. IUNG, Puławy.
- Paszyński J., Hornig A., Kluge M., Koechler W., Sokółowska M., Wolak J. 1971. Środowisko miejskie i przemysłowe. W: *Problemy środowiska człowieka. Biuletyn KPZK PAN* 68: 57-82.
- Psikuta A., Fiala D., Laschewski G., Jendritzky G., Richards M., Błażejczyk K., Mekjavič I., Rintamäki H., de Dear R., Havenith G. 2012. Evaluation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application. *International Journal of Biometeorology* 56, 3: 443-460.
- Stewart I.D. 2011a. Redefining the urban heat island. Vancouver: University of British Columbia, Department of Geography (rozprawa doktorska).
- Stewart I.D. 2011b. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology* 31, 2: 200-217.
- Stewart I.D., Oke T.R., Krayenhoff E.S. 2014. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34, 4: 1062-1080.
- Szulczewska B. 2015. Osiedle mieszkaniowe w strukturze przyrodniczej miasta. Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 1-167.
- Szulczewska B., Giedych R., Borowski J., Kuchcik M., Sikorski P., Mazurkiewicz A., Stańczyk T. 2014. How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence. *Land Use Policy* 38: 330-345.

## Summary

The climate and bioclimate of the city have been studied by the climatologists from the Climatology Department of IGSO PAS since the 1960s. Since the late 1990s, these studies have been based on their own measurement network of thermal and humidity conditions in the Warsaw agglomeration. The network has changed over the years and currently has 27 posts (Fig. 1).

Since the 2000s, most of the studies have been conducted as part of two national and one international projects. The first was “The influence of air circulation and local factors on climate and bioclimate of Warsaw Agglomeration” led by K. Błażejczyk. For the purposes of this project, the network consisting of 11 air temperature measurement points located in various urban planning units and various forms of land use was established. It allowed for, i.a., defining the greatest spatial contrast of bio-thermal conditions in Warsaw, delimiting 20 individual topoclimatic units and creating the maps of subjective temperature using GIS methods. The network was expanded under the next project “The assessment of Ratio of Biologically Vital Areas as a standard of creating the spatial structure of residential areas”. The objective of this project was to establish

a minimal proportion of green space required for good environmental performance in the neighbourhoods. 18 neighbourhoods (representing the most popular type of residential areas consisting of multistory buildings) were chosen in Warsaw, characterised by different RBVA values (varying from ca. 20% to ca. 70%). A threshold of 45% RBVA was recommended as the minimum which guarantees environmental performance in the neighbourhoods to a certain extent, and other recommendations concerned the structure of green areas, impermeable surfaces, the layout of buildings etc. (Fig. 2).

In the next project, supported by the Central Europe Programme of EU, entitled “Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon (UHI)”, the urban heat island in Warsaw was studied in details: its intensity, size, dependence on spatial development (Fig. 3–5), impact on subjective temperature (Fig. 6–7) and prognosis of its development in Warsaw up to 2070. As part of this project, the cooling role of greenery in residential areas was studied, as well as also the allergenic potential of plants planted in the old (from the 1950s-1970s) housing estates and the modern ones (dating to the 2000s) (Fig. 8). A catalogue of practices aimed at limiting the urban heat island was developed as well as a list of the most favourable (from the point of view of human comfort) trees and bushes.

In recent years, an attempt to analyze the urban heat island in Warsaw in the context of Local Climate Zones has been made (Fig. 9–10).

The monitoring network of atmospheric measures in the Warsaw agglomeration was also used to develop most of the maps for the ADAPTCITY project “Preparation of a strategy for adaptation to climate change of the city of Warsaw with the use of city climate mapping and with public participation” (Fig. 11).

The interest in the urban heat island, heat-waves or tropical nights originates in their inconvenience to humans and the attempts to understand and restrain their negative impact on people. Therefore, a special attention is paid in IGO PAS to bioclimate research: analyzing the impact of urban climate and air pollution on morbidity and mortality. Numerous publications in this field, often based on very long data series, present the frequency of heat waves and frosts, or changes in the frequency of thermal sensation categories in cities (Fig. 12). Although the main goal of these studies is to look for the magnitude of the impact of extreme thermal conditions on humans, the preliminary analysis of thermal or perceptible conditions in the city is a rich information source about changes in the city's climate.

Urban changes in Warsaw, both occurring now and projected in the future, such as: compacting buildings in central districts, city sprawl to suburban areas, consistent building of air exchange corridors and reducing the surface of green squares and small estate parks, overlap with the observed climate changes and the increasing urban heat island. These dynamic phenomena and their impact on humans will be further studied by the climatologists from IGSO PAS.