

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

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

CYKLICZNE ZMIANY MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W WARSZAWIE I ICH PRZYCZYNY

Cyclic changes of the urban heat island in Warsaw and their causes

Summary. The paper is an original part of the study: the deformation of air temperature limits (urban heat islands $\Delta T > 0$), the daily changes of air temperature in Warsaw (University of Warsaw – town, Okęcie – peripheries), the tendencies in air temperature (defined by $\partial T/\partial t$, t – time, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$) in Warsaw, spectrum and periods (Θ) changes of air temperature differences ($^{\circ}\text{C}$) between the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000), the dependence of the difference (ΔT) between the town and its peripheries on index NAO in Warsaw (1951–2000).

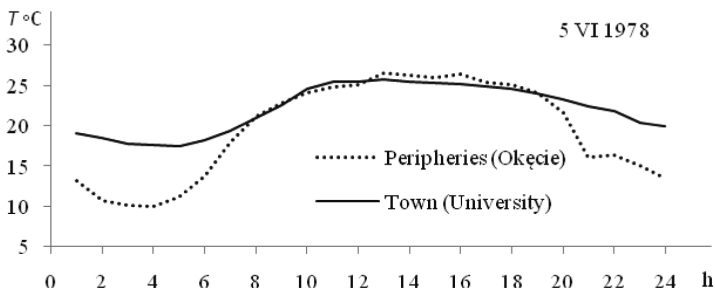
Słowa kluczowe: temperatura powietrza, wyspa ciepła, tendencje, prawdopodobieństwo, sinusoida regresji, widmo, okresy, zasoby ciepła

Key words: air temperature, urban heat island, the tendencies, probability, regression sinusoid, spectrum, periods, heat resources

Celem pracy jest określenie zakresu deformacji pola temperatury powietrza przez miasto w zależności od pory doby i roku. Rozwiązaniami tego problemu na przykładzie Warszawy zajmowano się wcześniej (Stopa-Boryczka red. 2003, Stopa-Boryczka i in. 2008). Materiały źródłowe pochodzą ze śródmiejskiej stacji meteorologicznej Zakładu Klimatologii UW oraz Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – z Obserwatorium Astronomicznego i Okęcia.

ZMIANY DOBOWE I ROCZNE MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA

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 (Stopa-Boryczka i in. 2010). Istotne jest poznanie dobowych zmian różnic ΔT 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 (ryc. 1), np. 5 czerwca 1978 – $\Delta T = 7,6^\circ\text{C}$ (4^{h}).

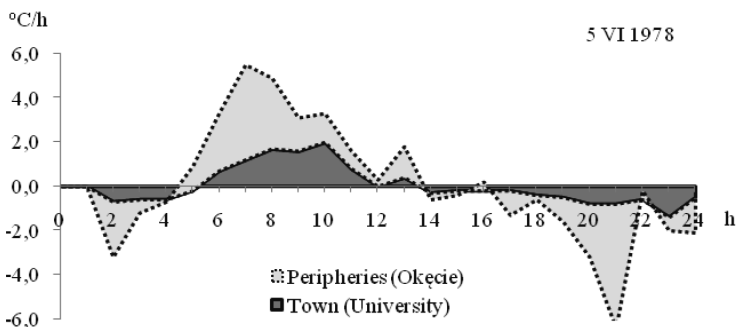


Ryc. 1. Przebieg dobowy temperatury powietrza w Warszawie (Uniwersytet – śródmieście, Okęcie – peryferie, 5 VI 1978)

Fig. 1. Daily course of air temperature in Warsaw (University – center of the town, Okęcie – peripheries, 5 Jun.1978)

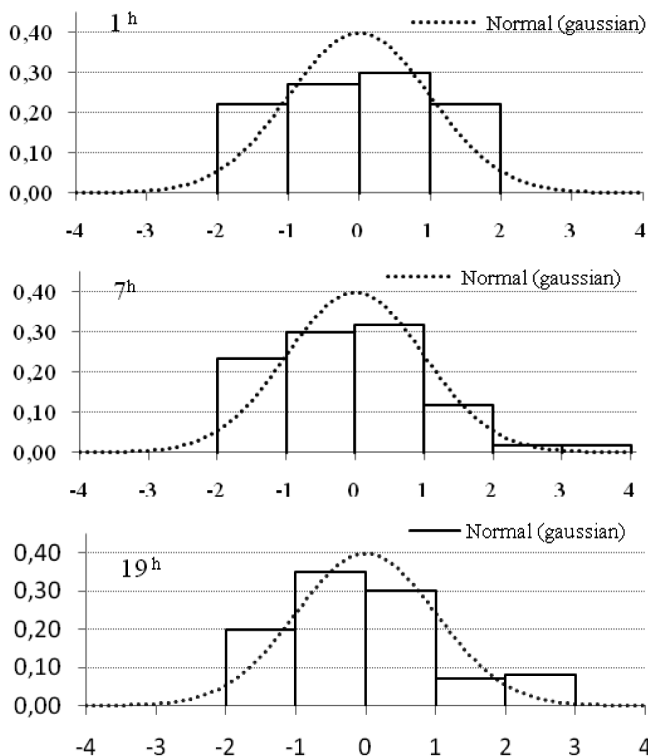
Przyrosty lub spadki temperatury powietrza (ΔT) w mieście dostarczają informacji o tempie nagrzewania i wychładzania miasta w stosunku do terenów niezabudowanych. Tereny o gęstej zabudowie (śródmiejskie) cechują się powolniejszym tempem nagrzewania się i wychładzania niż peryferyjne, zwłaszcza w miesiącach letnich. Tendencje zmian temperatury powietrza ($\partial T/\partial t$, t – czas, $^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$) są na ogół dodatnie (największe) rano i przed południem, a ujemne w godzinach popołudniowych, wieczornych i nocnych (ryc. 2).

Empiryczne rozkłady częstości różnic temperatury powietrza ($y = \Delta T$) między śródmieściem (Uniwersytet) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1^{h} , 7^{h} , 19^{h}) są zbliżone do rozkładu normalnego. Porównano (ryc. 3) histogramy empiryczne z rozkładem normalnym, wprowadzając standaryzowane zmienne: $(y - y_{\text{sr}}) s^{-1}$, gdzie y_{sr} – średnia różnica ΔT , s – odchylenie standardowe. O zbliżonych dystrybuantach (empirycznej m/n i normalnej $F(x)$) świadczy test Kołmogorowa: $D_n = \sup |m/n - F(x)|$, gdzie: m – numer w szeregu rosnącym y_1, \dots, y_n . Obliczone wartości $y = n^{0.5} D_n$ ($n = 60$) są mniejsze od wartości krytycznej $y_k = 1,23$ na poziomie istotności 0,05.



Ryc. 2. Przebieg dobowy tendencji temperatury powietrza ($\partial T/\partial t$, t – czas, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$) w Warszawie (Uniwersytet – śródmieście, Okęcie – peryferie, 5 VI 1978)

Fig. 2. The daily course of the tendencies in air temperature (defined by $\partial T/\partial t$, t – time, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$) in Warsaw (University – center of the town, Okęcie – peripheries, 5 Jun. 1978)



Ryc. 3. Rozkłady liczebności (histogramy) różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem (Uniwersytet Warszawski) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1976–1980)

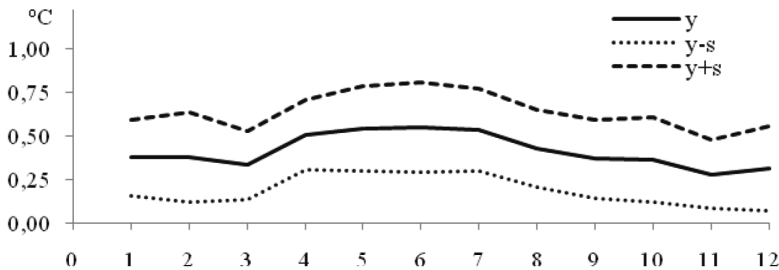
Fig. 3. The histograms of air temperature differences (ΔT) between center of the town (University) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1976–1980)

W przebiegu rocznym różnice ΔT między miastem (Uniwersytet, Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) są największe w lecie, a najmniejsze w zimie (tab. 1, ryc. 4). Wyspa ciepła (ΔT) jest najintensywniejsza w lipcu, osiągając w części śródmiejskiej średnio ponad 3°C .

Tabela 1. Średnia temperatura powietrza ($^{\circ}\text{C}$) na stacjach Obserwatorium i Okęcie (1951–2000)

Table 1. Average air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at stations Observatory and Okęcie (1951–2000)

Stacja	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Rok
Obserwatorium	-2,4	-1,6	2,2	8,3	13,9	17,3	18,7	18,1	13,5	8,6	3,3	-0,4	8,3
Okęcie	-2,7	-2,0	1,8	7,8	13,4	16,8	18,2	17,6	13,2	8,2	3,0	-0,7	7,9



Ryc. 4. Przebieg roczny różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (y – średnia, s – odchylenie standardowe) (1951–2000)

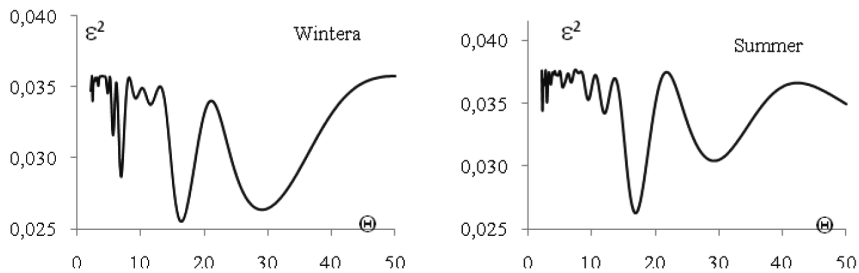
Fig. 4. Annual course of air temperature differences (ΔT) between the center of the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000) (y – average, s – standard deviation)

OKRESOWOŚĆ I TENDENCJE ZMIAN MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA

Miejska wyspa ciepła (ΔT) w Warszawie w latach 1951–2000 cechuje się okresowością wieloletnią. Cykle wyznaczono metodą sinusoid regresji:

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

gdzie: Θ – okres, b – amplituda, c – faza (ryc. 5, tab. 2).



Ryc. 5. Widma zmian różnic temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}$) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000) – zima i lato

Fig. 5. Spectrum of the changes of air temperature differences ($^{\circ}\text{C}$) between the center of the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000) – winter and summer

Tabela 2. Okresy (Θ) zmian różnic temperatury powietrza ($^{\circ}\text{C}$) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000), R – współczynnik korelacji, F_{obl} – test Fishera-Snedecora

Table 2. Periods (Θ) of air temperature differences between center of the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000), R – Correlation coefficient, F_{obl} – Fisher-Snedecor test

Zima					Lato				
Θ	2b	c	R	F_{obl}	Θ	2b	c	R	F_{obl}
2,4	0,1185	1,2528	0,221	1,204	2,9	0,1319	-0,2026	0,070	0,115
5,6	0,1607	-2,7770	0,341	3,096	5,4	0,1082	-2,7369	0,038	0,035
6,9	0,1820	-2,4989	0,445	5,813	7,9	0,0296	1,7813	0,008	0,001
9,2	0,1192	-1,1897	0,210	1,082	9,4	0,0910	0,2060	0,064	0,097
11,5	0,0794	3,1183	0,237	1,395	12,0	0,1075	-1,1349	0,093	0,205
16,3	0,2210	-1,8703	0,536	9,455	16,8	0,2238	-2,8452	0,304	2,287
29,0	0,2094	2,6737	0,514	8,417	29,2	0,1314	-0,2313	0,194	0,901

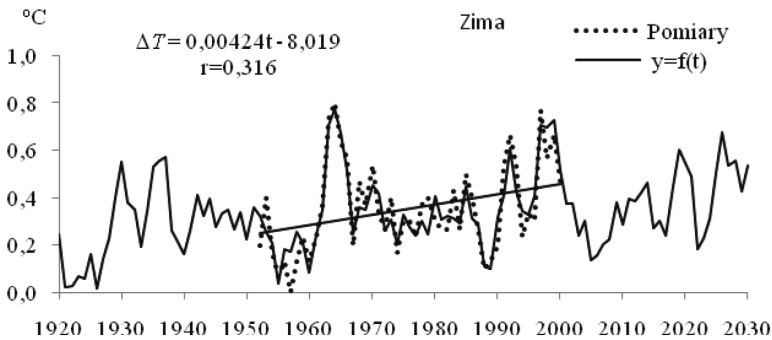
Na przykład, w zimie okresy Θ (minima wariancji resztkowej ϵ^2) wynoszą: 2,4; 5,6; 5,9; 9,2; 11,5; 16,3; 29,0 lat – o amplitudach $\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}} = 2b$. W lecie okresowość jest zbliżona: 2,9; 5,4; 7,9; 9,4; 12,0; 16,8; 29,2 lat. Najsilniejsze są cykle najdłuższe, zarówno w zimie – 16,3 lat ($R = 0,536$), 29,0 lat ($R = 0,514$), jak też w lecie – 16,8 lat ($R = 0,304$), 29,2 lat ($R = 0,194$).

TENDENCJE ZMIAN MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA

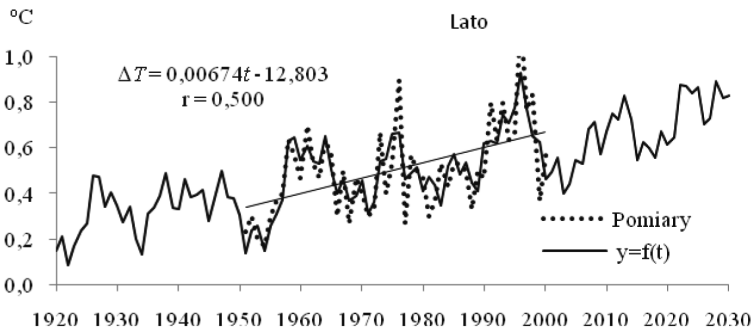
Interferencję wyznaczonych cykli (tab. 2) różnic temperatury powietrza ΔT ze składnikiem liniowym at (tab. 2) określa wzór:

$$y = f(t) = a_0 + at + \sum b_j \sin(2\pi t \Theta_j^{-1} + c_j)$$

Zmiany różnic temperatury powietrza ΔT między miastem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie w latach 1920–2030 w zimie i lecie przedstawiono na ryc. 6 i 7.



Ryc. 6. Zmiany różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000) – zima
Fig. 6. Changes of air temperature differences (ΔT) between center of the town (Astronomical Observatory) and peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000) – winter



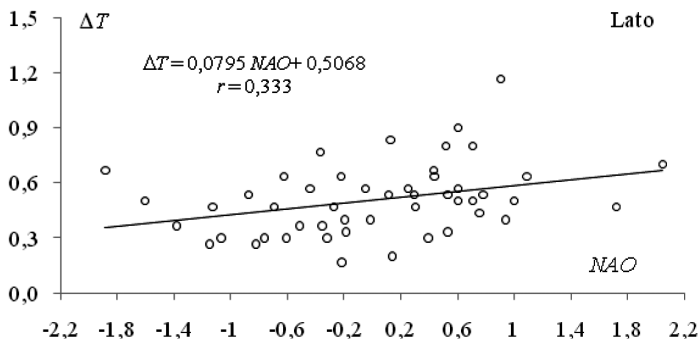
Ryc. 7. Zmiany różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w Warszawie (1951–2000) – lato
Fig. 7. Changes of air temperature differences (ΔT) between center of the town (Astronomical Observatory) and peripheries (Okęcie) in Warsaw (1951–2000) – summer

Tendencje zmian różnic temperatury powietrza (ΔT) między śródmieściem Warszawy (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) w latach 1951–2000, określone równaniami prostych regresji wynoszą: zima – 0,042, wiosna – 0,035, lato – 0,067, jesień – 0,031, rok – 0,046°C na 10 lat (tab. 3).

Tabela 3. Tendencje zmian (a) miejskiej wyspy ciepła (ΔT) w Warszawie (1951–2000)
Table 3. The tendencies changes (a) of the urban heat island (ΔT) in Warsaw (1951–2000)

Pora roku/rok	$\Delta T = at + b$	Współczynnik korelacji (r)
Zima	$\Delta T = 0,0042 t - 8,01$	0,316
Wiosna	$\Delta T = 0,0036 t - 6,73$	0,320
Lato	$\Delta T = 0,0067 t - 12,8$	0,500
Jesień	$\Delta T = 0,0031 t - 5,83$	0,265
Rok	$\Delta T = 0,0046 t - 8,71$	0,458

Zależność różnic temperatury powietrza ΔT między miastem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) od wskaźnika NAO w lecie (1951–2000) określa prosta regresji na ryc. 8 i współczynnik korelacji $r = 0,333$.



Ryc. 8. Zależność różnic temperatury powietrza (ΔT) między miastem (Obserwatorium Astronomiczne) i peryferiami (Okęcie) od wskaźnika NAO (1951–2000) – lato
Fig. 8. Dependence of the difference (ΔT) between the town (Astronomical Observatory) and its peripheries (Okęcie) on index NAO in Warsaw (1951–2000) – summer

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.