

**Maria Stopa-Boryczka,
Jerzy Boryczka, Jolanta Wawer**

Uniwersytet Warszawski,
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,
Zakład Klimatologii
00–927 Warszawa,
ul. Krakowskie Przedmieście 30
e-mail: jgwawer@uw.edu.pl

**WPŁYW ZABUDOWY I ZIELENI OSIEDŁOWEJ
NA ZRÓŻNICOWANIE KLIMATU LOKALNEGO
W WARSZAWIE**

**Influence of build-up area and housing estate green areas
of variety of the local climate in Warsaw**

Summary. The more important research results on the impact of building development and vegetation on the local climate, conducted in Warsaw in the years 1959–2009 by the Department of Climatology, are presented. Majority of the issues associated with determining the deformation of air temperature limits (urban heat islands), humidity and wind vector areas, because of buildings in housing estates, located in various parts of the city, were resolved in master's thesis. Areas with high building density are characterized by slow cooling and warming pace, especially during the summer months. Spatial changes in the urban heat islands in the east-west direction well describe the latitudinal profiles (W-E) of air temperature differences ($\Delta T > 0$) between the city and its urban fringe. The urban heat island ΔT does not appears till 5PM, initially in the Central City District. Spatial diversity of effective temperature and catathermal cooling allowed to mark off in housing estates ("Stawki", "Służew nad Dolinką", "Sady Żoliborskie") places with perceptible conditions, e.g. heat, warmth, comfort, cold.

Słowa kluczowe: temperatura powietrza, wyspa ciepła, zmiany dobowe, zmiany roczne, profile równoleżnikowe, miasto

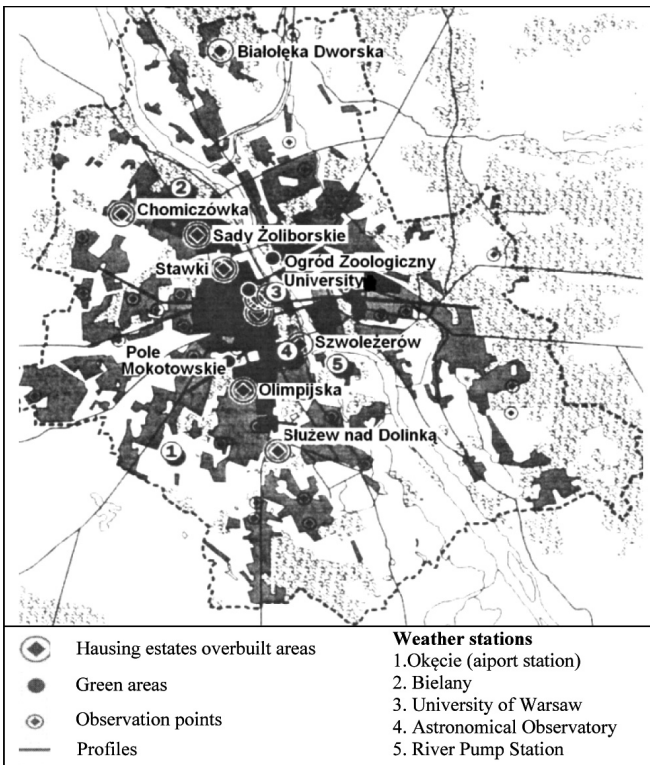
Key words: air temperature, intensity of heat island, diurnal changes, annual changes, air temperature, latitudinal profiles, town

WPROWADZENIE

Celem pracy 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. Badania Zakładu Klimatologii nad wpływem zabudowy na klimat lokalny w Warszawie prowadzono w latach 1959–2009 (Stopa-Boryczka red. 2003, Stopa-Boryczka i in. 2008, 2010). Obiektami szczegółowych zainteresowań stały się osiedla mieszkaniowe położone w różnych dzielnicach miasta w przybliżeniu na profilu północ-południe (ryc. 1).

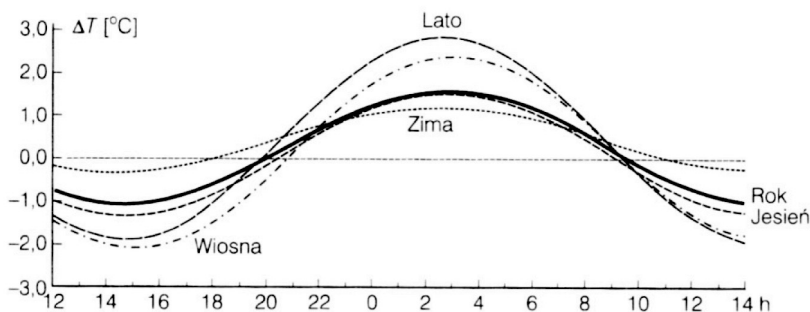
CECHY TERMICZNE KLIMATU LOKALNEGO MIASTA NIZINNEGO

Wyspa ciepła ($\Delta T > 0$) w Warszawie cechuje się wahaniami: dobowymi (ryc. 2) i rocznymi (ryc. 3, tab. 1). Największe różnice ΔT temperatury między miastem i peryferiami występują wieczorem i nocą, a najmniejsze w południe. W przebiegu rocznym, różnice ΔT są największe w lecie (w lipcu – ponad 2°C), a najmniejsze w zimie.



Ryc. 1. Badania terenowe Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego

Fig. 1. Climatological field studies carried out in Warsaw by the Department of Climatology of Warsaw University



Ryc. 2. Przebieg dobowy miejskiej wyspy ciepła ($\Delta T > 0$) w Warszawie (1961–1965)
Fig. 2. Daily intensity changes of the “heat island” ($\Delta T > 0$) in Warsaw



Ryc. 3. Przebieg roczny różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami w Warszawie w latach 1951–1965 (dobowe minimum ΔT_{\min})
Fig. 3. Annual changes of air temperature differences between center of the town and its peripheries in Warsaw, in the years 1951–1965 (daily minimum ΔT_{\min})

Tabela 1. Równania sinusoid rocznych zmian różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami w Warszawie (1951–1965) (dobowe minimum ΔT_{\min})

Table 1. Equations of sinusoids of annual changes in air temperature differences between center of the town and its peripheries in Warsaw (1951–1965) (daily minimum ΔT_{\min})

	$\Delta T = a_0 + b \sin(2\pi t / \Theta + c)$	R
Zabudowa zwarta	$\Delta T_{\min} = 1,436 + 0,495 \sin(2\pi t / 12 - 1,992)$	0,82
Zabudowa luźna	$\Delta T_{\min} = 0,852 + 0,355 \sin(2\pi t / 12 - 1,880)$	0,78
Zieleni parkowa	$\Delta T_{\min} = 1,001 + 0,302 \sin(2\pi t / 12 - 2,031)$	0,80
Miasto	$\Delta T_{\min} = 1,097 + 0,564 \sin(2\pi t / 12 - 1,933)$	0,64

Istotne jest też poznanie dobowych zmian różnic DT między poszczególnymi rejonami miasta a peryferiami, które umożliwiają wyznaczenie terminów pojawiania się wyspy ciepła, występowania maksimum jej intensywności oraz czasu jej słabnięcia lub zaniku (tab. 2 i 3).

Tabela 2. Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła w porach roku w Warszawie

Table 2. Characteristics of an urban heat island during seasons in Warsaw

	Początek (h)	Maksimum (h)	Koniec (h)	DT _{max}	DT (°C)
Zima	16–18	21–24	6–7	>0	9–11
Wiosna	17–18	about 24	7–8	<0	9
Lato	18–20	22–24	6–8	<0	8
Jesień	16–18	21–01	6–9	<0	8

Tabela 3. Tempo nagrzewania i ochładzania powietrza w centrum Warszawy i na peryferiach w porach roku (°C·h⁻¹)

Table 3. Pace of air warming and cooling (°C·h⁻¹) in the centre of Warsaw and in the outskirts in seasons

	Tempo nagrzewania		Tempo wychładzania	
	Centrum miasta	Peryferie	Centrum miasta	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

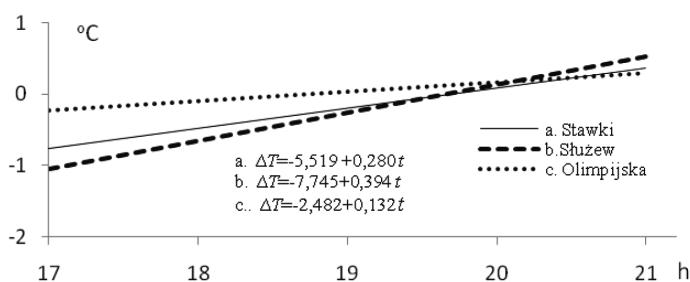
TEMPO NAGRZEWANIA I WYCHŁADZANIA OSIEDLI O ZABUDOWIE WYSOKIEJ, BLOKOWEJ I NISKIEJ WILLOWEJ Z DUŻYM UDZIAŁEM ZIELENI

Tempo nagrzewania i wychładzania osiedli badano na przykładzie 3 osiedli mieszkaniowych Warszawy – o zabudowie wysokiej blokowej, luźnej (Stawki, Służew nad Dolinką) i niskiej willowej z dużym udziałem zieleni (w rejonie ulic Olimpijskiej i Raławickiej). W celu określenia cech termicznych osiedli mieszkaniowych skorelowano dane (co 0,5 h) z punktów pomiarowych zlokalizowanych na osiedlach i na ich peryferiach. Zależności te opisano równaniami prostych regresji, wyodrębniając przedziały czasowe (pory): ranną 7–11^h, południową 12–16^h i wieczorną 17–21^h (czasu letniego, tab. 4, ryc. 4).

Zmiany przestrzenne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie, w kierunku zachód-wschód w godzinach 16, 18, 20 charakteryzują profile różnic temperatury

Tabela 4. Równania prostych regresji różnic temperatury powietrza w Warszawie (ΔT) między osiedlami mieszkaniowymi względem Okęcia (T) (r – współczynnik korelacji)
Table 4. The simple regression equation of air temperature differences in Warsaw (ΔT) between housing estates and Okęcie, in relation to Okęcie (T) (r – the correlation coefficient)

	Stawki	r	Służew	r	Olimpijska	r
Rano	$\Delta T = 2,314 - 0,163 T$	-0,75	$\Delta T = 2,769 - 0,167 T$	-0,70	$\Delta T = 0,619 - 0,038 T$	-0,62
Po południu	$\Delta T = 0,277 - 0,045 T$	-0,15	$\Delta T = 3,509 - 0,160 T$	-0,45	$\Delta T = 1,716 - 0,085 T$	-0,52
Wieczór	$\Delta T = 6,353 - 0,301 T$	-0,95	$\Delta T = 7,878 - 0,353 T$	-0,99	$\Delta T = 2,747 - 0,130 T$	-0,81



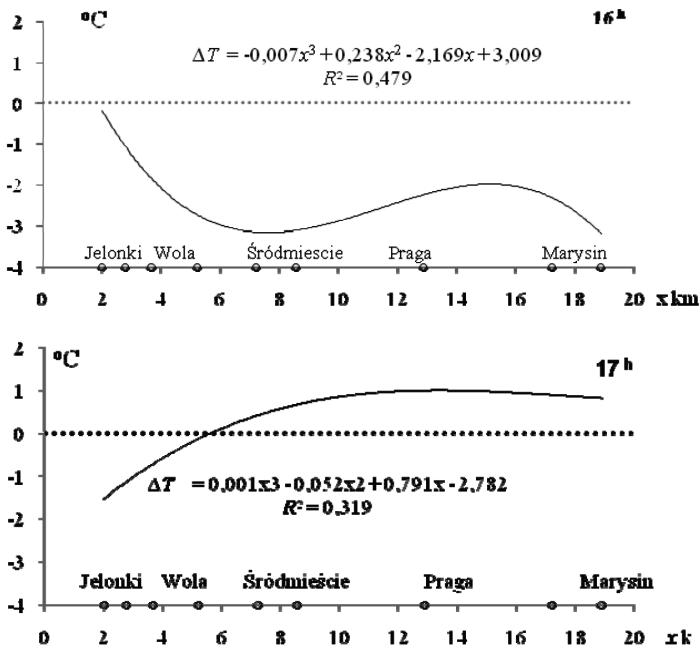
Ryc. 4. Zależność różnic (ΔT) między średnią temperaturą powietrza w osiedlach mieszkaniowych i w punktach zewnętrznych od czasu (t)

Fig. 4. The dependence of the difference (ΔT) between the average temperature in points inside the estates and an external reference point as a function of time (t)

powietrza (ΔT) między dzielnicami (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) i jego peryferiami (Okęcie). Miejska wyspa ciepła ($\Delta T > 0$) pojawia się o 16^h na Jelonkach, o 18^h i 20^h występuje na całym profilu W-E, a o 20^h – jest największa (5,0°C) w Śródmieściu w odległości $x = 8,56$ km (tab. 5, ryc. 5 i 6).

Tabela 5. Profile równoleżnikowe W-E (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) zmian różnic temperatury powietrza (°C) między miastem i peryferiami w Warszawie
Table 5. Profiles latitudinal W-E (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) changes of air temperature differences (°C) between the town and its vicinity in Warsaw

Profil W-E Profiles W-E	Jelonki		Wola		Śródmieście		Praga	Marysin	
x km	2.00	2.78	3.67	5.22	7.22	8.56	12.89	17.22	18.89
16 ^h	1.7	-3.0	-2.6	-2,6	-2.6	-2.4	-3.0	-2.1	-3.2
18 ^h	3.1	2.8	2.8	2,6	2.4	2.6	2.4	3.0	.
20 ^h	3.4	4.4	4.3	4,7	3.9	5.0	3.1	4.6	.



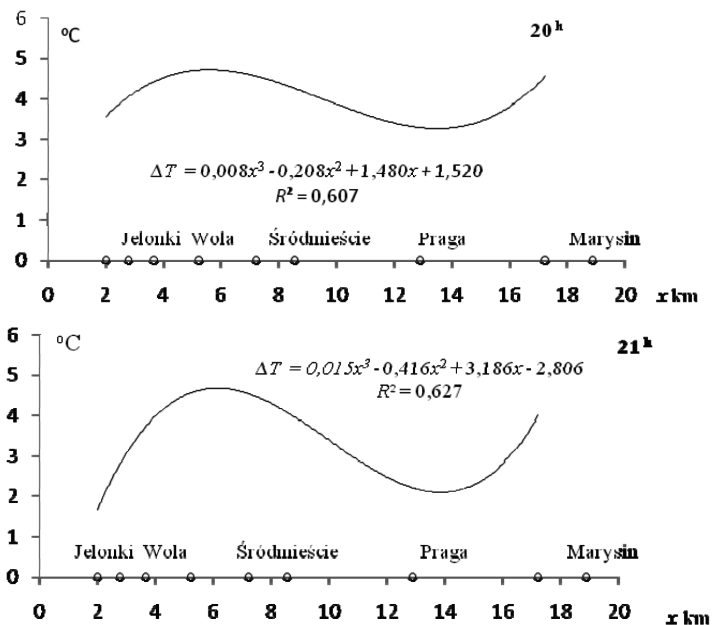
Ryc. 5. Profile równoleżnikowe W-E (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) zmian różnic temperatury powietrza (°C) między miastem i peryferiami w Warszawie – 16^h, 17^h

Fig. 5. Latitudinal profiles W-E (Jelonki, Wola, City Centre, Praga, Marysin) changes of air temperature differences (°C) between the city and its vicinity in Warsaw – 16^h, 17^h

Wielomiany opisujące profile równoleżnikowe W-E różnic temperatury powietrza ΔT wyznaczono na podstawie pomiarów temperatury powietrza w 9 punktach w dniach 30 VI–22 VII 1992 w godzinach 16, 17, 18, 19, 20, 21 (liczba danych $n = 207$). Współczynniki korelacji wielokrotnej R wynoszą odpowiednio: 0,692, 0,545, 0,779, 0,792, a wartości obliczone statystyki Fishera-Snedecora F_{obl} : 62,18, 28,59, 104,44, 113,87. W przypadku średnich 23 dniowych wartości różnic tylko niektóre współczynniki korelacji są istotne statystycznie na poziomie 0,05, gdyż otrzymuje się (F_{obl} : 2,75, 1,26, 4,63, 5,05), a wartości krytyczne rozkładu F wynoszą: $F_{kr} = 2,65$ i 3,86.

O zanikaniu miejskiej wyspy ciepła (ΔT) ze wzrostem: temperatury powietrza otoczenia (T), zachmurzenia (N) i prędkości wiatru (v) informują ujemne współczynniki regresji wielokrotnej w równaniach hiperpłaszczyzn regresji (tab. 6).

Różnice temperatury powietrza między miastem i jego otoczeniem przy silnych wiatrach zanikają, a przy małych prędkościach – wzrastają. Wzrost



Ryc. 6. Profile równoleżnikowe W-E (Jelonki, Wola, Śródmieście, Praga, Marysin) zmian różnic temperatury powietrza (°C) między miastem i peryferiami w Warszawie – 20^h, 21^h

Fig. 6. Latitudinal profiles W-E (Jelonki, Wola, City Centre, Praga, Marysin) changes of air temperature differences (°C) between the city and its vicinity in Warsaw – 20^h, 21^h

prędkości wiatru o 1 m·s⁻¹ powoduje spadek różnic temperatury T o 0,11–0,15°C. Wzrost zachmurzenia zmniejsza także intensywność wyspy ciepła.

Tabela 6. Równania hiperpłaszczyzn regresji różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem i jego peryferiami względem temperatury otoczenia T, zachmurzenia N i prędkości wiatru v, (R – współczynnik korelacji wielokrotnej)

Table 6. Hyperplane regression equation of air temperature differences (ΔT) between the center of town and its peripheries in relation to the temperature of surroundings T, cloudiness N and wind speed v, (R – multiple correlation coefficient)

X–III	$\Delta T = -0,0186 T - 0,0687 N - 0,1479 v + 1,448$	R = 0,58
IV–IX	$\Delta T = -0,0105 T - 0,0105 N - 0,1082 v + 1,329$	R = 0,58
I–XII	$\Delta T = -0,0105 T - 0,0105 N - 0,1082 v + 1,329$	R = 0,56

**WPŁYW OŚWIETLENIA (EKSPOZYCJI DOSŁONECZNEJ
I CIENIA) NA ZRÓŻNICOWANIE WARUNKÓW
CIEPLNYCH W OSIEDLACH**

Z pomiarów w poszczególnych punktach wynika, że pole temperatury powietrza w osiedlach jest deformowane pod wpływem ekspozycji dosłonecznej i wiatrowej, a także zależą od odległości od budynków. Największymi różnicami temperatury wyróżnia się okres poranny, kiedy to ekspozycja dosłoneczna odgrywa dominującą rolę. Mniejsze różnice temperatury występują w popołudnie, ze względu na wzmoczoną konwekcję od południowej strony budynków (tab. 7).

Tabela 7. Temperatura powietrza (T , °C), prędkość wiatru (v , ms^{-1}), ochładzanie katatermometryczne (H , $\text{mcal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) w osiedlach mieszkaniowych: Stawki, Służew nad Dolinką i Sady Żoliborskie (zabudowa: kwaterowa, wysoka, ulicowa, w dni pogodne i pochmurne)

Table 7. Air temperature (T , °C), wind velocity (v , ms^{-1}) and catathermometric cooling (H , $\text{mcal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) in the housing estates: Stawki, Służew nad Dolinką and Sady Żoliborskie (buildings: quarters, high, street on bright and cloudy days)

	Zmienne	Dzień pogodny			Dzień pochmurny		
		Stawki	Służew nad Dolinką	Sady Żoliborskie	Służew nad Dolinką	Stawki	Sady Żoliborskie
Rano	T	22,0–29,0	19,0–26,0	21,0–28,0	12,0–16,0	11,0–16,0	12,0–18,0
	v	1,0–2,0	0,5–1,5	~1,0	2,0–3,5	2,0–3,5	1,0–2,0
	H	8,0–5,0	6,0–7,5	7,0–4,0	18,5–15	22,4–15,7	9–12
Po południu	T	28,0–29,0	25,0–27,0	26,0–28,0	18,0–21,0	18,0–21,0	18,0–20,0
	v	1,0–1,5	1,0–2,0	0,5–1,5	2,0–4,0	3,0–5,0	1,5–2,0
	H	3,0–5,0	5,0–7,8	3,0–5,0	11,0–16,5	14,0–19,0	10,0–13,0
Wieczorem	T	27–23	25,0–22,0	26,0–22,5	17,0–15,0	16,0–17,0	17,0–19,0
	v	1,5–2,0	0,7–1,5	1,0–2,0	0,5–2,5	2,0–3,0	1,0–2,0

Wyniki badań wskazują dużą deformację pól zmiennych meteorologicznych przez miasto. Istotne znaczenie poznawcze ma określenie tempa nagrzewania (w dzień) i ochładzania (w nocy) terenów zabudowanych oraz terminów pojawiania się i zanikania miejskiej wyspy ciepła w zależności od stanu atmosfery. Ważne są również wartości progowe temperatury powietrza, zachmurzenia i prędkości wiatru, przy których deformacja pola temperatury powietrza przez miasto jest największa.

Literatura

- Stopa-Boryczka M. (red.), 2003, *Studies on the climate of Warsaw*. Warsaw University Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2008, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. 22, *Wpływ zabudowy i zieleni osiedlowej na zróżnicowanie klimatu lokalnego w Warszawie*. Wyd. UW, Warszawa.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2010, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. 24, *Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej*. Wyd. UW, Warszawa.