



# atlas

WSPÓLZALEŻNOŚCI  
PARAMETRÓW  
METEOROLOGICZNYCH  
I GEOGRAFICZNYCH  
W POLSCE

**POSTĘP BADAŃ ZMIAN KLIMATU WARSZAWY  
W OSTATNICH STULECIACH (XVIII-XXI)**

**68 LAT  
KLIMATOLOGII  
W UNIWERSYTECIE WARSZAWSKIM**

**UNIVERSITY OF WARSAW  
FACULTY OF GEOGRAPHY AND REGIONAL STUDIES**

**MARIA STOPA-BORYCZKA , JERZY BORYCZKA**

**XXXVIII-XXXIX . THE ADVANCES IN THE RESEARCH ON  
CHANGES OF THE WARSAW CLIMATE IN THE LAST  
CENTURIES (XVIII-XXI)**

# **atlas**

**OF INTERDEPENDENCE  
OF METEOROLOGICAL  
AND GEOGRAPHICAL  
PARAMETERS  
IN POLAND**

**Warszawa 2018**

**UNIWERSYTET WARSZAWSKI  
WYDZIAŁ GEOGRAFII I STUDIÓW REGIONALNYCH**

**MARIA STOPA-BORYCZKA , JERZY BORYCZKA**

**XXXVIII-XXXIX. POSTĘP BADAŃ ZMIAN KLIMATU  
WARSZAWY W OSTATNICH STULECIACH  
(XVIII-XXI)**

# **atlas**

**WSPÓLZALEŻNOŚCI  
PARAMETRÓW  
METEOROLOGICZNYCH  
I GEOGRAFICZNYCH  
W POLSCE**

**Warszawa 2018**

Komitet Redakcyjny

Maria STOPA-BORYCZKA

Jerzy BORYCZKA

Jolanta WAWER

Władysław ŻAKOWSKI

Recenzent

Bohdan Mucha

Lwowski Uniwersytet im. Iwana Franki

Ukraina

© Copyright by Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW 2018

ISBN 978-83-63245-78-8

Druk i oprawa: Zakład Graficzny UW, zam. 1139/2017

## SPIS TREŚCI

I.	WPROWADZENIE	5
II.	WKŁAD ZAKŁADU KLIMATOLOGII W BADANIA KLIMATU WARSZAWY, Urszula KOSSOWSKA-CEZAK, Jolanta WAWER	7
III.	DEFORMACJA PÓL ZMIENNYCH METEOROLOGICZNYCH PRZEZ MIASTO NA PRZYKŁADZIE WARSZAWY	27
3.1.	Wpływ położenia geograficznego na klimat miast w Europie	27
3.2.	Deformacja pola temperatury przez czynniki lokalne	28
3.3.	Zmiany dobowe i roczne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie	29
3.4.	Zależność cyklu rocznego temperatury powietrza w Warszawie od aktywności Słońca	35
3.5.	Cykliczność i tendencje zmian miejskiej wyspy ciepła	36
3.6.	Prawdopodobieństwo występowania miejskiej wyspy ciepła	37
3.7.	Ważniejsze wyniki badań	39
IV.	KLIMAT WARSZAWY W PUBLIKACJACH ZAKŁADU KLIMATOLOGII UNIwersytetu Warszawskiego, Maria STOPA-BORYCZKA, Maria KOPACZ-LEMBOWICZ, Jolanta WAWER	53
V.	WPŁYW ZABUDOWY I ZIELENI OSIEDLOWEJ NA ZRÓŻNICOWANIE KLIMATU LOKALNEGO W WARSZAWIE	63
5.1.	Zróźnicowanie klimatu lokalnego Warszawy w miesiącach letnich (1994), Renata ROMAŃSKA	75
5.2.	Zróźnicowanie klimatu lokalnego Warszawy na profilu wschód-zachód, Dorota PRZYBYŁKOWSKA	84
5.3.	Dobowy przebieg warunków odczuwalnych w Warszawie, Katarzyna GULA	90
5.4.	Warunki odczucia termicznego w Warszawie, Robert WAKER	100
VI.	KLIMAT WARSZAWY I MIEJSCOWOŚCI STREFY PODMIEJSKIEJ	107
6.1.	Wpływ urbanizacji na warunki klimatyczne w Warszawie, Bożena KICIŃSKA, Jolanta WAWER	119
6.2.	Warunki nefologiczne aglomeracji warszawskiej, Elwira ŻMUDZKA	139
VII.	KLIMAT WARSZAWY I INNYCH MIAST POLSKI	149
7.1.	Wielookresowe zmiany temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779-1979, Bogumiła DĄBROWSKA	161
7.2.	Wielookresowe zmiany temperatury powietrza w Krakowie w latach 1826-1985 Konrad KLECHTA	169
7.3.	Wielookresowe zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1813-1980, Dorota DEBSKA	174
7.4.	Wielookresowe zmiany opadów atmosferycznych w Krakowie w latach 1850-1987 Katarzyna GRZĘDA	184
7.5.	Długookresowe zmiany temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie, Małgorzata TOMASIK	194
7.6.	Synchroniczne wahania temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w XIX-XX wieku, Mariusz TOMASZEWSKI	204
7.7.	Zmiany wiekowe temperatury powietrza w Polsce w zależności od erupcji wulkanicznych i aktywności Słońca, Robert DUMA	211
VIII.	ZMIANY KLIMATU WARSZAWY OD XVIII DO XXI WIEKU, Jerzy BORYCZKA	217
IX.	ZMIANY WIEKOWE KLIMATU POLSKI NA PRZYKŁADZIE WARSZAWY	227
9.1.	Prognozy cyrkulacji atmosferycznej: wschodniej ( $C_E$ ), zachodniej ( $C_W$ ) i południkowej (C) (wg klasyfikacji G. J. Wangenheima)	234
9.2.	Prognozy temperatury powietrza w Warszawie (1980-2100)	237
9.3.	Prognozy opadów atmosferycznych w Warszawie (1980-2100)	243

X.	PROGNOZY ZMIAN KLIMATU WARSZAWY	253
10.1.	Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Warszawy i ich uwarunkowania	253
10.2.	Okresowa zmienność opadów atmosferycznych w Warszawie	258
10.3.	Tendencje zmian klimatu Warszawy	261
10.4.	Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku	262
XI	OCENA PROGNOZ ZMIAN TEMPERATURY POWIETRZA W WARSZAWIE WEDŁUG DANYCH Z LAT 1779-1979, 1779-1998 (OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE) I OKĘCIA (1951-2016)	273
11.1.	Ocena prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1990 (Obserwatorium Astronomiczne) – t. XIV	273
11.2.	Ocena prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1998 (Obserwatorium Astronomiczne) – t. XVII, XIX i XX-XXI	281
XII	PROGNOZY ZMIAN OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W WARSZAWIE WEDŁUG DANYCH Z LAT 1813 -1990 (OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE) I ICH WERYFIKACJA	295
12.1	Prognozy zmian opadów atmosferycznych w Warszawie na lata 1990-2100 i ocena ich sprawdzalności	295
XIII.	NOWE PROGNOZY ZMIAN TEMPERATURY POWIETRZA W WARSZAWIE W XXI WIEKU WEDŁUG POMIARÓW Z LAT 1779-2015	305
13.1	Nowe prognozy zmian temperatury powietrza w Warszawie w kolejnych miesiącach w latach 2016-2100	306
13.2	Nowe prognozy zmian temperatury powietrza w Warszawie w porach roku i roku w latach 2016-2100	342
XIV	CYKLICZNE WAHANIA TEMPERATURY I OPADÓW W POLSCE W XIX-XXI WIEKU, Jerzy BORYCZKA, Maria STOPA-BORYCZKA	357
XV.	PROBLEMY BADAŃ WSPÓŁCZESNYCH ZMIAN KLIMATU ZIEMI	369
15.1	Zmiany wiekowe klimatu Europy z uwzględnieniem prognoz w XXI wieku i ich weryfikacja	369
15.2.	Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy	379
15.3.	Studies on the climate of Warsaw	408
15.4.	Klimat wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952-2007	411
XVI	PRACE MAGISTERSKIE DOTYCZĄCE KLIMATU WARSZAWY I OKOLIC WYKONANE W ZAKŁADZIE KLIMATOLOGII W LATACH 1954-2015	417
XVII	LITERATURA	425

## I. WPROWADZENIE

Prezentowany 38-39 tom *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* pt. *Postęp badań zmian klimatu Warszawy w ostatnich stuleciach (XVIII-XXI)* poświęcono głównie własnym wynikom badań klimatu Warszawy i okolic oraz ocenie dotychczasowych prognoz temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w XXI wieku.

W rozdziale II. *Wkład Zakładu Klimatologii w badania klimatu Warszawy* (U. Kossowska-Cezak, J. Wawer) podsumowano ponad 55-letnią pracę naukową w Zakładzie Klimatologii UW w zakresie badania zmian naturalnych i antropogenicznych klimatu miasta (głównie w Warszawie). Problemy badawcze dotyczyły zarówno ogólnych cech klimatu Warszawy, zróżnicowania między śródmieściem a okolicą zamieszką (podstawowych cech klimatu wielkomiejskiego) oraz badań mikroklimatycznych w wybranych częściach miasta. Wyniki różnorodnych badań są zawarte w pracach magisterskich i doktorskich, pracach zleconych i publikacjach.

Celem rozdziału III. *Deformacja pól zmiennych meteorologicznych przez miasto na przykładzie Warszawy* jest ocena wpływu położenia geograficznego na cechy termiczne miast w Europie – ze szczególnym uwzględnieniem Polski j. Jest nim też określenie zakresu deformacji pola temperatury powietrza w Polsce przez miasta na przykładzie Warszawy – miasta nizinnego. Dobrym narzędziem badań klimatu Europy okazały się modele statystyczne – równania hiperpłaszczyzn i wielomianów regresji czwartego stopnia względem trzech współrzędnych: szerokości  $\phi$  i długości geograficznej  $\lambda$  oraz wysokość nad poziomem morza  $H$ , które są jednocześnie czynnikami geograficznymi. Gradienty południkowe, równoleżnikowe i hipsometryczne wskazują, że w kształtowaniu klimatu miast (także największych) dominują czynniki naturalne.

Pomiary elementów meteorologicznych w obrębie miasta (w kilku punktach) i na jego peryferiach umożliwiły określenie zmian rocznych i dobowych miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. Określono deformację pola temperatury powietrza w skali całego miasta jak też jego fragmentów: o zabudowie zwartej, luźnej i zieleni parkowej

W rozdziale IV. *Klimat Warszawy w publikacjach Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego* (Stopa-Boryczka, Kopacz-Lembowicz, Wawer, 2001, Prace Geograficzne, nr 180) wykazano, że Warszawa na tle otoczenia wyróżnia się przede wszystkim zmniejszonym dopływem promieniowania, wyższą temperaturą powietrza (zwłaszcza minimalną) i dłuższym okresem bez przymrozków, mniejszą wilgotnością względną i większym niedosytem wilgotności powietrza, większym zachmurzeniem oraz mniejszą liczbą dni pogodnych, większymi sumami opadu atmosferycznego, mniejszą prędkością wiatru. Przyczyny swoistego klimatu miasta przejawiają się w wyniku oddziaływania takich czynników, jak: sztuczne powierzchnie czynne, konfiguracja budynków i ulic zmieniające wymianę ciepła, sztuczne źródła ciepła, zmiana bilansu wodnego, zanieczyszczenia powietrza.

Celem badań w rozdziale V. *Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie* jest określenie zakresu zróżnicowania warunków meteorologicznych i biometeorologicznych w mieście w zależności od charakteru zabudowy i zieleni w osiedlach mieszkaniowych oraz ich lokalizacji w Warszawie, ze szczególnym uwzględnieniem pory dnia i roku. Podano wyniki pomiarów zawarte w niektórych pracach magisterskich.

W rozdziale VI *Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej* określono cechy specyficzne klimatu i bioklimatu miejscowości podwarszawskich, w zależności od ich lokalizacji względem Warszawy. Podano też zasięg oddziaływania miasta na tereny otaczające.



Rozdział VII. *Klimat Warszawy i innych miast Polski* zawiera skróty wyników badań magisterskich w zakresie naturalnych i antropogenicznych zmian klimatu miast Polski. Ich celem jest określenie cykliczności i tendencji zmian klimatu miast Polski np. w pracy 7.2. *Wielookresowe zmiany temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779-1979* (Bogumiła Dąbrowska). W pracy zaś 7.8. *Zmiany wiekowe temperatury powietrza w Polsce w zależności od erupcji wulkanicznych i aktywności Słońca* (Robert Duma) wykazano, że największy spadek temperatury powietrza (o 2,6°C) wystąpił w Warszawie, w ziemie, po erupcji wulkanu Coseguina w 1835 roku. Podczas wzmożonej aktywności wulkanicznej (ponad 1000 DVI), stwierdzono, że pył wulkaniczny zawarty w atmosferze wpływa na średnią roczną temperaturę powietrza w Polsce (Warszawa, Kraków, Wrocław), a także w Anglii środkowej. Wykazano również synchronizację niektórych okresów (wyznaczonych metodą J. Boryczki sinusoid regresji) zmian klimatu (w Warszawie i Anglii środkowej), aktywności Słońca i erupcji wulkanicznych.

W rozdziale VIII. *Zmiany klimatu Warszawy od XVIII do XXI wieku* (Boryczka, Prace Geograficzne, nr 180, 2001) stwierdzono, że w Europie i Polsce coraz cieplejsze są przede wszystkim zimy: w Warszawie (1779-1990) o 1°C/100 lat, Krakowie (1826-1990) – o 1,4°C, Pradze (1771-1980) – o 0,25°C, Genewie (1768-1980) – o 0,5°C, Anglii Środkowej (1659-1973) – o 0,3°C.:

Celem rozdziału IX. *Zmiany wiekowe klimatu Polski. na przykładzie Warszawy (Atlas współzależności ..., t. VII)* jest określenie cyklicznych zmian i tendencji klimatu Polski na przykładzie Warszawy. Zbadano ciągi chronologiczne: aktywności Słońca (liczb Wolfa), cyrkulacji atmosferycznej (wschodniej, zachodniej, południkowej) wg klasyfikacji Wangerheima, temperatury powietrza (1779-1979) i opadów atmosferycznych (1813-1980) w Warszawie. Modelowano też naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu., wyodrębniając dwa składniki: naturalny – wypadkową  $f(t)$  interferencji cykli i antropogeniczny – część liniową  $at$  trendu czasowego. Ponadto, przedstawiono prognozy temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1979.

Duże znaczenie poznawcze mają wyniki badań w zakresie cykliczności, rekonstrukcji i prognoz zmian temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie oraz ocena ich sprawdzalności przedstawione w kolejnych rozdziałach: X. *Prognozy zmian klimatu Warszawy*, XI. *Ocena prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1979, 1779-1998 (Obserwatorium Astronomiczne) i Okęcia (1951-2016)*, XII. *Prognozy zmian opadów atmosferycznych w Warszawie według danych z lat 1813 -1990 (Obserwatorium Astronomiczne) i ich weryfikacja* oraz XIII. *Nowe prognozy zmian temperatury powietrza w Warszawie w XXI wieku według pomiarów z lat 1779-2015.*

Interesujące są również określenie zakresu zmian temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie i Krakowie w ostatnich dwóch stuleciach oraz prognoza – w rozdz. XIV. *Cykliczne wahania temperatury i opadów w Polsce w XIX-XXI wieku* (Jerzy Boryczka, Maria Stopa-Boryczka, Acta Agrophisica, vol.3, 2004) .

W rozdziale. XV. *Problemy badań współczesnych zmian klimatu Ziemi* przedstawiono ważniejsze wyniki badań zmian wiekowych klimatu Europy z uwzględnieniem prognoz w XXI wieku i ich weryfikacji. Omówiono też naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy, zamieszczając spis treści książki *Studies on the climate of Warsaw* oraz spis treści *Klimat wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952-2007* (Piknik 2008). Na końcu ( rozdz. XVI) podano wykaz prac magisterskich dotyczących klimatu Warszawy i okolic wykonanych w Zakładzie Klimatologii w latach 1954-2015.

## II. WKŁAD ZAKŁADU KLIMATOLOGII W BADANIA KLIMATU WARSZAWY\*

Urszula KOSSOWSKA-CEZAK, Jolanta WAWER

Pierwsze spostrzeżenia meteorologiczne w Polsce były wykonane w Warszawie w połowie XVII wieku; znane są również krótkie serie z XVIII wieku, mają one jednak wartość wyłącznie historyczną. Dłuższa, w pełni zachowana seria zaczyna się dopiero w roku 1779; były to pomiary prowadzone przez księdza J. F. Bystrzyckiego na zamku Królewskim (do 1799 r.). Kolejną wieloletnią serię – od roku 1803 do 1828 – zawdzięczamy profesorowi Liceum Warszawskiego A. Magierowi, który prowadził pomiary przy ul. Piwnej. W roku 1825 została uruchomiona stacja meteorologiczna przy Obserwatorium Astronomicznym w Alejach Ujazdowskich, czynna do dziś. Kolejna ważna seria pomiarów meteorologicznych w Warszawie pochodzi ze stacji przy Muzeum Rolnictwa i Przemysłu, przy ul. Krakowskie Przedmieście (obecnie Biblioteka Rolnicza), rozpoczęta w roku 1885. Na początku XX wieku i w okresie międzywojennym działało na terenie Warszawy przynajmniej kilkanaście stacji, większość z nich pracowała jednak bardzo krótko. Dopiero uruchomione w latach trzydziestych stacje na Okęciu i Bielanach pracują do naszych czasów (Lipska, 1986; Rojecki, 1956, 1968).

Jak widać z tego krótkiego przeglądu, istnieją dość bogate materiały obserwacyjne dotyczące klimatu Warszawy, rozumianej jednak tylko jako punkt geograficzny. Pierwszą charakterystyką tak pojmowanego klimatu Warszawy jest opracowanie W. Jastrzębowskiego *Karta meteorograficzna stolicy Królestwa Polskiego* z roku 1828, oparta na wynikach obserwacji A. Magiera. Opracowanie to obejmuje przebieg roczny temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności oraz wezbrań Wisły i długości dnia. W drugim wydaniu *Karty...* W. Jastrzębowski uwzględnił ponadto wyniki starszych obserwacji J.F. Bystrzyckiego.

Za pierwszą wzmiankę dotyczącą klimatu miejskiego Warszawy możemy uznać informację W. Gorczyńskiego (1916), opartą na porównaniu wyników temperatury na stacji Muzeum (śródmieście) i Obserwatorium Astronomiczne (wówczas peryferie), że temperatura średnia miesięczna w śródmieściu jest wyższa o ok. 1,5 °C w lecie i ok. 0,5 °C w zimie.

Przez długi czas jednak zagadnienia klimatu miejskiego Warszawy nie pojawiały się, natomiast rozszerzała się wiedza o ogólnych cechach jej klimatu. Należy tu zwłaszcza wymienić prace W. Gorczyńskiego (1911, 1913, 1915) poświęcone temperaturze i opadom. Gorczyńskiemu zawdzięczamy opracowanie jednolitej serii wartości średnich miesięcznych temperatury od roku 1779, z uzupełnieniem luki w latach 1800-1802. Seria ta w latach znacznie późniejszych stała się podstawą licznych opracowań dotyczących zmienności klimatu. Dużo miejsca poszczególnym elementom klimatu w Warszawie poświęcił też R. Merecki (1914) w swojej *Klimatologii ziem polskich*.

Po II wojnie światowej ukazały się prace dotyczące całej Polski, w których wiele miejsca zajmują dane liczbowe dotyczące Warszawy wraz z interpretacją wyników.

Przytoczyć tu można publikacje: W. Wiszniewskiego, R. Gumińskiego i L. Bartnickiego (1949), E. Stenza (1952), czy też R. Gumińskiego (1950). W publikacji *Ważniejsze elementy klimatu rolniczego Polski Południowo-Wschodniej* R. Gumiński podkreśla, że środowiska miejskie stanowią obszar o wyższej temperaturze powietrza w stosunku do terenów zamieszkanych dzięki działaniu dwóch lokalnych czynników, jakimi są: silniejsze nagrzewanie się domów i ulic niż gruntu pokrytego roślinnością oraz ciepła pochodzącego z ogrzewania

mieszkań. Duże znaczenie ma też silniej zmętniona atmosfera. Dzięki oddziaływaniu tych czynników miasto wykazuje wyższą temperaturę średnią i minimalną niż okolica oraz mniejszą liczbę dni przymrozkowych, mroźnych i bardzo mroźnych.

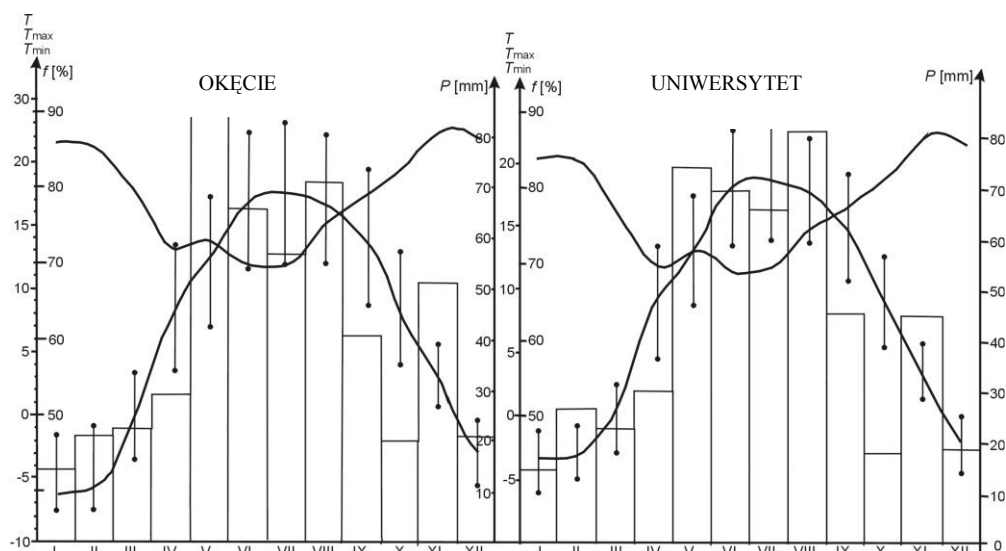
W utworzonej w 1951 r. Katedrze Klimatologii pod kierunkiem prof. R. Gumińskiego badania klimatu Warszawy nie zdołały się rozwinąć ze względu na rychłą śmierć profesora. Co prawda, jego współpracownica Z. Kaczorowska na wykładach kursowych z klimatologii wspominała o wynikach badań marszrutowych na terenie Warszawy, ale wyniki te zaginęły. Badania klimatu Warszawy zostały podjęte dopiero przez następnego kierownika Katedry, prof. W. Okołowicza. Były one realizowane przede wszystkim w cyklu prac magisterskich dotyczących klimatu placów, parków, Łasku Bielańskiego, otoczenia nowo wzniesionego Pałacu Kultury i Nauki i innych. Duże znaczenie miało też uruchomienie posterunku meteorologicznego na terenie Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1957. Od roku 1959 r. wyniki obserwacji tej stacji były przez wiele lat publikowane w postaci miesięcznych biuletynów, rozsyłanych do licznych odbiorców, a zawarte w biuletynach wyniki były wykorzystane w wielu pracach.

W początku lat sześćdziesiątych pracownicy Katedry opublikowali prace dotyczące całej Polski, w których każdorazowo była uwzględniana Warszawa, co przyczyniło się do dalszego poznania jej ogólnego klimatu. Są to prace dotyczące zachmurzenia W. Okołowicza (1962), opadów Z. Kaczorowskiej (1962) i burz M. Stopy (1962).

W 10-lecie powstania Katedry została zorganizowana sesja naukowa, na której m.in. była mowa o klimacie Warszawy, a wygłoszone referaty znalazły się później w pierwszym tomie „Prac i Studiów IGUW – Klimatologia”.

Do ważnych prac dotyczących wpływu miasta na klimat należy zaliczyć opracowanie Z. Kaczorowskiej dotyczące opadów w Warszawie w okresie 1956-1960 (1967). Na podstawie zagęszczonej sieci posterunków opadowych autorka stwierdziła, że najmniejszą ilością opadów wyróżnia się południowo-zachodnia część miasta, a największą – część zachodnia.

W końcu lat sześćdziesiątych powstało kilka prac J. Boryczki dotyczących rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych i jego zależności od warunków meteorologicznych, opartych na danych z Warszawy (1964, 1966, 1968, 1973). W pracy doktorskiej J. Boryczki 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 klimatologicznej Warszawa-Uniwersytet. Porównano teoretyczne rozkłady stężenia według wzorów różnych autorów. W porównaniach uwzględniono także przybliżone rozwiązania autora, otrzymane przy założeniu potęgowych pionowych profili prędkości wiatru i współczynników pionowej i poziomej wymiany masy. Porównano również wzory na opad pyłu w otoczeniu wysokich źródeł.



**Rys 1.** Przebieg roczny temperatury powietrza (średniej, maksymalnej i minimalnej), wilgotności względnej i opadów atmosferycznych na stacjach: Warszawa-Okęcie i Uniwersytet w latach 1951-1965

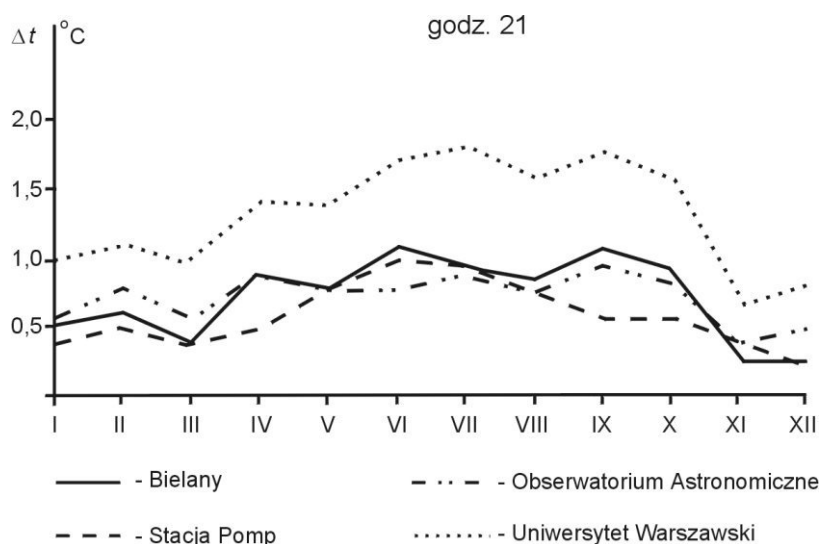
**Fig.1.** Yearly run of air temperature (average, maximum and minimum), relative humidity and precipitation in Okęcie and University (1951-1965)

Dalszy rozwój badań klimatu Warszawy wiązał się z pracami wykonywanymi na zlecenie różnych instytucji. W pierwszej kolejności należy tu wymienić pracę *Wpływ warunków pogodowych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza na terenie Warszawy* na zlecenie Biura Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej w Warszawie, ukończoną w 1970 r. Na potrzeby tej pracy zorganizowano na terenie miasta sieć obserwacyjną. Praca składała się z dwóch części, z których pierwsza obejmowała obszerną charakterystykę klimatu Warszawy, druga zaś dotyczyła właściwego tematu pracy, tzn. wpływu warunków pogodowych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń.

Kolejny krok w poznaniu klimatu Warszawy stanowiła praca doktorska U. Kossowskiej z 1971 r. *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy*. Praca zawierała charakterystykę klimatu na podstawie danych ze stacji PIHM z okresu 1951-1960 oraz dodatkowo od kwietnia 1966 do maja 1967 r., kiedy to przeprowadzono liczne pomiary wzdłuż profilu przez Warszawę. W pracy określono warunki formowania się miejskiej wyspy ciepła, a badania na profilach pozwoliły określić jej rozwój przy różnych typach pogody i przemieszczanie się w zależności od kierunku wiatru. Ponadto wydzielono strefy na terenie Warszawy o różnym stopniu oddziaływania zabudowy na klimat lokalny.

W latach następnych ukazały się liczne prace tej autorki dotyczące klimatu Warszawy, w tym zwłaszcza warunków termicznych. Należy tu wymienić *Przebieg roczny temperatury powietrza w Warszawie w różnych okresach obserwacyjnych* (1973), *Zmiany roczne różnic temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami Warszawy* (1976), czy *Warunki termiczne Warszawy* (1977). W drugiej z tych prac zostały porównane różnice temperatury między parami stacji Warszawa Obserwatorium i Okęcie (1951-1960) oraz Uniwersytet i Okęcie (1961-1970) (rys. 1). Na ich podstawie stwierdzono wyraźny wpływ otoczenia stacji na temperaturę, zmieniający się w ciągu

roku. W ostatniej pracy rozpatrzono warunki termiczne w 50-leciu 1921-1970 na stacji Obserwatorium oraz zróżnicowanie przestrzenne w okresie 1961-1965, kiedy to na terenie Warszawy działało 5 stacji, w tym też stacja śródmiejska Uniwersytet. Stwierdzono zależność warunków termicznych od położenia w stosunku do śródmieścia, zwartości zabudowy i rzeźby terenu (rys. 2). Ocieplający wpływ zabudowy miejskiej najsilniej zaznacza się latem i wczesną jesienią, najslabiej zaś w marcu i listopadzie. Zimą natomiast w mieście jest cieplej w ciągu całej doby niż na jego peryferiach, latem zaś najcieplej jest wieczorem i nocą, a w godzinach okołopołudniowych może być nawet chłodniej niż na peryferiach.



Rys. 2. Różnice temperatury powietrza między stacjami miejskimi a Okęciem o godz. 21 (Warszawa, 1961-1965)

Fig.2. Air temperature differences between the city stations and Okęcie in the observation period at 9.00 p.m. (Warsaw, 1961-1965)

Warto też wspomnieć o artykule tej autorki dotyczącym rzadko badanego aspektu klimatu miasta, jakim jest zachmurzenie (1978). Na podstawie wyników obserwacji ze stacji warszawskich z okresu 1961-1965 udało się stwierdzić wzrost wielkości zachmurzenia nad śródmieściem w okresie letnim w godzinach okołopołudniowych.

U. Kossowska-Cezak w następnych latach wielokrotnie podejmowała się opracowań dotyczących klimatu Warszawy, czego przykładem są publikacje dotyczące warunków termicznych (różnic temperatury między śródmieściem a peryferiami Warszawy (2002), dni charakterystycznych (2003), termicznych pór roku (2005), czy też uwarunkowań cyrkulacyjnych dużych zmian temperatury z dnia na dzień (2003). Interesującym, najnowszym opracowaniem autorki jest publikacja „Warunki termiczne i opadowe w Warszawie w świetle serii obserwacyjnej z Okęcia (1947-2008)”, gdzie scharakteryzowano warunki termiczne (chłodne, normalne i ciepłe) i opadowe miesiący (suche, normalne i mokre). Zestawienie najchłodniejszych i najcieplejszych miesięcy z wielolecia 1947-2008 oraz miesięcy o najniższych i najwyższych sumach opadu zawierają tabele 1-6.

**Tabela 1.** Najchłodniejsze miesiące (Warszawa Okęcie 1947-2008)**Table 1.** The coldest months

Miesiące		1	2	3	4	5	6	7
Grudzień December	t (°C)	-8,5	-6,6	-5,4	-5,4	-5,3	-4,6	-4,2
	rok,	1969	2002	1963	1996	1995	1962	2001
Styczeń January	t (°C)	-12,4	-12,3	-8,3	-8,3	-7,8	-7,7	-7,4
	rok	1963	1987	1985	2006	1947	1954	1972
Luty February	t (°C)	-12,2	-10,7	-9,6	-9,6	-9,2	-8,1	-5,9
	rok	1956	1947	1954	1986	1985	1963	1979
Marzec March	t (°C)	-3	-3	-2,9	-2,2	-2	-1,7	-1,7
	rok	1952	1958	1964	1987	1969	1962	1963
Kwiecień April	t (°C)	4,5	4,7	5	5,2	5,6	5,9	5,9
	rok	1958	1955	1997	1954	1982	1956	1981
Maj May	t (°C)	5,1	5,4	5,5	5,5	5,7	5,8	5,9
	rok	1955	1980	1958	1965	1987	1956	1964
Czerwiec June	t (°C)	14,4	14,6	14,7	14,8	15,2	15,2	15,2
	rok	1984	1962	1974	1985	1949	1976	2001
Lipiec July	t (°C)	15	15,7	15,8	16,1	16,2	16,2	16,3
	rok	1979	1984	1974	1961	1962	1978	1977
Sierpień August	t (°C)	15,2	15,5	15,7	15,8	15,9	16,1	16,2
	rok	1987	1956	1965	1976	1978	1977	1957
Wrzesień September	t (°C)	10,6	11,1	11,1	11,1	11,2	11,2	11,7
	rok	1996	1971	1978	1990	1977	1986	1959
Październik October	t (°C)	5,4	5,7	5,9	6,1	6,1	6,1	6,2
	rok	2003	1992	1947	1972	1979	1997	1973
Listopad November	t (°C)	-2,7	-1,9	-12	-0,6	-0,2	0,1	0,7
	rok	1993	1998	1965	1956	1995	1988	1985

W latach siedemdziesiątych podjęto badania klimatu mniejszych miast. Badaniami tymi objęto Sierpc, Maków Mazowiecki, później Płock. Badania, tak warszawskie jak i inne, były wielokrotnie poszerzane o aspekt bioklimatologiczny.

Kolejną, szeroko zakrojoną pracą zleconą była *Wpływ zieleni miejskiej na klimat w Warszawie*, stanowiąca fragment badań dotyczących wpływu zieleni na różne elementy środowiska miejskiego. Praca była prowadzona przez Instytut Gospodarki Komunalnej, w trakcie badań przekształcony w Instytut Kształtowania Środowiska. W związku z tą pracą również była zorganizowana sieć posterunków, a wyniki badań były nie tylko przekazane w postaci obszernego opracowania, ale były także przedstawione w licznych publikacjach. I tak, w tomie 11. „Prac i Studiów IGUW – Klimatologia” ukazały się artykuły dotyczące różnych obiektów zieleni autorstwa: M. Kopacz-Lembowicz, U. Kossowskiej-Cezak, D. Martyn i K. Olszewskiego (1978).

**Tabela 2** Najcieplejsze miesiące (Warszawa Okęcie 1947-2008)  
**Table 2.** The warmest months

Miesiące		1	2	3	4	5	6	7	8
Grudzień December	t (°C)	3,9	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2	2
	Rok,	2006	1971	1960	1954	1949	1974	1951	1993
Styczeń January	t (°C)	3,7	3,2	2,6	2	2	1,8	1,1	
	rok	2007	1983	1975	1989	1994	1990	2008	
Luty February	t (°C)	4,7	4	3,6	3,2	3,2	3,1	2,6	
	rok	1990	1989	2002	1995	1998	2008	1975	
Marzec March	t (°C)	7,2	6,6	5,5	5,4	5,2	5	4,6	
	rok	2007	1990	1989	1977	1961	1967	1974	
Kwiecień April	t (°C)	12,4	10,8	10,7	10,1	9,9	9,9	9,8	
	rok	2000	1952	1962	1948	1961	1998	1999	
Maj May	t (°C)	17,5	16,5	15,8	15,7	15,7	15,7	15,6	15,6
	rok	2002	1993	1947	1950	2003	2007	1963	1983
Czerwiec June	t (°C)	19,8	19,8	19,2	19	18,9	18,9	18,8	
	rok	1964	1979	1954	2007	1947	2008	1953	
Lipiec July	t (°C)	23,5	22	21,1	21	20,7	20,7	20,7	
	rok	2006	1994	2002	1959	1972	1999	2001	
Sierpień August	t (°C)	21,5	20,7	20,4	19,5	19,3	19,3	19,2	19,2
	rok	1992	2002	1951	1971	1982	2001	1955	1963
Wrzesień September	t (°C)	16,4	16,1	15,9	15,8	15,6	15,6	15,3	
	rok	1967	2006	2005	1947	1951	1975	1999	
Październik October	t (°C)	11,6	11,3	11	10,9	10,7	10,3	10,3	
	rok	2000	1967	1966	2001	2006	1984	1989	
Listopad November	t (°C)	6,4	6	5,9	5,9	5,8	5,4	5,2	5,2
	rok	1963	1996	2000	2006	1951	1969	1977	2008

Skrót wyników ukazał się w opracowaniu książkowym pt. *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego* pod red. B. Szczepanowskiej (PWN, 1984). Autorzy: M. Kopacz-Lembowicz, U. Kossowska-Cezak, D. Martyn, K. Olszewski podkreślili znaczącą rolę zieleni w kształtowaniu niekorzystnych cech klimatu miejskiego, a ponadto publikacja ta zawiera cenne praktyczne wskazówki dla urbanistów i planistów.

Ważnym przedsięwzięciem naukowym, już pod nowym kierownictwem prof. M. Stopy-Boryczki, był udział Zakładu Klimatologii w Programie Rządowym PR-5 *Ekofizjograficzne podstawy kształtowania środowiska osiedla Białoleka Dworska* (1979, 1980, 1982), założeniem którego było poprowadzenie różnorodnych badań, w tym klimatycznych, przed powstaniem osiedla, w trakcie jego budowy i po jej zakończeniu. Projektantem osiedla była prof. Skibniewska, autorka projektów osiedli Sady Żoliborskie i Szwoleżerów (gdzie przez trzy lata Zakład prowadził badania mikroklimatyczne). Niestety projekt zakończył się na pierwszym etapie. Mimo to praca ta przyniosła poważne osiągnięcie w postaci wypracowania metod opracowania materiałów klimatologicznych na potrzeby urbanistów przy projektowaniu osiedli mieszkaniowych.

**Tabela 3.** Miesiące o najniższych opadach (Warszawa Okęcie, 1947-2008)  
**Table 3.** The months with the lowest precipitation

Miesiące		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Grudzień December	o (mm)	3	6	7	8	9	9	11	11	
	rok	2002	1996	1984	1968	1953	1972	1948	1962	
Styczeń January	o (mm)	1	3	4	5	8	9	10	10	
	rok	1997	1963	1964	1996	1972	1969	1980	1990	
Luty February	o (mm)	0	5	5	5	6	7	9		
	rok	1976	1972	1982	2003	1975	1986	1994		
Marzec March	o (mm)	5	5	8	9	9	10	11	11	11
	rok	1974	1982	1953	1952	1954	1965	1950	1966	2003
Kwiecień April	o (mm)	4	5	5	11	12	14	14		
	rok	1976	1984	1988	1974	1964	1986	2000		
Maj May	o (mm)	8	16	19	23	25	26	27		
	rok	1947	1979	1953	1996	1992	1989	1964		
Czerwiec June	o (mm)	14	15	19	20	22	24	28	28	
	rok	2000	2006	1951	1994	2008	1977	1976	1979	
Lipiec July	o (mm)	15	17	20	22	23	23	23		
	rok	1982	1967	2006	1962	1952	1971	2002		
Sierpień August	o (mm)	4	19	22	22	23	24	25	25	25
	rok	1968	1959	1954	2005	1997	1955	1953	1970	1973
Wrzesień September	o (mm)	1	13	13	14	16	17	17		
	rok	1951	1947	1983	1982	1961	1988	2004		
Październik October	o (mm)	0	3	4	4	5	5	6		
	rok	1951	1949	1965	1988	2000	2005	1947		
Listopad November	o (mm)	12	13	13	16	17	18	19	19	
	rok	1954	1956	1975	1983	1959	1957	1951	1993	

Niezależnie od wymienionych szeroko zakrojonych prac Zakład prowadził liczne badania na terenie Warszawy, realizowane głównie w ramach studenckich ćwiczeń terenowych. Badania te obejmowały różne osiedla warszawskie, różniące się typem zabudowy, takie jak: Sady Żoliborskie, Osiedle Szwoleżerów, Stawki, Chomiczówka, Stegny, Służew nad Dolinką, fragmenty śródmieścia, osiedle willowe na Mokotowie (Wyględów). Przeprowadzono też badania profilowe przez miasto: północ-południe i wschód-zachód, badano też warunki mikroklimatyczne skarpy wiślanej. Wyniki tych badań były głównie opracowane w pracach magisterskich. Obiekty badawcze (profile i punkty) przedstawiono na rysunku 3.

Obok tych badań mikroklimatycznych, dotyczących coraz bardziej szczegółowej struktury klimatu miejskiego Warszawy, podejmowano również analizy statystyczne związków między poszczególnymi elementami (Stopa-Boryczka, 1988, 1992; Stopa-Boryczka, Boryczka, 1989). Najpełniejszy wyraz znalazły one w IX tomie *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, zatytułowanym *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy* autorstwa M. Stopy-Boryczki, J. Boryczki, E. Błażek i J. Skrzypczuka (1995). Autorzy zbadali m.in. zależność miejskiej wyspy ciepła od stanu atmosfery wykorzystując równania hiperpłaszczyzn regresji względem temperatury powietrza, zachmurzenia i prędkości wiatru. Istotne znaczenie mają też wyznaczone wartości progowe temperatury powietrza, prędkości wiatru i wielkości zachmurzenia, przy których deformacja pola temperatury w mieście jest największa.



**Tabela 4.** Miesiące o najwyższych opadach (Warszawa Okęcie, 1947-2008)  
**Table 4.** The months with the highest precipitation

Miesiące		1	2	3	4	5	6	7	8
Grudzień December	o (mm)	81	76	67	66	65	63	63	
	Rok,	2005	1954	1985	1993	1994	1955	1974	
Styczeń January	o (mm)	79	68	48	46	43	43	40	
	rok	2007	2008	1993	1948	1953	1968	1994	
Luty February	o (mm)	72	56	56	51	50	50	44	44
	rok	2002	1977	2004	1067	1952	1974	1947	1957
Marzec March	o (mm)	65	57	51	47	46	44	43	
	rok	1994	1967	1981	1983	1962	1988	1992	
Kwiecień April	o (mm)	93	85	76	64	61	57	56	56
	rok	1994	1970	1999	1967	2001	2004	1972	1998
Maj May	o (mm)	183	99	89	89	87	86	83	
	rok	1962	1984	1970	1994	1986	1968	1946	
Czerwiec June	o (mm)	142	134	126	122	114	114	114	
	rok	1981	2007	1987	1999	1948	1989	1998	
Lipiec July	o (mm)	214	193	159	139	133	122	120	
	rok	1997	1970	1960	2001	2003	1954	2000	
Sierpień August	o (mm)	179	165	141	138	121	109	105	
	rok	1977	2006	2002	1947	1972	1978	1948	
Wrzesień September	o (mm)	138	92	88	85	79	79	77	
	rok	1995	1984	1952	1972	1950	1992	1990	
Październik October	o (mm)	148	140	80	71	69	69	64	64
	rok	1974	1980	1956	1966	1952	1994	1970	2002
Listopad November	o (mm)	108	94	75	74	72	71	66	
	rok	1952	1970	1947	1966	1961	1964	2000	

Należy dodać, że we wspomnianej serii *Atlasu...* ukazały się też 4 tomy dotyczące zagadnień zakresu cykliczności i tendencji zmian klimatu oraz prognoz zmian klimatu w XXI wieku na przykładzie pomiarów w Warszawie. Tom VII *Atlasu...* dotyczy zmian wiekowych klimatu i ich uwarunkowań, tomy XI i XII – cykliczności i tendencji temperatury powietrza w Warszawie w miesiącach, sezonach, półroczach i roku, tom XIV zaś prognoz zmian klimatu Warszawy. Autorzy wnioskuje o naturalnych przyczynach ocieplenia klimatu o 0,6°/100 lat (głównie za przyczyną wzrostu aktywności Słońca) i przyczynach antropogenicznych, które szacuje się na około 0,2°C/100 lat. Ekstrapolując trendy czasowe temperatury i opadów opracowano unikatowe prognozy tendencji zmian klimatu w XXI wieku w Warszawie.

**Tabela 5.** Miesiące zimowe chłodne i suche oraz ciepłe i mokre (Warszawa Okęcie 1947-2008)

**Table 5.** The winter months: the cold-dry ones and the warm The -wet ones

Chłodne i suche Cold-dry			Ciepłe i mokre Warm-wet		
XII	I	II	XII	I	II
1946	1947	1954	1949	1948	1957
1948	1963	1963	1954	1983	1958
1952	1964	1965	1974	1993	1967
1961	1969	1969	1979	1994	1973
1962	1972	1976	1982	2002	1974
1963	1980	1978	1985	2005	1977
1968	1985	1986	1987	2007	1988
1984	1987	1991	1988	2008	1992
1995	1996	1996	1993		1995
1996	1997	2003	2003		1998
2001					2000
2002					2002
					2004

**Tabela 6.** Miesiące letnie chłodne i mokre oraz ciepłe i suche (Warszawa Okęcie 1947-2008)

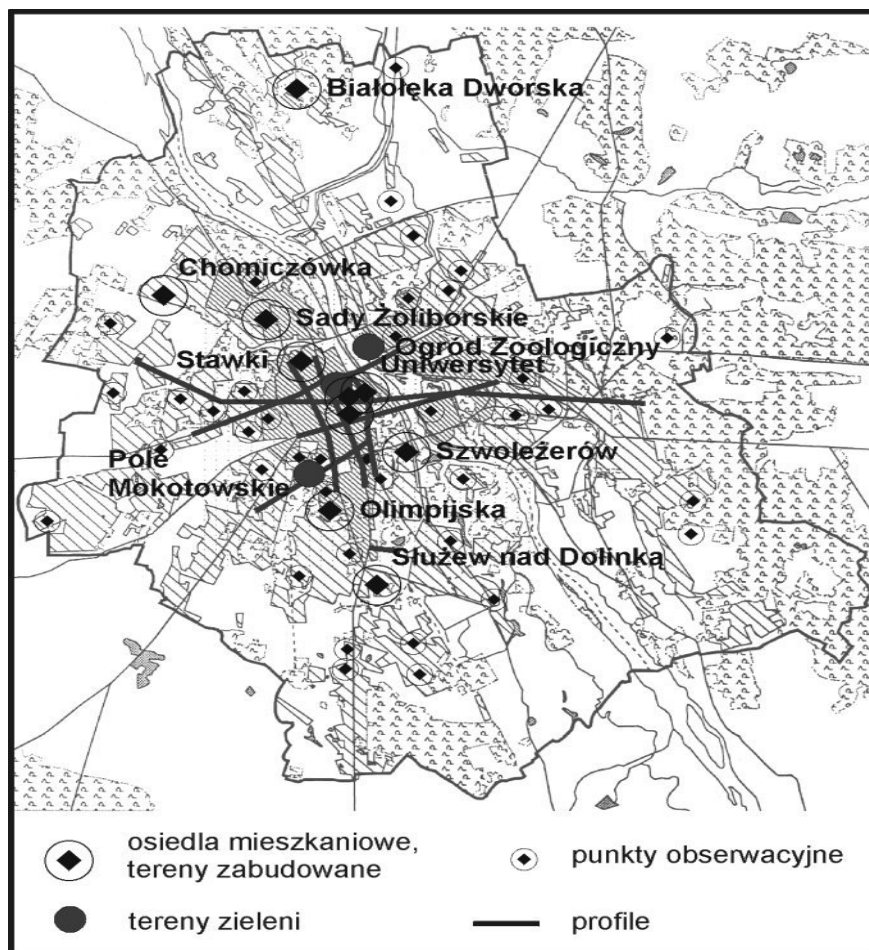
**Table 6.** The summer months: the cold-wet ones and the warm-dry ones

Chłodne i suche Cold-wet			Ciepłe i mokre Warm-dry		
VI	VII	VIII	VI	VII	VIII
1962	1954	1947	1951	1952	1951
1971	1960	1948	1954	1963	1955
1980	1965	1949	1957	1967	1959
1982	1970	1957	1977	1983	1968
1985	1974	1964	1979	1992	1971
1987	1978	1965	1992	1994	1992
1989	1979	1972	2000	1999	1977
1991	1980	1977	2003	2002	2001
	1984	1978	2006	2006	2004
	1996	1998	2008		
	1998				
	2000				

Kolejne tomy *Atlasu...* XVI (2002), XVII (2003) i XVIII (2004) dotyczą prognozowania klimatu Polski, mroźnych sezonów zimowych i upalnych letnich, czy też groźnych zjawisk pogodowych, zaś tomy *Atlasu...* XIX (2005) oraz XX i XXI (2007) klimatu Europy, ale są w nich zawarte informacje z Warszawy.

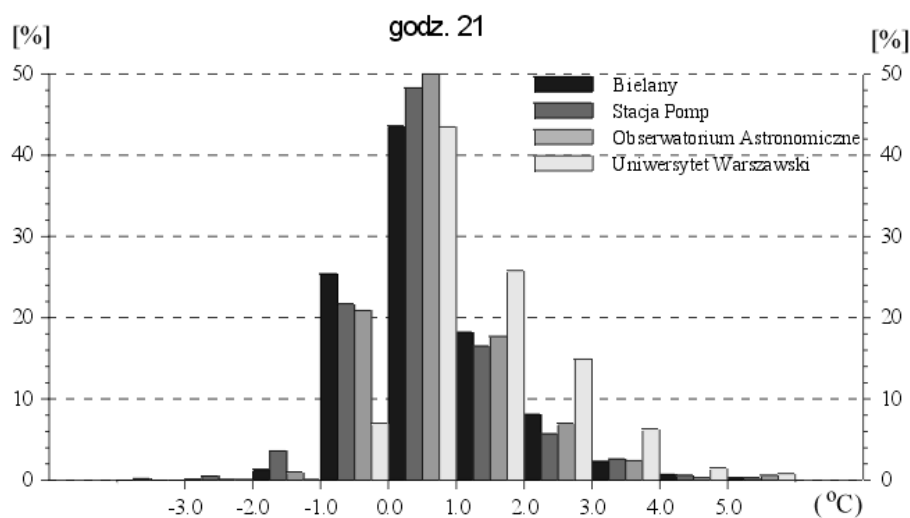
Tom XXII *Atlasu...*(2008) pt.: *Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie* stanowi syntezę różnorodnych badań klimatu Warszawy, prowadzonych najczęściej przez studentów w ramach ćwiczeń terenowych i przedstawioną w ich pracach magisterskich. Jest to już druga publikacja na ten temat bowiem pierwszą część opracowania stanowi publikacja *Klimat Wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952-2007*, wydana z okazji XII Pikniku Naukowego Polskiego Radia BIS i Centrum Nauki Kopernik (odbył się on w 2008 roku). Celem tej publikacji jest określenie wielkości zróżnicowania warunków meteorologicznych i biometeorologicznych w mieście ( w przebiegu dziennym i rocznym) w zależności od charakteru zabudowy i udziału oraz rodzaju zieleni w różnorodnych osiedlach mieszkaniowych oraz ich lokalizacji w Warszawie.

Tom XXIII *Atlasu ...* (2009) pt.: tytułem „*Klimat Warszawy i innych miast Polski, Studia porównawcze*” stanowi trzecią część syntezy badań w zakresie naturalnych zmian klimatu miast Polski. Celem pracy jest określenie cykliczności i tendencji zmian klimatu miast Polski na przykładzie Warszawy – miasta nizinnego i Krakowa – miasta położonego w Kotlinie Podkarpackiej. Oryginalną część pracy stanowi rozdział piąty pt. „*Przeszłość i teraźniejszość klimatu miast Polski w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego*”. Najważniejsze wyniki badań studenckich dotyczą problemów: długookresowe zmiany klimatu miast Polski, cyrkulacyjne uwarunkowania klimatu miast Polski, cechy solarne i termiczne klimatu miast Polski, cechy wilgotnościowe klimatu miast Polski i stan aerosanitarny miast w Polsce

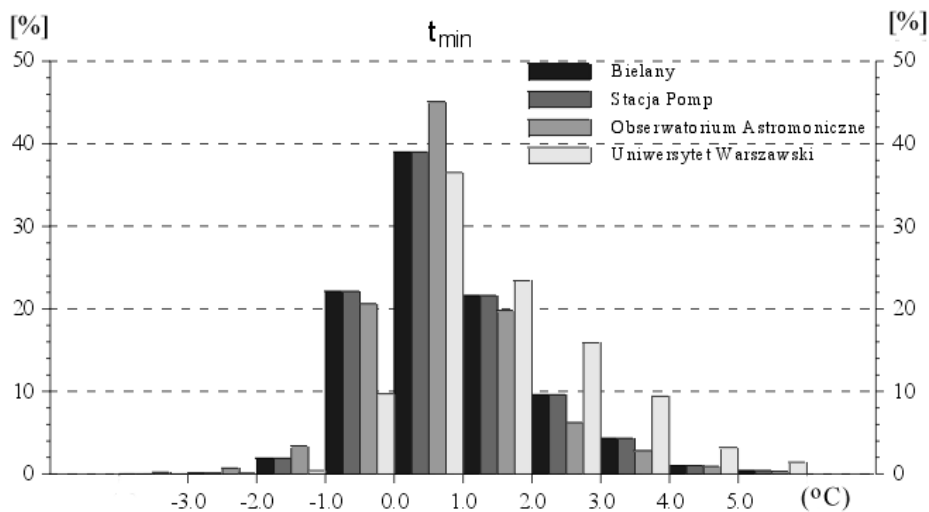


Rys. 3. Badania terenowe Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego

Fig. 3. Climatological field investigations in Warsaw made by the Department of Climatology of the Warsaw University



Rys. 4. Częstość różnic temperatury powietrza między stacjami miejskimi i Okęciem o godz. 21.00  
 Fig. 4. Frequency of differences of air temperature at 9.00 p.m. between the urban stations and Okęcie Station



Rys. 5. Częstość różnic temperatury minimalnej między stacjami miejskimi i Okęciem  
 Fig. 5 temperature between the urban stations and Okęcie Station. Frequency of differences of minimum air

Należy dodać że w okresie 1952-2010 wykonano w Zakładzie Klimatologii UW ponad 150 prac magisterskich i 33 prace licencjackie na temat klimatu Warszawy i okolic. Również w materiałach na Piknik Naukowy Radia BIS w 2002 roku ukazała się

publikacja pt.: *Zmiany klimatu i ich przyczyny. Hipotezy i fakty*, gdzie wiele miejsca poświęcono klimatowi miasta, w szczególności Warszawy.

Badania klimatu Warszawy we wszystkich aspektach: ogólnej charakterystyki, porównania klimatu śródmieścia i okolic oraz mikroklimatu wybranych fragmentów miasta znalazły odbicie nie tylko w pracach wykonywanych na zlecenie, pracach magisterskich, ale także w licznych publikacjach. Przede wszystkim należy tu wymienić „Prace i Studia IG UW” i ich kontynuację „Prace i Studia Geograficzne”; od pierwszego zeszytu były tu zamieszczane artykuły dotyczące badań klimatu Warszawy, m.in. U. Kossowskiej-Cezak, J. Boryczki, M. Stopy-Boryczki, D. Martyn, K. Olszewskiego, M. Kopacz-Lembowicz, J. Wawer i innych, a 11. tom „Prac i Studiów Geograficznych” był w całości poświęcony badaniom klimatu Warszawy. W kolejnym 20. tomie został zamieszczony obszerny wyciąg z pracy doktorskiej J. Wawer, dotyczącej miejskiej wyspy ciepła w Warszawie (1997).

Autorka na podstawie codziennych danych z lat 1961-1965 (jedyny okres, kiedy na terenie Warszawy działało pięć stacji meteorologicznych), a także 1976-1980 przedstawiła zmiany roczne miejskiej wyspy ciepła i jej zależność od warunków pogodowych (prędkości i kierunku wiatru, zachmurzenia, sytuacji synoptycznej) (rys. 4, 5). Cenną częścią pracy jest charakterystyka zmian dobowych miejskiej wyspy ciepła (cogodzinnych różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami na podstawie termogramów) w porach roku. W pracy podano terminy powstawania wyspy ciepła, jej zaniku i maksymalnej intensywności, wartości tempa nagrzewania i ochładzania się terenów miejskich i peryferyjnych (tab.7).

**Tabela 7.** Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła w porach roku w Warszawie  
**Table 7.** Characteristics of the urban heat island in individual season of the year in Warsaw

Sezon	Termin pojawiania się wyspy (godz.)	Termin występowania maksimum (godz.)	Termin słabnięcia wyspy (godz.)	$\Delta T$ (°C) w ciągu dnia	Skrajne wartości $\Delta T$ (°C)
Zima	16-18	21-24	6-7	> 0	9-11
Wiosna	17-18	ok. 24	7-8	$\leq 0$	9
Lato	18-20	22-24	6-8	< 0	8
Jesień	16-18	21-1	6-9	< 0	8

Maksymalna intensywność wyspy ciepła, rzędu 8°C, może się zdarzyć w każdej porze roku, ale z największym prawdopodobieństwem zimą (nawet do 10,8°C), w czasie mroźnej, bezchmurnej i bezwietrznej pogody antycyklonalnej.

Tematyka klimatu miejskiego pojawia się także w wydawnictwie obcojęzycznym „Miscellanea Geographica”, przygotowywanym co dwa lata na konferencje Międzynarodowej Unii Geograficznej. Tu m.in. został zamieszczony artykuł M. Stopy-Boryczki i współautorów (1986) *Deformation of fields of meteorological elements under the influence of buildings* oraz liczne artykuły pracowników Zakładu: M. Stopy-Boryczki (1988, 1998), U. Kossowskiej-Cezak (1988, 1996, 2000, 2002, 2004, 2006), J. Wawer (1992, 1996, 1998), B. Mierzwińskiego (1986), czy też artykuły zbiorowe kilku autorów: M. Stopy-Boryczki, M. Kopacz-Lembowicz, J. Wawer (2002) na temat klimatu Warszawy na podstawie badań Zakładu Klimatologii, czy też wpływu Oscylacji

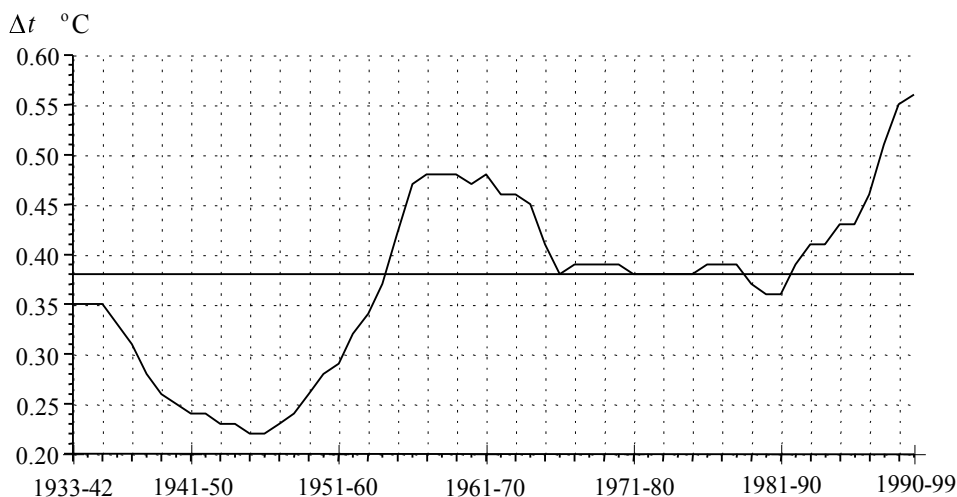
Północnoatlantyckiej na klimat Warszawy i Lwowa - J. Boryczki, B. Muchy, M. Stopy-Boryczki, J. Wawer (2006).

Na szczególną uwagę zasługuje publikacja książkowa na temat klimatu Warszawy, wydana w języku angielskim przez wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego pt.: *Studies on the climate of Warsaw* (2003, editor. M. Stopa-Boryczka), gdzie opublikowano 15 artykułów dotyczących zarówno długookresowych i cyklicznych zmian klimatu, rocznych i dobowych zmian wybranych elementów: temperatury powietrza, burz, okresu wegetacyjnego, kwasowości opadów czy też wpływu zieleni miejskiej i zabudowy na klimat lokalny czy też warunków biometeorologicznych i aerosanitarnych wpływających niekorzystnie na zdrowie i umieralność mieszkańców Warszawy.

Badania klimatu miasta prowadzone w Zakładzie Klimatologii znajdują także odbicie w czynnym udziale w cyklicznych konferencjach „Klimat i bioklimat miast”, organizowanych przez Uniwersytet Łódzki od 1984 roku. Na I konferencji pracownicy Zakładu przedstawili zbiorczy referat z dotychczasowymi wynikami badań klimatu Warszawy pt.: *Badania wpływu zabudowy na klimat lokalny w Warszawie* (M. Stopa-Boryczka i inni, 1984). Na kolejnej konferencji, która odbyła się w 1992 r., przedstawiono trzy referaty: zbiorowy (Stopa-Boryczka i inni, 1995) na temat *Antropogeniczne zmiany temperatury powietrza w Warszawie*, J. Wawer *Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła* (1995) i U. Kossowskiej-Cezak *Lato 1992 r. w Polsce na tle sezonów letnich ostatnich 120 lat*. Na kolejnej, trzeciej już konferencji w 1997 r. U. Kossowska-Cezak przedstawiła referat pt.: *Wpływ rozwoju terytorialnego Warszawy na warunki termiczne*, w którym poruszyła zagadnienie zaniku miejskiej wyspy ciepła po zniszczeniach wojennych (rys. 6). Natomiast J. Wawer przedstawiła referat na temat *Zależność miejskiej wyspy ciepła od typów cyrkulacji atmosferycznej* (U. Kossowska-Cezak, 1999; J. Wawer, 1999). Obie autorki zaprezentowały też prace na sesji posterowej.

Czwarta konferencja z cyklu „Klimat i bioklimat miast” odbyła się w grudniu 2007 roku. Na konferencji tej przedstawiono dwa opracowania z Zakładu Klimatologii UW: E. Żmudzkiej pt.: *Zmiany zachmurzenia w Warszawie w drugiej połowie XX wieku*, oraz J. Wawer i D. Demendeckiego pt.: *Dom pasywny w klimacie Polski*.

Cztery lata wcześniej w Łodzi odbyła się międzynarodowa konferencja organizowana pod egidą Międzynarodowej Asocjacji Klimatologii Miejskiej, gdzie zaprezentowano poster „*Circulation requirement of the Urban heat island variations In Warsaw*” trojga autorów E. Żmudzkiej, U. Kossowskiej-Cezak i M. Dobrowolskiej (2003).



**Rys. 6.** Przebieg różnicy temperatury średniej rocznej między stacjami Warszawa Obserwatorium Astronomiczne i Okęcie w okresie 1933-1999 (średnie konsekwentne 10-letnie)

**Fig. 6.** The differences of air temperature between Astronomical Observatory and Okęcie in the period 1933-1999 (10-years running means)

Podsumowując ponad 55-letnią pracę Zakładu Klimatologii UW w zakresie badania klimatu miasta należy stwierdzić, że problematyka ta była cały czas obecna i skupiała się głównie – co jest całkowicie zrozumiałe – na Warszawie. Zaznaczyła się przy tym charakterystyczna ewolucja tematyki badawczej: od poznania ogólnych cech klimatu Warszawy, poprzez badanie zróżnicowania między śródmieściem a okolicą zamieszką, a więc podstawowych cech klimatu wielkomiejskiego, aż do badań mikroklimatycznych w wybranych częściach miasta. Wyniki tak różnorodnych badań, dotychczas rozproszone w pracach magisterskich i doktorskich, w pracach zleconych i publikacjach, stanowią bogaty materiał do monografii klimatu Warszawy, której podjęcie stanowi poważne wyzwanie dla Zakładu Klimatologii.

### Literatura

*Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, Wyd. UW, Warszawa:

- t. VII, (1992), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, B. Kicińska, E. Żmudzka, *Zmiany wiekowe klimatu Polski*.
- t. IX, (1995), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy*.
- t. XI, (1997), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Tendencje wiekowe klimatu miast w Europie*.
- t. XII, (1999), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, M. Wągrowaska, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Ochłodzenia i ocieplenia klimatu miast w Europie*.
- t. XIII, (1999), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Cykliczne zmiany klimatu miast Europy*.

- t. XIV, (2000 ), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, H. Lorenc, B. Kicińska, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku.*
- t. XVI, (2002), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, D. Baranowski, K. Grabowska, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Prognozy zmian klimatu Polaki.*
- t. XVII, (2003), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, D. Baranowski, M. Kirschenstein, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Mroźne zimy i upalne lata w Polsce,*
- t. XVIII, (2004), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, K. Grabowska, J. Wawer, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Groźne zjawiska pogodowe w Polsce.*
- t. XIX, (2005), J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, K. Pietras, Sz. Bujak, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Cechy termiczne klimatu Europy.*
- t. XX – XXI, (2007), M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, Sz. Bujak, R. Cebulski, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Cykliczne zmiany klimatu Europy w ostatnim tysiącleciu według danych dendrologicznych..*
- t. XXII, (2008), M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, J. Wawer, M. Osowiec, E. Błażek, J. Skrzypczuk, *Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie,*
- t. XXIII. (2009), M. Stopa-Boryczka., J. Boryczka , J. Wawer , M. Dobrowolska , M. Osowiec , E. Błażek , J. Skrzypczuk , *Klimat Warszawy i innych miast Polski, Studia porównawcze, Wyd. UW, Warszawa.*
- Boryczka J., 1964, *Zależność klimatycznego wskaźnika turbulencyjnego od wysokości przy różnym stopniu zachmurzenia* , Przegląd Geofizyczny, t. IX, z.3-4.
- Boryczka J., Okołowicz W., 1964, *Turbulencyjne rozprzestrzenianie się pyłów i innych zanieczyszczeń powietrza różnych porach roku w zależności od charakteru podłoża ze szczególnym uwzględnieniem warunków miejskich,* Przegląd Geofizyczny, t. IX, z.2.
- Boryczka J., 1966, *Próba klasyfikacji warunków miejskich dla celów klimatologicznych,* Przegląd Geograficzny, t. XXXVIII, z.1.
- Boryczka J. 1968, *Turbulencyjna transformacja pyłu i gazów w atmosferze ziemskiej i jej zależność od parametrów klimatologicznych* , maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW.
- Boryczka J., 1973, *Turbulencyjna transformacja pyłu i gazów w atmosferze ziemskiej i jej zależność od parametrów klimatologicznych (skróty pracy doktorskiej),* Dokumentacja Geograficzna, z.6.
- Boryczka J. 1992, *Naturalny i antropogeniczny trend temperatury i opadów w Warszawie,* Prace i Studia Geograficzne, t.11.
- Boryczka J., 2001, *Zmiany klimatu Warszawy w XVIII-XX wieku i ich prognozy,* Prace Geograficzne IG PAN nr 180.
- Boryczka J., Mucha B., Stopa-Boryczka M., Wawer J., 2006, *The influence of the North Atlantic Oscillations (NAO) on the climate of Warsaw and Lviv,* Miscellanea Geographica , t.12.
- Ekofizjograficzne podstawy kształtowania środowiska osiedla w Białolece Dworskiej,* 1979, Opracowanie dla Instytutu Kształtowania środowiska w Warszawie w ramach tematu rządowego PR-5 pt.: *Charakterystyka i ocena warunków klimatycznych Białoleki Dworskiej oraz określenie wpływu zabudowy na ich zmiany,* (autorzy: M. Stopa-Boryczka, M. Kopcz-Lembowicz, A. Górka, E. Ryczywolska, J. Boryczka, J. Wawer).
- Gorczyński W., 1911, *O zmienności opadu wg obserwacji warszawskich od 1803 r.,* Warszawa.
- Gorczyński W., Wierzbicka W., 1915, *O wartościach średnich zachmurzenia w Polsce,* Warszawa.
- Gorczyński W., Kosińska S., 1916, *O temperaturze powietrza w Polsce,* Warszawa.
- Gumiński R., 1950, *Ważniejsze elementy klimatu rolniczego Polski Południowo-Wschodniej,* „Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej”, t. III, z. 1, Warszawa.
- Jastrzębowski W., 1828, *Karta meteorograficzna stolicy Królestwa Polskiego obraz głównych dostrzeżeń w Warszawie 1803-1828,* Warszawa.
- Jastrzębowski W., 1829, *Wypadki dostrzeżeń meteorologicznych czynionych w Warszawie blisko pół wieku tj. od 1779 do 1828 r. włącznie przez księdza Bystrzyckiego, Antoniego Magiera i innych,* Warszawa.
- Kaczorowska Z., 1962, *Opady w Polsce w przekroju wieloletnim,* „Prace Geograficzne IG PAN”, z. 33, Warszawa.



- Kaczorowska Z., 1967, *Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1956-1960*, „Przegląd Geofizyczny”, t. 12, z.3-4.
- Klimat Wielkiej Warszawy w pracach magisterskich Zakładu Klimatologii w latach 1952-2007*, pod red. K. Błażejczyka, M. Stopy-Boryczki, J. Boryczki, J. Wawer, W. Żakowskiego, 2008, Materiały Zakładu Klimatologii WGiSR UW na XII Piknik Naukowy Radia BIS. WGiSR UW.
- Kossowska U., 1971, *Osobliwości klimatu wielkomięjskiego na przykładzie Warszawy*, maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii.
- Kossowska U., 1973, *Przebieg roczny temperatury powietrza w Warszawie w różnych okresach obserwacyjnych*, Prace i Studia IG UW seria Klimatologia, z.7.
- Kossowska-Cezak U., 1976, *Zmiany roczne różnic temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami Warszawy*, Prace i Studia IG UW, seria Klimatologia, z.8.
- Kossowska-Cezak U., 1977, *Warunki termiczne Warszawy*, Prace i Studia IG UW, seria Klimatologia, z.9.
- Kossowska-Cezak U., 1978, *Próba określenia wpływu zabudowy miejskiej na wielkość zachmurzenia (na przykładzie Warszawy)*, Prace i Studia IG UW, seria Klimatologia z.10.
- Kossowska-Cezak U., 1995, *Lato w Polsce na tle sezonów letnich ostatnich 120 lat*, Materiały konferencji „Klimat i bioklimat miast”. Wyd. U.Ł.
- Kossowska-Cezak U., 1996, *Montly thermal and precipitation anomalies In Warsaw and their causes*, Miscellanea Geographica, t.7.
- Kossowska-Cezak U., 1998, *Wpływ rozwoju terytorialnego Warszawy na warunki termiczne*, Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica, 3.
- Kossowska-Cezak U., 2000, *The differences of temperature between the peripheries of Warsaw In years 1933-1998*, Miscellanea Geographica, t.9.
- Kossowska-Cezak U., 2002, *Anomalous months and seasons in terms of temperature and precipitation in the second half of the 20<sup>th</sup> century in Warsaw*, Miscellanea Geographica, t.10.
- Kossowska-Cezak U., 2002, *Zmiany różnicy temperatury powietrza między śródmieściem a peryferiami Warszawy od 1933 do 2000 roku*, Przegląd Geofizyczny, t.47, nr 3-4.
- Kossowska-Cezak U., 2003a, *Uwarunkowania cyrkulacyjne dużych zmian temperatury z dnia na dzień w Warszawie*, [w:] Postępy w badaniach klimatycznych i bioklimatycznych. Prace Geograficzne, nr 188.
- Kossowska-Cezak U., 2003b, *Współczesne ocieplenie a liczba dni charakterystycznych*, Balneologia Polska, t.45, nr 1-2.
- Kossowska-Cezak U., 2004, *Contemporary warming and daily values of temperature (on example of Warsaw)*, Miscellanea Geographica, t.11.
- Kossowska-Cezak U., 2005, *Zmiany termicznych pór roku w Warszawie w okresie 1933-2004*. Przegląd Geofizyczny, t.50, nr 3-4.
- Kossowska-Cezak U., 2009, *Warunki termiczne i opadowe w Warszawie w świetle serii obserwacyjnej z Okęcia (1947 – 2008)*. Zeszyty Naukowe Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin w Warszawie, Seria Geograficzno-Turystyczna, nr 2.
- Lipska A., 1986, *Instrumentalne obserwacje meteorologiczne w Warszawie*, „Przegląd Geofizyczny”, t. 31, z.1.
- Merecki R., 1914, *Klimatologia ziem polskich*, Warszawa.
- Okolowicz W., 1962, *Zachmurzenie Polski*, „Prace Geograficzne IG PAN”, z. 34, Warszawa.
- Prace i Studia IG UW, seria Klimatologia, z.1. (1964), z.4. (1970), z.5. (1970), z.7. (1973), z.9. (1977), z.10. (1978), z.11. (1978), Wyd. UW.
- Prace i Studia Geograficzne, t.11. (1992), t.20. (1997), Wyd. UW.
- Rojecki A., 1956, *O najdawniejszych obserwacjach meteorologicznych na ziemiach Polski*, „Przegląd Geofizyczny”, R. I, z. 3-4.
- Rojecki A., 1968, *O obserwacjach meteorologicznych w Warszawie w wieku XVII-XIX*, „Przegląd Geofizyczny”, t. XIII, z. 1,
- Stopa M., 1962, *Burze w Polsce*, Prace Geograficzne IG PAN, z. 34, Warszawa.

- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Boryczka J., Ryczywolska E., 1980, *Zasady sporządzania i wykorzystania dokumentacji klimatologicznej na potrzeby projektowania osiedli mieszkaniowych*, Opracowanie w ramach tematu rządowego PR – 5 dla Instytutu Kształtowania Środowiska w Warszawie.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Ryczywolska E., 1980, *Wpływ zabudowy na zróżnicowanie warunków mikroklimatycznych osiedli mieszkaniowych*, Opracowanie dla Instytutu Kształtowania Środowiska w Warszawie.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Boryczka J., Ryczywolska E., Górka A., 1982, *Ocena klimatu lokalnego do projektu osiedla w Białoleśce Dworskiej*, Człowiek i Środowisko, t. 6, z. 3-4.
- Stopa-Boryczka M., J. Boryczka., 1984, *The multiperiodical changes of air temperature In Warsaw*, Miscellanea Geographica, t.1.
- 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 „Klimat i bioklimat miast”, Łódź.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Mierzwiński B., Wawer J., 1986, *Deformacja pól elementów meteorologicznych pod wpływem zabudowy*, Materiały I Sesji naukowej INFG, Warszawa.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Mierzwiński B., Wawer J., 1986, *Deformation of fields of meteorological elements under the influence of buildings*, Miscellanea Geographica, t.2.
- Stopa-Boryczka M., 1988, *Air temperature field deformation under the influence of build-up area in Warsaw*, Miscellanea Geographica, t.3.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., 1989, *Wpływ czynników antropogenicznych na klimat lokalny Warszawy*, Acta Universitatis Carolinae, Geographica, XXIV 2.
- Stopa-Boryczka M., 1992, *Z badań klimatu Warszawy Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego*, Prace i Studia Geograficzne, t.11.
- Stopa-Boryczka M., 1992, *Deformacja pól zmiennych meteorologicznych przez zabudowę w Warszawie*, Prace i Studia Geograficzne, t.11.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Błażek E., Kicińska B., Żmudzka E., 1995, *Antropogeniczne zmiany temperatury powietrza w Warszawie – pozytywne i negatywne skutki*, Materiały II Konferencji „Klimat i bioklimat miast”, Łódź.
- Stopa-Boryczka M., 1998, *On thermal characteristic analysis of city climates*, Miscellanea Geographica, t.8.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J., 2001, *Klimat Warszawy w pracach Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN nr 180.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J., 2002, *The climate of Warsaw In the research conducted At the Department of Climatology of Warsaw University*, Miscellanea Geographica t.10.
- Studies on the climate of Warsaw*, pod. red. M. Stopy-Boryczki, 2003, WGiSR UW.
- Wawer J., 1992, *Zależność różnic temperatury powietrza między miastem i otoczeniem od pory dnia*, Prace i Studia Geograficzne, t. 11.
- Wawer J., 1995, *Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie*, Klimat i bioklimat miast pod red. K. Kłysika, Łódź.
- Wawer J., 1996, *The rate of heating and cooling of air In town and outside of it*, Miscellanea Geographica, t.7.
- Wawer J., 1997, *Częstość miejskiej wyspy ciepła w Warszawie*, Materiały III Ogólnopolskiej konferencji „Klimat i bioklimat miast”, Łódź.
- Wawer J., 1997, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie*, Prace i Studia Geograficzne, t.20.
- Wawer J., 1999, *Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3.
- Wawer J. Demendecki D., 2008, *Dom pasywny w klimacie Polski*, Klimat i bioklimat miast, pod red. K. Kłysika, J. Wibig, K. Fortuniaka, Wyd. UŁ, Łódź.

- Wiszniewski W., Gumiński R., Bartnicki L., 1949, *Przyczynki do klimatologii Polski*, „Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej”, t. I, z. 5.
- Wpływ warunków pogodowych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń na terenie Warszawy*, 1970, Maszynopis pracy wykonanej na zlecenie Biura Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej.
- Zmiany klimatu i ich przyczyny. Hipotezy i fakty*, pod red. M. Stopy-Boryczki, J. Boryczki, 2002, Materiały Zakładu Klimatologii WGiSR UW na VI Piknik Naukowy Radia BIS. WGiSR UW.
- Żmudzka E., 2008, *Zmiany zachmurzenia w Warszawie w drugiej połowie XX wieku* Klimat i bioklimat miast, pod red. K. Kłysika, J. Wibig, K. Fortuniaka, Wyd. UŁ, Łódź.
- Żmudzka E., Kossowska-Cezak U., Dobrowolska M., 2003, *Circulation requirement of the Urban heat island variations in Warsaw*, International Conference on Urban Climate, Wyd. UŁ, Łódź.

*Urszula Kossowska-Cezak, Jolanta Wawer*

**THE CONTRIBUTION OF THE DEPARTMENT OF CLIMATOLOGY  
TO THE STUDY OF THE CLIMATE OF WARSAW**

SUMMARY

The beginnings of the research on the urban climate in the Department of Climatology are associated with the start of functioning in 1957 of the downtown Climatological Station, located within the central campus of the University of Warsaw.

The studies from the domain of urban climate, done during the 50 years of existence of the Department, concern mainly the climate of Warsaw. These studies can be classified into:

- publications devoted to various elements of climate of Poland, in which Warsaw was also accounted for (W. Okołowicz, Z. Kaczorowska, M. Stopa),
- Master's Theses devoted to various fragments of town or to various elements of climate in Warsaw,
- doctoral dissertations devoted to various problems related to the climate of Warsaw (J. Boryczka, U. Kossowska, J. Wawer),
- work done at the orders from various institutions, such as transport of air pollution, influence of urban green spaces on climate, eco-physiographic foundations for environmental engineering at the housing estate Białoleka Dworska (elaborated by the entire team of the Department of Climatology),
- book publications including statistical analyses of relations between the particular elements of climate in Warsaw and of the secular climate changes together with its cyclical character (J. Boryczka, M. Stopa-Boryczka, and others),
- papers published in various journals, mainly in “*Prace i Studia IG UW*” and in “*Prace i Studia Geograficzne*”, concerning many different problems related to the climate of Warsaw.

During 55 years an evolution of the research domain could be observed: from cognition of the primary features of the climate of Warsaw, through the study of the differentiation between the centre and the suburban zone, to the micro-climatic studies and the theoretical-statistical elaborates. The results of the thus diversified research projects, dispersed until now among the both published and unpublished reports, make up a rich material for a detailed monograph of the climate of Warsaw.

\* *50 lat działalności naukowej i dydaktycznej Zakładu Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego (1951-2000)*. *Prace i Studia Geograficzne*, t. 28, Warszawa, 2001 (o takim samym tytule – uzupełniony)

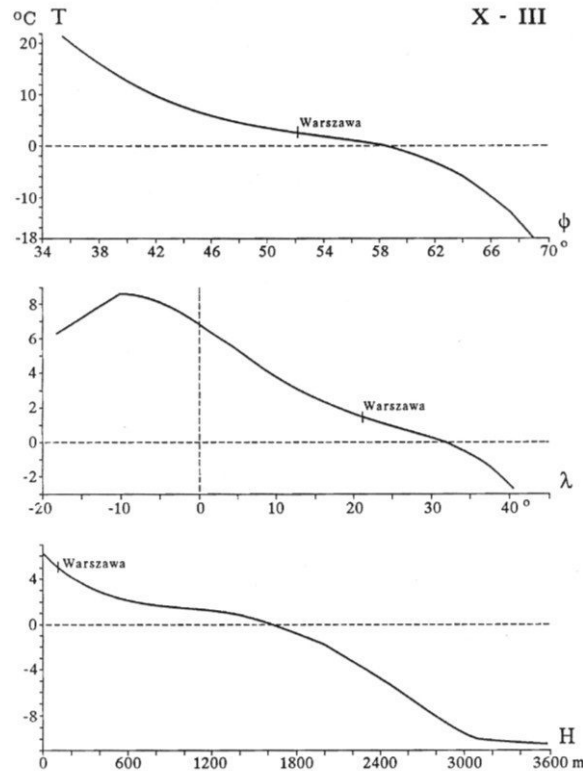
\* Kossowska-Cezak U., Wawer J., 2010, *Wkład Zakładu Klimatologii w badania klimatu Warszawy*, [w:] *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XXIV, *Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej* (Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Wyd. UW, s.13-30 (przedruk)

### III. DEFORMACJA PÓL ZMIENNYCH METEOROLOGICZNYCH PRZEZ MIASTO NA PRZYKŁADZIE WARSZAWY

#### 3.1. Wpływ położenia geograficznego na klimat miast w Europie

Dotychczasowe wyniki badań w zakresie wpływu czynników geograficznych na klimat przyczyniły się głównie do poznania cech termicznych klimatu miast Europy, a zwłaszcza Polski. Najważniejszym obiektem badań była i jest nadal Warszawa.

Na uwagę zasługuje ocena wpływu położenia geograficznego na cechy termiczne miast w Europie – ze szczególnym uwzględnieniem Polski na podstawie profili składowych pola temperatury powietrza (rys. 1):



**Rys. 1.** Profile temperatury powietrza w Europie: południkowy  $T(\varphi)$ , równoleżnikowy  $T(\lambda)$ , hipsometryczny  $T(H)$  (1931-1960, X-III)

**Fig. 1.** Profiles of gradients of air temperature in Europe: longitudinal  $T(\varphi)$ , latitudinal  $T(\lambda)$ , hipsometric  $T(H)$  (1931-1960, X-III)

Z modeli statystycznych wielkoskalowych (Europa) i średnio skalowych (Polska) wynika, że w kształtowaniu klimatu miast (także największych) dominują czynniki naturalne: szerokość geograficzna – warunkująca strefowość klimatu, odległość od Oceanu Atlantyckiego (ocieplający wpływ w zimie mas powietrza polarnego morskiego) i wysokość n.p.m. Strefowość klimatu jest głównie deformowana przez Ocean Atlantycki i góry. W miastach „nizinnych” Europy Zachodniej dominuje oddziaływanie Oceanu Atlantyckiego na pole temperatury powietrza, a w Europie Wschodniej – wpływ lądu Azji. Pole temperatury po-

wietrza w miastach położonych na południe i na północ od nizin europejskich jest głównie zdeformowane przez wysokość n.p.m. Najbardziej go deformują kotliny śródgórskie w Alpach, Karpatach, Sudetach (Stopa-Boryczka, Boryczka i in., 1984).

Z modeli symulujących zmienność przestrzenną temperatury powietrza w Europie wynika też znaczący wpływ czynników antropogenicznych na kształtowanie klimatu miast. Różnice temperatury powietrza między zmierzonymi i obliczonymi z wielomianów regresji 4 stopnia względem czynników geograficznych  $T = f(\varphi, \lambda, H)$  świadczą o dość dużej roli powierzchni sztucznych – głównie w dużych miastach. W przypadku Warszawy ta różnica jest rzędu  $1^{\circ}\text{C}$ , mimo że wyróżnia się jako cieplejsza Nizina Mazowiecka.

### 3.2. Deformacja pola temperatury przez czynniki lokalne

Dobrym narzędziem badań klimatu Europy okazały się modele statystyczne trójwymiarowe pola temperatury powietrza. Są nimi wielomiany regresji czwartego stopnia względem trzech współrzędnych kartezjańskich: szerokość geograficzna  $\varphi$ , długość geograficzna  $\lambda$  i wysokość nad poziomem morza  $H$ , które spełniają jednocześnie rolę czynników geograficznych.

Wielomiany regresji czwartego stopnia  $T = f(\Phi, \Lambda, H)$  – względem trzech współrzędnych położenia – szerokości i długości geograficznej  $\Phi, \Lambda$  (w setkach km) i wysokości nad poziomem morza  $H$  (hm) wyjaśniają prawie 98% wariacji temperatury powietrza.

Miarą wpływu czynników lokalnych: mniejszych form rzeźby terenu, ekspozycji względem Słońca czy też czynników antropogenicznych na pole temperatury powietrza w poszczególnych punktach  $(\Phi_i, \Lambda_i, H_i)$  Europy są reszty wielomianowe  $\varepsilon_i$ . Zmierzona wartość temperatury  $T_i$  jest sumą: obliczonej z wielomianu regresji  $f(\Phi_i, \Lambda_i, H_i)$  i różnicy  $\varepsilon_i$ :

$$T_i = f(\Phi_i, \Lambda_i, H_i) + \varepsilon_i$$

W przypadku wielomianu regresji czwartego stopnia, pole temperatury powietrza jest opisane za pomocą  $N = 34$  parametrów – współczynników regresji  $a_1, \dots, a_N$  (wg najmniejszych kwadratów). Te 34 parametrów nie wystarcza jednak by opisać wszystkie lokalne oddziaływania podłoża (np. kotliny śródgórskie, szczyty górskie, zbiorniki wodne, większe miasta).

Istnieje zatem oprócz składnika deterministycznego  $f(\Phi_i, \Lambda_i, H_i)$  tzw. trendu przestrzennego jeszcze składnik losowy  $\varepsilon_i$ , (nieokreślony). Reszty  $\varepsilon_i$  mają w populacji rozkład zbliżony do gaussowskiego o parametrach  $0, \delta$ , gdzie  $\delta$  – jest błędem standardowym.

Ekstremalne wartości różnic  $\varepsilon_i$  ( $\varepsilon_i < 0$  lub  $\varepsilon_i > 0$ ) wskazują miejsca na obszarze Europy, w których najsilniej oddziałują czynniki lokalne na pole temperatury powietrza. Reszty  $\varepsilon_i$  są największe (pod względem wartości bezwzględnej) w zimie. Wtedy przy małej insolacji (zanikającej strefowości) pole temperatury powietrza najbardziej zależy od wklęsłych i wypukłych form terenu, nachylenia zboczy. Wartości izarytm  $\varepsilon_i = \text{const.}$  w zimie zmieniają się od  $\varepsilon_i = -2,5^{\circ}\text{C}$  w górach do  $\varepsilon_i = 1,5^{\circ}\text{C}$  na nizinach północnej Europy (Stopa-Boryczka, Boryczka, 1994).

W lecie przy dużej insolacji, pole temperatury powietrza jest silnie skorelowane z szerokością geograficzną, długością geograficzną (odległością od Oceanu Atlantycznego) i wysokością n.p.m. Mniej ono zależy od rzeźby terenu – ekspozycji zboczy. Na nizinach i wyżynach dominują izarytmy  $\varepsilon_i = -0,5^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon_i = 0,0^{\circ}\text{C}$  i  $\varepsilon_i = 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Pole temperatury powietrza deformowane jest również przez duże miasta ze względu na tzw. miejską wyspę ciepła. Wynika to głównie z dodatkowej akumulacji ciepła w dzień przez zabudowę (zwiększoną powierzchnię czynną). Duże miasta położone na nizinach cechują się na ogół dodatnimi resztami wielomianowymi ( $\varepsilon_i > 0$ ).

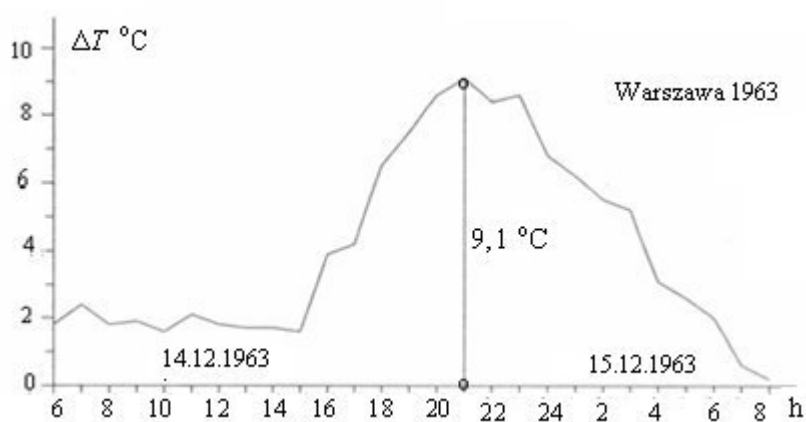
Przyrosty lub spadki temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) w mieście dostarczają informacji o tempie nagrzewania i wychładzania miasta, tj. o tendencji zmian  $a = \frac{\partial T}{\partial t}$  w stosunku do terenów niezabudowanych. Tereny o gęstej zabudowie (śródmiejskie) cechują się powolniejszym tempem nagrzewania i wychładzania niż peryferyjne, zwłaszcza w miesiącach letnich

Ilościowym wskaźnikiem nadwyżki energii cieplnej w Warszawie jest wyższa temperatura powietrza w odniesieniu do terenów otaczających miasto. „Intensywność” miejskiej wyspy ciepła w Warszawie określa różnica temperatury powietrza  $\Delta T = T_m - T_o > 0$  między miastem ( $T_m$ ) a peryferiami ( $T_o$ ), która cechuje się cyklicznymi wahaniami dobowymi i rocznymi oraz wieloletnimi. Zjawisko to nie jest stabilne, lecz cechuje się dużą zmiennością zarówno w cyklu dobowym, jak też rocznym – zależnie od stanu atmosfery. Miejska wyspa ciepła w Warszawie cechuje się nawet trendem czasowym – wiekowym.

Zakres deformacji pola temperatury powietrza przez miasto w zależności od pory doby, roku i warunków pogodowych przedstawiono na przykładzie Warszawy – miasta nizinnego, ( $\varphi = 52,1^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 21,0^\circ\text{E}$ ,  $H = 106$  m n.p.m.). Materiały źródłowe pochodzą głównie ze śródmiejskiej Stacji Meteorologicznej „Uniwersytet” Zakładu Klimatologii UW, działającej od 1956 r. Wyniki badań odniesiono do danych z peryferyjnej stacji synoptycznej „Okęcie”.

### 3.3. Zmiany dobowe i roczne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie

Wyspa ciepła w Warszawie tj. różnica temperatury powietrza ( $\Delta T = T_m - T_o > 0$ ) między miastem ( $T_m$ ) a peryferiami ( $T_o$ ) cechuje się periodycznymi wahaniami – dobowymi i rocznymi oraz wieloletnimi. Istotne jest poznanie dobowych zmian różnic  $\Delta T$  i wyznaczenie terminów pojawiania się wyspy ciepła, występowania maksimum jej intensywności oraz czasu jej zaniku. Największe różnice temperatury powietrza między miastem i peryferiami ( $\Delta T > 0$ ) występują wieczorem i nocą, a najmniejsze w południe (rys. 2).



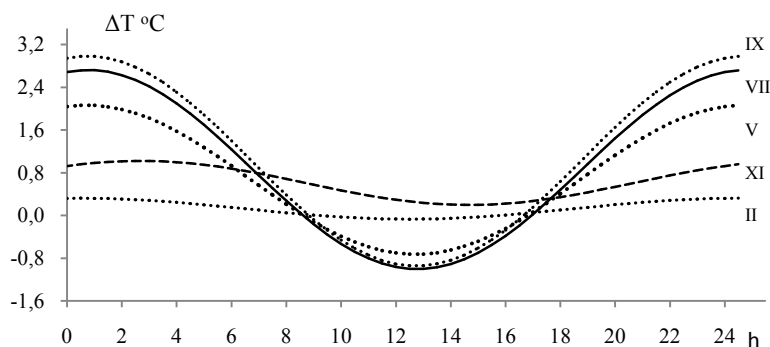
Rys. 2. Przebieg dobowy miejskiej wyspy ciepła ( $\Delta T > 0$ ) w Warszawie (1963)  
 Fig. 2. Diurnal changes of intensity of heat Island in Warsaw (1963)

Przebiegi dobowe miejskiej wyspy ciepła w Warszawie opisano równaniami sinusoid regresji o częstotliwości  $\omega = \frac{2\pi}{24}$ , gdzie  $R$  – współczynniki korelacji  $R$ ,  $F_{obl}$  – wartości testu Fishera-Snedecora  $F_{obl}$  (tab. 1). Minima sinusoid cyklu dobowego różnic  $\Delta T$  występują w godzinach południowych, a minima – w nocy (rys. 3).

**Tabela 1.** Zmiany dobowe intensywności śródmiejskiej wyspy ciepła w Warszawie ( $\Delta T$ ) (1963)

**Table 1.** Diurnal changes of intensity of „heat island” ( $\Delta T$ ) at Warsaw (1963)

		$R$	$F_{obl}$
II	$\Delta T=0,125+0,196\sin(\omega t+1,444)$	0,738	12,5
V	$\Delta T=0,667+1,305\sin(\omega t+1,386)$	0,911	51,3
VII	$\Delta T=0,858+1,862\sin(\omega t+1,368)$	0,914	52,9
IX	$\Delta T=1,017+1,963\sin(\omega t+1,377)$	0,960	125,2
XI	$\Delta T=0,608+0,413\sin(\omega t+0,871)$	0,837	24,7



**Rys. 3.** Zmiany dobowe intensywności śródmiejskiej wyspy ciepła w Warszawie ( $\Delta T$ ) (1969)

**Fig. 3.** Diurnal changes of intensity of „heat island” ( $\Delta T$ ) at Warsaw (1969)

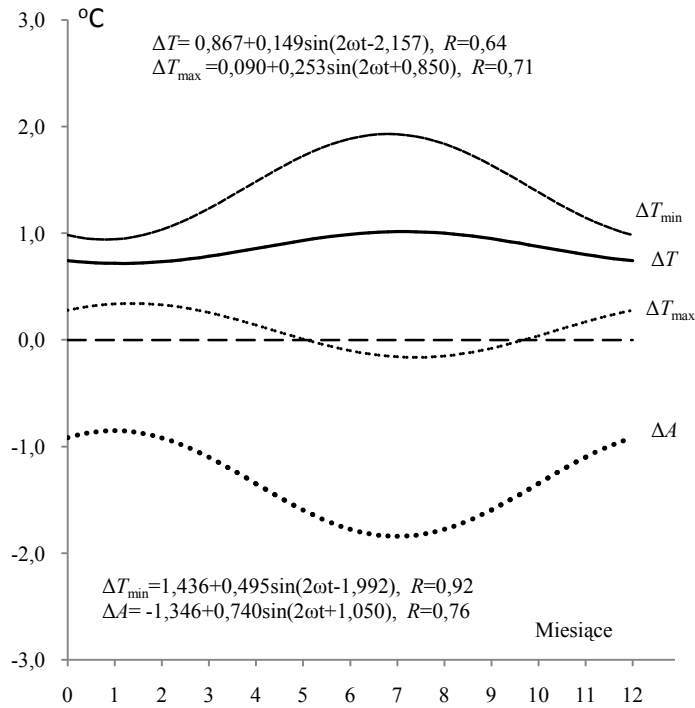
W przebiegu rocznym, różnice  $\Delta T$  są największe w lecie (w lipcu – ponad 2 °C), a najmniejsze w zimie (rys. 4-5).

Przebiegi roczne różnic temperatury powietrza (dobowego minimum  $T_{min}$ ) w Warszawie w latach 1951-2000 w różnych typach zabudowy opisują równania sinusoid regresji o częstotliwości  $\omega = 2\pi/12$ , gdzie  $R$  – współczynnik korelacji (tab. 2.i wykresy – rys. 4).

**Tabela 2.** Równania sinusoid rocznych zmian różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami w Warszawie w latach 1951-1965 (dobowe minimum  $\Delta T_{min}$ )

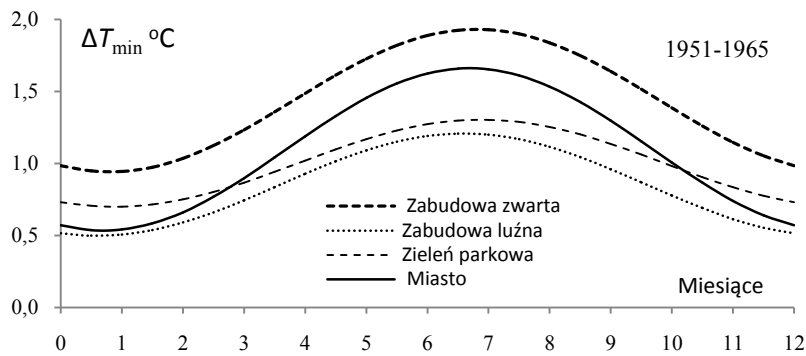
**Table 2.** Equations of sinusoids of annual changes in air temperature differences between center of the town and its peripheries in Warsaw the years 1951-1965 (daily minimum  $\Delta T_{min}$ )

		$R$
Zabudowa zwarta	$\Delta T_{min}=1.436+0.495\sin(\omega/t-1.992)$	0.82
Zabudowa luźna	$\Delta T_{min}=0.852+0.355\sin(\omega/t-1.880)$	0.78
Zieleń parkowa	$\Delta T_{min}=1.001+0.302\sin(\omega/t-2.031)$	0.80
Miasto	$\Delta T_{min}=1.097+0.564\sin(\omega/t-1.933)$	0.64



**Rys. 4.** Zmiany roczne różnic temperatury powietrza: średniej rocznej ( $\Delta T$ ), maksimum ( $\Delta T_{\max}$ ), minimum ( $\Delta T_{\min}$ ) i dobowej amplitudy ( $\Delta A$ ) między miastem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie)

**Fig. 4.** The annual changes of the differences of air temperature: of the daily average ( $\Delta T$ ), maximum temperature ( $\Delta T_{\max}$ ), minimum temperature ( $\Delta T_{\min}$ ) and daily amplitude ( $\Delta A$ ) between the town (University) and its peripheries (Okęcie) (1961-1965)

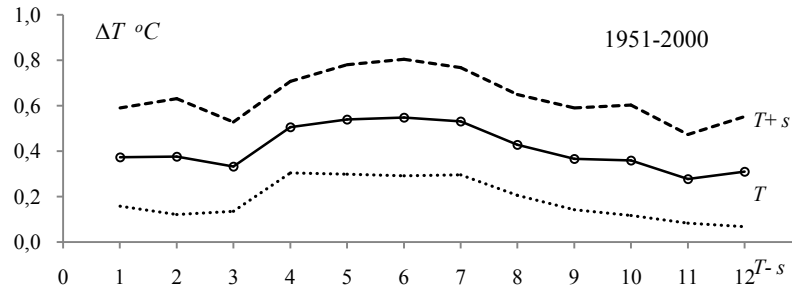


**Rys. 5.** Przebieg roczny różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami w Warszawie w latach 1951-1965 (dobowe minimum  $\Delta T_{\min}$ )

**Fig. 5.** Annual changes of air temperature differences between center of the town and its peripheries in Warsaw, in the years 1951-1965 (daily minimum  $\Delta T_{\min}$ )



Przebieg zaś roczny różnic temperatury powietrza  $\Delta T$  między miastem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie ( $T$  – średnia,  $s$  – odchylenie standardowe) w latach 1951-2000 przedstawiono na rys. 6.

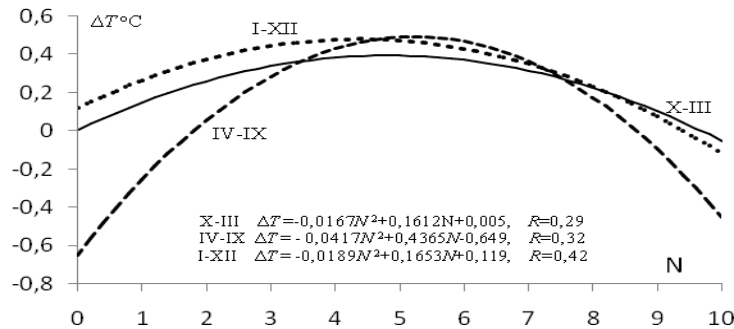


**Rys. 6.** Zmiany roczne różnic temperatury powietrza  $\Delta T$  między miastem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie ( $T$  – średnia,  $s$  – odchylenie standardowe) w latach 1951-2000

**Fig. 6.** Annual changes of air temperature differences  $\Delta T$  between the city (Astronomical Observatory) and its outskirts (Okęcie) in Warsaw, in the years 1951-2000 ( $T$  – average,  $s$  – standard deviation)

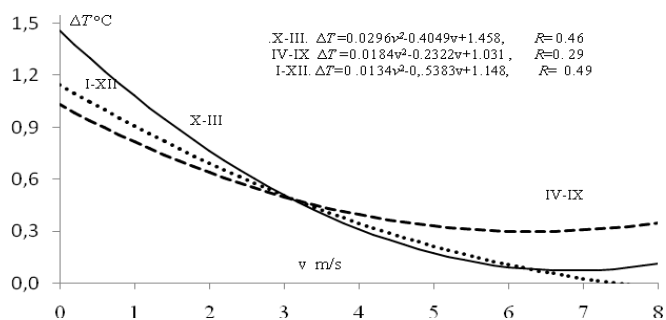
Wpływ zachmurzenia i prędkości wiatru na miejską wyspę ciepła ( $\Delta T$ ) w Warszawie charakteryzują wykresy wielomianów regresji 2. stopnia ( $R$  – współczynnik korelacji wielokrotnej) (rys. 7-8). Zależność miejskiej wyspy ciepła od temperatury powietrza poza miastem przedstawiono na rys. 9. Najmniejsze różnice temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między centrum miasta i peryferiami (średniej i minimalnej  $T_{\min}$ ) występuje przy temperaturze bliskiej zera. W półroczu ciepłym miejska wyspa ciepła jest najintensywniejsza (największe różnice  $\Delta T$ ), gdy temperatura powietrza poza miastem wynosi 13-16°C,

a w półroczu chłodnym jest najbardziej intensywna, gdy temperatura spada poniżej -10°C. Natomiast w każdej porze roku różnica temperatury między miastem i otoczeniem maleje ze wzrostem prędkości wiatru do zera, przy prędkościach wiatru 8-9 m/s. Po prostu przy dużych prędkościach wiatru intensywna pozioma wymiana ciepła powoduje zanik różnic temperatury powietrza (Stopa-Boryczka, Boryczka, 1995).



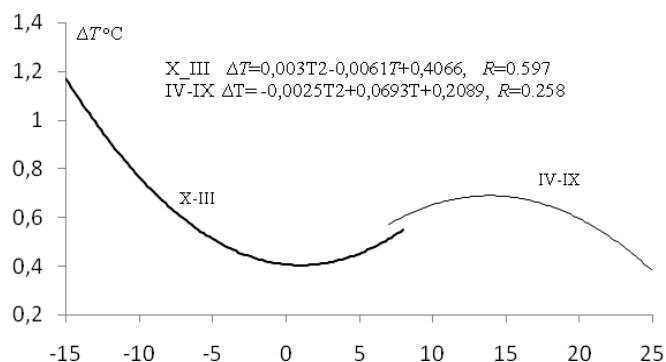
**Rys. 7.** Zależność paraboliczna różnic średniej dobowej temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem i jego otoczeniem od zachmurzenia ( $N$ ) w Warszawie (1961-1965)

**Fig. 7.** Parabolic dependence of differences mean daily air temperature ( $\Delta T$ ) between the city and its vicinity on cloudiness ( $N$ ), Warsaw (1961-1965)



**Rys. 8.** Zależność paraboliczna różnic średniej dobowej temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem i jego otoczeniem od prędkości wiatru ( $v$ ) w Warszawie (1961-1965)

**Fig. 8.** Parabolic dependence of differences mean daily air temperature ( $\Delta T$ ) between the city and its vicinity on the wind velocity ( $v$ ), Warsaw (1961-1965)



**Rys. 9.** Zależność paraboliczna różnic średniej dobowej temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem i jego otoczeniem od temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie (1961-1965)

**Fig. 9.** Parabolic dependence of differences mean daily air temperature ( $\Delta T$ ) between the city and its vicinity on the air temperature ( $T$ ), Warsaw (1961-1965)

O zanikaniu miejskiej wyspy ciepła ( $\Delta T$ ) ze wzrostem: temperatury powietrza ( $T$ ), zachmurzenia ( $N$ ) i prędkości wiatru ( $v$ ) informują ujemne współczynniki regresji wielokrotnej (tab. 3).

**Tabela 3.** Zależność miejskiej wyspy ciepła ( $\Delta T$ ) od temperatury powietrza ( $T$ ), zachmurzenia ( $N$ ) i prędkości wiatru ( $v$ ), równania hiperplaszczyzn regresji ( $R$  – współczynnik korelacji wielokrotnej)

**Table 3.** The dependence of the urban heat island ( $\Delta T$ ) upon the air temperature ( $T$ ), cloudiness ( $N$ ) and wind velocity ( $v$ ) outside of town. Equations of regression hyperplanes ( $R$  – multiple correlation coefficient)

Półroczne chłodne (X-III)	$\Delta T = -0.0186 T - 0.0687 N - 0.1479 v + 1.448$	$R = 0.58$
Półroczne ciepłe (IV-IX)	$\Delta T = -0.0105 T - 0.0105 N - 0.1082 v + 1.329$	$R = 0.58$
Rok (I-XII)	$\Delta T = -0.0105 T - 0.0105 N - 0.1082 v + 1.329$	$R = 0.56$

Powietrze o temperaturze  $T_0$  napływające do miasta o temperaturze wyższej  $T_m > T_0$  ogrzewa się o  $\Delta Q$  cal (Joul):

$$\Delta Q = M c_p \Delta T$$

gdzie:  $\Delta T$  – różnica temperatury powietrza między terenem zabudowanym i otwartym,  $M = \rho V$  – masa,  $\rho$  – gęstość powietrza,  $V$  – objętość powietrza,  $c_p$  – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu.

Przykładowo, oszacowano zasoby ciepła w Śródmieściu Warszawy w przyziemnej warstwie atmosfery – o wymiarach: 6km x 6km x 2m, o objętości  $V = 72 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  i masie  $M = 9 \cdot 10^4 \text{ t}$ .

### 3.4. Zależność cyklu rocznego temperatury powietrza w Warszawie od aktywności Słońca

Ruch obiegowy Ziemi dookoła Słońca (365,25 dni) i ruch obrotowy Słońca wokół jego osi, nachylonej pod kątem  $82^\circ 45'$  do płaszczyzny ekliptyki powodują zmiany roczne liczby plam słonecznych obserwowanych z Ziemi (liczb Wolfa), tj. tzw. aktywności Słońca.

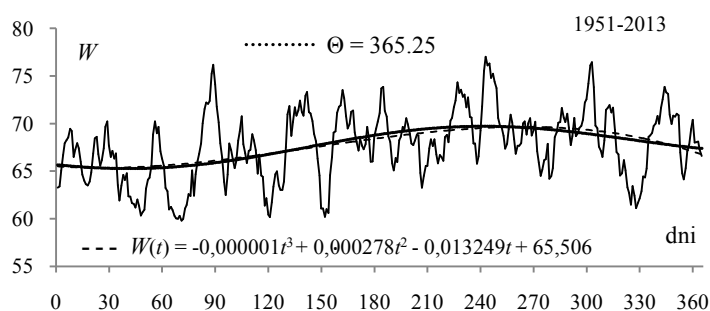
Okres obrotu Słońca wynosi 25,04 dni na równiku i 31 dni w pobliżu biegunów. W ciągu 365,25 dni występuje 14,59 obrotów Słońca (na równiku) i 11,78 obrotów (w pobliżu biegunów). Przyczyną cyklu rocznego aktywności Słońca (liczby plam na Słońcu) są więc zarówno zmiany aktywności Słońca spowodowane procesami fizycznymi zachodzącymi na jego powierzchni w cyklu 11- i 22-letnim, jak też wynikające z przesuwającej się coraz innej części powierzchni Słońca (tarczy) skierowanej ku Ziemi w kolejnych dniach roku

Przebieg roczny liczb Wolfa ( $W$ ) z kolejnych 365 (366) dni w latach 1951-2013 dobrze opisuje równanie sinusoidy regresji o okresie  $\Theta = 365,25$  dni (rys.10)

$$W = 66,832 + 0,00466t + 1,776792 \sin\left(\frac{2\pi}{365,25}t - 2,431845\right)$$

Współczynnik korelacji  $R = 0,433$  jest istotny na poziomie 0,01, ponieważ wartość testu Fishera- Snedecora  $F_{\text{obl}} = 41,65$  jest znacznie większe od wartości krytycznej  $F_k = 4,67$  ( $n=365$ ).

Ekstrema sinusoidy cyklu rocznego średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2013 przypadają: minimum (65,268) – w końcu zimy, a maksimum (69,714) – w końcu lata.



Rys. 10. Przebieg roczny średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2013  
 Fig. 10. Annual course of daily mean Wolf numbers ( $W$ ) in 1951-2013 years

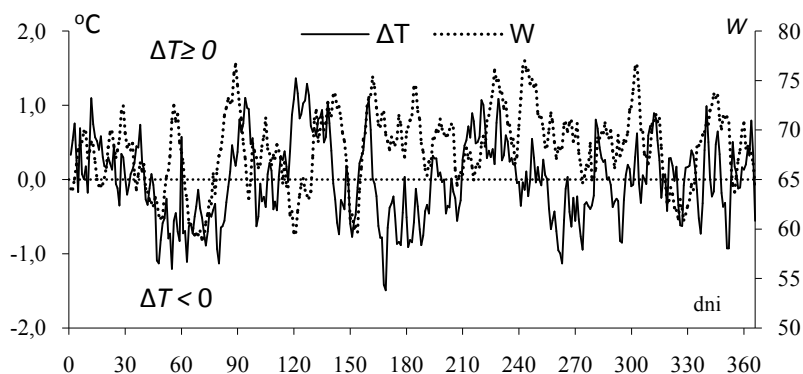
Wykresy wielomianu regresji 3. stopnia ( $R=0,420$ ,  $F_{obl}=92,05$ ) i sinusoidy o okresie  $\Theta=365,25$  dni prawie pokrywa się – ekstrema (minimum i maksimum) przypadają w przybliżeniu na te same dni.

Fale chłodu i ciepła zdefiniowano, stosując przekształcenie algebraiczne codziennych 60-letnich średnich dobowych wartości temperatury powietrza:

$$\varepsilon_i = \Delta T_i = T_i - f(t_i)$$

gdzie:  $T_i$  – średnie dobowe wartości zmierzone,  $f(t_i)$  – wartości obliczone z równania sinusoidy regresji ( $R=0,997$ ) o okresie  $\Theta=365,25$  dni (rys. 11):

$$T = f(t) = 7,6773 + 0,002239t + 10,767682 \sin\left(\frac{2\pi}{365,25}t - 1,845735\right)$$



**Rys. 11.** Fale ciepła i chłodu w Warszawie i liczby Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2010,  $\Delta T = T - f(t)$

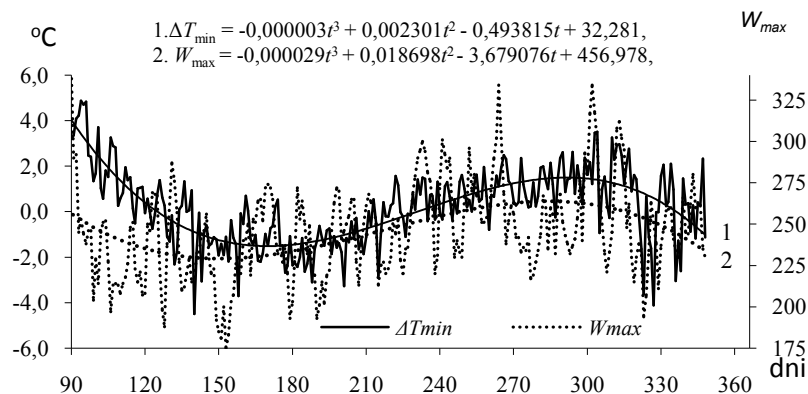
**Fig. 11.** Warm and cold waves in Warsaw and Wolf numbers ( $W$ ) in years 1951-2010)  $\Delta T = T - f(t)$  deviations of daily mean values ( $T$ ) from sinusoid  $f(t)$

Fale chłodu wskazuje znak ujemny odchylenia ( $\Delta T < 0$ ), a fale ciepła – znak dodatni ( $\Delta T \geq 0$ ). Fale chłodu ( $\Delta T < 0$ ) na ogół występują przy małej średniej dobowej (60-letniej) aktywności Słońca ( $W$ ), a fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) – przy dużych wartościach dobowych liczb Wolfa ( $W$ ).

Przebiegi roczne różnic  $\Delta T_{min} = T_{min} - f_1(t)$  najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie i maksimum liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w dniach 90-366 (IV-XII) dobrze określają sinusoidy regresji  $T_{min} = f_1(t)$  o okresie  $\Theta = 365,25$  dni ( $R=0,979$  i  $R=0,385$ ) i wielomiany regresji 3. stopnia  $\Delta T_{min}$  i  $W_{max}$  względem czasu  $t$  (o istotnych statystycznie współczynnikach korelacji wielokrotnej  $R=0,761$  i  $R=0,408$ ) (rys. 12):

$$T_{min} = f_1(t) = -2,7659 - 0,007865t + 15,190194 \sin\left(\frac{2\pi}{365,25}t - 1,825587\right)$$

$$W_{max} = 237,200678 + 0,037789t + 12,60485 \sin\left(\frac{2\pi}{365,25}t + 2,737850\right)$$



**Rys. 12.** Przebieg roczny odchyień ( $\Delta T_{\min}$ ) najniższych wartości temperatury powietrza ( $T_{\min}$ ) w okresie 60 lat w Warszawie od sinusoidy  $f_1(t)$  i maksima dobowe liczb Wolfa (1951-2010)

**Fig. 12.** Annual course of deviations ( $\Delta T_{\min}$ ) the lowest ( $T_{\min}$ ) of air temperature in Warsaw – in the 60-year period from sinusoid  $f_1(t)$  and maximum daily of Wolf numbers (1951-2010)

Interesująca jest synchroniczność zmian odchyień najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{\min} = T - f_1(t)$  i maksimów ( $W_{\max}$ ) liczb Wolfa

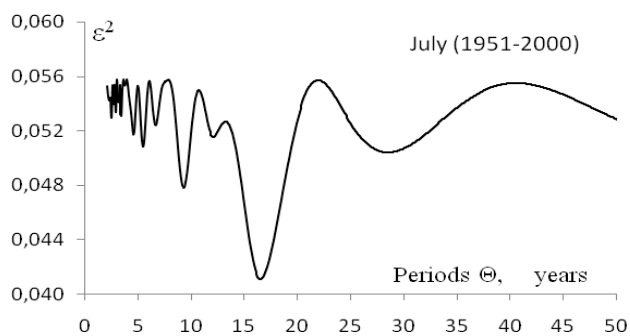
### 3.5. Cykliczność i tendencje zmian miejskiej wyspy ciepła

Miejska wyspa ciepła ( $\Delta T > 0$ ) w Warszawie w latach 1951-2000 cechuje się okresowością wieloletnią. Cykle różnic  $\Delta T$  wyznaczono z zastosowaniem metody sinusoid regresji:

$$\Delta T = a_0 + b \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta} t + c\right)$$

gdzie:  $t$  – czas,  $\Theta$  – okres,  $b$  – amplituda,  $c$  – faza. Okresy  $\Theta$  są minimami lokalnymi ciągu wariancji resztkowej  $\varepsilon^2$  (widma, spectrum).

Na przykład w lipcu (rys.13, tab. 4), okresy wynoszą:  $\Theta=9,3$ ,  $\Theta=12,1$ ,  $\Theta=16,5$  i  $\Theta=28,5$  lat – o amplitudach ( $\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min} = 2b$ ): 0,20, 0,16, 0,26, 0,08°C.



**Rys. 13.** Widma zmian różnic temperatury powietrza (°C) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000) – Lipiec

**Fig. 13.** Spectrum of the changes of air temperature differences (°C) between the town (Astronomical Observatory) and its vicinity (Okęcie) in Warsaw (1951-2000), July

**Tabela 4.** Okresy ( $\Theta$ ) zmian różnic temperatury powietrza ( $^{\circ}\text{C}$ ) między śródmieściem (Observatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000),  $R$  – współczynnik korelacji,

**Table 4.** The cycles  $\Theta$  of air temperature differences ( $^{\circ}\text{C}$ ) between the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000),  $R$  - Correlation coefficient

Periods ( $\Theta$ , years)	Amplitudes ( $2b$ , $^{\circ}\text{C}$ )	Phase ( $c$ )	$R$
5,5	0,164	1,5430	0,297
9,3	0,198	-2,0295	0,377
12,1	0,154	0,4509	0,276
16,5	0,260	2,4071	0,513
28,5	0,088	2,1787	0,310

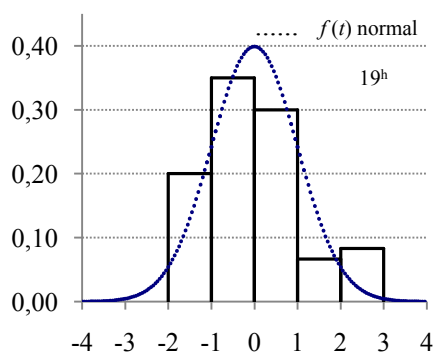
### 3.6. Prawdopodobieństwo występowania miejskiej wyspy ciepła

Istotne znaczenie praktyczne ma porównanie histogramu i dystrybuanty empirycznej (częstości skumulowanych) średnich miesięcznych różnic temperatury powietrza ( $x = \Delta T$ ) w Warszawie (1976–1980) między miastem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie) o  $19^{00}$  z rozkładem normalnym zmiennej standaryzowanej w przedziale  $-4,0 < t \leq 4$ :

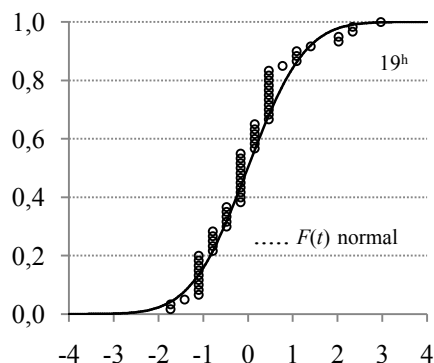
$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}t^2}, \quad F(t) = \int_{-\infty}^{t_0} f(t) dt$$

gdzie:  $t_0 = \frac{x_0 - \bar{x}}{s}$ ,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna,  $s$  – odchylenie standardowe.

Z porównania histogramów i wykresów dystrybant (rys.14-15) i zastosowania testu zgodności Kolmogorowa  $D_n$  wynika, że różnice  $\Delta T$  o godzinie  $19^{00}$  mają rozkład prawdopodobieństwa zbliżony do normalnego.



**Rys. 14.** Histogram różnic temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1976–1980), 19h  
**Fig. 14.** The histograms of air temperature differences ( $\Delta T$ ) between town (University) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1976–1980), 19h



**Rys. 15.** Prawdopodobieństwo różnic temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1976–1980), 19h (wg danych Domazat, 2007)  
**Fig. 15.** The probability of air temperature differences ( $\Delta T$ ) between town (University) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1976–1980, 19h) (Domazat, 2007)

O zbliżonych dystrybuantach (empirycznej  $\frac{m}{n}$  i normalnej  $F(x)$ ) świadczy test Kołmogorowa:

$$D_n = \sup \left| \frac{m}{n} - F(x) \right|,$$

gdzie:  $m$  – numer w szeregu rosnącym  $y_1, \dots, y_n$ .

Obliczone wartości  $y = nD_n$  ( $n = 60$ ) są mniejsze od wartości krytycznej  $y_k = 1,23$  na poziomie istotności  $0,05$

Prawdopodobieństwo wystąpienia różnicy  $\Delta T$  powyżej  $x_0$ :  $P(x > x_0) = P(t > t_0)$  jest równe  $1 - F(t_0)$ , gdzie  $t_0 = (x_0 - 0,853) / 0,319$ . Prawdopodobieństwo wystąpienia o godzinie 19<sup>00</sup> różnic  $\Delta T$ :  $\geq 0,5$  °C,  $\geq 1,0$  °C,  $\geq 1,5$  °C (po standaryzacji:  $t \geq -1,105$ ,  $\geq 0,459$ ,  $\geq 2,023$ ) odpowiednio wynosi: 86,4%, 32,6 %, 2,3 %

Istotne znaczenie w poznaniu cech klimatu miasta mają wyznaczone wartości progowe temperatury powietrza, prędkości wiatru i zachmurzenia, przy których deformacja pola temperatury jest największa. Na przykładzie Warszawy dokonano także próby wyodrębnienia antropogenicznych zmian temperatury powietrza o stałej tendencji od jej naturalnych okresowych wahań. Przebiegi różnic temperatury powietrza (średniej dobowej, maksymalnej, minimalnej i amplitudy dobowej) między Warszawą i średnimi z całej Polski wskazują, jak duży jest zakres zmienności wywołany przez czynniki fizycznogeograficzne, od których zależy klimat miast. Czynniki antropogeniczne odgrywają rolę drugorzędą.

Poznane prawidłowości oddziaływania czynników geograficznych i antropogenicznych na klimat oraz próba ich oddzielenia ma istotne znaczenie w modelowaniu i prognozach przestrzennych i czasowych zmian klimatu.

Na podstawie empirycznych wzorów – równań prostych, parabol, sinusoid i hiperplaszczyzn regresji – można ekstrapolować deformację pola temperatury powietrza przez miasto. Można oszacować różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem wstawiając odpowiednie wartości zmiennych meteorologicznych.

Problemy badawcze miejskiej wyspy ciepła w Warszawie należą do najczęściej podejmowanych tematów w latach 1959-2010 – w kilku pracach doktorskich, w kilkudziesięciu magisterskich oraz kilkudziesięciu publikacjach.

### **Przykłady pierwszych prac doktorskich z badań klimatu Warszawy wykonanych w Zakładzie Klimatologii UW**

Głównym tematem zainteresowań naukowych **Urszuli Kossowskiej-Cezak** jest klimat miasta, którego dotyczyła praca zarówno magisterska, jak i doktorska. Praca doktorska – skrót: Kossowska-Cezak U. , 1972, *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy*, Dokumentacja Geograficzna IG PAN , z. 6, s. 103-108 była pierwszą monografią klimatu Warszawy, opartą na wynikach 10-letnich obserwacji z kilku stacji na obszarze miasta i poza miastem. Zawarto w niej także wyniki badań dotyczących rozkładu temperatury i wilgotności względnej wzdłuż kilku profili przez miasto przy różnych typach pogody oraz określono wartości temperatury, wielkości zachmurzenia i prędkości wiatru, przy których zanika miejska wyspa ciepła. Klimatu miasta dotyczyły także inne liczne publikacje, m.in. poświęcone warunkom termicznym Warszawy czy

wpływowi miasta na wielkość zachmurzenia. U. Kossowska-Cezak w opracowaniach zwraca szczególną uwagę na rolę cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu warunków termiczno-opadowych, a głównym obiektem badań jest Warszawa.

Istotnym postępowaniem w badaniach klimatu Warszawy w zakresie zmian dobowych i warunków meteorologicznych sprzyjających powstawaniu miejskiej wyspy ciepła jest rozprawa doktorska **Jolanty Wawer** *Cechy termiczne klimatu lokalnego Warszawy – obroniona w 1994 r.*. Publikacja: Wawer J., 1997, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie*. [w:] *Nowe metody badań zmian klimatu Polski*, Prace i Studia Geograficzne, t. 20, red. M. Stopa-Boryczka, Wyd, UW, s. 145-197, zawiera najważniejsze wyniki badań dobowych i rocznych różnic temperatury powietrza ( $\Delta T$ ) między miastem i otoczeniem. Znaczenie poznawcze ma przede wszystkim określenie zależności intensywności miejskiej wyspy ciepła od warunków pogodowych, od prędkości wiatru i jego kierunku oraz zależności korelacyjnej od zachmurzenia. Wskazano warunki pogodowe (sytuacje synoptyczne, typy cyrkulacji, rodzaje mas powietrza) sprzyjające dużej deformacji pola temperatury powietrza w mieście. Wyznaczono też tempo ( $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ) nagrzewania i wychładzania się powietrza w różnych porach roku na obszarze zabudowanym i otwartej przestrzeni poza miejskiej.

### 3.7. Ważniejsze wyniki badań

Głównym celem pracy jest określenie zakresu deformacji pola temperatury powietrza w Polsce przez miasta. Propozycję rozwiązania tego problemu przedstawiono na przykładzie Warszawy – miasta nizinnego, położonego w środkowej Europie na Nizinie Mazowieckiej ( $\varphi = 52, 1^{\circ}$ ,  $\lambda = 21, 0^{\circ}$ ,  $H = 110$  m n.p.m.).

1. Najpierw dokonano oceny wpływu położenia geograficznego na cechy termiczne miast w Europie – ze szczególnym uwzględnieniem Polski. Z modeli statystycznych różnoskalowych: wielkoskalowych (Europa) i średnioskalowych (Polska) wynika, że w kształtowaniu klimatu miast (także największych) dominują czynniki naturalne: szerokość geograficzna warunkująca strefowość klimatu, odległość od Oceanu Atlantyckiego (ocieplający wpływ w zimie mas powietrza polarnomorskiego) i wysokość n.p.m. Strefowość klimatu jest głównie deformowana przez Ocean Atlantycki i góry. W miastach „nizinnych” Europy Zachodniej dominuje oddziaływanie Oceanu Atlantyckiego na pole temperatury powietrza, a w Europie Wschodniej – wpływ łądu Azji. Pole temperatury powietrza w miastach położonych na południe i północ od nizin europejskich jest głównie zdeformowane przez wysokość n.p.m. Najbardziej go deformują kotliny śródgórskie w Alpach, Karpatach, Sudetach.

Z modeli symulujących zmienność przestrzenną temperatury powietrza w Europie wynika też znaczny udział czynników antropogenicznych w kształtowaniu klimatu miast. Różnice temperatury powietrza między zmierzonymi i obliczonymi z wielomianów regresji 4. stopnia względem czynników geograficznych  $T = f(\varphi, \lambda, H)$  świadczą o dość dużej roli powierzchni sztucznych – głównie w dużych miastach. W przypadku Warszawy ta różnica jest rzędu  $1^{\circ}\text{C}$ , mimo że wyróżnia się jako cieplejsza Nizina Mazowiecka.

2. Warszawa na tle otoczenia wyróżnia się przede wszystkim wyższą temperaturą minimalną (w nocy jest znacznie cieplejsza); dłuższym okresem bezprzymrozkowym i wegetacyjnym, mniejszą wilgotnością względną i większym niedosytem wilgotności powietrza, większym zachmurzeniem nieba i mniejszą liczbą dni pogodnych, większymi sumami opadów atmosferycznych, mniejszą liczbą dni z mgłą (mniej inwersji termicznych) oraz znacznie mniejszą prędkością wiatru, mniejszą liczbą dni z wiatrem



silnym, większą liczbą dni z wiatrem bardzo słabym i większym udziałem dni bezwietrznych (Stopa-Boryczka 1992).

Pomiary elementów meteorologicznych w obrębie miasta (w kilku punktach) i na jego peryferiach umożliwiły określenie zmian rocznych i dobowych miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. Określono deformację pola temperatury powietrza w skali całego miasta jak też jego fragmentów: o zabudowie zwartej, luźnej i zieleni parkowej. Sporo miejsca w pracy poświęcono więc zróżnicowaniu cech termicznych klimatu w skali lokalnej – wpływowi rodzaju zabudowy, konfiguracji budynków, terenów zielonych na miejską wyspę ciepła.

Novum w literaturze stanowi wszechstronna charakterystyka zmian dobowych miejskiej wyspy ciepła w Warszawie przedstawiona na przykładzie anomalnego – upalnego roku 1992. Istotne znaczenie poznawcze mają terminy pojawiania się i zaniku miejskiej wyspy ciepła, jak również jej intensywność zależnie od warunków pogodowych. Interesujące jest określenie przy jakiej cyrkulacji powietrza, różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem są największe np.  $> 3^{\circ}\text{C}$ . Po prostu stwierdzono jakie sytuacje pogodowe sprzyjają dużej intensywności miejskiej wyspy ciepła.

Dni o maksymalnej różnicy temperatury powietrza ( $\Delta T_{\max}$ ) między śródmieściem Warszawy i peryferiami w roku 1992 i ich charakterystykę meteorologiczną zestawiono w tabeli 1, gdzie podano: godziny wystąpienia maksymalnej różnicy temperatury powietrza ( $\Delta T_{\max}$ ), typ cyrkulacji wg Lityńskiego, temperaturę powietrza na Okęciu ( $T$ ), zachmurzenie ( $N$ ), prędko wiatru ( $v$ ) i jego kierunek.

Interesujące jest, że miejska wyspa ciepła w Warszawie o maksymalnej intensywności (największej różnicy dodatniej temperatury powietrza między centrum miasta i peryferiami) wystąpiła w dniach o cyrkulacji antycyklonalnej (wyżowej) – przy największej insolacji. Największe różnice temperatury powietrza  $\Delta T = 9, 1^{\circ}\text{C}$  zanotowano w dniach 30 VII i 17 VIII 1992 r. przy typie cyrkulacji SW<sub>A</sub>. Kontrast termiczny między miastem i jego okolicami szczególnie nasila się przy frontach chłodnych w godzinach, późnowieczornych i nocnych (tab. 5).

**Tabela 5.** Dni o maksymalnej różnicy temperatury powietrza ( $\Delta T_{\max}$ ) między śródmieściem Warszawy i jej peryferiami

**Table 5.** Days with highest air temperature differences ( $\Delta T_{\max}$ ) between downtown Warsaw and its peripheries.

1992	Godz.	$\Delta T_{\max}$	Cyrkulacja	$T^{\circ}\text{C}$	$N$	$v$ [mis]	Kierunek	
23	1	5	6,8	OA	-15,8	0	1	W
26	11	24	4,4	OA	-1,1	2	1	S
2	111	4	8,4	WA	-1,7	2	0	C
6	IV	6	6,0	OC	-2,0	5	1	W
16	V	5	7,8	NA	5,8	1	1	SW
27	VI	5	8,5	OA	9,4	3	1	W
30	VII	1	9,1	SWA	9,2	0	1	S
17	VIII	6	9,1	SWA	8,1	2	2	S
10	IX	6	6,4	SWA	4,5	0	1	W
21	X	6	4,6	NW	-2,3	4	1	S
9	XI	20	5,1	OA	-3,8	0	1	S
26	XI	21	4,9	NA	-11,3	0	1	NW

Dzienna wyspa ciepła jest najintensywniejsza w zimie w śródmieściu (w zabudowie zwartej i zieleni parkowej). W nocy miasto wychładza się mniej niż jego otoczenie. Wskazują na to różnice temperatury powietrza (styczeń, kwiecień, lipiec, październik 1992). Miasto w nocy jest znacznie cieplejsze od otoczenia średnio temperatura mini-

malna jest do 2°C większa. Miejska wyspa ciepła w zimie występuje prawie przez całą dobę. Natomiast w lecie nasila się ona od wieczora do rana. W godzinach okołopołudniowych różnice temperatury powietrza między śródmieściem Warszawy i peryferiami są niewielkie (wyrównanie temperatury powietrza).

**3.** Różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem: średniej dobowej  $\Delta T$ , maksymalnej  $\Delta T_{\max}$ , minimalnej  $\Delta T_{\min}$  i dobowej amplitudy  $\Delta A$  – zależnie od rodzaju powierzchni zestawiono w tabeli 6.

**Tabela 6.** Różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem dla różnego rodzaju powierzchni

**Table 6.** Temperature difference measurement for various kinds of surface

Powierzchnia	Ekstrema	$\Delta T$		$\Delta T_{\max}$		$\Delta T_{\min}$		$\Delta A$	
Miasto	max	0,8	VII	0,2	II	1,7	VII	-1,7	VII
	miii	0,5	I	-0,1	I	0,5	I	-0,3	II
Zabudowa zwarta	max	1,0	VII, VIII	0,3	II	1,9	VII, VIII	-0,2	VII, VIII
	miii	0,7	,II	-0,2	VIII	0,9	I	-0,6	I
Zabudowa luźna	max	0,5	VIII, IX	0,1,,	VI, V	1,2	VII	-1,2	VII, VIII
	mm	0,3	III	-0,1	X	0,5	I	-0,4	-0,4(I)
Zieleń parkowa	Max	0,6	VI, VII	0,6	IV	1,3	VII	-0,9	VIII, IX
	mm	0,5	XII	0,3	IX	0,7	I	-0,2	II

W mieście wahania dobowe temperatury powietrza są mniejsze niż poza miastem. Różnice dobowej amplitudy zmieniają się w ciągu roku od  $\Delta A = -0,6^{\circ}\text{C}$  w styczniu do  $\Delta A = -2,1^{\circ}\text{C}$  w lipcu i sierpniu. Zabudowa luźna mniej zniekształca dobowe wahania temperatury powietrza: różnica  $\Delta A$  zmienia się od  $-0,4^{\circ}\text{C}$  do  $-1,2^{\circ}\text{C}$  (w tych samych miesiącach). Najmniejsze jednak dobowe wahania temperatury powietrza  $\Delta A$  występują w zieleni parkowej: od  $-0,2^{\circ}\text{C}$  w lutym do  $-0,9^{\circ}\text{C}$  w sierpniu i wrześniu.

Sinusoidy opisujące zmiany roczne różnic temperatury powietrza ( $\omega = \frac{2\pi}{365.25}$ ):

$$\Delta T = a_0 + b \sin(\omega t + c)$$

między zabudową zwartą, luźną, zielenią parkową i otoczeniem świadczą o zależności amplitudy miejskiej wyspy ciepła od rodzaju powierzchni czynnej. Temperatura powietrza w zabudowie zwartej i kompleksach zieleni parkowej w śródmieściu najbardziej odbiega od średnich warunków termicznych Warszawy. Zabudowa zwarta cechuje się najwyższą temperaturą minimalną (różnice  $\Delta T$  do  $1,9^{\circ}\text{C}$ ) i najmniejszą dobową amplitudą  $\Delta A$  (do  $-2,1^{\circ}\text{C}$ ) względem otoczenia. Z kolei zieleń miejska wyróżnia się najwyższą temperaturą maksymalną – różnice  $\Delta T_{\max}$  sięgają  $0,6^{\circ}\text{C}$  i największą amplitudą do  $-0,9^{\circ}\text{C}$  względem otoczenia.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zabudowa zwarta w śródmieściu Warszawy najbardziej deformuje pole temperatury powietrza, podwyższając średnią temperaturę powietrza, zwłaszcza minimalną, w 5-leciu 1961- 1965 do  $1,9^{\circ}\text{C}$ , w poszczególnych latach do  $2,6^{\circ}\text{C}$ , a w pojedynczych dniach do  $9^{\circ}\text{C}$ , zmniejszając dobowe wahania temperatury powietrza do  $-2,1^{\circ}\text{C}$ . Podczas upalnego lata 1992 r. średnie miesięczne różnice osiągały skrajne wartości od  $-4,1^{\circ}\text{C}$  w sierpniu do  $-0,4^{\circ}\text{C}$  w lipcu.

**4.** Istotny wpływ na pionowy i poziomy ruch powietrza w mieście ma stratyfikacja atmosfery. Nierównomierne ogrzewanie się miasta w ciągu dnia (zwłaszcza słonecznego) tj. silne nagrzewanie się oświetlonych ścian budynków, a powolne terenów zacienionych i zieleni parkowej sprzyja powstawaniu równowagi chwiejnej powietrza.

Równowaga chwiejna powietrza przy kontrastach termicznych podłoża sprzyja rozwojowi prądów konwekcyjnych i turbulencji – wzmaga pionową wymianę powietrza. Jest to proces samooczyszczania się miasta – odprowadzania pyłów i innych substancji gazowych na większe wysokości. Innym mechanizmem samooczyszczenia się miasta z pyłów przemysłowych jest poziomy ruch powietrza, wynikający z różnicy temperatury powietrza między centrum i peryferiami. Odgrywa on dużą rolę przy słabych wiatrach i ciszach (bryza miejska). Na peryferiach miasta – przy małych prędkościach wiatru i czystym niebie często występują inwersje temperatury powietrza (w nocy przy równowadze stałej powietrza), powodujące stagnację chłodnego powietrza przy gruncie. Miejska wyspa ciepła nie sprzyja inwersjom temperatury powietrza, którym towarzyszą mgły – duża koncentracja aerozoli. Miejska wyspa ciepła wzmaga pionową turbulencyjną dyfuzję zanieczyszczenia powietrza, zmniejszając zawartość aerozoli w przyziemnej warstwie atmosfery (Stopa-Boryczka, 1992).

W aspekcie zanieczyszczeń powietrza, najbardziej niekorzystne są warunki równowagi stałej powietrza – silne inwersje temperatury powietrza. Hamują one konwekcję i pionowy turbulencyjny ruch powietrza. Z radiosondaży atmosfery, wykonanych w Legionowie w latach 1954-1959 wynika, że średnio w roku jest 265 dni z inwersją temperatury powietrza, w tym jest 156 dni z inwersją przyziemną i 109 dni z inwersją w swobodnej atmosferze, kiedy to temperatura wzrasta ku górze od pewnego poziomu (Nowosielski 1959).

.Liczba dni z inwersją zależy od pory roku:

Inwersje	Wiosna	Lato	Jesień	Zima
Przyziemne	39,2	51,2	38,4	27,2
Wysokie	28,4	13,2	26,8	40,6

Częstość inwersji przyziemnych (pochodzenia radiacyjnego) jest największa w lecie, a inwersji wysokich (pochodzenia frontowego) w zimie.

Inwersje przyziemne i wysokie występują przeważnie w masach powietrza kontynentalnego (PPk). Ponadto 50% inwersji przyziemnych jest obserwowanych przy niebie bezchmurnym, a połowa z nich – podczas pochmurnego nieba. Prawdopodobieństwo inwersji w ciągu nocy bezchmurnej jest bliskie 100%, a w dni o zachmurzeniu konwekcyjnym – zanikającym wieczorem lub przy chmurach wysokich, które nie hamują wypromieniowania Ziemi – ponad 50%.

Należy podkreślić, że inwersjom temperatury powietrza towarzyszą zwykle małe prędkości wiatru lub cisze, przy których poziomy i pionowy turbulencyjny ruch powietrza jest niewielki. Sprzyjają one więc dużej koncentracji pyłów i SO<sub>2</sub> w przyziemnej warstwie powietrza (aerozoli). Na przykład dwutlenek siarki SO<sub>2</sub> łącząc się z kropelkami mgły tworzy kwas siarkawy H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, a w tkankach roślin – kwas siarkowy H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Spadek częstości inwersji przyziemnych w miastach należy zatem do pozytywnych skutków miejskiej wyspy ciepła.

Na wyższych poziomach nad miastem mogą być odmienne dobowe i roczne zmiany wyspy ciepła. W godzinach popołudniowych, powietrze nad miastem ogrzewa się szybciej niż w jego otoczeniu. Wywołane jest to intensywniejszym odprowadzeniem ciepła do góry drogą wzmożonej konwekcji i turbulencji.

Stwierdzone prawidłowości oddziaływania powierzchni sztucznych (miasta) na stan atmosfery w ciągu doby czy też roku można wykorzystać w prognozach antropogenicznych zmian klimatu. Przy rozbudowie miast np. w projektowaniu nowych osiedli mieszkaniowych.

Na podstawie empirycznych wzorów – równań prostych, parabol, sinusoid i hiperpłaszczyzn regresji można ekstrapolować deformację pola temperatury powietrza przez miasto. Można oszacować różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem wstawiając odpowiednie wartości zmiennych meteorologicznych. Istnieje więc możliwość prognozowania np. temperatury powietrza w dzielnicach miasta – przy projektowaniu nowej zabudowy. Można oszacować temperaturę powietrza tam, gdzie nigdy nie prowadzono żadnych pomiarów meteorologicznych. Przykładem może być opracowanie prognozy projektowanego osiedla mieszkaniowego w Białoleśce Dworskiej – pracy wykonanej w ramach tematu rządowego (Stopa-Boryczka 1992).

Tego rodzaju empiryczne wzory wyznaczone dla różnego typu zabudowy i zieleni miejskiej częściowo już wykorzystano w interpolacji – przy konstrukcji izarytm w terenie zabudowanym Warszawy (Stopa- Boryczka, 1992).

**5.** Innym rozwiązywanym problemem są naturalne zmiany klimatu i identyfikacja ich przyczyn. Uzasadniono tezę, że współczesne wahania klimatu są wypadkową: aktywności Słońca (mającej wpływ na cyrkulację atmosferyczną) i erupcji wulkanów (absorpcji promieniowania słonecznego przez pył wulkaniczny). Wskazano dwa rodzaje pośredniego oddziaływania Układu Słonecznego na klimat Ziemi:

- parametry US → aktywno Słońca → cyrkulacja atmosferyczna
- parametry US → erupcje wulkanów → promieniowanie słoneczne

Wykazano, że erupcje wulkanów podobnie do aktywności Słońca są zjawiskiem periodycznym, kształtowanym przez zmiany parametrów Układu Słonecznego. Takimi parametrami m.in. są przyspieszenie Słońca względem środka masy US i wypadkowa sił przyptywowych na Słońcu, wywołanych przyciąganiem grawitacyjnym największych planet (olbrzymów).

Identyfikacji przyczyn naturalnych zmian klimatu dokonano zgodnie z zasadą „widma oscylacji – cykle zmian – przyczyn i skutków są zbliżone”. Postępu w identyfikacji przyczyn naturalnych zmian klimatu dokonano dzięki nowej metodzie badań okresowości, tj. metodzie „sinusoid regresji” J. Boryczki.

Okazało się, że widma oscylacji: temperatury powietrza, opadów atmosferycznych, odpływów rzek Europy, cyrkulacji atmosferycznej są zbliżone, a także do widm oscylacji parametrów Układu Słonecznego (tab. 7). We wszystkich widmach oscylacji dominują okresy obiegu dookoła Słońca największych planet (Jowisz, Saturn, Uran, Neptun) i okresy ich wzajemnego takiego samego położenia (wyrażone w latach kalendarzowych):

**Table 7.** Okresy wzajemnego położenia największych planet (lat)  
**Table 7.** Periods of mutual identical positions of the giants (years)

Planety	Jowisz	Saturn	Uran	Neptun
Jowisz	11,862			
Saturn	19,858	29,458		
Uran	13,812	45,364	84,015	
Neptun	12,782	35,870	171,400	164,700

Znamienne jest, że okresy te są obecne w widmach oscylacji temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779– 1990 (średnie konsekwentne 12 miesięczne), aktywności Słońca w latach 1700-1980 (liczb Wolfa) i erupcji wulkanów w latach 1680-1980: wskaźnika zapylenia wulkanicznego  $I_g$  *DVI* (Dust Veil Index), wskaźnika aktywności

wulkanicznej  $\lg I = \lg\left(\frac{DVI}{\Delta t}\right)$ , gdzie  $\Delta t$  jest odstępem czasu między kolejnymi erupcjami. Oto najsilniejsze cykle (o największych amplitudach) widm oscylacji ( $R$  – współczynnik korelacji wielokrotnej)(tab. 8):

**Tabela 8.** Cykle najsilniejsze w ciągach czasowych temperatury powietrza, liczb Wolfa i erupcji wulkanów

**Table 8.** The strongest cycles in the time series of air temperature, Wolf number and volcanic eruptions

Temperature		Wolf numbers		Volcanic eruptions			
Period	R	Period	R	lg DVI		lg I	
				Period	R	Period	R
12,1	0,10	12,1	0,27	11,4	0,31	11,7	0,29
12,8	0,16	12,8	0,17	13,3	0,28	12,7	0,26
14,0	0,14	13,8	0,09	13,9	0,18	15,2	0,29
17,7	0,14	21,4	0,11	19,8	0,25	21,2	0,32
29,8	0,05	28,5	0,12	30,4	0,19	28,4	0,28
34,7	0,04	36,9	0,08	38,6	0,22	40,8	0,24
42,2	0,10	45,5	0,14	52,2	0,17	757,0	0,33
103,8	0,09	98,3	0,33	791,8	0,34	90,5	0,25
220,7	0,43	187,1	0,20	223,8	0,23	221,5	0,35

Istnieje też zbieżność krótszych silnych cykli (tab. 9)

**Tabela 9.** Charakterystyka krótkich cykli

**Table 9.** Characteristics of short strong cycles

	Period	R	Period	R	Period	R
Air temperature	4,16	0,17	7,75	0,23	11,17	0,10
Solar activity	-	-	7,4	0,10	0,10	0,32
Volcanic activity (lgDVI)	4,0	0,33	7,9	0,23	11,4	0,31
Volcanic activity (lgI)	3,9	0,29	8,0	0,32	11,2	0,22
Acceleration of the Sun	3,9	0,28	7,8	0,27	-	-

Nie oczekiwano tak dużego podobieństwa między maksimumami lokalnymi gęstych widm oscylacji (cyklami): temperatury powietrza, aktywności Słońca, erupcji wulkanów i parametrów Układu Słonecznego ze względu na procesy deterministyczno-stochastyczne zachodzące na Słońcu i Ziemi (w atmosferze).

W ostatnich dwóch stuleciach (1779-1990), temperatura powietrza w Warszawie wzrastała średnio o 0, 6°C/100 lat:

$$T = 6,93 + 0,006460 t, \quad R = 0,42$$

Ta tendencja wzrostowa temperatury powietrza jest wypadkową nakładania się dwóch naturalnych cykli: 103,8 lat i 220,7 lat (na podstawie ciągu chronologicznego 1779– 1979 otrzymano trochę krótsze cykle: 89,7 lat i 195,2 lat, pozostałe – takie same).

Podczas maksimumów aktywności Słońca obserwuje się wyższą temperaturę powietrza niż w latach spokojnego Słońca. Minimum wiekowe temperatury powietrza przypada na najśłabszy cykl 11- letni aktywności Słońca (1811-1823). Natomiast maksimum krzywej trendu czasowego temperatury przypada w pobliżu maksimum absolutnego aktyw-

ności Słońca (1957 r.). Minimum wiekowe temperatury powietrza wystąpiło podczas wzmożonej aktywności wulkanicznej Ziemi: 1815 – wybuch wulkanu Tambora (Indonezja) o  $DVI = 3000$ , 1835 Coseguina (Nicaragua) o  $DVI = 4000$ . Najdłuższe cykle temperatury powietrza: 103,8 i 220,7 lat są zbliżone do najdłuższych cykli aktywności Słońca: 96,3 i 187,1 lat oraz erupcji wulkanów:  $\lg DVI - 91,8$  i  $223,8$  lat,  $\lg I - 90,5$  i  $221,5$  lat. To ocieplenie się klimatu w ostatnich dwóch stuleciach o  $0,6^\circ\text{C}/100$  lat jest wywołane głównie wzrostem aktywności Słońca i spadkiem aktywności wulkanicznej.

Aktywność Słońca w latach 1700– 1980 wzrastała średnio o  $9,5/100$  lat:

$$W = 34,73 + 0,0948 t, \quad R = 0,20$$

Ponadto tendencja wiekowych zmian erupcji wulkanów w latach 1680– 1980 jest malejąca – zarówno wskaźnika Dust Veil Index, jak też wskaźnika aktywności wulkanicznej  $I = \frac{DVI}{\Delta t}$ . Natomiast średnio biorąc, wzrastają odstępy czasu między erupcjami

wulkanów  $\Delta t$ . Miarą antropogenicznych zmian temperatury powietrza w ostatnich dwóch stuleciach jest składnik liniowy  $\Delta T = at$  trendu czasowego temperatury powietrza – część która pozostaje po eliminacji kilkunastu naturalnych cykli (rytmów) temperatury. Składnik antropogenicznych zmian temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779-1979 wynosi  $a = 0,15^\circ\text{C}/100$  lat. Wynika on głównie z rozbudowy miasta – z miejskiej wyspy ciepła (większa akumulacja ciepła przez zabudowę, pyły przemysłowe i  $\text{CO}_2$ ). O właściwej identyfikacji przyczyn naturalnych zmian klimatu świadczy zgodność prognoz klimatologicznych i astronomicznych na XXI wiek. W prognozach klimatologicznych  $T = f(t)$  nałożono na siebie 15 cykli temperatury powietrza o największych amplitudach obecnych w widmie oscylacji. Natomiast w prognozach astronomicznych rozwinięto ciąg chronologiczny w szereg Taylora (wg najmniejszych kwadratów) względem czterech parametrów Układu Słonecznego  $T = f(G, \cos \gamma, z, Z)$ . Obydwie krzywe wiekowych zmian temperatury powietrza w Warszawie w stuleciu XXI znajdują się poniżej średniej z lat 1779-1979. W połowie tego wieku XXI można oczekiwać pewnego ochłodzenia klimatu. Nie będzie ono jednak zbyt duże (takie, jak na przełomie XVIII-XIX wieku) ze względu na składnik antropogeniczny wskazujący wzrost temperatury o  $0,15^\circ\text{C}/100$  lat.

## Summary

The primary objective of the volume is to determine the scope of deformation of the air temperature field in Poland caused by towns. The proposal of a solution to this problem is presented on the example of Warsaw, a lowland town, located in central Europe within the Masovian Lowland ( $\varphi = 52.1^\circ$ ,  $\lambda = 21.0^\circ$ ,  $H = 110$  m a.s.l.).

1. First, the assessment was made of the influence exerted by geographical location on the thermal features of towns in Europe, with special consideration of Poland. The statistical models of various scales: large scale (for Europe) and mesoscale (for Poland) give the results indicating that the natural factors dominate in formation of climate of towns. These factors are: latitude – decisive for the zonal nature of climate, distance from the Atlantic Ocean (the warming influence of masses of polar-maritime air in winter), and the height above the sea level. The zonal setting of climates is mainly being deformed by the Atlantic Ocean and the mountains. In the “lowland” towns of western Europe the influence of Atlantic Ocean on the field of air temperature dominates, while in eastern Europe – the influence of the Asian continent. The field of air temperature in towns located to the South and to the North of the belt of European plains is primarily deformed by their height a.s.l. It is most deformed in the intermontane valleys and dales in the Alps, Carpathians and Sudetes.

The models simulating the spatial variability of air temperature in Europe indicate also an important contribution of the anthropogenic factors in shaping of the climate of towns. The differ-

ences between air temperatures measured and calculated from the fourth order regression polynomials with respect to geographic factors,  $T = f(\varphi, \lambda, H)$ , witness to quite important role of the artificial surfaces, mainly in large towns. In the case of Warsaw this difference is of the order of 1°C, in spite of the fact that Masovian Lowland distinguishes itself as a warmer area.

2. Warsaw can be distinguished from the thermal background mainly through: higher minimum temperatures (the town being significantly warmer during the night), longer frost-free and growing season, lower relative humidity and greater air humidity deficiency, greater cloudiness and lower number of good weather days, higher total precipitation, lower number of foggy days (fewer thermal inversions) and much lower wind velocity (fewer days with strong winds, and more days with very weak winds and no wind at all), see Stopa-Boryczka (1992).

The measurements of the meteorological elements within the confines of town (in a couple of points) and in its peripheries made it possible to determine the annual and daily 313 changes of the urban heat island in Warsaw. The deformations of the air temperature field on the scale of the whole town, as well as for the fragments of compact and dispersed buildings, and greenery, were determined. Thus, quite a lot of space in the volume is devoted to differentiation of the thermal features on the local scale the influence exerted by the nature of buildings, their disposition in space, and by green areas on the urban island of heat.

A novelty in the literature is constituted by the comprehensive characterization of daily changes in the urban heat island in Warsaw, presented on the example of the anomalous hot year of 1992. An important cognitive significance must be attributed to the dates of appearance and disappearance of the urban heat island, as well as to its intensity, depending upon the weather conditions. It is interesting to know under what circulation of the air the differences of air temperature between the town and its surroundings are the biggest, e.g. > 3°C. It was namely simply stated what kind of weather situations are conducive to high intensity of the urban heat island.

The days with the maximum difference of air temperature ( $T_{\max}$ ) between downtown Warsaw and the town's peripheries in 1992 and their meteorological characteristics are given in Table 5.

It is interesting to note that the most pronounced urban heat island in Warsaw (i.e. the biggest positive difference of air temperature between downtown and peripheries) appeared on the days with anticyclonic (high pressure) circulation and the highest insolation. The biggest air temperature difference,  $\Delta T = 9.1^\circ\text{C}$ , occurred on the days of July 30th and August 17th, 1992, with the type of circulation SWA. The thermal contrast between the town and its surroundings intensifies particularly in the presence of cold fronts in late evening and night hours.

**Table 5.** Days with highest air temperature differences between downtown Warsaw and its peripheries.

1992	Hour	$\Delta T_{\max}$	Circulation	$T^\circ\text{C}$	$N$	$v$ [mis]	Direction	
23	I	5	6.8	OA	-15.8	0	1	W
26	II	24	4.4	OA	-1.1	2	1	S
2	III	4	8.4	WA	-1.7	2	0	C
6	IV	6	6.0	OC	-2.0	5	1	W
16	V	5	7.8	NA	5.8	1	1	SW
27	VI	5	8.5	OA	9.4	3	1	W
30	VII	1	9.1	SWA	9.2	0	1	S
17	VIII	6	9.1	SWA	8.1	2	2	S
10	IX	6	6.4	SWA	4.5	0	1	W
21	X	6	4.6	NW	-2.3	4	1	S
9	XI	20	5.1	OA	-3.8	0	1	S
26	XI	21	4.9	NA	-11.3	0	1	NW

The table gives the hours of appearance of the maximum air temperature difference ( $\Delta T_{\max}$ ), circulation type according to Osuchowska-Klein, air temperature in Okęcie quarter ( $T$ ), cloudiness ( $N$ ), wind velocity ( $v$ ) and its direction.

The daily heat island is most intensive in winter in downtown Warsaw (in compactly built up areas and parks). During the night the town cools down less than the surrounding areas. This is indicated by the differences in air temperature (January, April, July, October 1992). During the

night the town is much warmer than its peripheries – the temperature is on the average higher by up to 2°C. The urban heat island persists in winter during almost the whole day. In summer, on the other hand, it intensifies from evening till morning. In the hours around noon the differences between air temperatures in downtown Warsaw and in peripheries are very small (evening up of air temperature).

3. Various measurement of difference of air temperature, noted between the town and its surroundings, namely daily average,  $T$ , maximum,  $\Delta T_{\max}$ , minimum,  $\Delta T_{\min}$  and daily amplitude,  $\Delta A$ , depending upon the nature of surface, are presented in Table 6, together with months of occurrence of their extremal values (minimum and maximum), given in brackets.

**Table 6.** Temperature difference measurement for various kinds of surface

Surface	Extremum values	$\Delta T$		$\Delta T_{\max}$		$\Delta T_{\min}$		$\Delta A$	
		max	min	max	min	max	min	max	min
Town asa whole	max	0.8	VII	0.2	II	1.7	VII	-1.7	VII
	min	0.5	I	-0.1	I	0.5	I	-0.3	II
Compactly built	max	1.0	VII, VIII	0.3	II	1.9	VII, VIII	-0.2	VII, VIII
	min	0.7	II	-0.2	VIII	0.9	I	-0.6	I
up areas Sparsely built	max	0.5	VIII, IX	0.1..	VI, V	1.2	VII	-1.2	VII, VIII
	mm	0.3	III	-0.1	X	0.5	I	-0.4	-0.4(D)
up areas Parks	max	0.6	VI, V11	0.6	IV	1.3	VII	-0.9	VIII, IX
	min	0.5	XII	0.3	IX	0.7	I	-0.2	II

As can be easily seen from Table 2, daily oscillations of temperature are smaller in town than outside of it. The differences of the daily amplitudes change during the year from  $\Delta A = -0.6^\circ\text{C}$  in January to  $\Delta A = -2.1^\circ\text{C}$  in July and August. Sparse configuration of buildings deforms less the daily fluctuations of air temperature: the difference  $\Delta A$  changes in the interval of  $-0.4^\circ\text{C}$  to  $-1.2^\circ\text{C}$  (in the same months as before). The lowest differences of the daily air temperature amplitudes are observed, though, for the park areas, where they range from  $-0.2^\circ\text{C}$  in February to  $-0.9^\circ\text{C}$  in August and September.

The sinusoid model, describing the annual changes of air temperature differences,

namely ( $\omega = \frac{2\pi}{365.25}$ ):

$$\Delta T = a_0 + b\sin(\omega t + c)$$

established for compactly built up areas, sparsely built up areas and parks, indicates the dependence of the amplitude of the urban heat island upon the nature of active surface. Air temperatures in the compactly built up areas and in parks of downtown Warsaw diverge the most from the average thermal conditions of the town. The compactly built up areas are characterized by the highest minimum temperatures (the differences  $\Delta T_{\min}$  reaching up to  $1.9^\circ\text{C}$ ), and the lowest daily amplitude  $\Delta A$  (down to  $-2.1^\circ\text{C}$ ), in relation to the surroundings. On the other hand, urban green areas feature the highest maximum temperatures, the differences  $\Delta T_{\max}$  reaching  $0.6^\circ\text{C}$ , and the highest amplitude difference – up to  $-0.9^\circ\text{C}$  – with respect to the surrounding areas.

It can be concluded from the analysis performed that the compactly built up area in downtown Warsaw deforms the most the air temperature field, pushing up the average air temperature, and especially the minimum temperatures, over the five-year period 1961-1965 by  $1.9^\circ\text{C}$  (in particular years by up to  $2.6^\circ\text{C}$ , and on individual days even by  $9^\circ\text{C}$ ), and decreasing the daily temperature fluctuations by  $2.1^\circ\text{C}$ . During the hot summer of 1992 the average monthly differences attained the extremum values of  $-4.1^\circ\text{C}$  in August and  $-0.4^\circ\text{C}$  in July.

4. An essential influence upon the vertical and horizontal movements of air masses in town is exerted by stratification of the atmosphere. The uneven warming of the town during the day (especially during the sunny days), namely strong temperature increase of the insulated walls of buildings, and much smaller increase of temperature of the shaded areas and parks is altogether conducive to appearance of the unstable equilibrium of the air.



The unstable equilibrium of the air, given the thermal contrasts of the surface, gives rise to the development of convection currents and turbulences – the vertical air exchange. This constitutes the process of self-purification of the town's atmosphere – carrying away of gaseous substances to greater heights. Another mechanism of self-purification of the town from the industrial dust is provided by the horizontal movement of air masses, resulting from the difference of temperatures between the centre and the peripheries. This latter mechanism plays an important role in periods of weak winds and calms (town breeze). Within the peripheries of towns – when wind velocities are low and sky is clean there often appear the inversions of air temperature (during the night in conditions of a stable equilibrium of the air masses), entailing stagnation of cool air near to the ground. The urban heat island hampers the occurrence of air temperature inversions, accompanied by fogs, i.e. high concentrations of aerosols. The urban heat island intensifies the vertical, turbulent diffusion of air pollution, thereby decreasing the content of aerosols in the ground adjacent layer of the atmosphere (Stopa-Boryczka, 1992).

In terms of air pollution the most disadvantageous are the conditions of stable equilibrium of the air masses strong inversions of air temperature. They slow down the convection and the vertical turbulent movement of the air. According to the radio probing of the atmosphere, carried out in Legionowo near Warsaw in the years 1954-1959 there have been on the average 265 days in a year with inversions of air temperature. This includes 156 days with the ground-adjacent inversions and 109 days with inversions in free atmosphere, when temperature increases along with height starting with a certain level (Nowosielski, 1959).

Numbers of days with inversions depend upon the season: Spring Summer Autumn Winter Ground-adjacent

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Ground-adjacent	39.2	51.2	38.4	27.2
High	28.4	13.2	26.8	40.

The frequency of the ground-adjacent inversions (of radiation origin) is the greatest in summer, while that of high inversions (of weather front origin) – in winter.

Both kinds of inversions appear most often in the masses of continental air (PPK). Besides this, 50% of the ground-adjacent inversions are observed in conditions of cloudless sky, and a half of them – when the sky is clouded. The probability of inversion taking place during a cloudless night is close to 100%, while on the days with convective clouds –disappearing in the evening, or with tall clouds, which do not stand in the way of radiation of the earth – more than 50%.

It should be emphasized that inversions of air temperature are usually accompanied by low velocities of wind or by calms, when the horizontal and vertical turbulent movement of the air is very limited. They are conducive, therefore, to high concentrations of dusts and SO<sub>2</sub> in the ground-adjacent layer of the air (aerosols). Thus, for instance, the sulphur dioxide SO<sub>2</sub>, associating with the droplets of fog forms the sulphurous acid H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, and in the plant tissues – the sulphuric acid H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

The decrease of frequency of the ground-adjacent inversions in towns is, therefore, a positive effect of the urban heat island.

At the higher levels above town there may exist different daily and annual changes of the heat island. In the afternoon hours the air above town warms up quicker than in its surroundings. This is caused by the more intensive carrying away of the heat upwards through intensified convection and turbulence.

The established regularities regarding the influences exerted by the artificial surfaces (town) on the state of the atmosphere during a day or a year can be made use of in the forecasts of anthropogenic climate changes. In the case of expansion of towns – they can be used in designing new housing estates.

On the basis of empirical formulae equations of straight lines, paraboles, sinusoids and hyperplanes of regression – the deformation of the field of air temperature by a town can be extrapolated. The differences of air temperature between the town and the surrounding areas can be estimated by substitution of appropriate values of meteorological variable. Thus, there exists a

possibility of forecasting, e.g., the air temperature in the newly designed and constructed parts of town. Air temperature can be forecasted in places, where no meteorological measurements have been made before. An example can be provided by the elaboration of the forecast for the design of a housing estate in Białołęka Dworska by Warsaw, elaborated within the framework of the respective governmental program (Stopa-Boryczka, 1992).

The empirical formulae of this kind, determined for various types of built up and green areas, were already partly applied in interpolation, for construction of isotherms within the built up area of Warsaw (Stopa-Boryczka, 1992).

5. Another problem solved is constituted by the natural climate changes and identification of their causes. The proposition was proved stipulating that the modern fluctuations of the climate are the resultant of the solar activity (influencing atmospheric circulation) and the volcanic eruptions (absorption of solar radiation by volcanic dust). Two kinds of indirect influence of the Solar System (SS) on the earth's climate are indicated:

- the parameters of the SS → solar activity → atmospheric circulation;
- the parameters of the SS → volcanic eruptions → solar radiation.

It was also demonstrated that volcanic eruptions – similarly as solar activity – are periodic phenomena, shaped by the changes in the parameters of the solar system. The parameters in question are, in particular, acceleration of the sun with respect to the center of gravity of the SS and the resultant of the tidal forces on the sun, brought about by the gravitational attraction of the greatest planets (the giants).

Identification of the natural causes of climate changes was performed according to the principle: “the spectra of oscillations– the true cycles of causes and effects are similar”. An advance in identification of the causes of natural climate changes was made possible due to the new method of J.Boryczka of determining the dense spectra of oscillations the true cycles.

It turned out that the spectra of oscillations of air temperature, precipitation, outflow of European rivers and atmospheric circulation are alike, as are the spectra of oscillations of the parameters of the solar system. All these spectra are dominated by the periods of rotation of the biggest planets (Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune) around the sun and the periods of their mutual identical positions (expressed in years), see Table 7.

**Table 7.** Periods of mutual identical positions of the giants (years)

Planets	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Jupiter	11.862			
Saturn	19.858	29.458		
Uranus	13.812	45.364	84.015	
Neptune	12.782	35.870	171.400	164.700

. It is quite telling that these periods are present in the spectra of oscillations of the air temperature in Warsaw in the years 1779-1990 (consecutive 12-month averages), of the solar activity in the years 1700-1980 (Wolf numbers), and of volcanic eruptions in the years 1680-1980: the indicator of volcanic dust,  $\lg DVI$  (Dust Veil Index), along with the volcanic

activity indicator  $\lg I = \lg \left( \frac{DVI}{\Delta t} \right)$ , where  $\Delta t$  is the time interval between two consecutive eruptions.

Table 8 presents the strongest cycles (i.e. those with the greatest amplitudes) of the spectra of oscillations ( $R$  multiple correlation coefficient value).

**Table 8.** The strongest cycles in the time series of air temperature, Wolf number and volcanic eruptions

Temperature		Wolf numbers		Volcanic eruptions			
Period	<i>R</i>	Period	<i>R</i>	lg <i>DVI</i>		lg <i>I</i>	
				Period	<i>R</i>	Period	<i>R</i>
12.1	0.10	12.1	0.27	11.4	0.31	11.7	0.29
12.8	0.16	12.8	0.17	13.3	0.28	12.7	0.26
14.0	0.14	13.8	0.09	13.9	0.18	15.2	0.29
17.7	0.14	21.4	0.11	19.8	0.25	21.2	0.32
29.8	0.05	28.5	0.12	30.4	0.19	28.4	0.28
34.7	0.04	36.9	0.08	38.6	0.22	40.8	0.24
42.2	0.10	45.5	0.14	52.2	0.17	757.0	0.33
103.8	0.09	98.3	0.33	791.8	0.34	90.5	0.25
220.7	0.43	187.1	0.20	223.8	0.23	221.5	0.35

One can also observe similarity of the shorter strong cycles, as shown in Table 9 below.

**Table 9.** Characteristics of short strong cycles

	Period	<i>R</i>	Period	<i>R</i>	Period	<i>R</i>
Air temperature	4.16	0.17	7.75	0.23	11.17	0.10
Solar activity	-	-	7.4	0.10	0.10	0.32
Volcanic activity (lg <i>DVI</i> )	4.0	0.33	7.9	0.23	11.4	0.31
Volcanic activity (lg <i>I</i> )	3.9	0.29	8.0	0.32	11.2	0.22
Acceleration of the Sun	3.9	0.28	7.8	0.27	-	-

The thus important similarity between the local maxima of the dense spectra of oscillations (the true cycles) of air temperature, solar activity, volcanic eruptions and the parameters of the Solar System was not expected, in view of the deterministic – stochastic processes taking place in the sun and on the earth (in the atmosphere). 318

During the last two centuries (1779-1990) air temperature in Warsaw has been increasing by 0.6° C in 100 years on the average, i.e.

$$T = 6.93 + 0.006460 t, \quad R = 0.42$$

The upward tendency of the air temperature is the resultant of the overlapping of two natural cycles: 103.8 years and 220.7 years (on the basis of the chronological series for 1779—1979 somewhat shorter cycles were obtained: 89.7 years and 195.2 years, with the remaining ones being the same). During the maxima of solar activity higher temperature of the air is observed than in the years of calm sun. The secular minimum of air temperature coincides with the weakest 11-year cycle of solar activity (1811-1823). On the other hand, the maximum of the temporal trend curve of air temperature can be located some place near the absolute maximum of solar activity (1957). The secular minimum of air temperature occurred during the intensified volcanic activity of the earth: 1815 eruption of Tambora volcano (Indonesia) of *DVI* 3, 000, 1835 – Coseguina (Nicaragua), with *DVI* = 4, 000.

The longest cycles of air temperature: 103.8 and 220.7 years, are similar to the longest cycles of solar activity: 96.3 and 187.1 years, and of volcanic eruptions: lg *DVI* – 91.8 and 223.8 years, lg *I* – 90.5 and 221.5 years. This warming of climate during the last two centuries by 0.6° C per 100 years is mainly caused by the increase of solar activity and the decrease of volcanic activity. Solar activity has been increasing in the years 1700-1980 by 9.5 per each 100 years:

$$W = 34.73 + 0.0948 t, \quad R = 0.20$$

Besides this, there is a downward tendency in the secular trend of volcanic eruptions, both in terms of the Dust Veil Index and of the volcanic activity indicator  $I = \frac{DVI}{\Delta t}$ . Simultaneously, there has been, on the average, an increase of the time intervals, *t*, between consecutive volcanic

eruptions (see the parabole of regression in Fig. 205). The measure of antropogenic changes of air temperature during the last two centuries is constituted by the linear component of  $\Delta T = at$  of the temporal trend of air temperature – the part which remains after elimination of a dozen natural cycles (rhythms) of temperature. The antropogenic component of temperature changes in Warsaw in the years 1779-1979 amounted to  $a = 0.15^\circ\text{C}$  per 100 years. This results primarily from the expansion and growth of the town and the related increase of the heat island (bigger accumulation of heat by the buildings, industrial dusts and  $\text{CO}_2$ ).

The correctness of identification of the natural causes of climate changes was confirmed by the agreement between the climatological and astronomic forecasts for the 21st century. In the climatological forecast 15 true cycles of air temperature, having the highest amplitudes, contained in the dense spectrum of oscillations  $T = f(t)$ , were combined. In the astronomical forecasts, on the other hand, Taylor expansion of the chronological series was obtained according to the least squares with respect to four parameters of the Solar System,  $T = f(G, \cos \gamma, z, Z)$ . Both these curves of secular changes of air temperature in Warsaw in the 21st century are below the average for 1779-1979. Thus, in the 21<sup>st</sup> century one can expect a certain cooling down of climate. It will not be too big, though (like at the turn of 19<sup>th</sup> century), due to the presence of the antropogenic component, which forces the increase of temperature by  $0.15^\circ\text{C}$  per 100 years.

\* \* \*

Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Grzęda M., 2013, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XXX, *Klimat północno wschodniej Polski według podziału fizycznogeograficznego J. Kondrackiego i J. Ostrowskiego* (red.: K. Błażejczyk, M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, Wyd. UW, ss. 550 (s. 180-192 – zmieniony), recenzent: Bohdan Mucha, Lwowski Uniwersytet im. Franki, Ukraina.

Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Błażek E., Skrzypczuk J., 1995, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. IX, *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy* (red. M. Stopa-Boryczka), Wyd. UW, ss. 322 (str. 301-308 i 313-319 – zmieniony), recenzent tomu: Jerzy Kondracki – Przedmowa.

Stopa-Boryczka, Boryczka, J., Bijak Sz., Cebulski R., Błażek, E., Skrzypczuk J., 2010, *Cykliczne zmiany klimatu Europy w ostatnim tysiącleciu według ciągów dendrologicznych*, [w:] *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XXV, *Zmiany klimatu Warszawy i innych miast Europy w XVII-XXI wieku*. Wyd. UW, ss. 417 (skrót. str. 321-362), recenzent Bohdan Mucha.

Boryczka J., Stopa-Boryczka M., 2014, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XXXI-XXXII, *Modele empiryczne przestrzennych i czasowych zmian klimatu Europy z wyodrębnieniem Polski (ważniejsze wyniki badań)*, (red.: K. Błażejczyk, M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, J. Wawer, W. Żakowski), Wyd. WGR UW, ss. 422.

MARIA STOPA–BORYCZKA  
JERZY BORYCZKA  
ELŻBIETA BŁAŻEK  
JAN SKRZYPCZUK

IX. NATURALNE I ANTROPOGENICZNE ZMIANY  
KLIMATU WARSZAWY

# atlas

WSPÓLZALEŻNOŚCI  
PARAMETRÓW  
METEOROLOGICZNYCH  
I GEOGRAFICZNYCH  
W POLSCE

WARSZAWA 1995

---

#### IV. KLIMAT WARSZAWY W PUBLIKACJACH ZAKŁADU KLIMATOLOGII UNIWERSYTETU WARSZAWSKIEGO\*

Maria Stopa-Boryczka, Maria Kopacz-Lembowicz, Jolanta Wawer

##### Wprowadzenie

Zakład Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego prowadzi badania klimatu miast od wielu lat, niemalże od początku swojego istnienia (1951 r.).

Pierwsze wzmianki o klimacie Warszawy rozumianej jako punkt geograficzny pochodzą z prac dotyczących klimatu całej Polski (Okołowicz 1962; Kaczorowska 1962; Stopa 1962). W latach 50. i 60. pod kierunkiem prof. R. Gumińskiego i prof. W. Okołowicza prowadzono badania klimatu Warszawy w cyklu prac magisterskich dotyczących klimatu placów, parków, Lasku Bielańskiego, otoczenia Pałacu Kultury i Nauki i innych. Uruchomiono też w 1957 r. posterunek meteorologiczny na terenie Uniwersytetu Warszawskiego. W kolejnych latach pod kierownictwem prof. M. Stopy-Boryczki wyraźnie wzrosło zainteresowanie badaniami w mieście w celu dokładniejszego rozpoznania typowych, specyficznych cech klimatu Warszawy oraz wykrycia zróżnicowania klimatu w obrębie dużego miasta.

Pierwsze zagadnienie zostało opracowane na podstawie danych meteorologicznych okresu wieloletniego, udostępnionych ze stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej i własnej stacji Uniwersytetu Warszawskiego.

Warszawa na tle otoczenia wyróżnia się przede wszystkim zmniejszonym dopływem promieniowania, wyższą temperaturą powietrza (zwłaszcza minimalną) i dłuższym okresem bezprzymrozkowym, mniejszą wilgotnością względną i większym niedosytem wilgotności powietrza, większym zachmurzeniem oraz mniejszą liczbą dni pogodnych, większymi sumami opadu atmosferycznego, mniejszą prędkością wiatru. Fizyczne przyczyny swoistego klimatu miasta przejawiają się w wyniku oddziaływania takich czynników, jak: sztuczne powierzchnie czynne, konfiguracja budynków i ulic zmieniające wymianę ciepła, sztuczne źródła ciepła, zmiana bilansu wodnego, zanieczyszczenia powietrza.

Wieloletnie charakterystyki elementów meteorologicznych dają również możliwość prześledzenia wielookresowych zmian tychże elementów, a więc trendów, i wykrycia, jak cechy miejskie narastają w miarę rozbudowy miasta. Natomiast w opracowaniach dotyczących zróżnicowania warunków klimatycznych w obrębie miasta oparto się w dużym stopniu na badaniach własnych prowadzonych w wielu osiedlach warszawskich o różnym typie zabudowy (o różnej wysokości, zwartości i z różnym udziałem zieleni).

Badania te przeprowadzono w takich osiedlach jak: Sady Żoliborskie, osiedle Szwoleżerów, Stawki, Chomiczówka, Stegny, Służew nad Dolinką, fragmenty śródmieścia, osiedle willowe Olimpijska na Mokotowie. Przeprowadzono również badania profilowe przez miasto: północ-południe i wschód-zachód, badano też warunki mikroklimatyczne skarpy wiślanej. Starano się m. in. określić pewne cechy miejskiej wyspy ciepła i jej intensywność w ciągu roku w zależności od sytuacji pogodowej

\*) Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J., 2001, *Klimat Warszawy w publikacjach Zakładu Klimatologii Uniwersytetu warszawskiego*, [w:] Prace Geograficzne, nr 180, *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej*, Wyd. IG PAN, Warszawa , s. 57-69.

Podstawą oceny zarówno intensywności wyspy ciepła, jak i skutków jej występowania były różnice temperatury  $\Delta T$ , obliczone w stosunku do stacji peryferyjnej Warszawa-Okęcie dla całego miasta oraz różnych jego fragmentów.

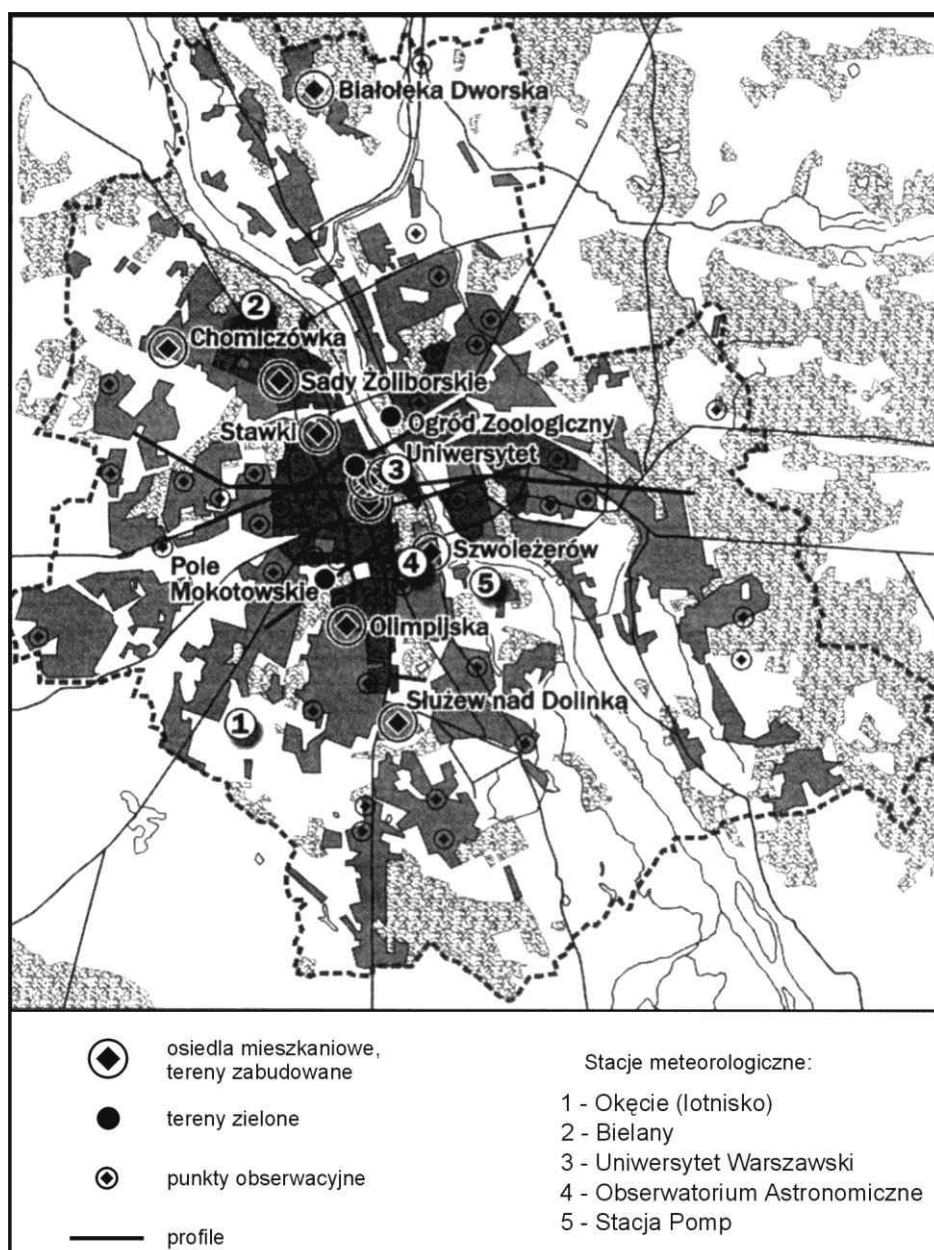
**Tabela 1.** Największe różnice średnich wartości zmiennych meteorologicznych pomiędzy centrum a peryferiami Warszawy, za okres 1961-1965 i 1969 roku

Lp.	Nazwa zmiennej i jej jednostka	Różnice
1.	Temperatura średnia dobową (°C)	1,1
2.	Temperatura maksymalna (°C)	0,5
3.	Temperatura minimalna (°C)	2,0
4.	Dni przymrozkowe ( $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ )	-10
5.	Dni mroźne ( $t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$ )	-6
6.	Ciśnienie pary wodnej (hPa)	-0,5
7.	Wilgotność względna (%)	-5
8.	Niedosyt wilgotności powietrza (hPa)	1,8
9.	Zachmurzenie (%)	4
10.	Dni pogodne (rok)	-4
11.	Dni pochmurne (rok)	18
12.	Dni z mgłą (rok)	-18
13.	Suma opadu atmosferycznego (mm, rok)	76
14.	Dni z opadem $\geq 0,1$ mm (rok)	-8
15.	Dni z opadem $\geq 1,0$ mm (rok)	7
16.	Dni z opadem $\geq 10,0$ mm (rok)	2
17.	Dni z burzą (rok)	-7
18.	Dni z pokrywą śnieżną (rok)	4
19.	Prędkość wiatru (m/s)	-1,4
20.	Dni z wiatrem silnym ( $\geq 10$ m/s, rok)	-8
21.	Liczba cisz	97
22.	Sumy promieniowania całkowitego (MJ/m <sup>2</sup> miesiąc) 1969 r.	58,6
23.	Zanieczyszczenie (opad pyłu w t/km <sup>2</sup> miesiąc) 1969 r.	110

### Miejska wyspa ciepła

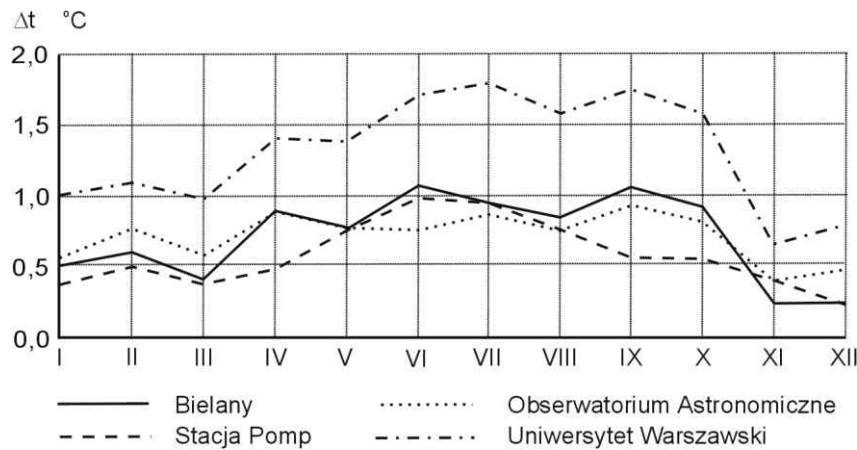
Wyspa ciepła w Warszawie nie jest zjawiskiem stabilnym i wykazuje periodyczne wahania zarówno w cyklu dobowym, jak i rocznym. Największe zróżnicowanie temperatury między miastem i peryferiami występuje wieczorem i nocą, a w przebiegu rocznym od kwietnia do października, najmniejsze zaś w południe oraz w listopadzie i marcu. Wyspa ciepła zaznacza się najsilniej jednak latem (lipiec), osiągając średnio w centralnych rejonach miasta  $\Delta T$  bliską 2°C, podczas gdy w innych rejonach miasta, z dala od śródmieścia, różnica jest o połowę mniejsza. Analiza przebiegu rocznego wartości przyrostu temperatury powietrza w mieście dostarcza informacji o tempie nagrzewania i wychładzania miasta w stosunku do terenów niezabudowanych. Tereny o intensywnej zabudowie charakteryzują się spowolnionym tempem wychładzania oraz nagrzewania, zwłaszcza w miesiącach letnich.

Właściwości miejskiej wyspy ciepła (jej intensywność) zależą od pory roku i pory dnia oraz warunków pogodowych panujących w ciągu doby. Analiza dobową ujawnia, że miejska wyspa ciepła zaznacza się w chłodnej porze roku (zwłaszcza od grudnia do marca) zwykle przez całą dobę. Jest to efekt termicznego oddziaływania zabudowy wraz z wpływem „sztucznego” ciepła.



Rys. 1. Badania terenowe Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego





**Rys. 2.** Różnice temperatury powietrza pomiędzy stacjami miejskimi a Okęciem w terminie wieczornym w latach 1961-1965

Największe dzienne zróżnicowanie intensywności wyspy ciepła występuje latem i wczesną jesienią.

Natomiast w porze letniej wyspa ciepła nasila się wieczorem i nocą, ze względu na ciepło zaakumulowane przez sztuczne podłoże i mniejsze jego wypromieniowanie niż poza miastem. W godzinach okołopołudniowych natomiast w mieście jest często chłodniej niż na peryferiach.

A więc na intensywność wyspy ciepła wywiera wpływ zarówno szereg elementów meteorologicznych, jak i czynników innej natury – antropogenicznej (wielkość miasta, jego zwartość, położenie itp.).

Spśród elementów meteorologicznych najsilniejsze oddziaływanie na wyspę ciepła wywołują wiatr i zachmurzenie. Wzrost prędkości wiatru zmniejsza szansę na gromadzenie się zapasów ciepła w mieście, szczególnie w chłodnej porze roku. Przy wiatrach przekraczających już 7 m/s różnice temperatury powietrza między miastem a jego otoczeniem stopniowo zanikają. Za graniczną wartość prędkości wiatru, przy której zanika wyspa ciepła, uznano 9-10 m/s. Natomiast utrzymywaniu się wyspy ciepła sprzyjają małe prędkości wiatru, a w szczególności cisze.

Wzrost zachmurzenia zmniejsza intensywność wyspy ciepła. Niebo bezchmurne lub zachmurzenie małe do 2 (w skali od 0-10) sprzyja zaś utrzymywaniu się różnic termicznych między miastem a peryferiami.

Bardzo istotne jest też rozpoznanie dobowych zmian różnic  $\Delta T$  między poszczególnymi rejonami miasta a peryferiami, co pozwala na określenie terminów pojawiania się wyspy ciepła, występowania maksimum jej intensywności oraz czasu jej słabnięcia lub zaniku. Można też dokładnie określić tempo nagrzewania i wychładzania się powietrza w obszarach śródmiejskich i peryferyjnych.

Interesujące jest również określenie, przy jakiej cyrkulacji powietrza różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem są największe, np.  $> 3^{\circ}\text{C}$ .

Interesujące jest, że miejska wyspa ciepła w Warszawie o maksymalnej intensywności (największe różnice dodatnie między centrum miasta i peryferiami) występuje w dniach o cyrkulacji antycyklonalnej (wyżowej). Największa różnica temperatury powietrza między miastem i otoczeniem wystąpiła przy typie cyrkulacji  $O_A$  (antycyklonalnym zerowym).

W wyniku prowadzonych badań własnych udało się ustalić cechy charakterystyczne klimatu lokalnego obszarów miejskich o zabudowie zwartej, luźnej, terenów zieleni oraz ulic różnie ukierunkowanych. Badano więc procesy wymiany ciepła, tempo nagrzewania i wychładzania, deformację pola przepływu powietrza w obrębie zabudowy, czy też zróżnicowanie wilgotności powietrza.

**Tabela 2.** Wartość tempa nagrzewania i ochładzania powietrza w centrum Warszawy i na peryferiach w porach roku (°C/godz.)

Pory roku	Tempo nagrzewania		Tempo wychładzania	
	centrum	peryferie	centrum	peryferie
Zima	0,2-0,1	1,5-2,5	0,1-0,7	1-3
Wiosna	0,3-2	1-3	0,1-0,7	1-3
Lato	około 1	1-3	< 1	1-6
Jesień	1-2	1-3	1-2	2-3

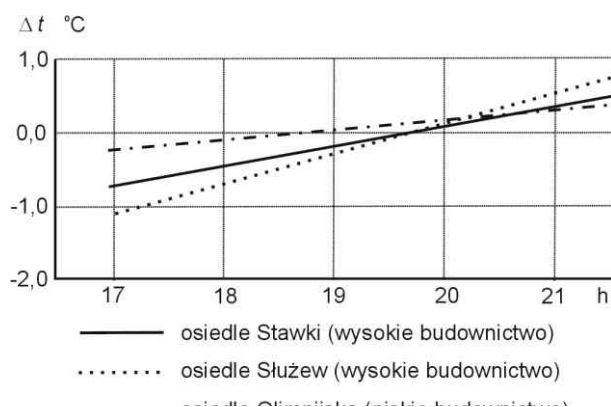
**Tabela 3.** Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła w porach roku w Warszawie

Pory roku	Czas pojawiania się wyspy ciepła (godziny)	Czas występowania maksimum wyspy ciepła (godziny)	Czas zaniku wyspy ciepła (godziny)
Zima	16:00-18:00	21:00-24:00	6:00-7:00
Wiosna	17:00-18:00	około 24:00	7:00-8:00
Lato	18:00-20:00	22:00-24:00	6:00-8:00
Jesień	16:00-18:00	21:00-01:00	6:00-9:00
Pory roku	Maksymalne wartości $\Delta T$	$\Delta T$ (w °C) w ciągu dnia	
Zima	>0	9-11	
Wiosna	<0	9	
Lato	<0	8	
Jesień	<0	8	

Analiza zróżnicowania ujawniła, że fragmenty miasta o zwartej zabudowie, czy też większe kompleksy zieleni parkowej, jak również osiedla o układzie kwatrowym odznaczają się tendencją do występowania „konserwującego” efektu cieplnego. Zaznacza się to najwyraźniej w czasie nagłych zmian pogody (ocieplenia lub ochłodzenia), a związane jest z obniżonym stopniem wentylacji wymienionych obiektów. Natomiast jakie może być tempo nagrzewania i wychładzania powierzchni zabudowanych wybranych osiedli względem otoczenia, przedstawia następujący przykład.

Osiedla o zabudowie wysokiej, blokowej, takie jak Służew nad Dolinką czy osiedle Stawki, nagrzewają się z intensywnością o 0,2°C mniejszą niż otoczenie. Oznacza to, że przy wzroście temperatury otoczenia o 1°C osiedle nagrzewa się tylko o 0,8°C i jest wtedy chłodniejsze.

Inaczej przebiega proces nagrzewania powietrza w osiedlu o zabudowie niskiej, willowej, z dużym udziałem zieleni (Olimpijska). Jeszcze silniej zaznacza się wpływ różnego rodzaju typu zabudowy w procesie wieczornego wychładzania. Kompleks wysokich budynków osiedla Służew nad Dolinką wychładza się z intensywnością mniejszą o 0,3-0,4°C, a zatem spadkowi temperatury poza osiedlem o 1,0°C odpowiada 0,6°C w osiedlu, które staje się wieczorem coraz cieplejsze. W niskiej zabudowie osiedla Olimpijska wychładzanie przebiega mniej intensywnie: spadkowi temperatury na zewnątrz osiedla o 1,0°C odpowiada 0,9°C w osiedlu.



**Rys. 3.** Zależność różnicy średniej temperatury powietrza z punktów osiedlowych i punktu zewnętrznego od czasu

Z badań różnych osiedli warszawskich wynika wniosek, że powietrze w osiedlu nagrzewa się w godzinach rannych mniej intensywnie, a w godzinach wieczornych wychładza z intensywnością o 1/3 mniejszą niż w otoczeniu. Tak więc wpływ zabudowy na pole temperatury powietrza jest największy w godzinach wczesnorannych i późnowieczornych.

### Przewietrzanie miasta

Ustalenie tempa nagrzewania i wychładzania fragmentów miasta (osiedli) o różnym typie zabudowy oraz zróżnicowania zasobów ciepła pomiędzy całym miastem i jego otoczeniem pozwala na rozpoznanie bardzo ważnego procesu zachodzącego w terenie zabudowanym – lokalnej cyrkulacji powietrza – procesu, który w znacznym stopniu wspomaga przewietrzanie miasta.

Zdynamizowanie wymiany powietrza, prowadzące do rozcieńczenia aerozolu miejskiego i samooczyszczania powietrza, jest zasadniczym problemem w dużych miastach. W Warszawie wynika on ze stanu i charakteru zanieczyszczenia. Szacuje się, że około 70% to zanieczyszczenia komunikacyjne. I o ile poziom zanieczyszczeń przemysłowych został ustabilizowany, to stopień zagrożeń zanieczyszczeniami komunikacyjnymi wciąż wzrasta.

W miastach funkcjonują dwa systemy przewietrzania: zewnętrzny i wewnętrzny. Zewnętrzny system to poziomy ruch powietrza – wiatr, który wnikając w środowisko o innych cechach fizycznych, ulega modyfikacji. System wewnętrzny stanowi lokalna cyrkulacja w obrębie organizmu miejskiego, uwarunkowana termicznie i dynamicznie.

Wymienione systemy w zależności od makrocyrkulacji atmosferycznej, mogą współuczestniczyć w procesie przewietrzania miasta albo któryś z tych systemów zaczyna przeważać, przejmując niekiedy całkowicie rolę czynnika wentylacyjnego.

Warszawa, z racji swego położenia i ukształtowania terenu, otwarta jest na swobodny dopływ powietrza ze wszystkich kierunków. Istotne jest jednak, w jakim stopniu napływające nad obszar miasta powietrze może spełniać funkcję czynnika przewietrzającego.

Najczęściej powietrze napływające z sektora zachodniego (NW, W, SW), charakteryzujące się na stacji Niepokalanów największą częstością (48,2%) i największą średnią prędkością (4,4 m/s), okazuje się „pozyteczne” dla wentylacji miasta tylko w 14,4% przypadków.

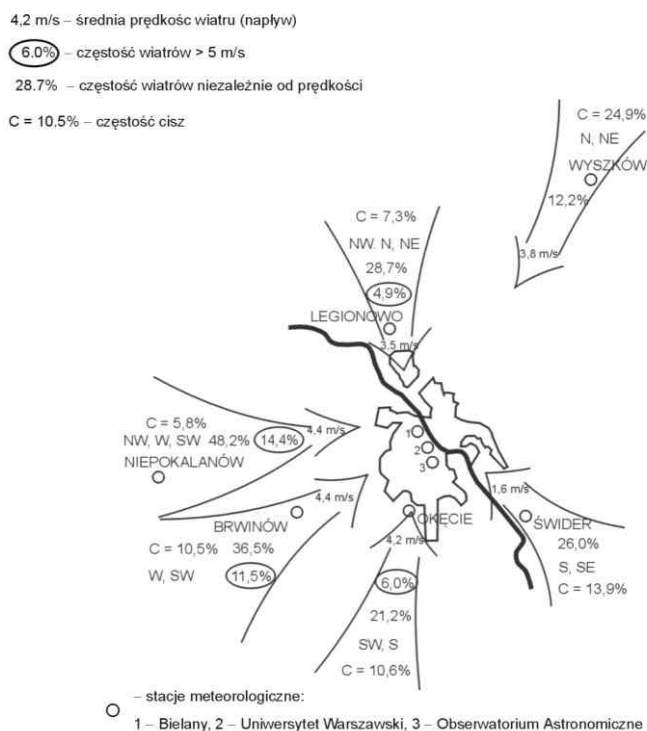
Napływ powietrza z innych kierunków zapewnia Warszawie skuteczne przewietrzanie w jeszcze mniejszym stopniu (wiatry o prędkości 5 m/s i większej na otwartej przestrzeni). Wiatr spełnia swoją funkcję wentylacyjną w Warszawie w sposób wystarczający jedynie w chłodnej porze roku. W lecie wymiana powietrza w centralnych rejonach miasta jest zbyt słaba. Wskazuje to na konieczność intensyfikowania lokalnej wymiany powietrza.

Najsukuteczniejszymi siłami, działającymi w kierunku rozcieńczenia aerozolu miejskiego i samooczyszczania powietrza, w ciągu dnia są prądy wstępujące. Różny stopień nagrzewania się sąsiadujących ze sobą powierzchni czynnych wywołuje pionowy ruch (konwekcyjny) i w konsekwencji lokalny przepływ powietrza między powierzchniami o znacznych kontrastach termicznych. Intensywność takiej wymiany będzie tym większa, im bardziej zróżnicowana jest temperatura.

Typowym układem kontrastowym w miastach jest zespół terenów zabudowanych sąsiadujących z terenami zieleni. Różnice w nagrzewaniu się tych powierzchni, przy określonych warunkach pogodowych (intensywne promieniowanie, cisza lub słaby wiatr) mogą dochodzić do kilkunastu stopni. Najczęściej w Warszawie obserwowaliśmy kontrasty termiczne rzędu kilku stopni.

Unoszący się prąd ciepłego powietrza powoduje zasysanie. Tor prądu wstępującego będzie więc rodzajem „kominów” wynoszącego zanieczyszczenia ponad zabudowę. Rozstaw, gęstość tych „kominów”, jak również pola powierzchni kontrastowych można regulować w zależności od potrzeb. Najbardziej wskazane wydaje się uaktywnienie pionowej wymiany powietrza w centralnych rejonach miasta.

Prądy konwekcyjne są podstawowym czynnikiem samooczyszczania powietrza w ciągu dnia przy pogodzie bezwietrznej lub słabych ruchach powietrza. Wiatry umiarkowane współuczestniczą w tym procesie, natomiast silniejsze, przekraczające 7 m/s, przejmują tę funkcję.



Rys. 4. Schemat napływ wiatru nad Warszawę (1951-1960)

W nocy, przy pogodzie bezwietrznej i pogodnym niebie jedynym czynnikiem zapewniającym wymianę powietrza w Warszawie jest tzw. nocna bryza miejska, która powstaje w wyniku powiększających się kontrastów termicznych między powoli wychładzającym się terenem zabudowanym i szybko stygnącym terenem pozamiejskim. Dochodzi wówczas do powstania prądów powietrznych skierowanych dołem ku wnętrzu miasta, w miejsce unoszącego się ku górze nagrzanego powietrza nad centrum. Tworzy się cyrkulacyjny obieg powietrza o różnym zasięgu i nie zawsze jest to powietrze świeże, czyste, np. w przypadku lokalizacji uciążliwych obiektów na skraju miasta. Z tego względu dobrze jest, jeśli na drodze strumieni powietrznych, skierowanych ku centrum miasta znajduje się strefa zieleni, spełniająca rolę filtru.

W związku z intensyfikacją zabudowy wielu rejonów miasta (w ostatnim czasie) istnienie klinów napowietrzających miasto zostało wyraźnie zakłócone. Przykładami może być: intensywna zabudowa wzdłuż Alej Jerozolimskich w kierunku Pruszkowa, zabudowa dawnego lotniska na Gocławiu, czy też zabudowa wkraczająca w klin lotniska Bemowo.

### Warunki odczuwalne

Wskaźnikami prawidłowego przewietrzania terenów zabudowanych może być czystość powietrza i korzystne warunki odczucia termicznego odbierane przez mieszkańców miasta, szczególnie w cieplej porze roku, kiedy kontakt z zewnętrznymi warunkami atmosferycznymi jest szczególnie ścisły.

W lecie mieszkańcy Warszawy są często narażeni na warunki przegrzania, spowodowane łącznym działaniem wysokiej temperatury powietrza, intensywnym promieniowaniem słonecznym w miejscach nie zacienionych, słabym ruchem powietrza oraz dodatkowym efektem – promieniowaniem energii cieplnej z nagranych ścian budynków i ulic. Uciążliwość takich warunków polega na nieprawidłowej wymianie ciepła między organizmem ludzkim a środowiskiem atmosferycznym w wyniku zbyt małej zdolności chłodzącej powietrza. W centrum Warszawy tego rodzaju niekorzystne stany pojawiają się przeciętnie w ciągu 20% dni letnich, podczas gdy poza miastem są dwukrotnie rzadsze.

Do zmniejszenia udziału tych niekorzystnych warunków odczuwalnych przyczynić się może w znacznym stopniu odpowiedni układ zieleni osiedlowej, parków. Wskazane jest, aby zieleń wysoka nie tworzyła zwartych skupisk, lecz projektowana była w luźnych grupach. Nie będzie wówczas hamowany przepływ powietrza, odgrywający w tych sytuacjach doniosłą rolę ochładzającą, nie będą się też tworzyły zastoiska wilgotnego powietrza, które w połączeniu z wysoką temperaturą będzie stwarzało uciążliwy stan parności. Np. pomiary wielkości ochładzającej powietrza, przeprowadzone w lipcu 1975 r. w Ogrodzie Saskim, wykazały, że pomimo nieco niższych wartości temperatury powietrza w porównaniu z sąsiednim Placem Zwycięstwa uciążliwe odczucie parności osiągało tu w godzinach południowych częstość 75%, podczas gdy na Pl. Zwycięstwa nie przekraczało 37%.

W większych skupiskach zieleni powinny być obszary o żywym ruchu powietrza, jak i miejsca osłonięte od wiatru, zapewniające mieszkańcom korzystanie z wypoczynku na powietrzu w czasie chłodnych, wietrznych dni, kiedy to wiatr powoduje nadmierne wychłodzenie organizmu.

Przy doborze składu gatunkowego roślinności w parkach powinno się uwzględnić taką, która produkuje lotne substancje bakteriobójcze – fitonocydy.

Ważna jest też zieleń towarzysząca ciągom komunikacyjnym, której głównym zadaniem jest zatrzymywanie zanieczyszczeń stałych i pochłanianie gazowych oraz obniżanie

nie poziomu hałasu. Elementy tej zieleni to drzewa, krzewy, zieleń niska, odporne na działanie aerozolu ulicznego.

Zieleń miejska spełnia więc doniosłą rolę w optymalizacji warunków bioklimatycznych miasta. Z tego powodu poświęciliśmy w naszych badaniach wiele miejsca określeniu roli zieleni w kształtowaniu warunków klimatycznych Warszawy.

W ramach tematu dotyczącego klimatu miasta wykonano w Zakładzie Klimatologii UW ponad 200 opracowań, w tym 4 pozycje książkowe, około 100 artykułów, 6 prac zleconych przez różne instytucje, 4 prace doktorskie i około 150 prac magisterskich

## Literatura

- Kaczorowska Z., 1962, *Opady w Polsce w przekroju wieloletnim*, Prace Geograficzne IG PAN, nr 33, Warszawa.
- Kaczorowska Z., 1967, *Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1951-1956*, Przegląd Geofizyczny, R.XII, z.3-4, Warszawa.
- Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Martyn D., Olszewski K., 1984, *Wpływ zieleni miejskiej na klimat lokalny*, [W]: „Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego”, praca zbiorowa pod red. Szczepanowskiej, PWN, Warszawa.
- Kossowska U., 1973, *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy*, Prace i Studia IGUW seria Klimatologia , z. 7, Warszawa.
- Kossowska U., 1977, *Warunki termiczne Warszawy*, Prace i Studia IGUW seria Klimatologia, z. 9. Warszawa.
- Okołowicz W., 1962, *Zachmurzenie Polski*, Prace Geograficzne IG PAN, nr 34, Warszawa.
- Stopa-Boryczka M., 1962, *Burze w Polsce*, Prace Geograficzne IG PAN, nr 34, Warszawa.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Ryczywolska E., Wawer J., 1984, *Badania wpływu zabudowy na klimat lokalny w Warszawie*, [W]: Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji nt. „Klimat i bioklimat miast”, Łódź.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Mierzwiński B., Wawer J., 1986, *Deformacja pól zmiennych meteorologicznych pod wpływem zabudowy*, Materiały I Sesji Naukowej Instytutu Nauk Fizycznogeograficznych, Warszawa.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Błażek E., Kicińska B., Żmudzka E., 1995, *Antropogeniczne zmiany temperatury powietrza w Warszawie – pozytywne i negatywne skutki*, [W]: „Klimat i bioklimat miast”, pod red. K. Kłysika , Łódź.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Błażek E., Skrzypczuk J., 1995, *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy*, [W]: „Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce”, t. IX, Warszawa.
- Studies on the climate of Warsaw, praca zbiorowa pod red. M. Sropy-Boryczki, 2003, Wyd. UW.
- Wawer J., 1997, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie*, Prace i Studia Geograficzne , t.20, Warszawa.

THE CLIMATE OF WARSAW ACCORDING TO RESEARCH DONE BY THE UNIVERSITY OF WARSAW DEPARTMENT OF CLIMATOLOGY.

Summary

The article portrays the Department's research results on the climate of Warsaw since the beginning of the 1950's. The article occupies itself with two main branches of questioning.

The first branch of questioning, aims to define the typical climatic characteristics of Warsaw on the basis of climatic conditions in the Warsaw Basin. On the basis of an analysis undertaken on the long-term character of the meteorological conditions in the urban area, it was possible to identify specific meteorological characteristics and the defining factors that caused them. The paper also studied the trend on how the urban characteristics of a region develop with the growth of a city (very important information to city planners).

The second branch of questioning aims to find the difference in local climate in the outskirts of the city. The most attention was given to the occurrence of heat islands and the reasons for their intensity during the year (and the time of day) and depending on the weather (circulation, wind cloud cover and other meteorological occurrences). When determining local climates for parts of the city with high and low density structures, green areas and differently positioned streets (the institute has already carried out lengthy research of its own in this area) large amounts of time were given to discovering the micro-processes which occur in the layers of air, near the ground. When researching, for instance, the rate of heating and cooling of certain fragments of the city (the suburbs) it was possible to define the horizontal and vertical intensity of heat exchange - and thus the local circulation of the air, a process, which to a large degree aids in the (insufficient) cooling of the city by the wind. This type of research allows us to reach conclusions on how to improve the climatic conditions in ever-expanding Warsaw. A large role in improving the bioclimatic conditions of the citizens of Warsaw (mainly providing them with clean air and satisfactory thermal conditions) is played by the green areas within the city. A large part of the study is given to these green areas and to their defining role in determining climatic and bioclimatic conditions.

*Adres autorów:*

*Maria Stopa-Boryczka*

*Zakład Klimatologii, Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW ul.  
Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa*

*Maria Kopacz-Lembowicz*

*Zakład Klimatologii, Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW ul.  
Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa*

*Jolanta Wawer*

*Zakład Klimatologii, Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW ul.  
Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa*