



POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA
IM. STANISŁAWA LESZCZYCKIEGO

Krzysztof Błazejczyk
Magdalena Kuchcik
Paweł Milewski
Wojciech Dudek
Beata Kręcisz
Anna Błazejczyk
Jakub Szmyd
Bożena Degórska
Cezary Pałczyński

Miejska wyspa ciepła w Warszawie



SEDNO
Wydawnictwo
Akademickie

Miejska wyspa ciepła w Warszawie

**Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polskiej Akademii Nauk
oraz Wydawnictwo Akademickie SEDNO**
wspólnie wydają serię publikacji książkowych pracowników IGiPZ PAN.

W serii opublikowano monografie:

- Leszek Starkel *O niektórych prawidłowościach rozwoju rzeźby gór i ich przedpoli*
- Tomasz Komornicki, Piotr Korcelli, Piotr Siłka, Przemysław Śleszyński, Dariusz Świętek *Powiązania funkcjonalne pomiędzy polskimi metropoliami*
- Magdalena Kuchcik, Krzysztof Błażejczyk, Jakub Szmyd, Paweł Milewski, Anna Błażejczyk, Jarosław Baranowski *Potencjał leczniczy klimatu Polski*
- Marek Degórski, Alojzy Kowalkowski, Anna Kozłowska *Gleby bielicoziemne – geograficzne trendy oraz dyskontynuacje procesów rozwoju*
- Przemysław Śleszyński, Tomasz Komornicki, Jerzy Solon, Marek Więckowski *Planowanie przestrzenne w gminach*

Wkrótce ukazać się następujące książki:

- Ewa Roo-Zielińska *Wskaźniki ekologiczne zespołów roślinnych Polski*
- Bożena Degórska *Transformacja krajobrazu wschodnich Kujaw w świetle zmian użytkowania ziemi i osadnictwa (1770–1970)*
- Marek Degórski, Dariusz Brykała, Bożena Degórska, Tomasz Komornicki *Uwarunkowania lokalizacji elektrowni wiatrowych w skali regionalnej – propozycja metody na przykładzie województwa kujawsko-pomorskiego*

Więcej informacji o tych i kolejnych publikacjach
można znaleźć na stronach internetowych wydawców:

www.igipz.pan.pl
www.wydawnictwosedno.pl

Krzysztof Błazejczyk
Magdalena Kuchcik
Paweł Milewski
Wojciech Dudek
Beata Kręcis
Anna Błazejczyk
Jakub Szmyd
Bożena Degórska
Cezary Patczyński

Miejska wyspa ciepła w Warszawie

uwarunkowania klimatyczne
i urbanistyczne



INSTYTUT GEOGRAFII
I PRZESTRZENNEGO
ZAGOSPODAROWANIA PAN



SEDNO
Wydawnictwo
Akademickie

Wydawca
Bożena Kućmierowska

Recenzenci
dr hab. Halina Lorenc, prof. IMGW PIB
dr Andrzej Wyszowski

Redakcja merytoryczna i korekty
Janusz Puskarz

Redakcja techniczna
Danuta Przymanowska-Boniuk

Projekt okładki, stron tytułowych i opracowanie typograficzne
Janusz Fajto

Zdjęcia na okładce
Jakub Szmyd, Jarosław Baranowski

Publikacja współfinansowana przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (ERDF) za pośrednictwem projektu 3CE292P3 „Wypracowanie i zastosowanie strategii adaptacyjnych i ograniczających oraz sposobów przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła” w ramach programu Europa Środkowa

The studies were supported by Central Europe Programme of EU, co-financed by the ERDF, in the frame of UHI project No 3CE292P3 *Development and application of mitigation and adaptation strategies and measures for counteracting the global Urban Heat Islands phenomenon (UHI)*



Copyright © by Wydawnictwo Akademickie SEDNO
Copyright © by Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN
Warszawa 2014

Wszelkie prawa zastrzeżone
Kopiowanie, przedrukowywanie i rozpowszechnianie w całości lub we fragmentach jakkolwiek techniką bez pisemnej zgody wydawcy zabronione

ISBN 978-83-7963-018-9
ISBN 978-83-7963-019-6 (e-book)

Wydawnictwo Akademickie SEDNO Spółka z o.o.
00-696 Warszawa
ul. J. Pankiewicza 3
www.wydawnictwosedno.pl
info@wydawnictwosedno.pl

Spis treści

PRZEDMOWA	7
1. WPROWADZENIE	9
2. METODY OKREŚLANIA MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA	13
2.1. Pomiary temperatury	15
2.2. Wskaźniki oceny natężenia	18
2.3. Wskaźniki oceny odczuwania	21
3. SIEĆ MONITORINGU MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W WARSZAWIE	25
3.1. Charakterystyka fizjograficzna stanowisk pomiarowych	29
3.2. Charakterystyka urbanistyczna stanowisk pomiarowych	30
3.3. Inwentaryzacja otoczenia stanowisk pomiarowych	35
4. UWARUNKOWANIA KLIMATYCZNE MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W WARSZAWIE	39
4.1. Stan wiedzy	40
4.2. Zmienność czasowa miejskiej wyspy ciepła	43
4.2.1. Dynamika zmienności dobowej	44
4.2.2. Dynamika zmienności sezonowej	47
4.2.3. Dynamika miejskiej wyspy ciepła w masach powietrza	51
4.3. Wieloletnie zmiany miejskiej wyspy ciepła	55
4.4. Prognoza zmian klimatu a miejska wyspa ciepła	61
5. UWARUNKOWANIA URBANISTYCZNE MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W WARSZAWIE	65
5.1. Użytkowanie terenu	69
5.2. Zagospodarowanie osiedli mieszkaniowych	75
5.3. Tereny biologicznie czynne	80
5.3.1. Zróznicowanie przestrzenne zielonej infrastruktury Warszawy	83
5.4. Korytarze wymiany powietrza	88
5.5. Układ urbanistyczny	95
5.5.1. Prognozowane zmiany urbanistyczne	98
5.5.2. Prognozowane zmiany zielonej infrastruktury Warszawy	102
6. WPŁYW MIASTA NA WARUNKI ODCZUWALNE	105
6.1. Zmienność dobową i sezonową	106
6.2. Rola zagospodarowania terenu w kształtowaniu klimatu odczuwalnego	109
6.3. Prognozowane zmiany obciążeń cieplnych do 2100 roku	117
7. WPŁYW MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA NA JAKOŚĆ ŻYCIA I STAN ZDROWIA MIESZKAŃCÓW	121

7.1. Wpływ podwyższonej temperatury powietrza w mieście na zdrowie	122
7.2. Termoregulacja i zespoły przegrzania	127
7.3. Wpływ miejskiej wyspy ciepła na alergenowość szaty roślinnej (na przykładzie wybranych osiedli)	129
7.4. Wrażliwość demograficzna miast na wysoką temperaturę powietrza	135
8. SPOSOBY OGRANICZANIA MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA I ADAPTACJI DO NIEJ	139
8.1. Katalog działań ograniczających	144
8.2. Katalog działań adaptacyjnych	146
9. PODSUMOWANIE	149
 BIBLIOGRAFIA	 155
SPIS RYCIN	166
SPIS TABEL	170

Przedmowa

Klimatem obszarów zurbanizowanych w Polsce zajmuje się – w różnym stopniu – większość klimatologów polskich. Analizowane są wszystkie aspekty wyjątkowości klimatu miasta, m.in.: bilans radiacyjny i cieplny, temperatura powietrza, pole wiatru, zachmurzenie, opady, zanieczyszczenie powietrza. Miejska wyspa ciepła w Warszawie jest obiektem zainteresowania klimatologów z Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN od połowy lat 90. XX wieku. Z początkiem XXI w. rozpoczęto tworzenie sieci monitoringu tego zjawiska, która obecnie składa się z 28 punktów stałego, automatycznego pomiaru temperatury powietrza. W analizie zjawiska wykorzystano także dane z 8 stacji innych operatorów oraz z 11 innych, już nieistniejących stacji pomiarowych.

Opracowanie jest pokłosiem badań prowadzonych przez klimatologów z IGiPZ PAN oraz lekarzy z Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi w projekcie Nr 3CE292P3 *Wypracowanie i zastosowanie strategii adaptacyjnych i ograniczających oraz sposobów przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła*, realizowanego w ramach programu Europa Środkowa, a współfinansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego (ERDF).

Książka, którą oddajemy Państwu jest pierwszą tak obszerną monografią miejskiej wyspy ciepła (MWC) w Warszawie. Nie obejmuje wpływu miasta na elementy klimatu inne niż temperatura powietrza, jednak mamy nadzieję, że o jej wyjątkowości świadczy jej interdyscyplinarność i kompleksowość ujęcia. Obok zagadnień stricte klimatologicznych i zmienności czasowej miejskiej wyspy ciepła, szeroko omówiona została zależność rozmiaru i intensywności tego zjawiska od czynników urbanistycznych, m.in. użytkowania i zagospodarowania terenu, udziału terenów biologicznie czynnych czy korytarzy wymiany powietrza. Współpraca z alergologami z Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi zaowocowała rozdziałem poświęconym wpływowi MWC na jakość życia i stan zdrowia mieszkańców oraz wykonaną po raz pierwszy szeroką analizą alergenowości roślin na dwóch osiedlach warszawskich. Omawiane zagadnienia przedstawiono także w kontekście zmian klimatu oraz planowanych przemian urbanistycznych i demograficznych. Zaproponowano działania ograniczające zjawisko MWC oraz niezbędne działania adaptacyjne adresowane m.in. do władz miasta, służby zdrowia, urbanistów i architektów, mediów, systemu edukacji oraz organizacji pozarządowych.

Autorzy mają nadzieję, że publikacja zainteresuje szerokie grono odbiorców od klimatologów przez architektów i urbanistów po osoby tworzące system zarządzania kryzysowego w mieście.

Krzysztof Błażejczyk, Magdalena Kuchcik

1. Wprowadzenie

- ▷ Miejska wyspa ciepła jest zjawiskiem klimatycznym polegającym na występowaniu podwyższonej temperatury powietrza w mieście w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych.
- ▷ Miejska wyspa ciepła jest wynikiem nagromadzenia w mieście dużej ilości powierzchni sztucznych, które pochłaniają więcej promieni słonecznych niż ich odbijają, ale także: małego udziału powierzchni roślinnych, zmniejszonej wilgotności powietrza, osłabionego przewietrzania. Znaczącą rolę odgrywa też ciepło antropogeniczne produkowane przez urządzenia grzewcze i klimatyzacyjne, przemysł, ruch samochodowy itp.

Miejska wyspa ciepła (MWC) jest lokalnym zjawiskiem klimatycznym, powszechnie występującym w obszarach miejskich. Polega na znacznym podwyższeniu temperatury w mieście w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych (Arnfield 2003), co można porównać do wyspy ciepła (lub niekiedy archipelagu) otoczonej „oceanem” względnego chłodu. K. Kłysik i K. Fortuniak (1999) wyróżniają dwa podstawowe typy MWC:

1. wielokomórkowy, występujący w warunkach bezwietrznych,
2. jednokomórkowy, występujący przy wietrze o prędkości $2-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Wiatr silniejszy niż $7-8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ prowadzi natomiast do intensywnego mieszania się warstwy powietrza nad miastem, czego skutkiem jest zanik MWC (Wawer 1997; Błażejczyk 2002).

Powstanie miejskiej wyspy ciepła jest wynikiem (Oke 1982; Lopez i in. 2001):

- ▶ specyficznych, fizycznych właściwości materiałów pokrywających grunt w mieście, które pochłaniają więcej promieni słonecznych niż odbijają. Jest to efektem zmniejszonego albedo różnorodnych sztucznych powierzchni w mieście (asfalt, beton, dachy pokryte papą, ciemne ściany budynków) oraz geometrii miasta (wielokrotne odbicia promieni słonecznych w kaniach ulicznych (Taha i in. 1988; Rosenfeld i in. 1995; Ali-Toudert, Mayer 2007; Pawlak 2009);
- ▶ zmienionej struktury promieniowania długofalowego (ciepłnego). Obserwuje się wzrost dopływu promieniowania długofalowego z góry, będący

efektem zwiększonego pochłaniania promieniowania emitowanego i re-emitowanego przez nagrzane powierzchnie sztuczne, co chroni obszar miasta przed nocnym wychładzaniem. Jednocześnie ma miejsce zmniejszenie wypromieniowania długofalowego w wyniku zwiększonego zasłonięcia horyzontu;

- ▶ małego udziału naturalnych powierzchni roślinnych, które sprzyjają stabilizacji bilansu cieplnego miasta (Oke 1987; Ng 2010). Im większy jest obszar miasta pokryty przez nieprzepuszczalne, sztuczne powierzchnie, tym bardziej zmniejsza się parowanie z gleby i szaty roślinnej. W konsekwencji, zwiększa się ilość energii zgromadzonej w atmosferze i materiałach budowlanych, a zmniejsza się ilość ciepła zużywanego na parowanie. W godzinach popołudniowych temperatura powierzchni pokrytych roślinnością jest zbliżona do temperatury powietrza w terenie pozamiejskim, natomiast ściany budynków mogą być cieplejsze nawet o 30°C, a temperatura powierzchni dachów pokrytych papą, blachą czy blachodachówką może sięgać 65–90°C (Gartland 2008);
- ▶ dużej liczby różnego rodzaju powierzchni pionowych, które z jednej strony silnie pochłaniają promienie słoneczne, a z drugiej zmniejszają prędkość wiatru (efekt kanionu). Badania F. Ali-Touderta i H. Mayera (2006) dowodzą, że orientacja kanionów ulicznych oraz wysoki stosunek głębokości „kanionu” do jego szerokości są podstawowymi czynnikami wpływającymi na klimat wnętrza miasta. Wąskie kaniony uliczne cechują się zmniejszonym oddawaniem ciepła poprzez wypromieniowanie (na skutek dużego zasłonięcia horyzontu) oraz wymianę turbulentną (na skutek osłabienia ruchu powietrza). Jednocześnie w różnych porach dnia nasłonecznione fragmenty „kanionu” mogą być cieplejsze od jego części zacienionej nawet o kilkanaście stopni Celsjusza (Lopes i in. 2001; Błażejczyk 2002; Fortuniak i in. 2006; Akbari i in. 2008; Fortuniak 2008);
- ▶ aktywności człowieka, na którą składa się ciepło produkowane przez urządzenia grzewcze i klimatyzacyjne, przemysł, ruch samochodowy itp. Czynniki antropogeniczne, czyli przede wszystkim praca silników samochodowych, straty ciepła z budynków poprzez okna oraz praca urządzeń klimatyzacyjnych odprowadzających ciepło z wnętrza pomieszczeń, powoduje silny wzrost temperatury powietrza wewnątrz kanionu ulicznego (Papadopoulos 2001; Priyadarsini 2009). Zjawisko to dotyczy wszystkich miast, niezależnie od ich położenia geograficznego (Lindberg i in. 2013). Wpływ gęstości zabudowy na wielkość MWC był np. obserwowany w Meksyku (Erell i in. 2011), w Londynie czy w Warszawie (Błażejczyk 2002). Niemniej jednak antropogeniczne źródła ciepła dotyczą całego obszaru miasta. A. Christen i R. Vogt (2004) oszacowali antropogeniczną produkcję ciepła w Bazylei na 5–20 W·m⁻². K. Kłysik (1996)

dla Łodzi określił jego ilość na $32 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a I. Hamilton i inni (2009) w Londynie na $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Badania prowadzone w Łodzi pokazują także, że w dzielnicach przemysłowych ilość ciepła antropogenicznego jest większa niż w dzielnicach mieszkalnych i sięga średnio w roku $41 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Niemniej jednak w nowszych badaniach D. Sailor i L. Lu (2004) podają, że w dużych miastach amerykańskich latem ilość ciepła antropogenicznego sięga $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, a zimą $75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. W Tokio wielkość ta szacowana jest nawet na $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ latem i $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ zimą (Ichinose i in. 1999);

- efektu cieplarnianego towarzyszącego miastu. Zwiększenie zanieczyszczenia powietrza nad miastem oraz zwiększenie zawartości gazów cieplarnianych emitowanych lokalnie do atmosfery prowadzi do zwiększenia ilości ciepła emitowanego przez warstwę powietrza nad miastem do jego wnętrza.

Wymienione wyżej czynniki i procesy powodują, że w obrębie miasta gromadzą się w ciągu dnia znaczne ilości ciepła, które w godzinach nocnych są stopniowo uwalniane do atmosfery, powodując, że wychładza się ona wolniej niż tereny otaczające.

Zjawisko MWC zostało po raz pierwszy rozpoznane przez L. Howarda w Londynie i opisane w jego książce *Climate of London deduced from meteorological observation made in metropolis and at various places around it* (Howard 1833). W kolejnych dekadach XIX w. podobne badania prowadzone były w Paryżu przez E. Renou, w Wiedniu przez W. Schmidta, w Monachium przez A. Schmauss (Landsberg 1981), a w wieku XX także w innych, dużych miastach europejskich i amerykańskich (Stewart 2011).

Klimatem obszarów zurbanizowanych w Polsce w różnym stopniu zajmuje się większość klimatologów polskich. O wyjątkowości klimatu Warszawy pisał już R. Merecki (1915), który zwracał uwagę na obniżenie sum usłonecznienia w Warszawie względem terenów zamieszkanych o około 100 godz. (za Kozłowska-Szczęśna, Podogrocki 1995). Jednak stricte zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła poczynawszy od końca lat 50. XX w. zajmowali się kolejno m.in.: w Łodzi – S. Zych (1961), K. Kłysik (1998), K. Fortuniak (2001, 2003, 2008), w Krakowie – przede wszystkim J. Lewińska (1967, 1996, 2000) oraz z zespołem (1990), w Warszawie – U. Kossowska-Cezak (1973a,b, 1976, 1992, 1998), M. Stopa-Boryczka z zespołem (1984, 1991, 1992, 2003), J. Wawer (1992, 1995, 1998a), T. Kozłowska-Szczęśna i inni (1995, 1996, 2001), K. Błażejczyk (1996) oraz z zespołem (2002, 2006, 2013), a także H. Lorenc (2009) wraz z A. Mazurem (2003), we Wrocławiu zaś głównie M. Szymanowski (2004, 2005) wraz z M. Kryzą (2009).

W polskich miastach różnica temperatury powietrza między centrum miasta i obszarem pozamiejskim sięga zazwyczaj $5\text{--}8^{\circ}\text{C}$, a jej maksymalne udokumentowane wartości przewyższają 7°C w Krakowie (Lewińska i in. 1990), $8\text{--}9^{\circ}\text{C}$ we Wrocławiu (Dubicka, Szymanowski 2003; Szymanowski 2004, 2005), 10°C (Wawer 1995) i 11°C w Warszawie (Błażejczyk i in. 2014) czy 12°C w Łodzi (Fortuniak 2003).

2. Metody określania miejskiej wyspy ciepła

- ▷ Podstawową miarą miejskiej wyspy ciepła jest, w tym opracowaniu, różnica minimalnej dobowej temperatury powietrza pomiędzy miastem i terenem pozamiejskim (UHI-index).
- ▷ W badaniu zjawiska miejskiej wyspy ciepła stosuje się naziemne pomiary temperatury powietrza i metody teledetekcyjne, w tym satelitarne i lotnicze obrazy termalne powierzchni miasta, które umożliwiają określenie temperatury powierzchni promieniującej.
- ▷ Miejską wyspę ciepła bada się w różnych skalach przestrzennych: mezoskali, skali lokalnej i mikroskali. Od skali badań zależy zastosowana w nich metoda i zakres pomiarów.
- ▷ Intensywność miejskiej wyspy ciepła można oszacować na podstawie wielkości miasta. Podstawą tych szacunków są silne związki statystyczne pomiędzy wielkością miasta a odchyleniami temperatury minimalnej powietrza w mieście w stosunku do terenów pozamiejskich.

Istnieje wiele sposobów określania różnic termicznych pomiędzy miastem a otoczeniem. Są w tym celu wykorzystywane zarówno dane ze standardowych stacji meteorologicznych (leżących w mieście oraz poza nim), jak również dane ze specjalnych sieci pomiarowych, pomiarów mobilnych czy też termicznych obrazów lotniczych lub satelitarnych (Mayer 1988; Chudzia, Ropuszyński 1998; Watkins i in. 2002; Voogt, Oke 2003; Peng i in. 2012). Należy jednak pamiętać, że informacje o rozkładzie temperatury powietrza uzyskane za pomocą różnorodnych metod nie są w pełni porównywalne, a każda z metod ma specyficzne cechy i ograniczenia.

Ogólnie biorąc, stosowane metody badania MWC pozwalają na określenie zróżnicowania temperatury powietrza lub temperatury powierzchni. Informacje o zróżnicowaniu temperatury powietrza uzyskuje się na podstawie pomiarów naziemnych, a temperatury powierzchni na podstawie termalnych obrazów lotniczych lub satelitarnych. W tabeli 2.1 zestawiono najważniejsze cechy MWC, uzyskane na podstawie danych o temperaturze powietrza i temperaturze powierzchni. Niewątpliwą zaletą lotniczych i satelitarnych obrazów termalnych jest duża rozdzielczość

przestrzenna oraz jednoczesowe zobrazowanie termiczne dla rozległych obszarów. Należy jednak pamiętać, że obrazy te dostarczają danych o temperaturze różnych powierzchni horyzontalnych (grunt, dachy budynków, korony drzew), natomiast pomiary naziemne informują nas o temperaturze powietrza na wysokości ok. 2 m nad gruntem. Temperatura ta jest kształtowana przez całe otoczenie punktu pomiarowego (podłoże, obiekty otoczenia). Można zatem przyjąć, że w obszarach gęsto zabudowanych, o dużym udziale powierzchni sztucznych będziemy mieli do czynienia z podwyższoną temperaturą powietrza, a w obrębie parków, lasów i zadrzewień temperatura powietrza będzie względnie niska. Niemniej jednak dotychczas nie udało się znaleźć zadawalająco dokładnego sposobu przejścia pomiędzy temperaturą powierzchni a temperaturą powietrza w odniesieniu do obszarów zurbanizowanych (Weng 2001; Voogt, Oke 2003; Peng i in. 2012).

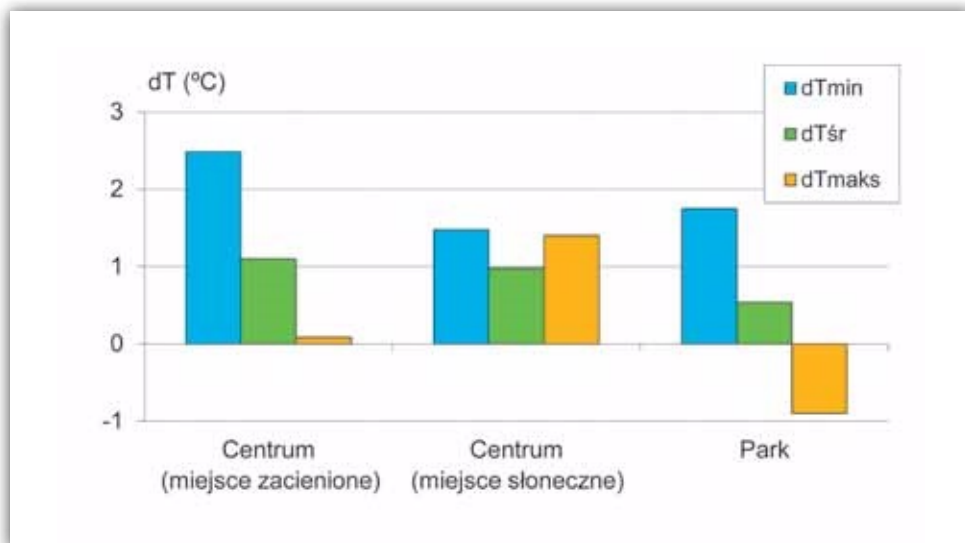
Tabela 2.1. Charakterystyki miejskiej wyspy ciepła określonej na podstawie temperatury powietrza i temperatury powierzchni

Cecha	Powierzchniowa MWC	Atmosferyczna MWC
Czas występowania	- występuje w dzień i w nocy - najbardziej intensywna w dzień i w lecie	- w dzień może być niewielka lub może nie występować wcale - najbardziej intensywna w nocy, o świcie oraz w zimie
Maksimum intensywności	większe zróżnicowanie przestrzenne i czasowe: - w dzień: 10–15°C - w nocy: 5–10°C	mniejsze zróżnicowanie przestrzenne i czasowe: - w dzień: 1–3°C - w nocy: 7–12°C
Typowa metoda identyfikacji	pomiary pośrednie: - teledetekcja	pomiary bezpośrednie: - stacje meteorologiczne - pomiary mobilne
Typowy sposób przedstawiania	- zdjęcia termalne	- mapy izoterm - wykres temperatury powietrza

Źródło: Akbari i in. (2008).

Największe różnice pomiędzy powierzchniową i atmosferyczną MWC dotyczą intensywności i czasu występowania zjawiska. Powierzchniowa MWC jest intensywniejsza w dzień niż w nocy oraz latem niż zimą. Dla kontrastu, atmosferyczna MWC jest silniejsza zimą niż latem, a największa jej intensywność jest obserwowana nocą lub o świcie (tab. 2.1).

Podstawową miarą MWC jest różnica minimalnej temperatury powietrza pomiędzy miastem i terenem pozamiejskim, która występuje w godzinach wczesnoporannych. Innymi miarami miejskiej wyspy ciepła są także różnice: średniej dobowej oraz maksymalnej temperatury powietrza pomiędzy miastem a jego otoczeniem (Lowry 1977; Błażejczyk 2002; Fortuniak 2003). Różnice średniej dobowej temperatury dają jedynie bardzo uogólnione informacje o MWC, jednak podkreślają jej stabilność, niezależnie od warunków pogodowych. Natomiast różnice temperatury



Rycina 2.1. Średnie roczne (2001 i 2002) wartości różnych miar MWC (różnic temperatury pomiędzy miastem a terenem pozamiejskim, dT) w obrębie różnych struktur urbanistycznych Warszawy

dTmin – minimalna temperatura powietrza, dTśr – średnia dobową temperatura powietrza, dTmaks – maksymalna temperatura powietrza

Źródło: Błażejczyk (2002).

maksymalnej mówią o możliwym, całodobowym występowaniu MWC. Ma to także duże znaczenie z punktu widzenia warunków termicznych odczuwanych w ciągu dnia przez ludzi mieszkających i poruszających się po mieście. Należy jednak pamiętać, że z uwagi na złożoną strukturę geometryczną miasta zacienienie pewnych jego części w godzinach najwyższej temperatury powietrza może powodować, że w miejscach tych jest ona niższa niż w terenie pozamiejskim. Ilustracją przedstawionych wyżej cech różnych miar MWC jest rycina 2.1.

2.1. Pomiary temperatury

W ostatnich latach rozwinęły się techniki pomiarów temperatury powierzchni dokonywanych z pokładów satelitów lub samolotów. Zainstalowane na nich specjalne skanery wielospektralne pozwalają na rejestrowanie obrazów powierzchni w odbitym świetle widzialnym (z uwzględnieniem różnych długości fali) oraz obrazów termalnych pokazujących temperaturę promieniowania emitowanego przez powierzchnie horyzontalne. Obrazy te zarówno w zakresie promieniowania widzialnego, jak i cieplnego są coraz powszechniej stosowane w badaniach geograficznych. Pozwalają one na niemal równoczesne zobrazowanie temperatury powierzchni promieniującej i identyfikację różnych obiektów terenowych. Obrazy te są także

wykorzystywane do badania intensywności i zasięgu miejskiej wyspy ciepła (Carlson i in. 1977; Matson i in. 1978; Kozłowska-Szczęśna i in. 1996; Quattrochi i in. 2000; Streutker 2002; Szymanowski 2004).

Satelitarne lub lotnicze obrazy termalne powierzchni poza niewątpliwymi zaletami mają także kilka poważnych ograniczeń (Emeis 2010). Po pierwsze, tylko fragmentarycznie opisują one promieniowanie cieplne z powierzchni pionowych, np. ścian budynków. Po drugie, skanery rejestrują tzw. temperaturę radiacyjną, która nie uwzględnia właściwości emisyjnych różnych fragmentów podłoża. Przeliczenie temperatury radiacyjnej na temperaturę rzeczywistą powierzchni wymaga uwzględnienia współczynników emisyjności odmiennych dla różnych materiałów tworzących powierzchnię terenu. Uzyskanie tych współczynników jest trudne, a otrzymane wartości są obarczone niekiedy znacznym błędem. Po trzecie, skanery umieszczone na satelitach rejestrują promieniowanie (widzialne i cieplne), które dwukrotnie przechodzi przez warstwę atmosfery (od Słońca w kierunku Ziemi oraz odbitego i emitowanego przez powierzchnię Ziemi w kierunku górnych warstw atmosfery). Prawidłowe opracowanie danych satelitarnych i lotniczych wymaga zatem stosowania różnych korekt atmosferycznych, zależnych od fizycznego stanu powietrza w trakcie rejestracji obrazu. Dane pomiarowe niezbędne do poprawnej korekty atmosferycznej są praktycznie niedostępne i z konieczności są w tym zakresie przyjmowane liczne uproszczenia i uogólnienia. Czwartym ograniczeniem wykorzystania pomiarów teledetekcyjnych w badaniach miejskiej wyspy ciepła jest czas pozyskiwania tych danych. MWC najsilniej rozwija się w godzinach nocnych. Tymczasem rejestracje satelitarne są dokonywane w godzinach dziennych (w Polsce są to z reguły godziny przedpołudniowe, Kozłowska-Szczęśna i in. 1996), gdy na temperaturę powierzchni wpływają nie tylko właściwości cieplne podłoża, ale także promieniowanie słoneczne, które wewnątrz zabudowy podlega licznym odbiciom i okresowym zwiększonym reemisjom. Piątym ograniczeniem są trudności z oszacowaniem temperatury powietrza na podstawie temperatury podłoża. Można jedynie przyjąć, że w obszarach o dużym udziale powierzchni sztucznych temperatura powietrza będzie wyraźnie podwyższona, a w terenach pokrytych roślinnością temperatura powietrza będzie względnie niska (Quattrochi i in. 2000; Weng 2001; Streutker 2002; Voogt, Oke 2003).

Pomiary temperatury powietrza są prowadzone na wysokości 2 m nad gruntem, na której prowadzone są standardowe obserwacje meteorologiczne. Dla zidentyfikowania występowania miejskiej wyspy ciepła niezbędne są co najmniej dwa punkty pomiarowe, jeden położony wewnątrz miasta, a drugi w terenie pozamiejskim. Mogą być wykorzystywane dane z państwowej sieci meteorologicznej, a także ze stacji działających przy uczelniach wyższych, czy stacji monitoringu zanieczyszczeń powietrza. W przypadku ich braku dane można pozyskać ze specjalnych kampanii pomiarowych, stacjonarnych i mobilnych, prowadzonych na wybranych transektach od peryferii do centrum miasta.

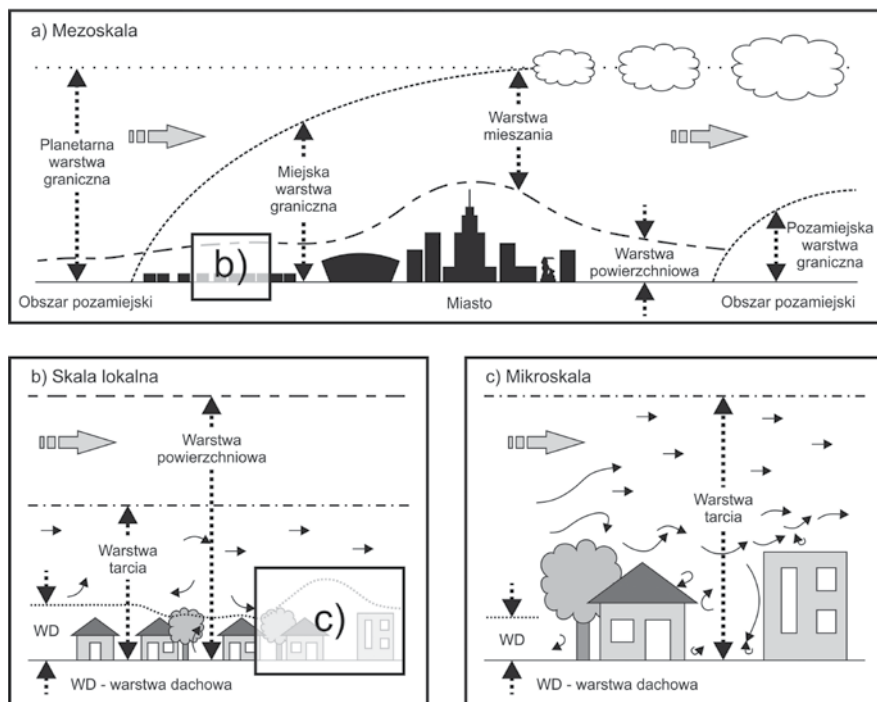
Pomiary temperatury powietrza dostarczają bezpośrednich danych niezbędnych do zidentyfikowania MWC i jej intensywności. Korzystając z danych z różnych źródeł, należy jednak pamiętać, że mogą być one obciążone pewnymi błędami. Jeśli korzystamy z danych pochodzących z różnych sieci pomiarowych, błędy mogą wynikać z różnych protokołów obserwacji oraz stosowanych przyrządów pomiarowych, przy czym ważną rolę odgrywa także lokalizacja punktu pomiarowego.

Dla stacji pozamiejskich WMO (Światowa Organizacja Meteorologiczna) opracowała obowiązujący standard lokalizacji, organizacji i wyposażenia stacji meteorologicznej. Szczegółowo przedstawiono takie zagadnienia jak: odległość stacji meteorologicznej od przeszkód terenowych, pokrycie terenu stacji, zasłonięcie horyzontu, czy wysokość, na której należy wykonywać pomiar poszczególnych elementów meteorologicznych. Celem standaryzacji pomiaru jest wyeliminowanie wpływu czynników mikroklimatycznych, dzięki czemu uzyskane dane pomiarowe można uznać jako reprezentatywne dla skali lokalnej. W warunkach miejskich standard ten nie może być zachowany, zwłaszcza w odniesieniu do: odległości od ścian budynków i drzew, otwartego horyzontu i rodzaju podłoża. Specyfika lokalizacji stacji miejskich może sprzyjać występowaniu nietypowych przebiegów dobowych temperatury powietrza, np. jej obniżenia w godzinach południowych na skutek dużego zasłonięcia horyzontu i zacielenia.

Podstawową kwestią w badaniach MWC jest określenie skali przestrzennej badań. Decyzja ta warunkuje m.in. zakres badań oraz wybór metod pomiarowych. Wyróżnia się trzy skale przestrzenne badań klimatu obszarów miejskich (Oke 1984, ryc. 2.2):

- a) mezoskala – dotyczy obszaru całego miasta, zwykle jednostek o wymiarach rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Ma zastosowanie, gdy rozpatrywany jest wpływ całego miasta na warunki pogodowe i klimatyczne. Dane z pojedynczej stacji meteorologicznej są niewystarczające do opisu warunków klimatycznych w mezoskali. Badania w tej skali mogą być prowadzone jedynie na podstawie danych z wielu stacji meteorologicznych;
- b) skala lokalna – w skali tej rozpatrywane są warunki klimatyczne obszarów miasta różniących się własnościami podłoża, np. pokryciem terenu, wielkością budynków i odległością między nimi. Skala lokalna ma zastosowanie w przypadku jednostek o wymiarach od jednego do kilku kilometrów;
- c) mikroskala – dotyczy warunków klimatycznych pojedynczych obiektów na obszarze miasta (np. droga, budynek, podwórko, skwer), o wymiarach od poniżej jednego metra do setek metrów.

Obok różnych skal przestrzennych badania MWC istnieją różne skale czasowe. Badania w mezoskali obejmują najczęściej średnie roczne i miesięczne wartości temperatury powietrza. Badania w skali lokalnej – zazwyczaj średnią dobową



Rycina 2.2. Skale przestrzenne badań klimatu miasta

Źródło: Oke (1984); Fortuniak (2003).

temperaturę powietrza lub temperaturę minimalną i maksymalną, zaś w przypadku analiz w skali lokalnej często wykorzystuje się dane godzinowe, a nawet 10-minutowe.

2.2. Wskaźniki oceny natężenia

T. Oke (1973) jako pierwszy wykazał empiryczną zależność między liczbą mieszkańców, prędkością wiatru oraz różnicą temperatury powietrza między obszarem miejskim i wiejskim. Przedstawione przez niego równanie prezentuje intensywność MWC w miastach Ameryki Północnej 3 godziny po zachodzie słońca w pogodne dni ze słabym wiatrem. Podobne wyniki uzyskano dla wielu miast na świecie, np. w Japonii i Korei (Park 1986). Dla miast w Polsce K. Błażejczyk i A. Kunert (2006) udokumentowali istotną statystycznie zależność między liczbą mieszkańców i powierzchnią miasta. Wyniki uzyskano na podstawie danych o miastach, których liczba

*Dalsza część książki dostępna w wersji
pełnej.*

