

BADANIA KLIMATU WARSZAWY PROWADZONE W ZAKŁADZIE KLIMATOLOGII WYDZIAŁU GEOGRAFII I STUDIÓW REGIONALNYCH UNIwersYTETU WARSZAWSKIEGO (1951–2018)

**The Warsaw's climate research conducted in the Department of Climatology,
Faculty of Geography and Regional Studies of the University of Warsaw (1951–2018)**

ELWIRA ŻMUDZKA* 

Zarys treści. W artykule omówiono wybrane aspekty badań klimatu Warszawy prowadzonych przez pracowników Zakładu Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Klimat miast, głównie Warszawy był jednym z ważniejszych zagadnień badawczych podejmowanych w tym ośrodku akademickim. Istotne znaczenie miało uruchomienie z inicjatywy prof. Wincentego Okołowicza stacji meteorologicznej położonej w kampusie głównym UW, w części śródmiejskiej Warszawy. W opracowaniu przedstawiono główne zagadnienia badawcze realizowane w ramach prac indywidualnych i zespołowych oraz prac zleconych i projektów. Zestawiono wybrane prace dotyczące poruszanych zagadnień. Wskazano na znaczenie studenckich prac dyplomowych w badaniach klimatu Warszawy. Przytoczono niektóre wyniki badań miejskiej wyspy ciepła, jej intensywności oraz uwarunkowań. Wyniki potwierdzają znane prawidłowości, ale jednocześnie ukazują specyfikę klimatu Warszawy wynikającą z jej położenia, a także indywidualnych cech fizjograficznych i układu architektonicznego miasta. W związku z postępującym procesem urbanizacji zagadnieniem kluczowym, szczególnie w kontekście współczesnego wzrostu temperatury powietrza, są działania ukierunkowane na zmniejszenie ekspozycji na obciążenia termiczne oraz ochronę przed zagrożeniami związanymi z meteorologicznymi zjawiskami ekstremalnymi występującymi głównie w półroczu ciepłym.

Słowa kluczowe: klimat, zagadnienia badawcze, miejska wyspa ciepła, Zakład Klimatologii UW, Warszawa

Abstract. The article discusses selected aspects of Warsaw's climate research conducted by employees of the Department of Climatology of the Faculty of Geography and Regional Studies at the University of Warsaw. The climate of cities, mainly Warsaw's climate, is one of the most important research issues undertaken in this academic center. Of particular importance was establishing, on the initiative of Prof. Wincenty Okołowicz, a meteorological station located on the main campus of the University of Warsaw, in downtown Warsaw. The study presents the main research issues carried out as individual and team works as well as commissioned works and projects. Selected works on the concerned issues are presented. The importance of student diploma theses in research into Warsaw's climate is also pointed out. Some of the results of the research of the urban heat island, its intensity and conditions are shown. The results confirm the known regularities, but at the same time show the specificity of Warsaw's climate, resulting from its location, as well as the individual physiographic features and architectural layout of the city. As the urbanization progresses, actions of key importance, especially in the context of the contemporary increase in air temperature, are aimed at reducing exposure to thermal stress and protection against risks related to extreme weather events occurring mainly in the warm half-year.

Key words: climate, research issues, Urban Heat Island, Department of Climatology UW, Warsaw

Wprowadzenie

Katedra Klimatologii (obecnie Zakład Klimatologii) w Uniwersytecie Warszawskim powstała w 1951 r. i była jedną z pierwszych jednostek w strukturach organizacyjnych polskich uczelni, powołaną w celu prowadzenia badań klimatologicznych oraz kształcenia kadry w tym zakresie, a tym

samym służącą samodzielnemu rozwojowi klimatologii jako dyscypliny naukowej. Praktycznie od momentu powstania tej jednostki jednym z ważniejszych nurtów badań są zagadnienia związane z klimatem miast, głównie Warszawy. Wśród wielu aspektów tych badań jednym z podstawowych jest wpływ miasta na elementy meteorologiczne, w tym przede wszystkim na warunki termiczne, wilgotnościowe i wiatrowe oraz deformacja pól zmiennych

* Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Katedra Geografii Fizycznej, Zakład Klimatologii, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa; e.zmudzka@uw.edu.pl; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3497-7904>

meteorologicznych na obszarze miasta. Prowadzone są także badania wpływu miasta na warunki odczuwalne i możliwości ich poprawy (np. przewietrzanie miasta) oraz stanu sanitarnego atmosfery. Bogatą grupę opracowań stanowią prace poświęcone zmianom wieloletnim klimatu Warszawy oraz, szczególnie w ostatnich latach, współczesnym zagrożeniom klimatycznym.

W badaniach prowadzonych w Zakładzie Klimatologii UW są wykorzystywane zarówno materiały źródłowe pochodzące ze stacji meteorologicznych IMGW (pierwotnie PIM, a następnie PIHM), a także z założonej z inicjatywy prof. Wincentego Okołowicza stacji Zakładu Klimatologii UW, ulokowanej w kampusie głównym uczelni (część śródmiejska Warszawy). Pomiary na tej stacji rozpoczęto w 1956 r. i trwają one nieprzerwanie do dziś. W latach 1961–1965 stacja działała w sieci IMGW. Na stacji tej są prowadzone pomiary podstawowych elementów meteorologicznych na dwóch poziomach: standardowym oraz na wyso-

kości dachów okolicznych budynków – na wieży (fot. 1). Jest to jedna z niewielu stacji śródmiejskich na obszarze Warszawy o tak długiej serii pomiarowej, dodatkowo pozwalającej na badania gradientowe. W celu realizacji konkretnych zadań badawczych są zakładane także dodatkowe stacje pomiarowe tworzące sieci pomiarowe działające okresowo. W wybranych okresach letnich w latach 1960–2017 działały sieci pomiarów stacjonarnych oraz były wykonywane pomiary patrolowe, m.in. na terenie osiedli warszawskich o zróżnicowanej zabudowie (Sady Żoliborskie, Szwoleżerów, Stawki, Chomiczówka, Stegny, Służew nad Dolinką, Olimpijska, Śródmieście), na Skarpie Wiślańskiej, w profilach poziomych prowadzonych przez miasto, w kompleksach zieleni (Ogród Saski, Ogród Zoologiczny). Coraz częściej jako materiał źródłowy służący do detekcji różnych zjawisk na obszarze Warszawy są wykorzystywane dane radarowe i satelitarne.



fot. E. Żmudzka, 2018

Fot. 1. Stacja meteorologiczna Zakładu Klimatologii UW (pomiary w warstwie dachowej)

Meteorological station of the Department of Climatology, University of Warsaw
(measurements in the roof layer)

Działalność naukowa pracowników Zakładu Klimatologii w zakresie badań klimatu Warszawy obejmuje realizację tematów indywidualnych i zespołowych. Tematyka ta jest także realizowana w ramach projektów badawczych oraz prac zleconych i ekspertyz. W latach 70. XX wieku, wykorzystując wyniki pomiarów z założonych sieci posterunków pomiarowych, realizowano tematy dotyczące wpływu warunków pogodowych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza na terenie Warszawy (na zlecenie Biura Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej w Warszawie), wpływu zieleni miejskiej na klimat w Warszawie (na zlecenie Instytutu Kształtowania Środowiska), a na przełomie lat 70. i 80. – ekofizjograficznych podstaw kształtowania środowiska osiedla Białołęka Dworska (na zlecenie Instytutu Kształtowania Środowiska w Warszawie w ramach tematu rządowego PR-5, Stopa-Boryczka i in. 1982). Na początku lat 90. był realizowany grant KBN „Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy”. W latach 2014–2016 pracownicy Zakładu Klimatologii brali udział w realizacji Projektu LIFE13 INF/PL/000039 *Life_Adaptcity_pl Preparation of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation* (zadanie: mapa współczesnych zagrożeń klimatycznych miasta stołecznego Warszawy).

Wybrane aspekty badań klimatu Warszawy

Do najwcześniejszych prac dotyczących klimatu Warszawy, które były wykonane przez osoby związane z Zakładem Klimatologii UW można zaliczyć prace Gumińskiego (1950, 1952), Okołowicza (1961, 1962), Kaczorowskiej (1962, 1967). W opracowaniach tych, w większości przypadków poświęconych obszarowi całej Polski lub wybranego jej regionu, są zawarte wyniki analiz, w których wykorzystano dane ze stacji warszawskich. Na ich podstawie określono prawidłowości w przebiegu rocznym i wieloletnim podstawowych elementów klimatu Warszawy. Za pierwszą monografię klimatu Warszawy można uznać rozprawę doktorską Kossowskiej (1970). Autorka uwzględniła wyniki wieloletnich obserwacji (1951–1960) z kilku stacji PIHM na obszarze miasta i poza nim. Dodatkowo wykorzystwała dane pochodzące z licznych pomiarów wzdłuż transektów wyznaczonych na terenie Warszawy (od kwietnia 1966 do maja 1967). Zebrany bogaty materiał źródłowy pozwolił na określenie modyfikującej

roli miasta w kształtowaniu elementów klimatu oraz na podjęcie zagadnienia zróżnicowania temperatury i wilgotności względnej na obszarze miasta w wyniku oddziaływania takich czynników, jak zabudowa o różnej zwartości i wysokości oraz o różnym udziale terenów zielonych. Autorka zwróciła uwagę na zjawisko miejskiej wyspy ciepła (MWC) w Warszawie i była to pierwsza próba określenia jej zasięgu i intensywności. Ustaliła również wartości temperatury powietrza, wielkość zachmurzenia i prędkość wiatru, przy których zjawisko to zanika. Warto podkreślić, że pojęcie MWC nie funkcjonowało wówczas powszechnie w polskiej literaturze klimatologicznej, nie zostało ono również użyte w tytule zamieszczonej we wspomnianej publikacji mapy, na której przedstawiono wartości średniej temperatury minimalnej (V–IX 1969). Wielkość odchylen temperatury powietrza w każdym punkcie od wartości uśrednionej ze wszystkich 13 punktów pomiarowych wskazała, że obszarem najcieplejszym jest teren zwartej zabudowy śródmiejskiej (+1,3°C na terenie Uniwersytetu Warszawskiego), a najchłodniejszym Białołęka, położona w prawobrzeżnej, północnej części miasta (–1,0°C).

Istotne znaczenie dla opisu zmian dobowych i rocznych MWC w Warszawie oraz warunków meteorologicznych sprzyjających powstawaniu tego zjawiska miały badania prowadzone przez Wawer (1994, 1997). Badanie dobowego rytmu MWC na podstawie różnic temperatury powietrza mierzonej o pełnych godzinach między poszczególnymi stacjami umożliwiło określenie terminów pojawiania się MWC, występowania maksimum jej intensywności oraz czasu jej słabnięcia lub zaniku (tab. 1). Kształtowanie się MWC w ciągu doby zmienia się w poszczególnych porach roku, co ma związek z długością dnia i czasem insolacji. Udokumentowano, że największe różnice pomiędzy temperaturą powietrza w Warszawie i poza nią występują wieczorem i nocą, a w przebiegu rocznym od kwietnia do października (do 2°C), najmniejsze zaś odpowiednio w południe oraz w listopadzie i marcu (do 1°C). Uprzywilejowanie termiczne centrum miasta w najcieplejszej porze dnia latem może zanikać („jezioro chłodu”). Zimą MWC zaznacza się najczęściej przez całą dobę.

Istotną częścią badań było określenie warunkowań intensywności miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. Badano zarówno wpływ podłoża, jak i warunków meteorologicznych i synoptycznych. Wykazano m.in., że szczególnie dużą rolę w modyfikacji MWC pełnią tereny pokryte roślinnością, w nieco mniejszym stopniu jest ona

zależna od zwartości zabudowy; jest także funkcją odległości od centrum miasta (np. Kossowska-Cezak 1977).

Zależność intensywności MWC w Warszawie od liczby ludności, stanu zabudowy oraz rozwoju terytorialnego Warszawy badała Kossowska-Cezak (1998, 2002). Analizując przebieg różnic między średnią temperaturą powietrza na stacji śródmiejskiej (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferyjnej (Okęcie) w latach 1933–2000, wykazała, że

MWC w miesiącach od maja do lipca przed II wojną światową wynosiła nieco ponad $0,5^{\circ}\text{C}$, po zniszczeniach miasta podczas Powstania Warszawskiego zmalała poniżej $0,3^{\circ}\text{C}$, by w połowie lat 60. powrócić do wartości sprzed wojny, a pod koniec lat 90. osiągnąć około $0,75^{\circ}\text{C}$. Różnica średniej rocznej temperatury powietrza zmieniała się odpowiednio od około $0,4^{\circ}\text{C}$, przez około $0,2^{\circ}\text{C}$ do $0,6^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1

Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła w Warszawie (Wawer 1997)

Characteristics of the urban heat island in Warsaw (Wawer 1997)

Pora roku <i>Season</i>	Termin pojawiania się (godz.) <i>Start time</i>	Termin występowania maksimum (godz.) <i>Maximum intensity time</i>	Termin słabnięcia (godz.) <i>Time of weakening</i>	Δt ($^{\circ}\text{C}$) w ciągu dnia Δt ($^{\circ}\text{C}$) during day	Skrajne wartości Δt ($^{\circ}\text{C}$) Δt ($^{\circ}\text{C}$) extreme values
XII–II	16–18 (4–6 p.m.)	21–24 (9–12 p.m.)	6–7 (6–7 a.m.)	> 0	9–11
III–V	17–18 (5–6 p.m.)	~ 24 (~ 12 p.m.)	7–8 (7–8 a.m.)	≤ 0	9
VI–VIII	18–20 (6–8 p.m.)	22–24 (10–12 p.m.)	6–8 (6–8 a.m.)	< 0	8
IX–XI	16–18 (4–6 p.m.)	21–1 (9 p.m.–1 a.m.)	6–9 (6–9 a.m.)	< 0	8

Intensywność i zróżnicowanie przestrzenne MWC w znacznym stopniu zależą od cyrkulacji atmosferycznej i cech fizycznych powietrza występującego nad miastem. Czynniki makrocyrkulacyjne należą także do najważniejszych przyczyn odpowiedzialnych za rytm roczny MWC. Wyniki badań MWC i wpływu warunków pogodowych na jej intensywność w Warszawie ukazały, że zjawisko to jest bardzo częste oraz może zaistnieć przy każdym typie cyrkulacji atmosferycznej. Częściej powstaje jednak w sytuacjach antycyklonalnych (ok. 60%) niż cyklonalnych (28%) i słabogradentowych (12%). Układem barycznym szczególnie sprzyjającym rozwojowi MWC w Warszawie jest wyż nad Polską (Europą Środkową), klin wyżowy znad Europy Zachodniej lub Południowej oraz, występujące dość rzadko, sytuacje słabogradentowe w masach PPK, PPms, rzadziej PA (Wawer 1995, 1997, 1999, tab. 2). Rozwojowi miejskiej wyspy ciepła i jej największej intensywności ($\Delta t > 3^{\circ}\text{C}$) towarzyszy na ogół pogoda bezchmurna lub z małym zachmurzeniem (przy zachmurzeniu całkowitym MWC nie zawsze zanika, lecz najczęściej ulega znacznemu osłabieniu), a także cisza lub małe prędkości wiatru ($4\text{--}5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Latem warunki pogodowe sprzyjające rozwojowi MWC w Warszawie zdarzają się częściej niż

zimą. Ale jeśli sytuacja synoptyczna zimą jest sprzyjająca (mroźna masa powietrza, bezchmurnie i bezwietrznie) mogą wówczas wystąpić skrajnie duże różnice temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami ($10\text{--}11^{\circ}\text{C}$), przewyższające wartości przypadki MWC z okresu letniego (Wawer 1997).

Skrajne zróżnicowanie termiczne między śródmieściem a peryferiami może przekraczać w Warszawie 10°C (godz. 21), a w przypadku temperatury minimalnej $7,5^{\circ}\text{C}$ (minimum temperatury powietrza w mieście występuje 1–2 godziny później niż na peryferiach). Intensywność wyspy ciepła przekraczająca 8°C może zdarzyć się w każdej porze roku, ale z największym prawdopodobieństwem zimą w czasie mroźnej, bezchmurnej i bezwietrznej pogody antycyklonalnej (Wawer 1999).

Badania MWC kontynuowane w latach 90. XX wieku potwierdziły, że ma ona największą intensywność w dniach z cyrkulacją wyżową. W roku 1992 r. największą różnicę temperatury powietrza między śródmieściem a stacją pozamiejską stwierdzono 30 lipca o godz. 1.00 i 17 sierpnia o godz. 6.00. W obu przypadkach wynosiła ona $9,1^{\circ}\text{C}$. Były to dni z typem cyrkulacji antycyklonalnej południowo-wschodniej (Stopa-Boryczka i in. 2001). Kossowska (1970) oraz Żmudzka i in. (2003) wykazały, że miejska wyspa ciepła w Warszawie nie

Tabela 2

Przeciętne oraz skrajne różnice (Δt , °C) temperatury powietrza między miastem i otoczeniem podczas sytuacji synoptycznych sprzyjających występowaniu dużej intensywności wyspy ciepła w Warszawie (1961–1965, 1976–1980) (Wawer 1995, zmienione)

Average and extreme differences (Δt , °C) of air temperature between the city and its surroundings during synoptic situations conducive to the occurrence of high intensity of urban heat island in Warsaw (1961–1965, 1976–1980) (Wawer 1995, changed)

Pora roku Season	Sytuacja synoptyczna Synoptic situation	Masa powietrza Air mass	Δt (°C)	
			Przeciętna Average	Skrajna Extreme
XII–II	Wyż nad Polską (Europą Środkową) <i>High over Poland (Central Europe)</i>	PPk	ok. 0,5 (w dzień) / approx. 0.5 (day)	9,1 (godz. 21.00 / 9 p.m.) 14.12.1963
	Sytuacje słabogradentowe <i>Indifferent situations</i>	PPms	3 (nocą) / 3 (night)	10,8 (godz. 2.00 / 2 a.m.) 10,5 (godz. 21.00 / 9 p.m.) 19.02.1978
	Wyż znad Europy Zachodniej lub Skandynawii <i>High over Western Europe or Scandinavia</i>	PA		10,3 (godz. 2.00 / 2 a.m.) 14.01.1979
III–V	Wyż nad Polską (Europą Środkową) <i>High over Poland (Central Europe)</i>	PPms	ok. 0 (w dzień) / approx. 0 (day)	8,7 (godz. 24.00 / 12 p.m.) 1.03.1963
	Wyż znad Europy Południowej <i>High over Southern Europe</i>	PPk	3 (nocą) / 3 (night)	7,0 (godz. 4.00 / 4 a.m.) 11.05.1977
	Klin znad Europy Zachodniej <i>Wedge over Western Europe</i>	PAs		6,8 (godz. 3.00–4.00 / 3–4 a.m.) 15.05.1979
VI–VIII	Wyż nad Polską (Europą Środkową) <i>High over Poland (Central Europe)</i>	PPms	0 lub < 0 (w dzień) / 0 or < 0 (day)	7,6 (godz. 4.00 / 4 a.m.) 20.07.1965
	Wyż znad Europy Południowej <i>High over Southern Europe</i>	PPk	2–4 (nocą) / 2–4 (night)	7,9 (godz. 4.00 / 4 a.m.) 4.06.1978
IX–XI	Wyż nad Polską (Europą Środkową) <i>High over Poland (Central Europe)</i>	PPms	0 lub < 0 (w dzień) / 0 or < 0 (day)	8,1 (godz. 3.00 / 3 a.m.) 7.10.1964
	Klin znad Europy Zachodniej <i>Wedge over Western Europe</i>	PPk	2–4 (nocą) / 2–4 (night)	7,5 (godz. 4.00 / 4 a.m.) 13.09.1979

ogranicza się jedynie do strefy śródmiejskiej, ale często przesuwają się i obejmują swym zasięgiem stacje uznawane za „peryferyjne” lub „pozamiejskie”, położone po stronie zawietrznej. Bywają także sytuacje, że zmniejszenie różnicy temperatury powietrza w porównaniu ze stacją zamiejską może być konsekwencją powstania tam własnej, lokalnej wyspy ciepła.

Zależność miejskiej wyspy ciepła od stanu atmosfery badano także, wykorzystując równania hiperpłaszczyzn regresji względem temperatury, zachmurzenia i prędkości wiatru (Stopa-Boryczka 1988, 1992; Stopa-Boryczka, Boryczka 1989; Stopa-Boryczka i in. 1994, 1995). Uzyskane wyniki potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia, przyczyniły się także do ich uściślenia. Wyznaczono m.in. wartości progowe temperatury powietrza, prędkości wiatru i wielkości zachmurzenia, przy których deformacja pola temperatury w mieście jest najwię-

ksza. Najmniejsze różnice średniej dobowej i minimalnej temperatury powietrza między centrum miasta i peryferiami występują przy temperaturze bliskiej 0,0°C. W półroczu ciepłym miejska wyspa ciepła jest najintensywniejsza (największe różnice), gdy temperatura powietrza poza miastem wynosi 13–16°C, a w półroczu chłodnym, gdy temperatura spada poniżej –10°C. Latem MWC słabo zależy od zachmurzenia, a w chłodnej porze roku sprzyja jej małe zachmurzenie. W ciągu całego roku MWC słabnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Przy prędkościach wiatru 7–8 m·s⁻¹ zanika. Według parabol regresji prędkość wiatru w mieście jest w ciągu całego roku mniejsza o około 2 m·s⁻¹ niż poza miastem, a przy prędkościach wiatru około 10 m·s⁻¹ osłabienie wiatru w mieście wynosi ponad 3 m·s⁻¹. Interesujące jest, że przy prędkościach wiatru mniejszych od 1 m·s⁻¹ w terenie pozamiejskim średnia prędkość poziomego ruchu

powietrza w terenie zabudowanym jest większa niż w terenie otwartym. W terenie zabudowanym występuje mniej cisz.

Szczegółowe badania dotyczące oceny warunków wiatrowych w Warszawie w aspekcie przewietrzania miasta wykazały, że najczęściej napływające nad obszar miasta powietrze z sektora zachodniego (NW–W–SW) sprzyja wentylacji miasta tylko w 14,4% przypadków, głównie w chłodnej części roku (Kopacz-Lembowicz 1991a, b; Stopa-Boryczka i in. 1995).

Deformację pól zmiennych meteorologicznych badano nie tylko w skali całego miasta i wybranych jego dzielnic, lecz także w osiedlach mieszkaniowych, co ma istotne znaczenie w procesie planowania przestrzennego. Badania wpływu różnego rodzaju zabudowy i zieleni na klimat lokalny w Warszawie są prowadzone od roku 1959 do czasów współczesnych (głównie w latach 70. i 80.). Obiektami szczegółowych badań, jak wspomniano, były m.in. osiedla: Chomiczówka, Sady Żoliborskie, Stawki, Szwoleżerów, Wyględów-Olimpijska, Służew nad Dolinką, Kabaty, Grochów, Śródmieście. Wyniki badań empirycznych pozwoliły na sformułowanie kilku prawidłowości. Stwierdzono, m.in., że w osiedlach o zabudowie wysokiej, blokowej powietrze nagrzewa się o $0,2^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$ mniej niż w otoczeniu, co oznacza, że przy wzroście temperatury powietrza w otoczeniu o 1°C osiedle nagrzewa się o $0,8^{\circ}\text{C}$ i staje się względnie chłodne. W osiedlach willowych z dużym udziałem zieleni nie ma różnic w nagrzewaniu się w stosunku do otoczenia. Wpływ typu zabudowy silniej zaznacza się w procesie wieczornego wychładzania niż porannego nagrzewania się. W osiedlach z zabudową wysoką spadkowi temperatury poza osiedlem o 1°C odpowiada zmniejszenie temperatury o $0,7\text{--}0,6^{\circ}\text{C}$ w osiedlu, które staje się cieplejsze od otoczenia. W niskiej zabudowie osiedla willowego z dużym udziałem zieleni wychładzanie przebiega szybciej i spadkowi temperatury na zewnątrz osiedla o 1°C odpowiada zmniejszenie temperatury powietrza w osiedlu o $0,9^{\circ}\text{C}$ (Stopa-Boryczka i in. 1984, 1986, 1991, 2008, 2010; Stopa-Boryczka 1992).

W kształtowaniu warunków odczuwalnych w mieście szczególnie ważną rolę odgrywają tereny biologicznie czynne (TBC). Odpowiedni układ zieleni osiedlowej, parków może przyczyniać się do zmniejszenia częstości niekorzystnych warunków odczuwalnych w sezonie letnim, sprzyjających przegrzaniu organizmu (Kopacz-Lembowicz 1978). Badania dotyczące wpływu zieleni na różnicowanie wartości elementów meteorologicznych i warunków biometeorologicznych na obsza-

rze Warszawy były prowadzone przez pracowników Zakładu Klimatologii UW głównie w latach 1971–1975 na zlecenie ówczesnego Instytutu Kształtowania Środowiska, w ramach szeroko zakrojonych badań wpływu zieleni na środowisko miejskie (Kossowska-Cezak 1978; Martyn 1978; Olszewski 1978; Kopacz-Lembowicz i in. 1984). Badania te, oparte na wynikach pomiarów w stałych posterunkach i stacjach IMGW, jak też pomiarach patrolowych w kilku różnych obiektach zieleni na terenie miasta, pozwoliły stwierdzić kilka istotnych faktów. I tak, wykazano, że obszar zieleni niskiej (trawnik) musi mieć powierzchnię przynajmniej 3000 m^2 , aby osłabienie dziennego wzrostu temperatury było odczuwalne na wysokości $1,5\text{ m}$ nad podłożem; nad obiektami o powierzchni 1000 m^2 jest ono zauważalne tylko na wysokości $0,5\text{ m}$. „Ochładzający” wpływ takich obiektów ogranicza się tylko do ich powierzchni. Stwierdzono również, że powierzchnie trawników pozbawione zakrzewień i zadrzewień w godzinach nocnych, zwłaszcza przy małym zachmurzeniu, sprzyjają tworzeniu się nad nimi niekorzystnego zjawiska inwersji temperatury w przygruntowej warstwie powietrza. W przypadku zieleni wysokiej wskazane jest, by nie tworzyła ona zwartych skupisk, lecz projektowana była w luźnych grupach. Nie będzie wówczas hamowany przepływ powietrza, odgrywający w sytuacjach sprzyjających przegrzaniu doniosłą rolę ochładzającą. Wielkość powierzchni biologicznie czynnych ma kluczową rolę w projektowaniu nowych osiedli tak, by możliwie najbardziej zmniejszać zasięg i intensywność MWC. Z obecnych badań wynika, że aby uzyskać ten cel, udział powierzchni terenów biologicznie czynnych nie powinien być mniejszy niż $45\text{--}50\%$ ogólnej powierzchni.

Ważnym nurtem badawczym są zagadnienia związane z warunkami aerosanitarnymi na obszarze miasta. Już w latach 60. XX wieku powstało w Zakładzie Klimatologii UW kilka prac opartych na danych z Warszawy i dotyczących rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych i ich zależności od warunków meteorologicznych (Boryczka, Okołowicz 1964; Boryczka 1967). Określono zmiany roczne przestrzennego rozkładu stężenia pyłu i gazów w otoczeniu punktowych źródeł emisji – naziemnych i nadziemnych (kominów fabrycznych). Pionową i poziomą intensywność turbulencyjnej wymiany powietrza oszacowano na podstawie pomiarów gradientowych dobowej amplitudy temperatury powietrza wykonanych na wieży strażackiej (Warszawa-Jelonki) i na stacji meteorologicznej Zakładu Klimatologii UW. Temat wpływu warunków pogodowych na

rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza na terenie Warszawy był kontynuowany w związku ze zleceniem Biura Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej w Warszawie. Na potrzeby tej pracy zorganizowano na terenie miasta sieć pomiarową. Prawie we wszystkich rozpatrywanych miesiącach największy opad pyłu na terenie aglomeracji warszawskiej występował na południowschód od śródmieścia (do ponad $55 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ w październiku). Drugim niekorzystnym pod tym względem obszarem była Praga-Północ. Silną zależność opadu pyłu od kierunków wiatru dodatkowo udokumentowano, analizując próbki śniegu z 11 punktów pomiarowych z okresu zimowego 1969/1970. W następnych latach prowadzono liczne badania ukierunkowane na określenie stężeń zanieczyszczeń charakterystycznych na terenie Warszawy, ich przebiegu dobowego i rocznego, zależności od elementów pogody i sytuacji synoptycznej. Przegląd tych opracowań znajduje się w 28 tomie „Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce” (Boryczka i in. 2012).

Istotnym nurtem badawczym rozwijanym w Zakładzie Klimatologii UW jest także określenie warunków bioklimatycznych w różnych skalach przestrzennych na obszarze Warszawy (Lindner-Cendrowska 2012) oraz ich wpływu na zdrowie i zgony jej mieszkańców (Kuchcik 2000; Rabchenko i in. 2016), a także na możliwości uprawiania turystyki i rekreacji (Lindner-Cendrowska 2013). W ramach tych tematów w latach 2011–2013 były realizowane dwa promotorskie projekty badawcze finansowane przez NCN (kierownik projektów Krzysztof Błażejczyk). W Zakładzie Klimatologii UW jest także badana percepcja pogody oraz preferencje pogodowe (Lindner-Cendrowska, Błażejczyk 2018).

Zagadnieniem badawczym podejmowanym w Zakładzie Klimatologii UW są także wieloletnie zmiany elementów klimatu Warszawy (Boryczka i in. 1992, 1998, 1999, 2010; Boryczka 2001; Kossowska-Cezak 2005; Żmudzka 2008, 2016). W badaniach są wykorzystywane różnej długości serie pomiarowe, najdłuższe wynoszące 200–300 lat. Szukano odpowiedzi na pytanie dotyczące udziału przyczyn naturalnych i antropogenicznych w postępującym ociepleniu (Stopa-Boryczka i in. 1995) oraz kierunku i wielkości zmian temperatury powietrza i opadów w Warszawie w XXI w. (Boryczka i in. 2000). Badano m.in. tendencje zmian oraz cykliczne zmiany miejskiej wyspy ciepła (np. Kossowska-Cezak 2002; Stopa-Boryczka i in. 2011). Stwierdzono, że w latach 1933–2000 różnica temperatury powietrza między stacjami War-

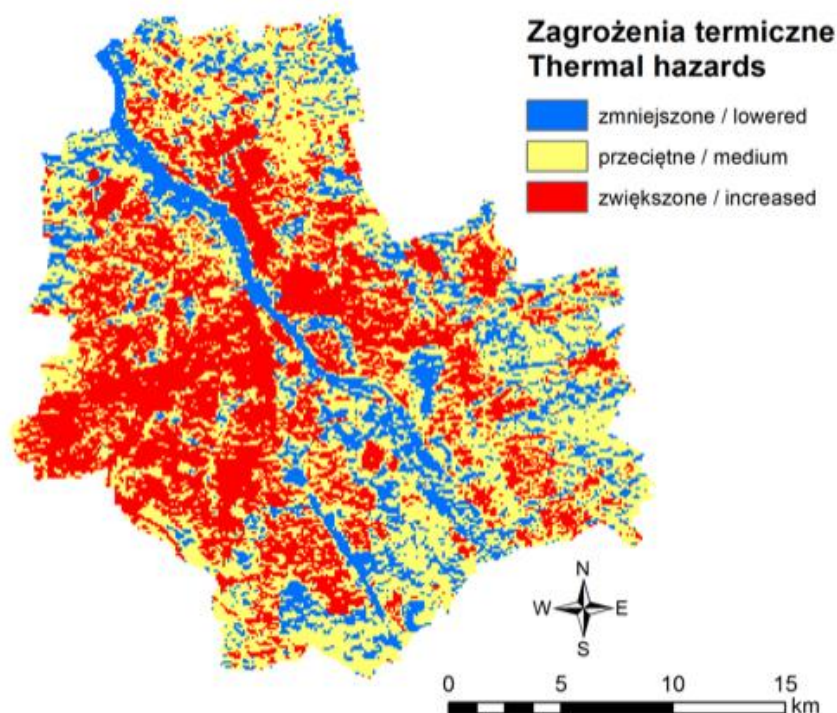
szawa-Observatorium Astronomiczne i Okęcie nieistotnie zwiększyła się ($0,01^\circ\text{C}$ na 5 lat), co jest konsekwencją zarówno powiększania się obszaru zurbanizowanego, jak i zmian w bezpośrednim otoczeniu stacji śródmiejskiej. Analiza współczesnych zmian poszczególnych elementów klimatu w Warszawie wskazała na znaczący wzrost średniej rocznej temperatury powietrza ($0,02\text{--}0,04^\circ\text{C}$ na rok w latach 1981–2014, Żmudzka 2016). W ujęciu sezonowym istotny przyrost temperatury wystąpił latem. W części północnej i śródmiejskiej Warszawy znacząco wzrosła średnia temperatura maksymalna. Tam też stwierdzono znaczący wzrost liczby dni gorących i upalnych. W roku 2018 na stacji Warszawa-Okęcie wystąpiła rekordowa (od 1947 roku), wynosząca $20,7^\circ\text{C}$ średnia temperatura powietrza latem oraz skrajnie duża liczba dni gorących – 86 (Kossowska-Cezak, w opracowaniu). W latach 1981–2014 na terenie Warszawy wystąpiło od 26 (w części śródmiejskiej i południowej miasta) do 32 (w części północnej) fal upałów (ciągi co najmniej trzech kolejnych dni z $t_{\text{max}} > 30,0^\circ\text{C}$). Fale upałów występowały głównie w lipcu i sierpniu. Na początku XXI wieku pojedyncze przypadki fal upałów pojawiły się w miesiącach wiosennych: w maju, a nawet w kwietniu (Żmudzka 2016). Cechą charakterystyczną zmian klimatu Warszawy po roku 1980. był także wzrost ilości opadów w ciągu roku, głównie w południowej części Warszawy ($7,2 \text{ mm}$ na rok). W tej części Warszawy stwierdzono także istotny przyrost liczby dni z opadem silnym (sumy dobowe co najmniej $10,0$ i $20,0 \text{ mm}$). Dni z opadem co najmniej 50 mm , których liczba na terenie Warszawy w latach 1981–2014 wynosiła od 3 do 7, pojawiały się głównie po roku 1991. Na obszarze Warszawy stwierdzono także wzrost najwyższej sumy dobowej opadów w ciągu roku. Wynosił on od $0,13$ w części śródmiejskiej do $0,45 \text{ mm}$ na rok na południu miasta (istotny na poziomie $0,05$). Wykazano także zmniejszenie średniej rocznej wielkości zachmurzenia nad Warszawą ($-0,09\%$ na rok w latach 1951–2000, Żmudzka 2008, 2010).

W ostatnich latach badania prowadzone przez pracowników Zakładu Klimatologii UW są ukierunkowane głównie na określenie ekspozycji na zagrożenia termiczne oraz, we współpracy z hydrologami, klimatyczno-hydrologiczne na obszarze Warszawy (Żmudzka i in. 2019). W celu określenia ekspozycji na współczesne zagrożenia termiczne w Warszawie stworzono model obiektyw, pozwalający na jakościowe określenie stopnia zagrożenia przy jednoczesnej analizie jego rozkładu przestrzennego (Kulesza i in. 2017). Badaniami objęto obszar miasta stołecznego Warszawy

w jego obecnych granicach, w rozdzielczości przestrzennej 100 m x 100 m. Do modelu zasymulowano dane wejściowe o pokryciu terenu, pochodzące z programu Corine Land Cover (CLC 2012), oraz średnie całkowite promieniowanie słoneczne, średnie albedo powierzchni czynnej i wartości jej temperatury z wybranych dni z pogodą insolacyjną z okresu wegetacyjnego. Przy konstrukcji mapy średniego promieniowania całkowitego wykorzystano cyfrowy model rzeźby terenu uzyskany z Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Burgmann i in. 2000). Promieniowanie całkowite zostało obliczone na podstawie modelu określania widoczności hemisferycznej (Rich i in. 1994; Fu, Rich 2000, 2002). Rozkład średniego albedo oraz temperatury powierzchni zostały opracowane na podstawie zdjęć satelitarnych z satelitów LAND-SAT 5 i 8 (Dąbrowska- Zielińska i in. 2015) i pozyskane z Instytutu Geodezji i Kartografii (Projekt LIFE 13INF/PL/000039 LIFE ADAPTCITY PL *Prepa-*

ration of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation) (rys. 1).

Pracownicy Zakładu Klimatologii UW, oprócz działalności publikacyjnej oraz udziału w licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych dotyczących zagadnień „miejskich”, biorą także udział w różnych inicjatywach popularyzujących wiedzę z zakresu klimatu Warszawy. Oprócz wspomnianego udziału w Pikniku Naukowym Polskiego Radia BIS innym przejawem aktywności pracowników Zakładu Klimatologii jest udział w Festiwalu Nauki. Lektury i wykłady prowadzone w ramach tego Festiwalu, dotyczące cech charakterystycznych i specyficznych klimatu Warszawy, a szczególnie zjawiska miejskiej wyspy ciepła w Warszawie (jej przyczyn, intensywności, skutków oraz sposobów łagodzenia) cieszą się dużym zainteresowaniem.



Rys. 1. Współczesne zagrożenie termiczne na terenie Warszawy (Żmudzka i in. 2019)

Badania były prowadzone na zlecenie Fundacji Instytut na rzecz Ekorozwoju w ramach Projektu LIFE13 INF/PL/000039 Life_Adaptcity_pl „Preparation of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation”, finansowanego ze środków instrumentu finansowego LIFE+ Komisji Europejskiej oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

Current thermal hazard in Warsaw area (Żmudzka *et al.* 2019)

The research was conducted for Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju within the LIFE13 Project INF/PL/000039 Life_Adaptcity_pl „Preparation of a strategy of adaptation to climate change with use of city climate mapping and public participation”, founded under LIFE+ by European Committee and polish National Fund for Environmental Protection and Water Management

Znaczenie prac dyplomowych w poznaniu klimatu Warszawy

Istotny wkład w poznanie różnych aspektów klimatu miasta wnoszą prace dyplomowe realizowane na studiach pierwszego i drugiego stopnia. Prace te mają zazwyczaj charakter oryginalnych opracowań częściowych. Często są oparte na wynikach pomiarów terenowych przeprowadzanych podczas praktyk z zakresu klimatologii. W latach 1954–2017 wykonano około 180 prac magisterskich, a w latach 2003–2017 około 50 prac licencjackich dotyczących klimatu Warszawy i okolic. Tematyka tych opracowań jest różnorodna. Do najważniejszych zagadnień badanych z wykorzystaniem danych warszawskich można zaliczyć:

- zróżnicowanie czasowe i przestrzenne elementów pogody/klimatu,
- wpływ zabudowy, zieleni i zbiorników wodnych na klimat/bioklimat osiedli mieszkaniowych,
- zależność elementów meteorologicznych i stężenia zanieczyszczeń powietrza od warunków pogodowych i cyrkulacji atmosferycznej,
- miejską wyspę ciepła,
- wpływ warunków pogodowych na zdrowie i samopoczucie mieszkańców,
- klimat lokalny lotniska Warszawa-Okęcie,
- charakterystykę warunków klimatycznych na potrzeby turystyki.

Syntezę tych badań stanowi publikacja „Klimat Wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952–2007” przygotowana z okazji udziału w XII Pikniku Naukowym Polskiego Radia BIS i Centrum Nauki Kopernik (2008). Badania realizowane w pracach dyplomowych były także podstawą opracowania kilku tomów „Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce”: t. 22 (Stopa-Boryczka i in. 2008), t. 23 (Stopa-Boryczka i in. 2009), t. 24 (Stopa-Boryczka i in. 2010), t. 25 (Boryczka i in. 2010), dotyczących m.in. wpływu zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie oraz zmian klimatu Warszawy. W ostatnich latach w ramach prac dyplomowych podejmowane są głównie tematy dotyczące zagrożeń ze strony warunków atmosferycznych w transporcie drogowym i lotniczym na obszarze Warszawy, zanieczyszczenia światłem i hałasem czy wpływu miasta na procesy silnej konwekcji. Warto także zaznaczyć, że niektóre prace dyplomowe powstają w odpowiedzi na potrzeby firm (Projekt eCo-Solving FSS/2014/HEI/W/0127/U/0037 realizowany w ramach programu Rozwój

Polskich Uczelni w latach 2015–2016 „Aplikacyjne prace dyplomowe i inne formy dydaktycznej współpracy uczelni z otoczeniem w kontekście aktualnych wyzwań zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska i przeciwdziałania zmianom klimatu”, projekt finansowany ze środków funduszy norweskich oraz środków krajowych).

Podsumowanie

W ramach zagadnienia dotyczącego klimatu miasta w latach 1951–2000 wykonano w Zakładzie Klimatologii UW ponad 200 opracowań, w tym 3 pozycje książkowe, około 100 artykułów, 6 prac zleconych przez różne instytucje i 4 prace doktorskie (za Stopa-Boryczka i in. 2001). Przegląd najważniejszych wyników badań klimatu Warszawy prowadzonych w tym okresie stanowią m.in. opracowania Stopy-Boryczki (1992) oraz Stopy-Boryczki i in. (2001). Syntetyczne ujęcie wyników badań klimatu Warszawy można znaleźć w serii „Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce”, np. t. 9 (Stopa-Boryczka i in. 1995), t. 14 (Boryczka i in. 2000), t. 28 (Boryczka i in. 2012), t. 38/39 (Stopa-Boryczka, Boryczka, 2018). Na szczególną uwagę zasługuje publikacja książkowa, wydana w języku angielskim pt. „*Studies on the climate of Warsaw*” (Stopa-Boryczka red. 2003), która jest zbiorem 15 artykułów dotyczących, m.in. zmian dobowych, rocznych oraz wieloletnich (długookresowych i cyklicznych) wybranych elementów: temperatury powietrza, burz, okresu wegetacyjnego, kwasowość opadów oraz wpływu zieleni miejskiej i zabudowy na klimat lokalny, czy też warunków bioklimatycznych i aerosanitarnych i ich wpływu na zdrowie i umieralność mieszkańców Warszawy, a także opracowanie „*Urban climate*” (Kicińska, Wawer 2005), będące wieloaspektowym opisem klimatu Warszawy. W 2013 r. ukazała się pod redakcją Żmudzkiej bibliografia opracowań poświęconych badaniom środowiska przyrodniczego (w tym klimatu) i społeczno-ekonomicznego miasta Warszawy i województwa mazowieckiego (2003–2013).

Wyniki szeroko zakrojonych wieloaspektowych badań klimatu Warszawy w różnych skalach przestrzennych prowadzone przez pracowników Zakładu Klimatologii UW potwierdzają, a także uszczegółwiają znane prawidłowości. Ukazują jednocześnie specyfikę klimatu Warszawy wynikającą z jej położenia, a także indywidualnych cech fizjograficznych i układu architektonicznego miasta. W związku z postępującym procesem urbanizacji (powiększaniem się obsza-

ru miejskiego, wzrostem liczby ludności oraz zagęszczeniem zabudowy już istniejącej) zagadnieniem kluczowym na terenie Warszawy, szczególnie w warunkach współczesnego ocieplenia, są działania ukierunkowane na zmniejszenie ekspozycji na obciążenia występujące w okresie letnim. Pogarszające się warunki bioklimatyczne w tej części roku, przejawiające się coraz większą liczbą dni upalnych ($t_{\max} > 30,0^{\circ}\text{C}$), które układają się w ciągi i, dodatkowo, coraz większą liczbą nocy tropikalnych ($t_{\min} > 20,0^{\circ}\text{C}$) ograniczających możliwość nocnego wychłodzenia, stanowią istotne zagrożenie dla zdrowia i życia jej mieszkańców. Mimo iż uzyskane wyniki w zakresie ogólnych cech klimatu Warszawy, jego różnic względem klimatu terenów zamiejskich oraz zróżnicowania topoklimatycznego w obrębie miasta składają się na obszerną wiedzę z tego zakresu, to jednak nieustanny rozwój miasta w połączeniu ze zmianami klimatu w makroskali stawiają wciąż nowe wyzwania badawcze.

Literatura

- Boryczka J. 1967. Turbulencyjna transformacja pyłu i gazów w atmosferze ziemskiej i jej zależność od parametrów meteorologicznych. Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW: 1-234.
- Boryczka J. 2001. Zmiany klimatu Warszawy od XVIII do XXI wieku. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 180: 27-37.
- Boryczka J., Okołowicz W. 1964. Turbulencyjne rozprzestrzenianie się pyłów i innych zanieczyszczeń powietrza w różnych porach roku w zależności od charakteru podłoża ze szczególnym uwzględnieniem warunków miejskich. *Przegląd Geofizyczny IX (XVII)*, 2: 121-137.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Błażek E., Skrzypczuk J. 1998. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 11. Tendencje wiekowe klimatu miast w Europie. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-258.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Błażek E., Skrzypczuk J., 1999. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 13. Cykliczne zmiany klimatu miast w Europie. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-283.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Kicińska B., Żmudzka E. 1992. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 7. Zmiany wiekowe klimatu Polski. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-439.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B., Błażek E., Skrzypczuk J. 2000. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 14. Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-209.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Grzęda M. 2012. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 28. Stan zanieczyszczenia atmosfery w Warszawie i innych miastach Polski. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-470.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Wawer J., Grabowska K., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J. 2010. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 25. Zmiany klimatu Warszawy i innych miast Europy w XVII–XXI wieku. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-417.
- Burgmann R., Rosen P. A., Fielding E. J. 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 28: 169-209.
- CLC. 2012. *Corine Land Cover*. Retrieved from <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>.
- Dąbrowska-Zielińska K., Hościło A., Tomaszewska M., Kiryła W. 2015. Wstępna analiza zdjęć satelitarnych wykonana na potrzeby projektu *Life_adaptcity_pl* – przygotowanie strategii adaptacji do zmian klimatu miasta metropolitalnego przy wykorzystaniu mapy klimatycznej i partycypacji społecznej. IGiK, Warszawa (maszynopis).
- Fu P., Rich P. M. 2000. *The Solar Analyst 1.0 Manual*. USA: HEMI.
- Fu P., Rich P. M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture* 37, 1-3: 25-35.
- Gumiński R. 1950. Ważniejsze elementy klimatu rolniczego Polski południowo-wschodniej. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej* 3, 1: 57-113.
- Gumiński R. 1952. Bieg roczny występowania mgły w centralnej i wschodniej Polsce. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej* 3, 2a: 103-109.
- Kaczorowska Z. 1962. Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. *Prace Geograficzne IG PAN* 33: 1-112.
- Kaczorowska Z. 1967. Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1956–1960. *Przegląd Geofizyczny XII (XX)*, 3-4: 251-271.
- Kicińska B., Wawer J. 2005. Urban climate. W: M. Gutry-Korycka (red.) *Urban Sprawl Warsaw Agglomeration. Case study*. Warsaw University Press, Warszawa: 155-174.

- Klimat Wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952–2007. 2008. Materiały Zakładu Klimatologii WGSR UW na XII Piknik Naukowy Radia BIS, WGSR UW.
- Kopacz-Lembowicz M. 1978. Wpływ zieleni miejskiej na wielkość ochładzającą powietrza. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 26, Klimatologia 11*: 81-92.
- Kopacz-Lembowicz M. 1991a. Ogólne zasady cyrkulacji powietrza w strefie wielkomiejskiej. W: J. Skorupski, E. Ostaszewska, Z. Biernacki, M. Kopacz-Lembowicz – *Tereny otwarte w Warszawie – ocena roli w systemach ekologicznych, koncepcja układu i zasady zagospodarowania. cz. 2. Systemy wymiany i regeneracji powietrza w Warszawie*. Opracowanie dla Urzędu m.st. Warszawy wykonane w Instytucie Miasta w Warszawie: 2-16.
- Kopacz-Lembowicz M. 1991b. Wymiana powietrza w Warszawie. W: J. Skorupski, E. Ostaszewska, Z. Biernacki, M. Kopacz-Lembowicz – *Tereny otwarte w Warszawie – ocena roli w systemach ekologicznych, koncepcja układu i zasady zagospodarowania. cz. 2. Systemy wymiany i regeneracji powietrza w Warszawie*. Opracowanie dla Urzędu m.st. Warszawy wykonane w Instytucie Miasta w Warszawie: 17-28.
- Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Martyn D., Olszewski K. 1984. Wpływ zieleni miejskiej na klimat lokalny. W: H. Szczepanowska (red.) *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego*. PWN, Warszawa: 61-78.
- Kossowska U. 1970. Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy. Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW; skrót pracy: 1973. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 12, Klimatologia 7*: 141-185.
- Kossowska-Cezak U. 1977. Warunki termiczne Warszawy. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 22, Klimatologia 9*: 5-38.
- Kossowska-Cezak U. 1978. Wpływ dużego kompleksu zieleni miejskiej na warunki termiczno-wilgotnościowe (na przykładzie warszawskiego Ogrodu Zoologicznego). *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 26, Klimatologia 11*: 11-36.
- Kossowska-Cezak U. 1998. Wpływ rozwoju terytorialnego Warszawy na warunki termiczne. *Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica 3*: 51-57.
- Kossowska-Cezak U. 2002. Zmiany różnicy temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami Warszawy od 1933 do 2000 roku. *Przeegląd Geofizyczny XLVII*, 3-4: 203-209.
- Kossowska-Cezak U. 2005. Zmiany termicznych pór roku w Warszawie w okresie 1933–2004. *Przeegląd Geofizyczny L*, 3-4: 265-277.
- Kuchcik M. 2000. Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy. Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW: 1-208.
- Kulesza K., Żmudzka E., Leziak K. 2017. Modern thermal hazards in a big city – how to detect, analyse and assess them? The case of Warsaw, Poland. Cities and Climate Conference 2017, September 19th-21st, 2017, Potsdam, Germany. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam: 95.
- Lindner-Cendrowska K. 2012. Warunki odczuwalne na standardowej stacji meteorologicznej a bioklimat miejskich obszarów zabudowanych (na przykładzie Warszawy). W: K. Fortuniak, J. Jędruszkiewicz, M. Zieliński (red.) *Przestrzeń w badaniach geograficznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 95-102.
- Lindner-Cendrowska K. 2013. Assessment of bioclimatic conditions in cities for tourism and recreational purposes (A Warsaw case study). *Geographia Polonica 86*, 1: 55-66.
- Lindner-Cendrowska K., Błażejczyk K. 2018. Impact of selected personal factors on seasonal variability of recreationist weather perceptions and preferences in Warsaw (Poland). *International Journal of Biometeorology 62*, 1: 113-125.
- Martyn D. 1978. Wpływ śródmiejskiego parku na warunki termiczno-wilgotnościowe powietrza (na przykładzie Ogrodu Saskiego w Warszawie). *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 26, Klimatologia 11*: 37-80.
- Okołowicz W. 1961. Przyczynek do znajomości klimatu Warszawy. *Wiadomości Uzdrawiskowe VI*, 1-2: 163-169.
- Okołowicz W. 1962. Zachmurzenie Polski. *Prace Geograficzne IG PAN 34*: 9-107.
- Olszewski K. 1978. Rola trawników w kształtowaniu warunków termiczno-wilgotnościowych w mieście. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 26, Klimatologia 11*: 93-115.
- Rabczenko D., Wojtyniak B., Kuchcik M., Szymalski W., Seroka W., Żmudzka E. 2016. Związek umieralności mieszkańców Warszawy z wysoką temperaturą powietrza, w latach 2008–2013. Association between high temperature and mortality of Warsaw inhabitants, 2008-2013. *Przeegląd Epidemiologiczny 70*, 4: 629-640.
- Rich P. M., Dubayah R., Hetrick W. A., Saving S. C. 1994. Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*: 524-529.
- Stopa-Boryczka M. 1988. Air temperature field deformation under the influence of build-up area in Warsaw. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development 3*, 1: 133-144.
- Stopa-Boryczka M. 1992. Deformacja pól zmiennych meteorologicznych przez zabudowę w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne 11*: 39-73.

- Stopa-Boryczka M. (red.) 2003. Studies on the climate of Warsaw. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-208.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J. 1989. Wpływ czynników antropogenicznych na klimat lokalny Warszawy. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica* 24, 2: 49-66.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J. 2018. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 38-39. Postęp badań zmian klimatu Warszawy w ostatnich stuleciach (XVIII–XXI). Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa: 1-428.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Błażek E., Skrzypczuk J. 1995. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 9. Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-322.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J. 2010. Impact of build-up areas and housing estate vegetation on diversity of the local climate in Warsaw. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development* 14, 1: 121-134.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J. 2009. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 23. Klimat Warszawy i innych miast Polski. Studia porównawcze. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-383.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J. 2010. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 24. Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-333.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Grabowska K. 2011. Cykliczne zmiany miejskiej wyspy ciepła w Warszawie i ich przyczyny. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 409-416.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J. 2008. Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. t. 22. Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 1-332.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Błażek E., Kicińska B., Żmudzka E. 1994. The heat island in Warsaw and its effects. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development* 6, 1: 93-102.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Błażek E., Kicińska B., Żmudzka E. 1995. Antropogeniczne zmiany temperatury powietrza w Warszawie: pozytywne i negatywne skutki. Anthropogenic changes of the air temperature in Warsaw: positive and negative effects. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 169-179.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Boryczka J., Ryczywolska E., Górka A. 1982. Ocena klimatu lokalnego do projektu osiedla mieszkaniowego w Białołęce Dworskiej, *Człowiek i Środowisko* 6, 3-4: 335-349.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Mierzwiński B, Wawer J. 1986. Deformacja pól zmiennych meteorologicznych pod wpływem zabudowy. Materiały z I Sesji Naukowej Instytutu Nauk Fizycznogeograficznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa: 137-142.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Ryczywolska E., Wawer J. 1984. Badania wpływu zabudowy na klimat lokalny w Warszawie. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji nt. Klimat i bioklimat miast, Łódź, 22-24 listopada 1984 r. Uniwersytet Łódzki, Łódź: 29-35.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Mierzwiński B, Wawer J. 1991. Zależność pola temperatury powietrza od charakteru zabudowy. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 1213, Prace Instytutu Geograficznego, Seria A – Geografia Fizyczna* 5: 187-188.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J. 2001. Klimat Warszawy w pracach Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego. *Prace Geograficzne I GiPZ PAN* 180: 57-69.
- Wawer J. 1994. Cechy termiczne klimatu lokalnego Warszawy. Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW.
- Wawer J. 1995. Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 71-78.
- Wawer J. 1997. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 20: 145-197.
- Wawer J. 1999. Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej. *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica* 3: 45-50.
- Żmudzka E. 2008. Zmiany zachmurzenia w Warszawie w drugiej połowie XX wieku. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 165-177.
- Żmudzka E. 2010. Warunki nefologiczne aglomeracji warszawskiej. W: Barwiński M. (red.) *Obszary metropolitalne we współczesnym środowisku geograficznym, tom 2*. 58. Zjazd Polskiego Towarzystwa Geograficznego Łódź 2010. Oddział Łódzki PTG, Wydział Nauk Geograficznych UŁ, Łódź: 285-298.
- Żmudzka E. 2016. Zmienność czasowa i zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu na

- terenie Warszawy. Zakład Klimatologii WGSR UW, Warszawa (maszynopis).
- Żmudzka E. (red.) 2013. Wkład geografów Uniwersytetu Warszawskiego w badania środowiska przyrodniczego i społeczno-ekonomicznego miasta Warszawy i województwa mazowieckiego (2003–2013). WGSR UW, Warszawa: 1-108.
- Żmudzka E., Kossowska-Cezak U., Dobrowolska M. 2003. Circulation's Requirements of the Urban Heat Island Variations in Warsaw. 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: 163-166.
- Żmudzka E., Kulesza K., Lenartowicz M., Leziak K., Magnuszewski A. 2019. Assessment of modern hydro-meteorological hazards in a big city – identification for Warsaw. *Meteorological Applications*: 1-11, <https://doi.org/10.1002/met.1779>.

Summary

The aim of the article is to discuss the main research issues related to the climate of Warsaw, which are carried out in the Department of Climatology, Faculty of Geography and Regional Studies at the University of Warsaw as individual or team works and commissioned works and projects. The Chair of Climatology (currently Department of Climatology) at the University of Warsaw was established in 1951 and was one of the first units in the organizational structure of Polish universities established to conduct climatological research and for education in this area. Practically from the beginning, one of the most important research issues were those related to the climate of cities, mainly Warsaw. Among many aspects of research, one of the main is the city's influence on meteorological elements, including primarily on thermal, humid and wind conditions, as well as the formation of meteorological variables in the city area. Research is also carried out on the impact of the city on the feels-like conditions in various spatial scales as well as its possible improvement (e.g. ventilating the city) and the

aerosanitary state of the atmosphere. A large number of studies are works concerning the variability and long-term changes of particular elements (and their various characteristics) of the climate of Warsaw, and, especially in recent years, the works devoted to modern climatic threats.

In the research conducted in the Department of Climatology we use various source materials originating from the IMGW, and from the meteorological station of the Department of Climatology, which was established on Prof. W. Okołowicz's initiative on the main campus of the University of Warsaw, in downtown Warsaw.

The article cites some of the results of research, mainly regarding the urban heat island, its intensity in the diurnal, annual and long-term course, and UHI conditions. Some results of studies on climate diversification within the area of Warsaw in various spatial scales are highlighted, as well as its connections with land use, mainly with the character of buildings and green areas. Particular attention is paid to selected aspects of the aerosanitary and bioclimatic conditions' research. The results of research on contemporary climate changes in Warsaw are discussed. The most important works on the issues discussed are summarised.

The importance of measurements and observations performed as part of student exercises and master's and diploma theses in the study of Warsaw's climate is also pointed out.

The obtained results confirm the known regularities, but also specify them. They show the specificity of the Warsaw's climate resulting from its location, as well as the individual physiographic features and architectural layout of the city. Because of the expansion of urban areas, as well as population and building density increase, actions of key importance in Warsaw, especially in the context of the modern increase in air temperature, are aimed at reducing exposure to thermal stress and protection against hazards related to hydrometeorological extreme phenomena which occur mainly in the warm half-year.