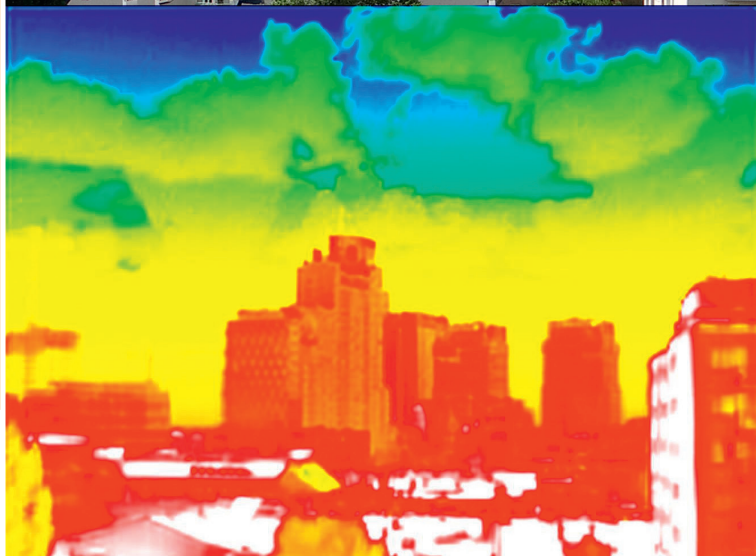




POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOGRAFII I PRZESTRZENNEGO ZAGOSPODAROWANIA
IM. STANISŁAWA LESZCZYCKIEGO

Krzysztof Błażejczyk
Magdalena Kuchcik
Paweł Milewski
Wojciech Dudek
Beata Kręcisz
Anna Błażejczyk
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 Świątek ***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 ukazą 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 Błażejczyk
Magdalena Kuchcik
Paweł Milewski
Wojciech Dudek
Beata Kręcisz
Anna Błażejczyk
Jakub Szmyd
Bożena Degórska
Cezary Pałczyński**

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. Zróżnicowanie 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 strictly 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 kanyonach ulicznych (Taha i in. 1988; Rosenfeld i in. 1995; Ali-Toudert, Mayer 2007; Pawlak 2009);
- ▶ zmienionej struktury promieniowania długofalowego (ciepłego). 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 turbulencyjną (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 zamiejskich o około 100 godz. (za Kozłowska-Szczęśna, Podogrocki 1995). Jednak stricte zjawiskiem miejskiej wyspy ciepła począwszy 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).

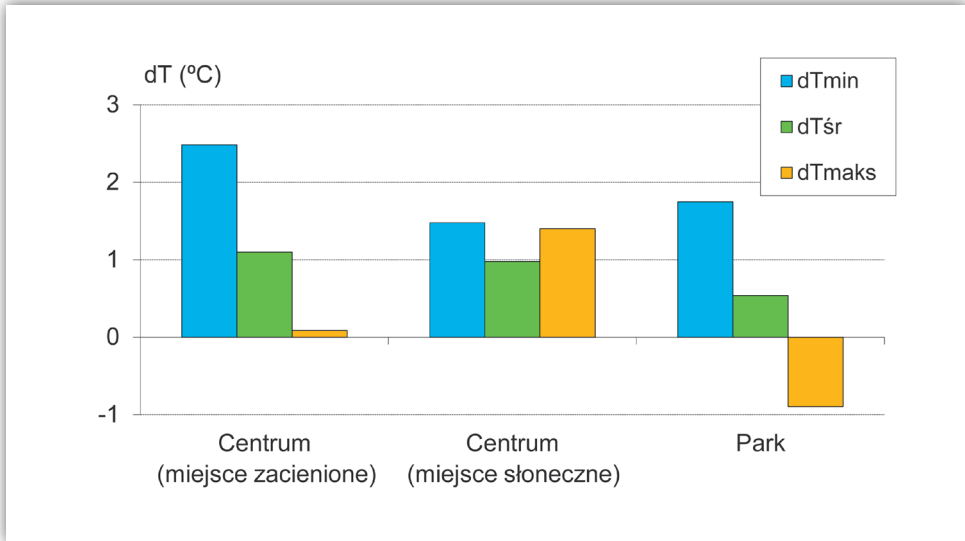
Tabela 2.1. Charakterystyki miejskiej wyspy ciepła określonej na podstawie temperatury powietrza i temperatury powierzchni

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 a 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, dTsr – średnia dobowa 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 ciepłego 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 zalecaniami mają także kilka poważnych ograniczeń (Emeis 2010). Po pierwsze, tylko fragmentarycznie opisują one promieniowanie ciepłe 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 ciepłe), 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 ciepłe 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.

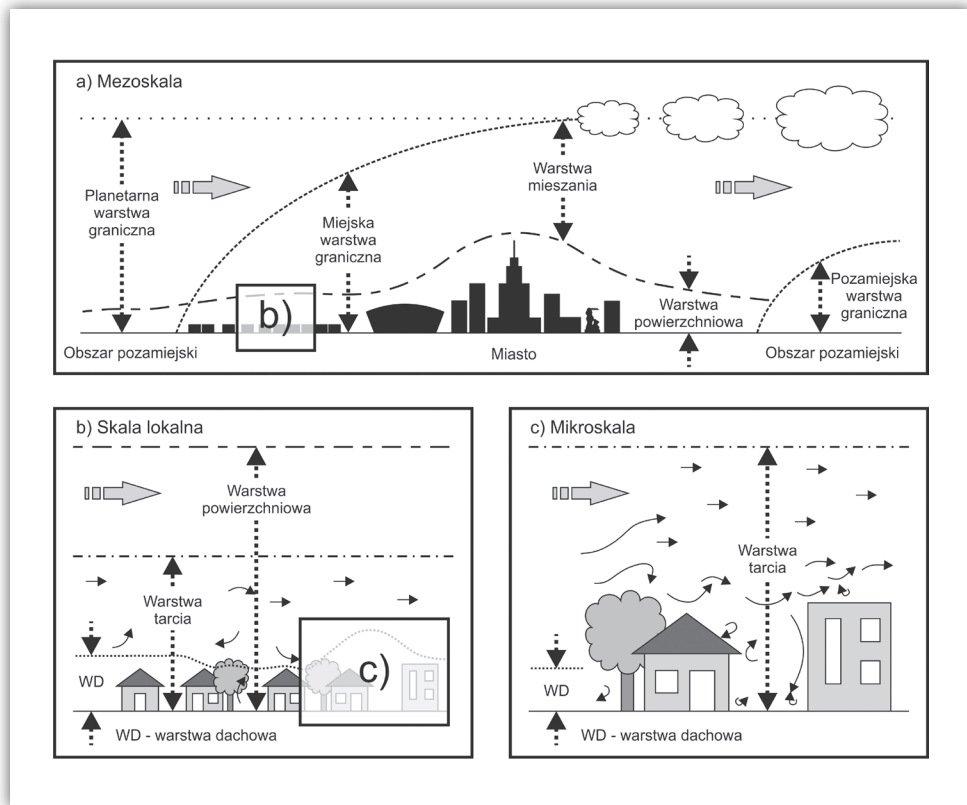
Pomiary temperatury powietrza dostarczają bezpośrednich danych niezbędnych do zidentyfikowania MWC i jej intensywności. Korzystając z danych z różnych źródeł, należy jednak pamiętać, że mogą być one obarczone pewnymi błędami. Jeśli korzystamy z danych pochodzących z różnych sieci pomiarowych, błędy mogą 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

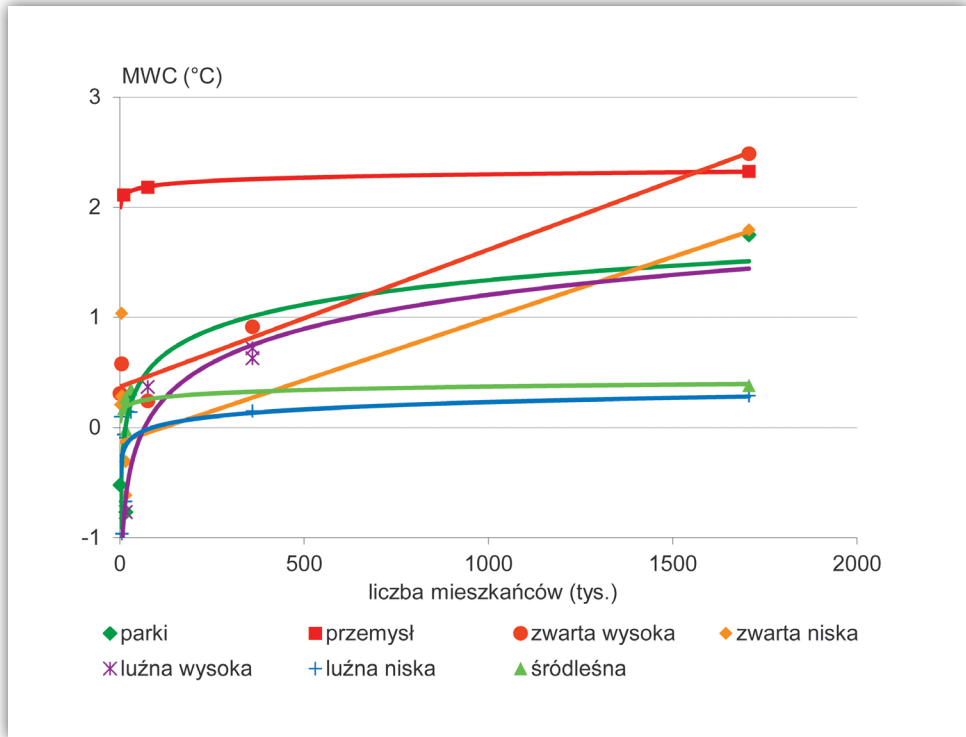
T. Oke (1973) jako pierwszy wykazał empiryczną zależność między liczbą mieszkańców, prędkością wiatru oraz różnicą temperatury powietrza między obszarem miejskim i wiejskim. Przedstawione przez niego równanie prezentuje intensywność MWC w miastach Ameryki Północnej 3 godziny po zachodzie słońca w pogodne 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

mieszkańców wynosiła od około 1 tys. do 1,7 mln, natomiast powierzchnia od 6 km² do 500 km².

Czynniki geometryczne, takie jak wielkość budynków lub szerokość ulic, oddziałują na rozwój MWC. H. Park (1986) przeanalizował zależność między maksymalnymi wartościami MWC a wskaźnikiem zwartości zabudowy w miastach Japonii i Korei na podstawie pomiarów transektowych. Największe wartości uzyskano, gdy wskaźnik zwartości zabudowy był największy.

Na intensywność MWC wpływa także kształt kanionów ulicznych, który może być wyrażony np. przez stosunek ich wysokości do szerokości. Często stosuje się również wskaźniki opisujące wielkość widoku powierzchni nieba w danym miejscu, np. *sky view factor* (SVF). W literaturze polskiej określany jest on jako współczynnik widoku nieba (Fortuniak 2003) lub współczynnik zasłonięcia horyzontu, który jest de facto dopełnieniem wielkości SVF do 100% (Szymanowski 2004; Hämmerle i in. 2014). T. Oke (1981, 1982) zbadał zależność między tym współczynnikiem a maksymalną wartością MWC. Współczynnik widoku nieba jest proporcjonalny do widocznej z danego miejsca powierzchni sfery niebieskiej nieprzesłoniętej przez żadne obiekty. Wielkość tego współczynnika ma wpływ na intensywność MWC w porze nocnej. Zależność między współczynnikiem widoku nieba a maksymalną wartością MWC analizowało wielu autorów, m.in. L. Barring i inni (1985), H. Park (1987), M. Shahgedanova i inni (1997), K. Goh i C. Chang (1999).

Intensywność miejskiej wyspy ciepła zależy od wielkości miasta, a w jego obrębie – od typu zagospodarowania terenu. Badania przeprowadzone przez A. Kunert i K. Błażejczyka (2011) na próbie obejmującej 32 miasta i miejscowości o różnej wielkości w Polsce dowodzą, że wielkość miasta, wyrażona liczbą mieszkańców, determinuje intensywność miejskiej wyspy ciepła w różnym stopniu. W przypadku zabudowy zwartej niskiej współczynnik determinacji wynosi 40%, dla zabudowy luźnej wysokiej – 90%, a zwartej wysokiej aż 97%. W każdym z powyższych typów zabudowy intensywność miejskiej wyspy ciepła wzrasta liniowo wraz ze wzrostem wielkości miasta, od wartości niewiele przekraczających 0°C w miastach do 5 tys. mieszkańców do 1,5–2,5°C w mieście liczącym 1,7 mln mieszkańców. Również tereny parków miejskich znajdują się pod wyraźnym wpływem miejskiej wyspy ciepła. Szata roślinna powinna niwelować ocieplający wpływ miasta, jednak parki są zlokalizowane najczęściej w centrach miejscowości, a więc na terenach najcieplejszych. Obszary otaczające parki (z reguły duże ruchliwe ulice i zwarta zabudowa miejska) znacznie je ocieplają. Odchylenia temperatury minimalnej na obszarze parków są w 77% zależne od wielkości miasta, a np. w Warszawie wynoszą około 1,5°C. W przypadku trzech typów zagospodarowania terenu: zabudowy przemysłowej, luźnej niskiej oraz śródlądowej wielkość miasta w niewielkim stopniu wpływa na intensywność miejskiej wyspy ciepła. Na obszarach przemysłowych przekracza ona 2°C, natomiast w zabudowie niskiej luźnej i śródlądowej



Rycina 2.3. Intensywność miejskiej wyspy ciepła (MWC) w różnych typach zagospodarowania terenu w zależności od wielkości miasta (wyrażonej liczbą mieszkańców)

wynosi jedynie 0,2–0,4°C, co niewątpliwie wynika z faktu, iż są one w znaczącym stopniu pokryte szatą roślinną (ogrody przydomowe, zieleń leśna), łagodząc warunki termiczne (ryc. 2.3).

Związki statystyczne pomiędzy wielkością miasta a odchyleniami temperatury minimalnej powietrza w mieście, w stosunku do terenów pozamiejskich, są powszechnie stosowane jako syntetyczne wskaźniki intensywności miejskiej wyspy ciepła (Oke 1973; Park 1987; Błażejczyk i in. 2006).

Znalezione na podstawie badań prowadzonych w Polsce (Kunert, Błażejczyk 2011) istotne statystycznie związki między wielkością miasta wyrażoną liczbą mieszkańców (pop – w tysiącach mieszkańców), a intensywnością miejskiej wyspy ciepła obserwowaną w obrębie zabudowy można także traktować jako syntetyczne wskaźniki MWC. Przedstawiają je poniższe równania regresji:

– zabudowa zwarta wysoka

$$MWC = 0,0012 \times \text{pop} + 0,3695$$

– zabudowa zwarta niska

$$MWC = 0,0011 \times \text{pop} - 0,1314$$

- zabudowa luźna wysoka
MWC = $0,4456 \times \ln(\text{pop}) - 1,8737$
- zabudowa luźna niska
MWC = $0,0954 \times \ln(\text{pop}) - 0,4286$
- zabudowa śródleśna:
MWC = $0,0451 \times \ln(\text{pop}) + 0,0601$
- zabudowa przemysłowa
MWC = $0,0432 \times \ln(\text{pop}) + 2,0003$
- parki miejskie
MWC = $0,3201 \times \ln(\text{pop}) - 0,8732$

2.3. Wskaźniki oceny odczuwania

W poprzednich rozdziałach przedstawiono ogólne cechy termiczne miejskiej wyspy ciepła. Należy jednak pamiętać, że na organizm człowieka oddziałują, obok temperatury, także inne elementy pogody, zwłaszcza promieniowanie słoneczne, wiatr i wilgotność powietrza. W sposób najpełniejszy te wieloczynnikowe oddziaływania są opisywane przez modele wymiany ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem (Budyko 1975; Krawczyk 1979; Höppe 1984; Freitas de 1985; Jendritzky 1990; Havenith 2001; Błażejczyk 2003; Parsons 2003; Błażejczyk, Kunert 2011). Modele bilansu cieplnego człowieka są powszechnie wykorzystywane w badaniach bioklimatu miast (Morgan, Baskett 1974; Terjung 1974; Tuller 1975; Givoni 1976; Jendritzky, Nübler 1981; Burt i in. 1982a,b; Matzarakis i in. 2007; Błażejczyk 2011; Błażejczyk i in. 2014; Lindner-Cendrowska 2013; Krüger i in. 2011).

Do oceny warunków klimatu odczuwalnego w różnych typach pokrycia i użytkowania terenu coraz częściej stosowane są wskaźniki biotermiczne oparte na modelach bilansu cieplnego człowieka. G. Jendritzky (1990) w badaniach bioklimatu miasta stosuje wskaźnik PT (*Perceived Temperature*; VDI 2008; Staiger i in. 2012). A. Matzarakis i inni (2010) preferują natomiast wskaźnik PET (*Physiological Equivalent Temperature*; Mayer, Höppe 1987; Höppe 1999). K. Błażejczyk (1994, 2004, 2005, 2011) w badaniach bioklimatu obszarów zurbanizowanych stosował różne wskaźniki: HL (*Heat Load*), STI (*Subjective Temperature Index*), PST (*Physiological Subjective Temperature*), zaś w ostatnim czasie wskaźnik obciążeń cieplnych UTCI (*Universal Thermal Climate Index*).

Podstawowym zadaniem wymiany ciepła jest utrzymanie temperatury wewnętrznej człowieka na stałym poziomie, wynoszącym około 37°C, niezależnie od warunków zewnętrznych i samej aktywności fizycznej człowieka. Do oceny oddziaływania klimatu Warszawy na mieszkańców zastosowano uniwersalny

wskaźnik obciążeń cieplnych UTCI (Błażejczyk i in. 2010; Bröde i in. 2012; Fiala i in. 2012; Psikuta i in. 2012). Wskaźnik opiera się na analizie bilansu cieplnego człowieka, dokonywanej przy zastosowaniu wielowęzłowego modelu wymiany ciepła Fiali. Model Fiali składa się z dwóch podsystemów regulacji wymiany ciepła: pasywnego i aktywnego i rozpatruje przepływy ciepła w obrębie 19 różnych części ciała, a każda z tych części jest dodatkowo podzielona na 5 warstw i 2 lub 3 segmenty. Każda z tych części ciała, warstwa i segment są reprezentowane przez jeden węzeł. Łącznie algorytmy opisują przepływy ciepła pomiędzy ponad trzystoma węzłami. Model uwzględnia aktywne, fizjologiczne procesy termoregulacji zmieniające wielkość strumieni ciepła, takie jak: wydzielanie potu, produkcja ciepła w wyniku tzw. termogenezy drżeniowej, zmiany w tempie skórno przepływu krwi. Danymi wejściowymi do modelu są informacje meteorologiczne (temperatura powietrza, ciśnienie pary wodnej, prędkość wiatru, tzw. średnia temperatura promieniowania) oraz fizjologiczne (metaboliczna produkcja ciepła, albedo powierzchni ciała i odzieży, współczynnik emisyjności ciała i odzieży, izolacyjność termiczna i ewaporacyjna odzieży).

Wskaźnik UTCI jest definiowany jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości, jak w warunkach rzeczywistych. Mówiąc inaczej, zakłada się, że wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem zależy tylko od temperatury powietrza (T_a), przy stałym poziomie pozostałych parametrów meteorologicznych. Aby określić taką właśnie temperaturę powietrza, należy w pierwszej kolejności obliczyć bilans cieplny człowieka w warunkach rzeczywistych. Następnie, przyjmując warunki referencyjne, należy metodą kolejnych przybliżeń znaleźć taką temperaturę powietrza, przy której parametry fizjologiczne uzyskują takie same wartości, jak w warunkach rzeczywistych. Jako referencyjne warunki meteorologiczne przyjęto:

- ▶ brak promieniowania słonecznego i cieplnego,
- ▶ prędkość wiatru na wysokości 10 m nad gruntem równą $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na wysokości torsu człowieka, za którą przyjęto 1,2 m),
- ▶ względną prędkość ruchu powietrza związaną z poruszaniem się równą $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- ▶ ciśnienie pary wodnej odpowiadające 50% wilgotności względnej (przy temperaturze niższej od 29°C) i równą 20 hPa przy temperaturze wyższej od 29°C .

Przyjęto także stałe parametry fizjologiczne:

- ▶ metaboliczną produkcję ciepła (M) równą $135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (co odpowiada marszowi z prędkością $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),
- ▶ izolacyjność termiczną odzieży (I_{cl}) proporcjonalną do rzeczywistych warunków termicznych (Havenith i in. 2012).

Obliczenia wskaźnika UTCI wykonano za pomocą programu BioKlima © 2.6, który jest dostępny na stronie www.igipz.pan.pl/geoekoklimat/blaz/bioklima.htm.

Wartości wskaźnika UTCI są miarą obciążeń cieplnych organizmu powodowanych przez warunki atmosferyczne panujące w jego otoczeniu (tab. 2.2).

Tabela 2.2. Skala oceny obciążeń cieplnych organizmu według wskaźnika UTCI

UTCI (°C)	Obciążenie cieplne	Sposób przeciwdziałania
> +46	Nieznosny stres ciepła	Niezbędne okresowe schładzanie organizmu, konieczne uzupełnianie płynów > 0,5 l·h ⁻¹ . Należy unikać dużego wysiłku fizycznego.
+38,1 do +46,0	Bardzo silny stres ciepła	Konieczne okresowe korzystanie z pomieszczeń klimatyzowanych lub miejsc zacienionych, niezbędne uzupełnianie płynów > 0,5 l·h ⁻¹ . Należy ograniczyć wysiłek fizyczny.
+32,1 do +38,0	Silny stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l·h ⁻¹ , pożądane korzystanie z miejsc zacienionych i okresowe zmniejszanie wysiłku fizycznego.
+26,1 do +32,0	Umiarkowany stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l·h ⁻¹ .
+9,1 do +26,0	Brak obciążeń cieplnych*	Fizjologiczne procesy termoregulacji są wystarczające do zachowania komfortu cieplnego.
+0,1 do +9,0	Łagodny stres zimna	Pożądane używanie rękawiczek i nakrycia głowy.
-13,0 do 0,0	Umiarkowany stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem.
-27,0 do -13,1	Silny stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Pożądane zwiększenie termoizolacyjności odzieży.
-40,0 do -27,1	Bardzo silny stres zimna	Należy zwiększyć wysiłek fizyczny oraz chronić kończyny i twarz przed wychłodzeniem. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności odzieży i ograniczenie czasu przebywania w terenie otwartym.
< -40,0	Nieznosny stres zimna	Czas przebywania ograniczyć do niezbędnego minimum. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności i wiatrochronności odzieży.

* UTCI w zakresie 18,1–26,0°C, odpowiadają definicji „strefy komfortu cieplnego”, czyli „zakresowi temperatury otoczenia, w której człowiek ubrany w odpowiednią odzież nie odczuwa wpływu środowiska termicznego przez nieskończenie długi czas” (IUPS 2003).

3. Sieć monitoringu miejskiej wyspy ciepła w Warszawie

- ▷ Sieć monitoringu miejskiej wyspy ciepła na obszarze Warszawy założona przez IGiPZ PAN obejmuje obecnie 28 stanowisk pomiarowych, zlokalizowanych zarówno w ścisłym centrum miasta, jak i w różnej od niego odległości, a także w małych miejscowościach wokół Warszawy. Dane te są uzupełniane pomiarami z 8 stacji innych operatorów. W analizie miejskiej wyspy ciepła wykorzystano także dane z 11 innych, już nieistniejących stacji pomiarowych.
- ▷ Stanowiska monitoringu posiadają dokładną charakterystykę cech fizjograficznych i urbanistycznych: formy użytkowania terenu, rodzaju zabudowy, wskaźnika intensywności zabudowy, udziału terenów biologicznie czynnych, utworów powierzchniowych i stopnia zasłonięcia horyzontu.
- ▷ Inwentaryzacja bezpośredniego otoczenia punktów monitoringu obejmuje kartowanie: rodzaju pokrycia terenu, obiektów architektonicznych i roślinności wysokiej.

Obecna powierzchnia Warszawy przewyższa 515 km². Odległość między krańcem północnym i południowym wynosi 25 km, zaś między wschodnim i zachodnim 20 km. Na obszarze Warszawy funkcjonują 3 stacje meteorologiczne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (Okęcie, Bielany, Filtry) oraz 3 stacje opadowe, a także pojedyncze stacje należące do uczelni warszawskich (Uniwersytetu Warszawskiego, Politechniki Warszawskiej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego oraz Wojskowej Akademii Technicznej). Dostęp do danych zbieranych na tych stacjach jest utrudniony. Dlatego też w celu analizy MWC w Warszawie, zwłaszcza w świetle dużych zmian zagospodarowania przestrzeni miasta, a także widocznych zmian klimatu, w latach 90. XX w. klimatolodzy z Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN przystąpili do tworzenia własnej sieci pomiarów topoklimatycznych. Bazą nowej sieci monitoringu klimatu Warszawy były dwie stacje meteorologiczne: w ścisłym centrum Warszawy przy ul. Twardej oraz w Borowej Górze k. Serocka, która reprezentowała warunki pozamiejskie. W skład wyposażenia stacji wchodziły rejestratory Campbell CR23X, pyranometry Kipp&Zonen,

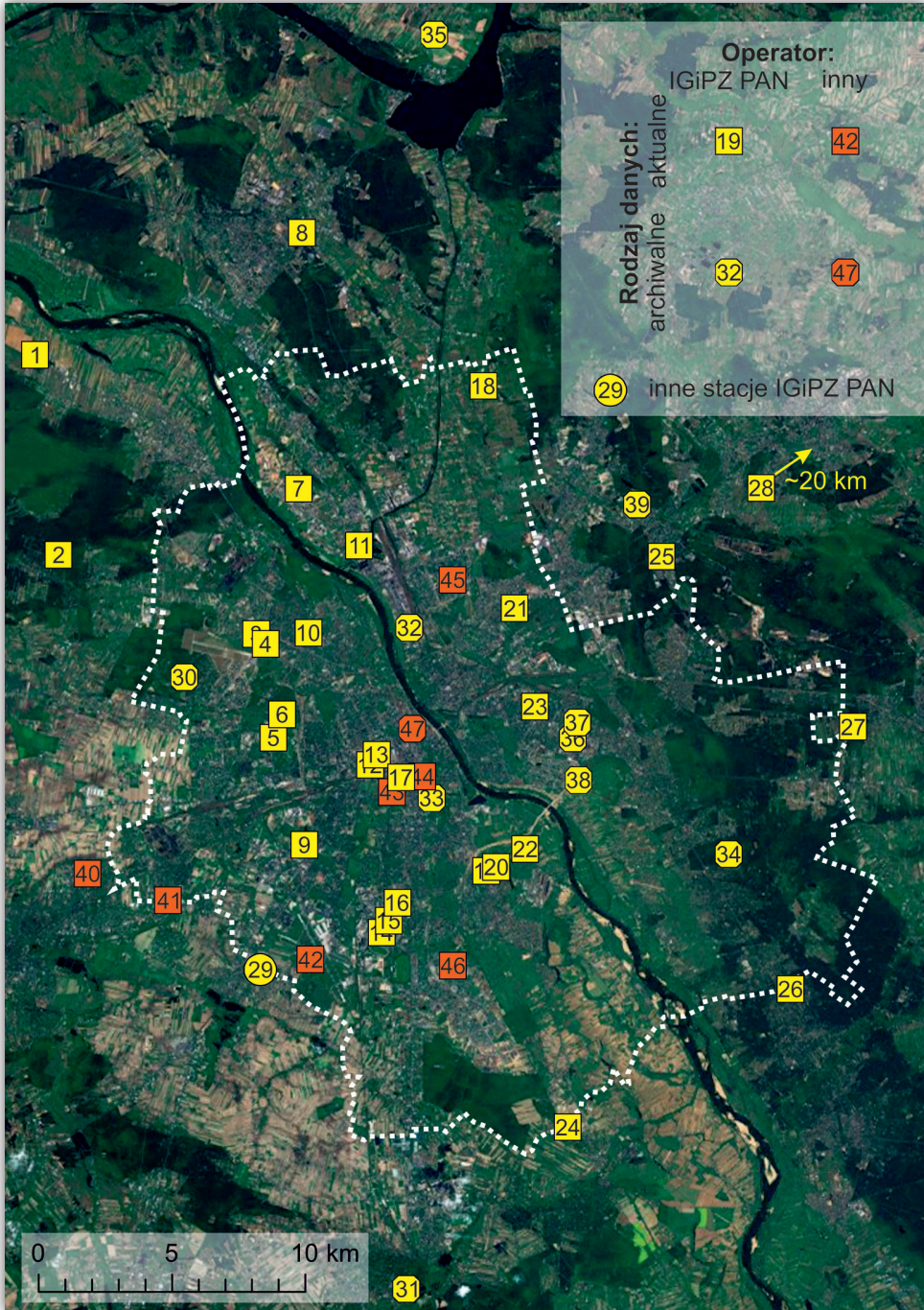
Tabela 3.1. Stanowiska pomiarowe w sieci monitoringu MWC

Nr	Nazwa stanowiska	Okres pomiarów	Adres	Szerokość geograficzna	Długość geograficzna	Odległość od centrum [km]	Operator
1	Dziekanów	od 2006	Sadowa, Kolejowa 334a	52°21'60"N	20°48'34"E	20,5	IGiPZ PAN
2	Izabelin	od 2006	Izabelin, Tetmajera 38	52°17'57"N	20°49'21"E	15,0	IGiPZ PAN
3	Conrada	od 2008	Warszawa, Dąbrowskiej 5A	52°16'21"N	20°55'53"E	7,2	IGiPZ PAN
4	Zgrupowania Żmija	od 2008	Warszawa, Kochanowskiego 49	52°16'09"N	20°56'12"E	6,7	IGiPZ PAN
5	Olbrachta	od 2008	Warszawa, Olbrachta 28	52°14'16"N	20°56'27"E	4,8	IGiPZ PAN
6	Koło	od 2008	Warszawa, Deotymy 41	52°14'44"N	20°56'44"E	4,7	IGiPZ PAN
7	Kamińskiego	od 2008	Warszawa, Mysliborska 104a	52°19'18"N	20°57'16"E	10,9	IGiPZ PAN
8	Legionowo	od 2006	Legionowo, Zegrzyńska 38	52°24'28"N	20°57'22"E	20,2	IGiPZ PAN
9	Włodarzewska	od 2008	Warszawa, Włodarzewska 61	52°12'05"N	20°57'28"E	4,7	IGiPZ PAN
10	Duracza	od 2008	Warszawa, Staffa 7B	52°16'23"N	20°57'36"E	5,9	IGiPZ PAN
11	Żerań	od 2006	Warszawa, Konwaliowa 7	52°18'09"N	20°59'16"E	8,2	IGiPZ PAN
12	Twarda	od 2000	Warszawa, Twarda 51/55	52°13'43"N	20°59'38"E	1,1	IGiPZ PAN
13	Pańska	od 2008	Warszawa, ul. Śliska 54	52°13'55"N	20°59'52"E	0,9	IGiPZ PAN
14	Bokszerska	od 2008	Warszawa, Gruszczyńskiego 11	52°10'19"N	21°00'01"E	6,4	IGiPZ PAN
15	Orzycka	od 2008	Warszawa, Orzycka 18	52°10'33"N	21°00'15"E	6,0	IGiPZ PAN
16	Langego	od 2008	Warszawa, Langego 3	52°10'55"N	21°00'32"E	5,3	IGiPZ PAN
17	Hoża	od 2008	Warszawa, Hoża 58/60	52°13'27"N	21°00'39"E	0,6	IGiPZ PAN
18	Kobiałka	od 2006	Warszawa, Ruskowy Bród 80H	52°21'23"N	21°03'22"E	14,5	IGiPZ PAN
19	Limanowskiego	od 2008	Warszawa, Gołkowska 106	52°11'34"N	21°03'27"E	5,2	IGiPZ PAN
20	Bernardyńska	od 2008	Warszawa, Bernardyńska 14a	52°11'38"N	21°03'47"E	5,4	IGiPZ PAN
21	Zacisze	2001-2002, od 2006	Warszawa, Wyborna 11	52°16'52"N	21°04'24"E	7,2	IGiPZ PAN
22	Augustówka	2001-2002, od 2006	Warszawa, Antoniewska 32	52°12'00"N	21°04'44"E	5,7	IGiPZ PAN
23	Kamionek	od 2006	Warszawa, Lubelska 5/7	52°14'53"N	21°05'04"E	5,5	IGiPZ PAN
24	Powsin	od 2006	Warszawa, Prawdziwka 2	52°06'23"N	21°06'07"E	15,1	IGiPZ PAN
25	Zielonka_2	od 2006	Zielonka, Waryńskiego 13	52°17'55"N	21°09'15"E	12,5	IGiPZ PAN
26	Michalin	od 2006	Józefów, Złotej Jesieni 12	52°09'10"N	21°13'28"E	17,0	IGiPZ PAN
27	Sulejówek	od 2006	Sulejówek, Jasna 5	52°14'28"N	21°15'32"E	17,1	IGiPZ PAN
28	Tłuszcz	od 2006	Tłuszcz, Makowa 17	52°25'26"N	21°26'56"E	36,9	IGiPZ PAN
29	Raszyn	od 2011	Raszyn, Orzechowa 6	52°09'34"N	20°56'02"E	9,4	IGiPZ PAN

30	Bemowo	2006–2010	Warszawa, Pitagorasa 14	52°15'29"N	20°53'31"E	8,7	IGiPZ PAN
31	Zalesie	2007–2010	Piaseczno, Kwiatowa 10	52°03'06"N	21°00'50"E	19,8	IGiPZ PAN
32	Pelcowizna	2001–2002	Warszawa, Jagiellońska 84	52°16'29"N	21°00'55"E	5,0	IGiPZ PAN
33	Park	2001–2002	Warszawa, Al. Ujazdowskie 4	52°13'02"N	21°01'40"E	1,8	IGiPZ PAN
34	Las	2001–2002	Warszawa, Trakt Napoleoński 62	52°11'54"N	21°11'42"E	3,7	IGiPZ PAN
35	Borowa Góra	2000–2011	Borowa Góra, Lipowa 1	52°28'29"N	21°01'45"E	27,3	IGiPZ PAN
36	Łukowska	2001–2002	Warszawa, Łukowska 16	52°14'15"N	21°06'19"E	6,6	IGiPZ PAN
37	Grochów	2001–2002	Warszawa, Zaliwskiego 3	52°14'34"N	21°06'28"E	6,8	IGiPZ PAN
38	Gocław	2001–2002	Warszawa, Kosmatki 72c	52°13'24"N	21°06'30"E	6,8	IGiPZ PAN
39	Zielonka_1	2001–2002	Zielonka, Saperów 11	52°18'58"N	21°08'27"E	13,1	IGiPZ PAN
40	Piastów	od 2003	Piastów, Pułaskiego 6/8	52°11'30"N	20°50'20"E	12,4	WIOŚ
41	Reguły	od 2001	Reguły, Bodycha 63	52°10'58"N	20°52'59"E	10,1	LAB-EL
42	Okęcie	od 1966	Warszawa, Wieżowa 8	52°09'46"N	20°57'40"E	8,1	IMGW
43	Niepodległości	od 2003	Warszawa, al. Niepodległości 227/233	52°13'09"N	21°00'21"E	1,2	WIOŚ
44	Krucza	od 2004	Warszawa, Krucza 5/11B	52°13'28"N	21°01'21"E	1,0	WIOŚ
45	Bródno	od 2003	Warszawa, Kondratowicza 8	52°17'27"N	21°02'21"E	7,1	WIOŚ
46	Ursynów	od 2003	Warszawa, Wokalna 1	52°09'39"N	21°02'21"E	7,9	WIOŚ
47	Uniwersytet	od 1972	Warszawa, Krakowskie Przedmieście 26/28	52°14'26"N	21°01'02"E	1,3	UW

WIOŚ – Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie, LAB-EL – LAB-EL Elektronika Laboratoryjna s.j., IMGW – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy, UW – Uniwersytet Warszawski

wiatromierze Young oraz czujniki temperatury i wilgotności powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego firmy Vaisala. W latach 2001 i 2002 w sieci pracowało 9 dodatkowych stanowisk pomiaru temperatury i wilgotności względnej powietrza, zlokalizowanych w różnych formach użytkowania terenu miejskiego. Od 2006 r. sieć monitoringu klimatu Warszawy zaczęła obejmować miejscowości wokół stolicy, m.in.: Izabelin, Legionowo, Zielonkę i najbardziej oddalony w tej sieci Tłuszcz. Od 2008 r., wraz z rozpoczęciem współpracy ze Szkołą Główną Gospodarstwa Wiejskiego w ramach projektu KBN N527/0669/33 „Ocena wskaźnika terenów biologicznie czynnych jako standardu kształtowania struktury przestrzennej terenów mieszkaniowych”, sieć monitoringu powiększyła się o kolejne kilkanaście stanowisk pomiarowych zlokalizowanych w różnych osiedlach mieszkaniowych (Kuchcik i in. 2008).



Rycina 3.1. Rozmieszczenie punktów w sieci monitoringu MWC w aglomeracji warszawskiej

Źródło materiału podkładowego: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo oraz GIS User Community.

Obecnie w ramach sieci działa 28 czujników pomiaru temperatury powietrza na wysokości 2 i 0,1 m nad poziomem gruntu oraz temperatury i wilgotności względnej powietrza na poziomie 2 m nad gruntem. Wszystkie stanowiska zlokalizowane są nad trawą, a tylko w jednym przypadku nad płożącymi krzewami iglastymi. Są to rejestratory HOBO Pro, które nieprzerwanie rejestrują dane z rozdzielczością 10-minutową, a na ich podstawie obliczane są następnie średnie godzinowe, dobowe, miesięczne wartości temperatury powietrza oraz wyznaczane wartości minimalne i maksymalne.

Łącznie od 2000 r. we wszystkich opracowaniach klimatu Warszawy i miejskiej wyspy ciepła opracowywanych przez zespół z Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN wykorzystano dane z 47 punktów pomiarowych (ryc. 3.1). W tej grupie 8 stanowisk pomiarowych należy do innych operatorów niż IGiPZ PAN (tab. 3.1).

Lokalizacja czujników reprezentuje wszystkie skale przestrzenne badania miejskiej wyspy ciepła. Porównanie danych miejskich i pozamiejskich, odległych nawet o 37 km od Warszawy, pozwala uzyskać pełny obraz MWC w mezoskali. Lokalizacja czujników w różnych jednostkach urbanistycznych, w różnych typach zagospodarowania przestrzennego umożliwia natomiast analizę cech MWC w skali lokalnej. Wykorzystanie danych 10-minutowych, zwłaszcza w analizie warunków klimatycznych fragmentu osiedla czy najbliższego otoczenia punktu, sprowadza badania do mikroskali.

3.1. Charakterystyka fizjograficzna stanowisk pomiarowych

Dla każdego punktu monitoringu miejskiej wyspy ciepła opracowano charakterystykę fizjograficzną otoczenia stanowiska pomiarowego (tab. 3.2). W pierwszej kolejności zdefiniowano formę użytkowania terenów, na których znajdują się punkty monitoringu, kierując się klasyfikacją użytków gruntowych zapisanych w *Rozporządzeniu Ministra Rozwoju Regionalnego i Budownictwa z dnia 29 marca 2001 r. w sprawie ewidencji gruntów i budynków* (Dz.U. z 2001 r. Nr 38, poz. 454). Według tego rozporządzenia, grunty dzielą się na:

- ▶ użytki rolne, wśród których wyróżnia się: grunty orne, sady, łąki trwałe, pastwiska trwałe, grunty rolne zabudowane, grunty pod stawami, rowy;
- ▶ grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione;
- ▶ użytki ekologiczne;
- ▶ grunty zabudowane i zurbanizowane, wśród których wyróżnia się: tereny mieszkaniowe, tereny przemysłowe, zurbanizowane tereny niezabudowane, tereny rekreacyjno-wypoczynkowe (w tym parki), użytki kopalne, tereny komunikacyjne;

- ▶ nieużytki;
- ▶ tereny różne;
- ▶ grunty pod wodami.

Charakterystyka fizjograficzna obszaru, w którym zlokalizowano punkt monitoringu obejmowała te elementy środowiskowe, które oddziałują na kształtowanie temperatury powietrza w warstwie przygruntowej, w tym na kształtowanie miejskiej wyspy ciepła, tzn.:

- ▶ rodzaj gruntu (utwory powierzchniowe);
- ▶ stosunki wodne (głębokość do wody gruntowej i stopień skanalizowania terenu);
- ▶ stosunki wietrzne (szczególną uwagę zwrócono na położenie stanowisk leżących na obszarze Warszawy względem korytarzy nawietrzających).

Materiałami źródłowymi dla analizy fizjograficznej poszczególnych punktów monitoringu były materiały kartograficzne:

- mapy topograficzne w skalach przestrzennych (1 : 10 000, 1 : 25 000 i 1 : 50 000);
 - mapy geologiczne utworów powierzchniowych w skali 1 : 50 000;
 - mapy hydrograficzne w skali 1 : 100 000,
- oraz opracowania planistyczne:
- *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy* (SUKZPMW 2010);
 - *Studium Planu Zagospodarowania Przestrzennego Obszaru Metropolitalnego Warszawy* (SPZPOMW 2011).

3.2. Charakterystyka urbanistyczna stanowisk pomiarowych

Na kształtowanie się temperatury w przyziemnej warstwie powietrza silnie wpływa, poza czynnikami naturalnymi, stopień zagospodarowania terenu. Charakterystyka urbanistyczna obszarów, w których zlokalizowano stanowiska monitoringu MWC, obejmuje:

- ▶ zdefiniowanie rodzaju zabudowy na danych obszarze (typ oraz wysokość budynków);
- ▶ określenie wskaźnika terenów biologicznie czynnych;
- ▶ określenie wskaźnika intensywności i gęstości zabudowy;
- ▶ określenie stopnia zasłonięcia horyzontu;
- ▶ określenie odległości od centrum miasta.

Obszary podlegające analizom urbanistycznym to tereny położone w bezpośrednim otoczeniu stanowisk monitoringu, o powierzchni od 250 do 1000 m².

Rodzaj i wysokość zabudowy określono bazując na *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz.U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690). Rozporządzenie to definiuje następujące pojęcia, wykorzystane w niniejszym opracowaniu, dotyczące budynków oraz zagospodarowania działek przeznaczonych pod zabudowę:

- ▶ zabudowa jednorodzinna – jeden budynek mieszkalny jednorodzinny lub ich zespół, wraz z przeznaczonymi dla potrzeb mieszkających w nich rodzin budynkami garażowymi i gospodarczymi;
- ▶ zabudowa wielorodzinna – jeden budynek mieszkalny wielorodzinny lub ich zespół, zawierający 2 lub więcej mieszkań;
- ▶ zabudowa zagrodowa – budynki mieszkalne i gospodarcze w rodzinnych gospodarstwach rolnych, hodowlanych lub ogrodniczych oraz w gospodarstwach leśnych;
- ▶ budynek użyteczności publicznej – budynek przeznaczony dla administracji publicznej, wymiaru sprawiedliwości, kultury, kultu religijnego, oświaty, szkolnictwa wyższego, nauki, opieki zdrowotnej, opieki społecznej i socjalnej, obsługi bankowej, handlu, gastronomii, usług, turystyki, sportu, obsługi pasażerów w transporcie kolejowym, drogowym, lotniczym lub wodnym, poczty lub telekomunikacji, oraz inny ogólnodostępny budynek przeznaczony do wykonywania podobnych funkcji;
- ▶ budynek produkcyjno-magazynowy – budynek przeznaczony do składowania wyrobów nieodpornych na warunki atmosferyczne wymagające odpowiedniej temperatury, wilgotności, czystości powietrza, a także wyrobów wymagających odpowiedniego zabezpieczenia;
- ▶ kondygnacja nadziemna – kondygnacja, której nie mniej niż połowa wysokości w świetle, co najmniej z jednej strony budynku, znajduje się powyżej poziomu projektowanego lub urzędzonego terenu.

Rozporządzenie wprowadza również podział budynków, pod względem ich wysokości, na następujące grupy:

- ▶ niskie – do 12 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości do 4 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- ▶ średniowysokie – ponad 12 m do 25 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości ponad 4 do 9 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- ▶ wysokie – ponad 25 m do 55 m włącznie nad poziomem terenu lub mieszkalne o wysokości ponad 9 do 18 kondygnacji nadziemnych włącznie;
- ▶ wysokościowe – powyżej 55 m nad poziomem terenu.

Według przywołanego wyżej rozporządzenia przy planowaniu zabudowy należy uwzględnić zachowanie tzw. wskaźnika powierzchni biologicznie czynnej (PBC). Jednakże w inwentaryzacji obszarów zielonych w Instytucie Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN stosowany jest wskaźnik terenów biologicznie czynnych (TBC) (Szulczewska i in. 2014), który uwzględnia grunt rodzimy pokryty roślinnością oraz wodą powierzchniową na działce budowlanej, zaś nie uwzględnia 50% sumy nawierzchni tarasów i stropodachów urządzonych jako stałe trawniki lub kwietniki na podłożu zapewniającym ich naturalną wegetację, o powierzchni nie mniejszej niż 10 m².

Wskaźnik terenów biologicznie czynnych (TBC) obliczono według wzoru:

$$\text{TBC} = \frac{\text{powierzchnia terenów biologicznie czynnych}}{\text{ogólna powierzchnia obszaru}}$$

Kolejną charakterystyką urbanistyczną obliczoną dla każdego stanowiska jest wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ). Wyraża ona stosunek powierzchni ogólnej budynków [Pog] do powierzchni terenu [Tn]:

$$\text{WIZ} = \text{Pog}/\text{Tn}$$

przy czym powierzchnia ogólna budynku to iloczyn powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków [Pzab], z wyłączeniem balkonów, tarasów i liczby kondygnacji [k]:

$$\text{Pog} = \text{Pzab} \cdot k$$

Gęstość zabudowy [Gzab] rozumiana jest natomiast jako udział powierzchni zabudowy w powierzchni działki:

$$\text{Gzab} = \text{Pzab}/\text{Tn}$$

Analiza stopnia zasłonięcia horyzontu danego punktu monitoringu ma na celu określenie możliwości dopływu do niego bezpośredniego i rozproszonego promieniowania słonecznego. Stopień zasłonięcia poszczególnych stanowisk monitoringu określono za pomocą symulacji w programie Rayman Pro.

Za centrum miasta przyjęto skrzyżowanie Alei Jerozolimskich i ul. Marszałkowskiej. Stanowiskiem najbliższym centrum była Hoża, najdalszym zaś Tłuszcz.

Wszystkie powyższe cechy uwzględniono w charakterystyce stanowisk pomiarowych monitoringu warunków klimatycznych aglomeracji warszawskiej (tab. 3.2). Z powodu braku bezpośredniego dostępu do stacji WIOŚ nie obliczono kilku parametrów (WIZ, TBC oraz SVF) charakteryzujących ich otoczenie.

Tabela 3.2. Charakterystyka fizjograficzna oraz urbanistyczna stanowisk pomiarowych w sieci monitoringu MWC w Warszawie

Nr	Nazwa stanowiska	Forma użytkowania terenu	Rodzaj zabudowy	Wskaźnik intensywności zabudowy [WIZ]	Tereny biologicznie czynne [TBC, %]	Utwory powierzchniowe	Zastąpienie horyzontu [%]
1	Dziekanów	użytki rolne/ grunty rolne zabudowane	jednorodzinna	0,31	54	osady rzeczne gruboziarniste	19
2	Izabelin	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	budynki użyteczności publicznej	0,11	82	osady fluwioglacjalne	18
3	Conrada	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,26*	60*	glina zwałowa	76
4	Zgrupowania Żmija	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,02*	42*	glina zwałowa	70
5	Olbrachta	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,24*	52*	glina zwałowa	52
6	Koło	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,80*	54*	osady fluwioglacjalne	68
7	Kamińskiego	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,98*	45*	osady rzeczne gruboziarniste	26
8	Legionowo	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren usługowy i teren mieszkaniowy	budynki użyteczności publicznej	0,05	85	piaski eoliczne	18
9	Włodarzewska	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,25*	41*	osady fluwioglacjalne	65
10	Duracza	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,71*	52*	glina zwałowa	68
11	Żerań	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren przemysłowy	budynki produkcyjno-magazynowe	0,27	55	osady rzeczne gruboziarniste	30
12	Twarda	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	budynki użyteczności publicznej	2,74	4	glina zwałowa	73
13	Pańska	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	2,50*	18*	glina zwałowa	71
14	Boklerska	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,56*	59*	glina zwałowa	74
15	Orzycka	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,95*	49*	glina zwałowa	87
16	Langego	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,19*	57*	glina zwałowa	53
17	Hoża	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	2,23*	16*	glina zwałowa	75

Nr	Nazwa stanowiska	Forma użytkowania terenu	Rodzaj zabudowy	Wskaźnik intensywności zabudowy [WIZ]	Tereny biologicznie czynne [TBC, %]	Utwory powierzchniowe	Zastąpienie horyzontu [%]
18	Kobiałka	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,33	72	osady rzeczne gruboziarniste	38
19	Limanowskiego	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,62*	65*	osady rzeczne gruboziarniste	63
20	Bernardyńska	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,72*	67*	osady rzeczne gruboziarniste	43
21	Zacisze	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,66	46	osady rzeczne gruboziarniste	51
22	Augustówka	użytki rolne/ grunty rolne zabudowane	jednorodzinna	0,25	67	osady rzeczne gruboziarniste	26
23	Kamionek	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	1,60	19	osady rzeczne gruboziarniste	50
24	Powsin	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren parków	budynki użyteczności publicznej	0,10	77	osady fluwioglacjalne	27
25	Zielonka_2	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,40	45	osady rzeczne gruboziarniste	37
26	Michalin	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,17	83	osady rzeczne gruboziarniste	37
27	Sulejówek	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,05	87	osady rzeczne gruboziarniste	23
28	Tłuszcz	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,42	53	piaski gliniaste	31
29	Raszyn	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,43	44	glina zwałowa	29
30	Bemowo	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,40	59	osady fluwioglacjalne	48
31	Zalesie	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,11	92	osady fluwioglacjalne	19
32	Pelcowizna	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren przemysłowy	budynki produkcyjno-magazynowe	0,72	10	osady rzeczne gruboziarniste	38
33	Park	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren parków	budynki użyteczności publicznej	0,14	71	glina zwałowa	87
34	Las	grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione	obszar niezabudowany	0,07	86	osady rzeczne gruboziarniste	82
35	Borowa Góra	użytki rolne/ grunty rolne zabudowane	budynki użyteczności publicznej	0,01	92	piaski gliniaste	20
36	Łukowska	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,64	43	osady rzeczne gruboziarniste	2

37	Grochów	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	0,77	33	osady rzeczne gruboziarniste	58
38	Gocław	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,25	68	osady rzeczne gruboziarniste	27
39	Zielonka_1	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	0,20	80	osady rzeczne gruboziarniste	35
40	Piastów	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	jednorodzinna	-	-	glina zwałowa	-
41	Reguły	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren przemysłowy	budynki produkcyjno-magazynowe	0,35	45	glina zwałowa	45
42	Okęcie	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren komunikacyjny	obszar niezabudowany	0,20	65	glina zwałowa	1
43	Niepodległości	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna	-	-	glina zwałowa	-
44	Krucza	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna/ budynki użyteczności publicznej	-	-	glina zwałowa	-
45	Bródno	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	wielorodzinna/ budynki użyteczności publicznej	-	-	osady rzeczne gruboziarniste	-
46	Ursynów	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	budynki użyteczności publicznej	-	-	glina zwałowa	-
47	Uniwersytet	grunty zabudowane i zurbanizowane/ teren mieszkaniowy	budynki użyteczności publicznej	1,07	16	glina zwałowa	21

*TBC i WIZ obliczono dla całych osiedli mieszkaniowych (osiedla mają powierzchnię od 5,1 do 7,6 ha).

3.3. Inwentaryzacja otoczenia stanowisk pomiarowych

Inwentaryzacja bezpośredniego otoczenia punktów monitoringu objęła kartowanie:

- ▶ terenów niezabudowanych (oznaczono podłoża biologicznie czynne oraz nawierzchnie przepuszczalne i nieprzepuszczalne według podziału przedstawionego w tabeli 3.3);
- ▶ obiektów architektonicznych z uwzględnieniem liczby kondygnacji naziemnych budynku oraz rodzaju zastosowanych materiałów wykończeniowych;
- ▶ roślinności wysokiej w promieniu do 50–100 m od punktu monitoringu (określono rodzaj, gatunek i wysokość drzew i krzewów).

Tabela 3.3. Klasyfikacja nawierzchni na potrzeby opracowania

Kategoria nawierzchni	Charakterystyka pokrycia terenu
Podłoże biologicznie czynne	trawa, łąka, pole, roślinność rabatowa, zakrzewienia i zadrzewienia
Nawierzchnie przepuszczalne	nawierzchnie gruntowe ulepszone, nawierzchnie z kruszyw naturalnych i sztucznych
Nawierzchnie nieprzepuszczalne	nawierzchnie twarde nieulepszone (brukowane, tłuczniowe), nawierzchnie twarde ulepszone (bitumiczne, betonowe, kostkowe lub klinkierowe)

Inwentaryzację uzupełniono o informacje na temat wartości współczynnika pochłaniania całkowitego promieniowania słonecznego dla poszczególnych elementów pokrycia terenu w otoczeniu punktów monitoringu (tab. 3.4). Informacje te, dla powierzchni naturalnych i sztucznych oraz dla materiałów budowlanych, zaczerpnięto z opracowania *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania klimatycznego* autorstwa J. Paszyńskiego, K. Miary i J. Skoczka z 1999 r. oraz ze strony internetowej: <http://www.engineeringtoolbox.com>.

Wyniki inwentaryzacji przedstawiono w postaci kartograficznej. Poniżej podano przykłady map inwentaryzacji terenu oraz diagramów zasłonięcia horyzontu dla wybranych punktów monitoringu MWC, reprezentujących różne formy i typy zabudowy.

Tabela 3.4. Współczynnik pochłaniania powierzchni naturalnych i sztucznych oraz materiałów wykończeniowych budynków

Powierzchnie naturalne i sztuczne		Współczynnik pochłaniania całkowitego promieniowania słonecznego (%)
Powierzchnie naturalne	zbiorniki wodne	98
	piasek rzeczny biały	60
	piasek suchy	65
	glina sucha	84
	trawa sucha	84
	łąka sucha	68
	pole	85
	wrzosowisko	90
	las iglasty	90
	las liściasty	85
Powierzchnie sztuczne i materiały wykończeniowe budynków	beton	80
	asfalt	91
	cegła czerwona	68
	wapień jasny	35
	szary piaskowiec	62
	stal szara	76
	dachówka	64
	papa	90
eternit	83	

Inwentaryzacja sieci monitoringu ma zatem charakter liczbowy, kartograficzny oraz opisowy. Jej przykład pokazuje rycina 3.2, na której przedstawiono dwa stanowiska o odmiennej charakterystyce i różnym klimacie lokalnym: punkt Hoża usytuowany w ścisłym centrum miasta, ze wskaźnikami terenów biologicznie czynnych 16%, wskaźnikiem intensywności zabudowy 2,23 i zasłonięciem horyzontu 75%, oraz punkt Kobiałka z odpowiednimi wartościami wskaźników TBC 72%, WIZ 0,3 i zasłonięciem horyzontu 38%.

Hoża (nr 17) – centrum miasta

Kobiałka (nr 18) – przedmieścia

Mapy inwentaryzacji terenu

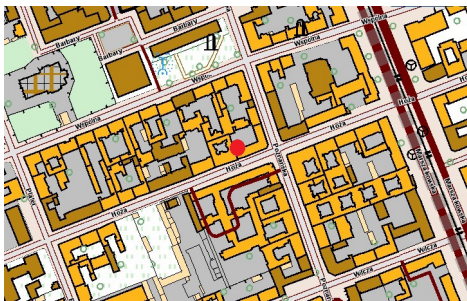


- punkt pomiarowy
 - trawnik
 - rabata
 - nawierzchnia betonowa
 - nawierzchnia asfaltowa
 - drzewa i krzewy liściaste
 - drzewa i krzewy iglaste
- Budynki (liczba kondygnacji):
- I
 - III
 - V
 - VII
 - IX

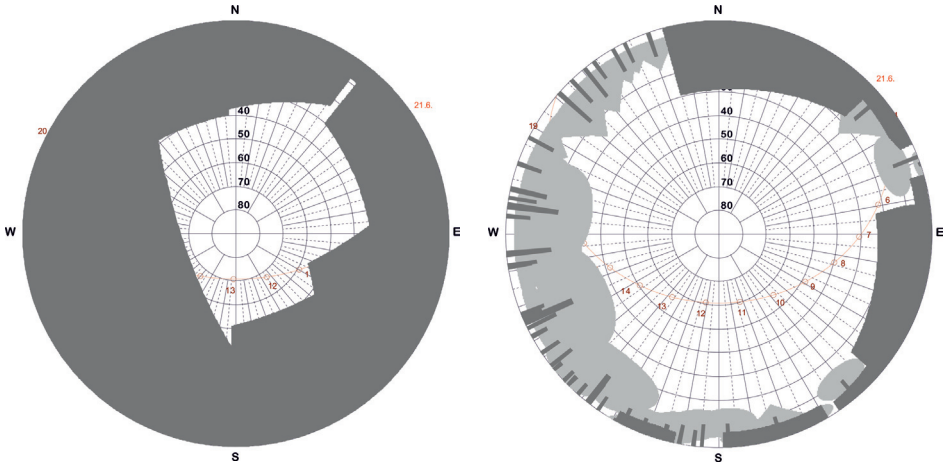


- punkt pomiarowy
 - trawnik
 - rabata
 - nawierzchnia betonowa
 - nawierzchnia asfaltowa
 - drzewa i krzewy liściaste
 - drzewa i krzewy iglaste
- Budynki (liczba kondygnacji):
- I
 - II
 - III

Mapy topograficzne (czerwony punkt oznacza lokalizację stanowiska pomiarowego)



Diagramy zasłonięcia horyzontu



Otoczenie punktów pomiarowych



Rycina 3.2. Przykład inwentaryzacji dwóch stanowisk pomiarowych: pokrycie terenu, rodzaj zabudowy, położenie na mapie topograficznej, wykres zasłonięcia horyzontu oraz zdjęcie otoczenia punktu

4. Uwarunkowania klimatyczne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie

- ▷ Intensywność miejskiej wyspy ciepła zależy przede wszystkim od pory dnia, ale także od pory roku (i związanej z nią długości dnia) oraz od ogólnej sytuacji synoptycznej.
- ▷ MWC występuje między zachodem a wschodem Słońca, a największe natężenie osiąga w drugiej części nocy i w godzinach około świtu. W ciągu dnia różnica temperatury między miastem i terenem pozamiejskim maleje, a często pojawia się ujemny UHI-index.
- ▷ Warszawska miejska wyspa ciepła jest najbardziej intensywna jesienią (UHI-index $> 2,5^{\circ}\text{C}$), natomiast najmniej – zimą (UHI-index $< 1,5^{\circ}\text{C}$). Średnio w roku intensywność miejskiej wyspy ciepła w centralnej części miasta osiąga około $2,0^{\circ}\text{C}$.
- ▷ Natężenie miejskiej wyspy ciepła w niewielkim stopniu zależy od masy powietrza zalegającej nad miastem. Średnio największe natężenie MWC obserwowane jest w masie powietrza polarnego kontynentalnego (PPk) (UHI-index $\approx 3,0^{\circ}\text{C}$), najmniejsze zaś w masie powietrza zwrotnikowego (PZ) (UHI-index $\approx 2,0^{\circ}\text{C}$).
- ▷ Maksymalne natężenie MWC w latach 2011 i 2012 wyniosło $9,9^{\circ}\text{C}$ (12 maja 2011 r.).
- ▷ W latach 1976–2011 MWC pojawiała się w Warszawie przez blisko 87% dni w roku (od 80% dni zimą do ponad 94% dni latem).
- ▷ W okresie 1976–2011 liczba stopniodni ogrzewania (HDD) w centrum Warszawy była większa o 300–500 stopniodni w porównaniu z peryferiami miasta, jednocześnie zmniejszając się od około 3600–3900 rocznie w latach 70. XX w. do 3000–3400 rocznie na początku XXI wieku.
- ▷ W okresie 1976–2011 znacząco zwiększyło się w Warszawie zapotrzebowanie na korzystanie z urządzeń klimatyzacyjnych, a liczba stopniodni chłodzenia (CDD) zwiększyła się od około 60–80 w latach 70. XX w. do 200–300 na początku XXI wieku.

▷ Prognozy zmian klimatu do końca XXI w. wskazują, że zarówno średnie, jak i maksymalne natężenie MWC powinny do końca wieku utrzymywać się w Warszawie na poziomie zbliżonym do obecnego. Zmniejszy się natomiast zapotrzebowanie na energię grzewczą, a zwiększą potrzeby energetyczne do obsługi urządzeń chłodzących.

Miejska wyspa ciepła powstaje w wyniku nagromadzenia dużych powierzchni sztucznych na niewielkim obszarze i całkowitej zmiany procesów fizycznych zachodzących w miejskiej warstwie dachowej i miejskiej warstwie granicznej. Ich oddziaływanie zaznacza się w ciągu całej doby, jednak szczególnie między zachodem i wschodem Słońca. Jednakże jej intensywność w dużej mierze zależy od pory roku i związanej z nią długości dnia i ilości promieniowania słonecznego dopływającego do powierzchni oraz od ogólnej sytuacji synoptycznej i to zarówno w skali regionu, jak i w skali globu. Jak zostało opisane poniżej, zjawisko MWC nie ma stałego natężenia i jest różne w kolejnych latach. Tworzeniu MWC sprzyjają sytuacje antycyklonalne, z małym zachmurzeniem oraz niewielką prędkością wiatru. Na przykład we Wrocławiu natężenie MWC w układach wyżowych jest średnio w roku o $0,7^{\circ}\text{C}$ wyższe niż w niżowych, zaś latem różnica ta sięga $1,0^{\circ}\text{C}$. Szczególnie zaznacza się w centrum wyżu oraz w klinie wysokiego ciśnienia (Szymanowski 2004).

4.1. Stan wiedzy

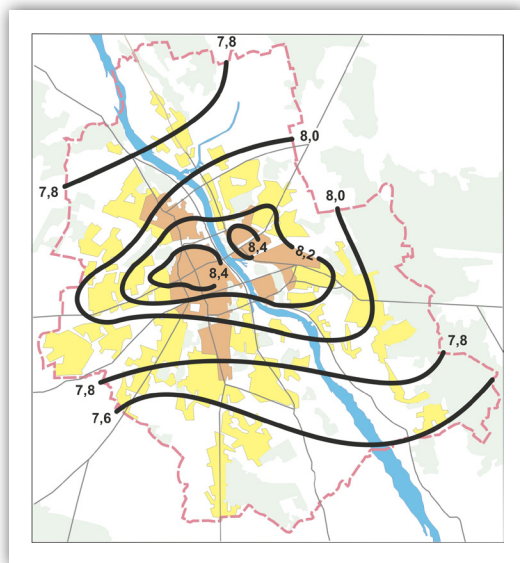
Pierwsze informacje o miejskiej wyspie ciepła w Warszawie pochodzą z początku XX wieku. W. Górczyński i S. Kosińska (1916) na podstawie porównania temperatury powietrza ze stacji meteorologicznych przy Obserwatorium Astronomicznym i przy ul. Krakowskie Przedmieście stwierdzili, że na tej drugiej temperatura powietrza jest wyższa średnio o $1,5^{\circ}\text{C}$ latem i $0,5^{\circ}\text{C}$ zimą.

Analiza temperatury powietrza z 1960 r. na 4 stacjach warszawskich: Uniwersytet (przy ul. Krakowskie Przedmieście), Obserwatorium (przy Ogrodzie Botanicznym UW, Aleje Ujazdowskie), Bielany (ul. Podleśna) i Warszawa-Okęcie, które w owym czasie było prawdziwie zamiejską stacją wykazała, że w stosunku do Okęcia, w Obserwatorium temperatura była wyższa o $0,3^{\circ}\text{C}$, na Bielanych o $0,4^{\circ}\text{C}$, zaś na Uniwersytecie o $0,8^{\circ}\text{C}$. Zaznaczyła się tym samym nie tylko miejska wyspa ciepła, ale także w jej obrębie obniżenie temperatury powietrza w ogrodzie botanicznym i parku go otaczającym (Kossowska 1973a,b, 1976). Pomimo tego różnica średniej rocznej temperatury powietrza między stacjami Warszawa Obserwatorium i Warszawa-Okęcie wzrastała od $0,23^{\circ}\text{C}$ w latach 1941–1950, przez $0,48^{\circ}\text{C}$ w okresie 1961–1970 po $0,60^{\circ}\text{C}$ w latach 1991–2000 (Lorenc, Mazur 2003).

Badania MWC w Warszawie obejmujące okresy 1961–1965 i 1976–1980 prowadzone przez J. Wawer wykazały, że w centrum miasta średnio było cieplej o 2°C w porównaniu z Okęciem, choć codzienne pola temperatury w mieście były bardziej złożone niż średnie miesięczne. Najbardziej intensywna miejska wyspa ciepła wystąpiła 19.02.1978 r., kiedy to różnica temperatury wyniosła $10,8^{\circ}\text{C}$. Dwa pozostałe przypadki powyżej 10°C także zanotowano zimą. Warunkami sprzyjającymi powstaniu tak silnej MWC były: zachmurzenie nieba poniżej 2 oktantów, mała prędkość wiatru (poniżej $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), masa powietrza kontynentalnego lub polarnego morskiego starego. Warunki takie determinuje zazwyczaj antycyklonalna sytuacja synoptyczna z centrum nad Europą Środkową lub Południową, ale także sytuacja słabogradientowa (Wawer 1992, 1997, 1998b).

Występowanie miejskiej wyspy ciepła w Warszawie jest dobrze widoczne na mapach rozkładu średniej rocznej temperatury powietrza, wykonanej na podstawie danych z 6 stacji meteorologicznych zlokalizowanych na terenie miasta w latach 1961–1980 (ryc. 4.1). Średnia roczna temperatura powietrza w Warszawie wynosiła około 8°C , przy czym w centrum miasta była ona o około $1,0^{\circ}\text{C}$ wyższa niż na peryferiach. Podobnie było w poszczególnych miesiącach. Nieco większe różnice zaznaczały się w przypadku temperatury minimalnej i osiągały w półroczu ciepłym średnio około $+1,5^{\circ}\text{C}$. W półroczu chłodnym średnie odchylenie temperatury minimalnej w centrum miasta w stosunku do terenu otwartego wynosiło

około 1°C (Kozłowska-Szczęsna i in. 1996).



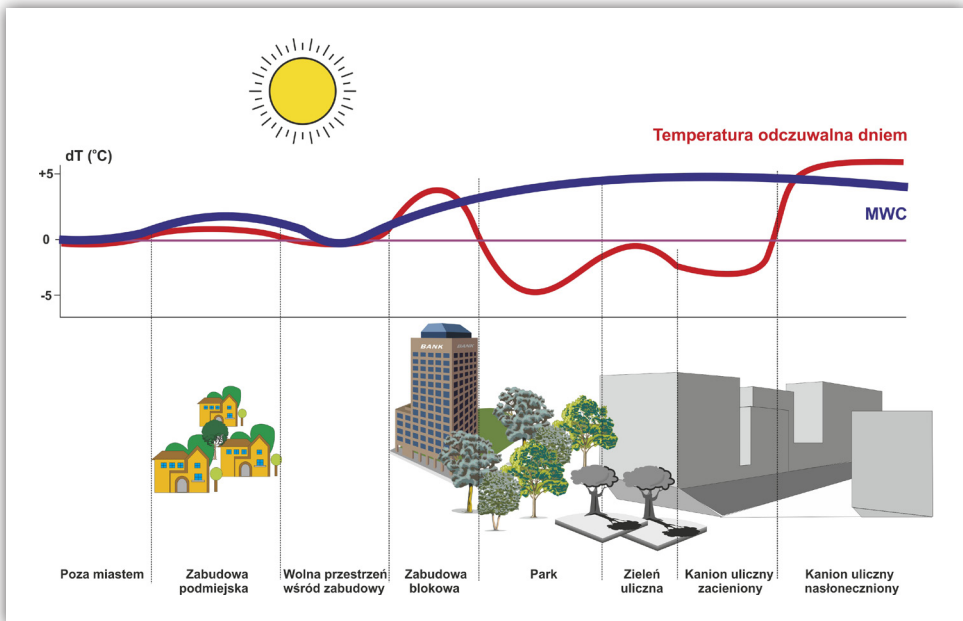
Rycina 4.1. Rozkład średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie, 1961–1980

Źródło: Kozłowska-Szczęsna i in. (1996).

Charakteryzując szczegółowo zróżnicowanie przestrzenne MWC w latach 2001 i 2002, K. Błażejczyk (2002) przeprowadził w Warszawie badania, w których wykorzystano 2 meteorologiczne stacje automatyczne (w centrum Warszawy przy ul. Twardej i w Borowej Górze k. Serocka) oraz 11 punktów pomiarowych usytuowanych w różnych częściach aglomeracji warszawskiej. Stwierdził, że średnio biorąc, w cieplej porze roku intensywność MWC w centrum miasta dochodziła do $2,5\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$. W miesiącach zimowych intensywność MWC nieco słabła i w centrum Warszawy wynosiła $1,0\text{--}1,5^{\circ}\text{C}$. Ocieplający wpływ zabudowy miejskiej

był wyraźnie obserwowany nie tylko w Śródmieściu i w dzielnicach przemysłowych, ale również w centrum Pragi i Grochowa oraz na wielkoblokowych osiedlach, a także wśród zwartej niskiej zabudowy przedmiejskiej. Intensywna MWC występowała także w parkach śródmiejskich, które nocą i wczesnym ranem były pod wyraźnym oddziaływaniem ciepła emitowanego przez otaczające je tereny zabudowane. Ocieplający wpływ miasta był także widoczny w osiedlach śródleśnych. Bardzo słabo MWC zaznaczała się na osiedlach z niską, luźną zabudową, a praktycznie zanikała na obszarach otwartych wewnątrz miasta (ryc. 4.1).

Uprzywilejowanie termiczne centrum miasta praktycznie zanikało, gdy analizie poddano zróżnicowanie temperatury maksymalnej powietrza. Średnie miesięczne wartości odchylenia tej charakterystyki termicznej od wartości notowanych na obszarze pozamiejskim (dT_{maks}) w obrębie zabudowy wysokiej, zwartej i luźnej, wynosiły około $+1^{\circ}\text{C}$, a niekiedy miały znak ujemny (co mówi o wyższych wartościach temperatury maksymalnej poza miastem niż w mieście). Wyraźnie wyższa temperatura maksymalna panowała natomiast w miejscach nasłonecznionych, w których istniejąca zabudowa hamowała ruch powietrza. Parki i inne tereny w mieście z zielenią wysoką cechowały się stosunkowo łagodnymi warunkami termicznymi w ciągu dnia. Ogólnie biorąc, o warunkach termicznych w mieście w ciągu dnia decydowała przede wszystkim ogólna sytuacja pogodowa, a dopiero w drugiej kolejności rodzaj zabudowy.



Rycina 4.2. Schematyczny rozkład miejskiej wyspy ciepła (MWC) oraz temperatury odczuwalnej w godzinach dziennych, w obrębie różnych struktur miasta

Powyższe specyficzne cechy termiczne miasta zarówno w godzinach nocnych, jak i w ciągu dnia można przedstawić w postaci schematu (ryc. 4.2). O ile miejska wyspa ciepła zaznacza się mniej lub bardziej intensywnie na całym obszarze miasta, o tyle w godzinach dziennych przestrzenny rozkład warunków termicznych odczuwanych przez mieszkańców jest bardzo zróżnicowany (Błażejczyk 2002; Kuchcik 2003b; Błażejczyk, Kunert 2006; Adamczyk i in. 2008).

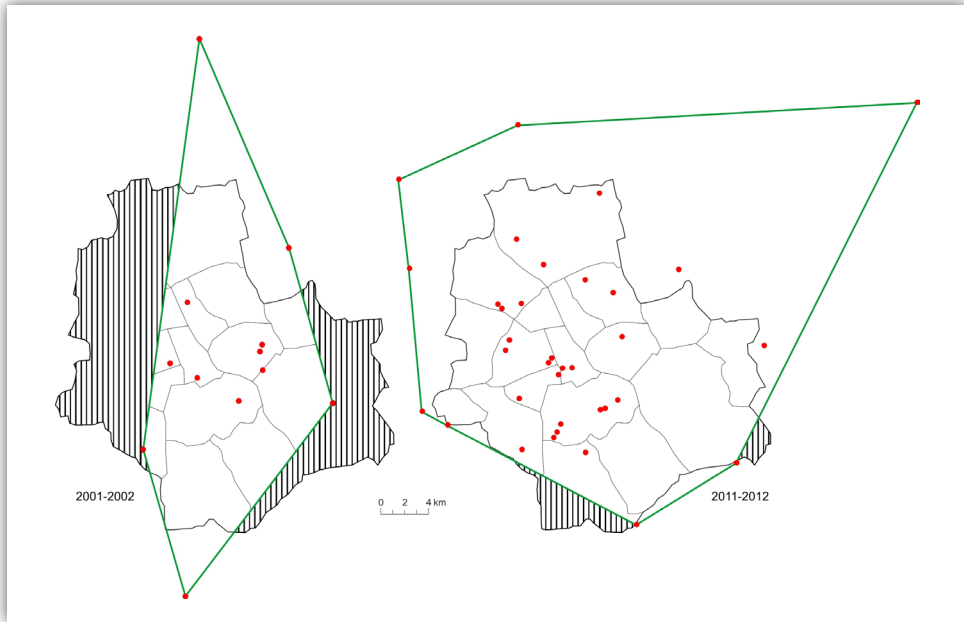
4.2. Zmienność czasowa miejskiej wyspy ciepła

Zasięg przestrzenny MWC w Warszawie odzwierciedla zasięg obszaru intensywnej zabudowy i jest raczej stały. Zmienia się zaś intensywność MWC. Widoczna jest jej dynamika dobową, sezonową oraz roczną, opisana poniżej z wykorzystaniem różnych metod: przebiegów dobowych oraz rocznych i sezonowych map rozkładu różnic między stacjami sieci monitoringu MWC a stacją Warszawa-Okęcie.

W pracy zróżnicowanie przestrzenne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie określone zostało dla dwóch okresów obejmujących lata 2001 i 2002 oraz 2011 i 2012. Wyznaczono je na podstawie danych z punktów pomiarowych rozmieszczonych w Warszawie i aglomeracji warszawskiej, działających w okresach 01.05.2001–30.06.2002 i 01.01.2011–31.12.2012. Rozmieszczenie punktów pomiarowych zaprezentowano na rycinie 3.1. Intensywność MWC w poszczególnych punktach pomiarowych określono na podstawie odchyłeń dobowej temperatury minimalnej w tych punktach w stosunku do wartości obserwowanej na stacji lotniskowej Warszawa-Okęcie (UHI-index), którą przyjęto jako stację odniesienia.

Przestrzenne zróżnicowanie MWC w Warszawie zostało zilustrowane przy wykorzystaniu oprogramowania ArcGIS w wersji 10.1. Ze względu na różny zasób danych pomiarowych z obydwu okresów, do interpolacji danych pomiarowych wykorzystano różne metody. Niewielka liczba punktów pomiarowych działających w latach 2001 i 2002 pozwoliła wykorzystać metodę ważonych odwrotności odległości (*IDW – Inverse Distance Weighting*). Metoda ta jest prosta, szybka i sprawdza się przy niewielkiej ilości próbek (Krivoruchko 2011). Jej wadą jest jednak to, że łatwo ulega wpływowi nierównomiernie rozmieszczonych punktów i uwydatnia kierunkowe trendy i anomalie – zwłaszcza na obszarze ekstrapolacji, dlatego powierzchnia obszaru interpolacji została zmodyfikowana tak, by prezentować wartości jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych.

Większa liczba próbek w latach 2011 i 2012 pozwoliła na interpolację danych dla tego okresu metodą krigingu. Wartości określone tą metodą szacowane są na podstawie średniej ważonej otaczających próbek. Metoda ta wybiera wartość najbardziej prawdopodobną i daje najlepsze wyniki pod warunkiem spełnienia kilku wymagań (normalny rozkład danych, dane stacjonarne i pozbawione trendu,



Rycina 4.3. Obszar interpolacji (wnętrze zielonego wieloboku) i ekstrapolacji (szraf) danych pomiarowych w latach 2001 i 2002 oraz 2011 i 2012

dostateczna liczba próbek). W opracowaniu wykorzystano powszechnie stosowany kriging zwykły (*OK – Ordinary Kriging*), który charakteryzuje się odpornością na trend (Papritz, Stein 2002; Krivoruchko 2011). Na rycinie 4.3 przedstawiono obszar interpolacji i ekstrapolacji danych pomiarowych w latach 2001 i 2002 oraz 2011 i 2012.

4.2.1. Dynamika zmienności dobowej

Jak wykazują dotychczasowe badania zmiany MWC, jej zanikanie i przechodzenie w ujemny UHI-index obserwowane są głównie w ciągu dnia. Nocą MWC jest zjawiskiem raczej stałym, choć o zmieniającym się natężeniu. W godzinach nocnych różnice temperatury powierzchni różnych obiektów w przestrzeni miasta są większe niż różnice temperatury powietrza (Saaroni, Ziv 2003). To właśnie zróżnicowanie stopnia wychładzania się powierzchni w mieście i poza nim, widoczne zwłaszcza podczas bezchmurnej i bezwietrznej pogody, jest główną przyczyną powstawania MWC. Natężenie miejskiej wyspy ciepła wzrasta po zachodzie słońca (Landsberg 1981; Oke 1982; Johnson i in. 1991), maksymalną wartość osiąga około 3–5 godzin po zachodzie słońca (Haeger-Eugensson, Holmer 1999) lub tuż przed jego wschodem (Błażejczyk 2002; Fortuniak 2003) albo o wschodzie (Szymonowski 2004) i maleje w godzinach rannych, w tempie uzależnionym od sytuacji

pogodowej (Voogt 2002). Według Montaveza i innych (2000) najwyższe natężenie MWC występuje albo w pierwszej części nocy, do 5 godzin po zachodzie, albo w drugiej części, o wschodzie słońca. Czas występowania MWC jest jednak różny w zależności od wielkości miasta i jego struktury. M. Szymanowski (2004) tłumaczy przesunięcie maksimum MWC na pierwszą część nocy prawdopodobnym ograniczeniem tempa spadku temperatury poza miastem w stosunku do centrum, które może wynikać nawet z nieznacznej zmiany warunków pogodowych, wzrostu prędkości wiatru i stopnia zachmurzenia.

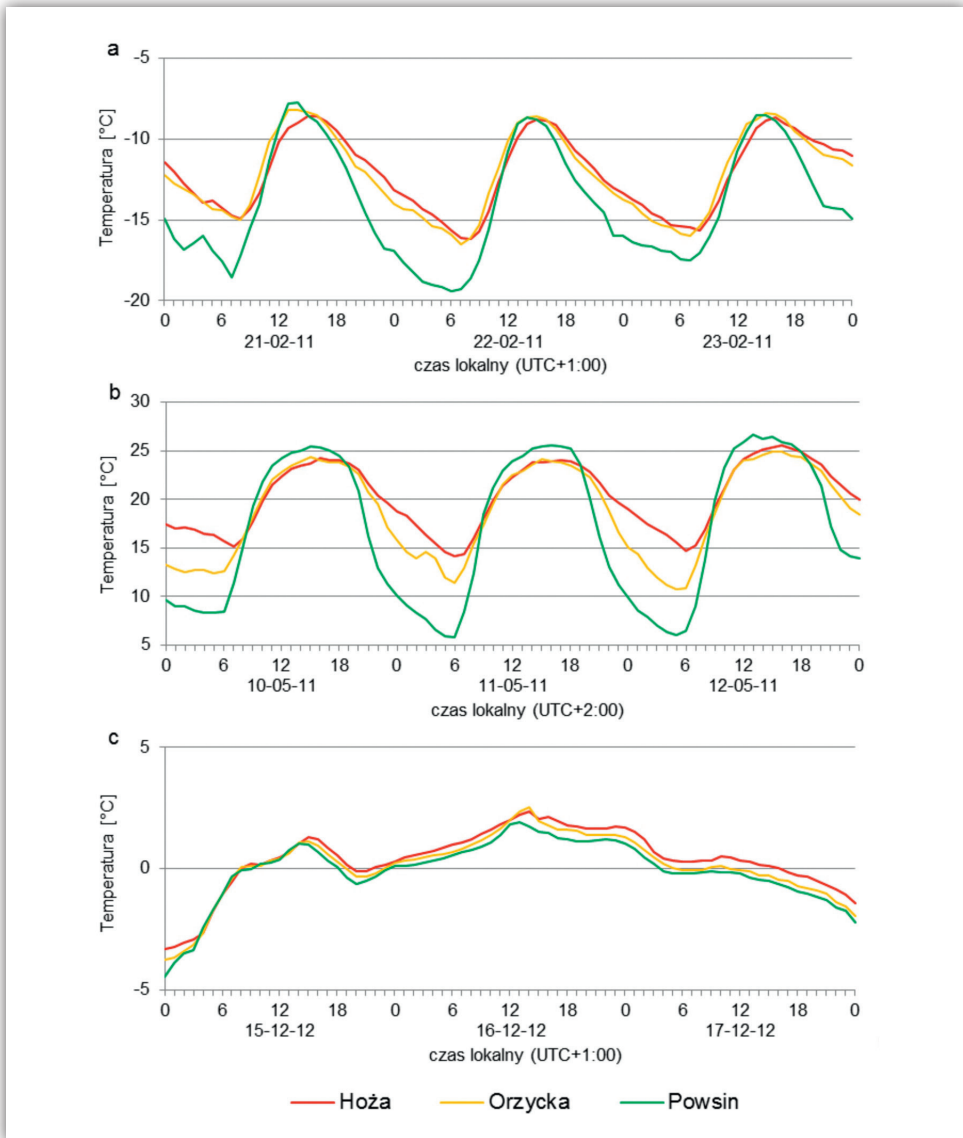
W ciągu dnia różnica temperatury między miastem i terenem pozamiejskim maleje, a często pojawia się ujemny UHI-index. Powodują to liczne zacienione przestrzenie w mieście oraz wolniejsze nagrzewanie się powierzchni sztucznych (Landsberg 1981; Oke 1982; Voogt 2002).

Zmienność dobową MWC w Warszawie obrazują przykłady 3-dniowych przebiegów średniej godzinnej temperatury powietrza z trzech stacji wyznaczających profil od przedmieść lewobrzeżnej Warszawy po jej centrum. Punkt Hoża (nr 17) usytuowany jest w ścisłym centrum miasta, w otoczeniu 5–8-kondygnacyjnych budynków; stacja Powsin (nr 24) zlokalizowana jest tuż za granicą miasta, na terenie Ogrodu Botanicznego PAN, na polanie; punkt Orzycka (nr 15) znajduje się w połowie dystansu pomiędzy centrum miasta a jego obrzeżami, na terenie osiedla mieszkaniowego z lat 50–70. XX w. (por. ryc. 3.1).

W lutym 2011 r., w arktycznej masie powietrza, kiedy temperatura powietrza w okresie całej doby nie przekraczała -5°C przebieg temperatury na Hożej i Orzyckiej był bardzo podobny do siebie, z niewielkim uprzywilejowaniem centrum miasta w godzinach nocnych. Wyraźnie odbiegał od nich przebieg temperatury na stacji w Powsinie. Intensywność MWC w nocy 21/22 lutego dwukrotnie sięgnęła $4,5^{\circ}\text{C}$ o godz. 23:00 oraz o godz. 3:00. MWC o natężeniu powyżej $3,0^{\circ}\text{C}$ utrzymywała się do godz. 7:00. Około godz. 10:00–11:00 następowało zrównanie temperatury w mieście i poza nim, po czym w godzinach 11:00–14:00 miasto stawało się chłodniejsze, nawet o $1,5^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4.4a)

W maju 2011 r., w masie powietrza polarnego morskiego, w okresie słonecznej, bezchmurnej pogody, zróżnicowanie między wszystkimi stacjami było wyraźniejsze niż zimą (ryc. 4.4b). W nocy 11/12 maja, o godz. 4:00, MWC osiągnęła $9,9^{\circ}\text{C}$, ale każdej nocy w tym okresie, w godzinach od 2:00 do 5:00–6:00 rano przewyższała $8,0^{\circ}\text{C}$ (ryc. 4.4). W ciągu dnia, od godz. 9:00 do 17:00–18:00 w zacienionym centrum miasta notowano ujemny UHI-index sięgający $2,2^{\circ}\text{C}$. Przebieg temperatury powietrza na rycinie 4.4b dobrze ilustruje zmniejszenie wychłodzenia nocnego w centrum miasta i spadku dobowej amplitudy powietrza wraz ze spadkiem udziału terenów biologicznie czynnych (TBC) oraz wzrostem wskaźnika intensywności zabudowy (WIZ). Na obrzeżach miasta, w Powsinie, temperatura minimalna w analizowanym okresie sięgnęła $5,8^{\circ}\text{C}$, zaś na stanowisku Hoża $11,4^{\circ}\text{C}$.

Temperatura maksymalna zaś odpowiednio 26,6°C i 25,5°C. Tym samym amplituda dobowa temperatury powietrza była znacznie wyższa na silnie nagrzewających się w ciągu dnia i równie silnie wychładzających w nocy obrzeżach miasta (20,8°C) w porównaniu do centrum (14,1°C). W okresie upałów tak duża amplituda temperatury powietrza w terenie podmiejskim sprzyja nocnej regeneracji organizmu silnie nagrzanego dniem.



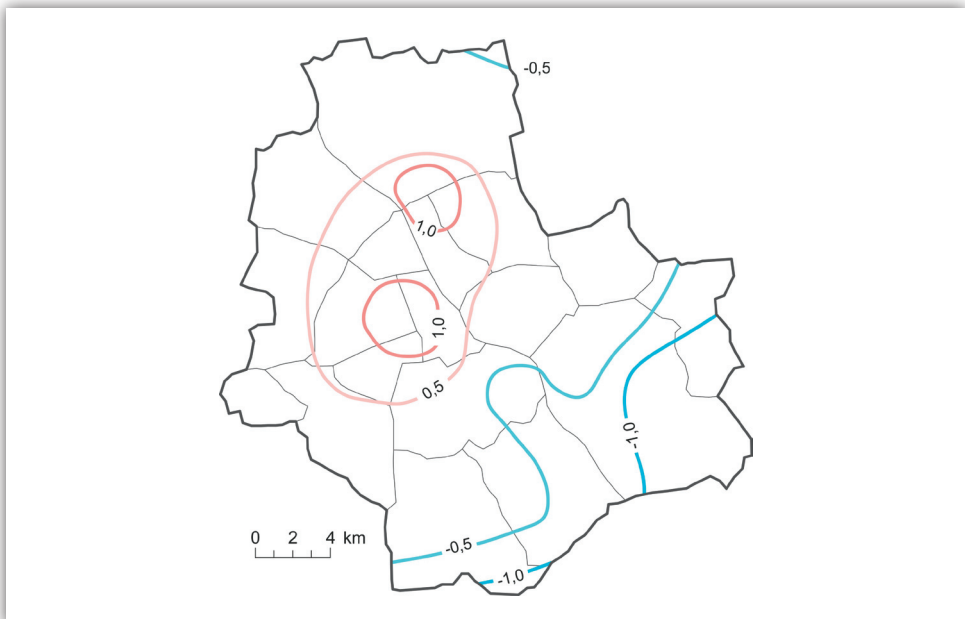
Rycina 4.4. Przebieg dobowy średniej godzinnej temperatury powietrza na 3 wybranych stacjach monitoringu MWC (Hoża, Orzycka i Powsin) w okresach: 21–23.02.2011 (a), 10–12.05.2011 (b) i 15–17.12.2012 (c)

Istnieją także sytuacje, w których MWC zaznacza się bardzo słabo lub wcale. W dniach 15–17 grudnia 2011 r., w masie powietrza polarnejskiego morskiego, przy dużym zachmurzeniu nieba i prędkości wiatru $2\text{--}8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przebieg temperatury powietrza na wszystkich stacjach był zbliżony do siebie, ze stałym, niewielkim, niezależnym od pory dnia uprzywilejowaniem termicznym centrum miasta (ryc. 4.4c).

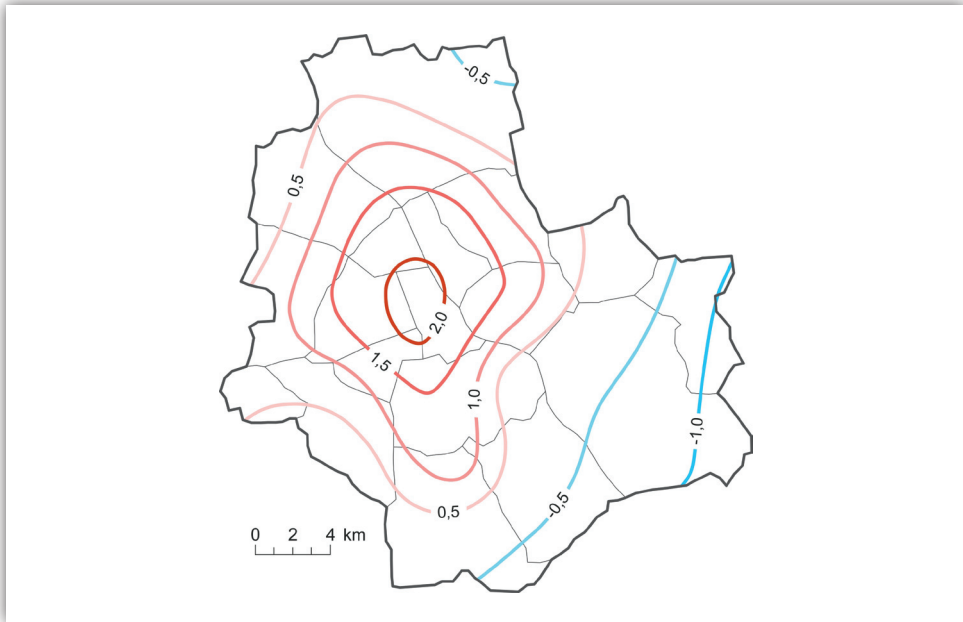
Analizowane przebiegi godzinne temperatury powietrza wyraźnie wskazują na przesuwanie się największego natężenia MWC, w zależności od godziny zachodu i wschodu Słońca.

4.2.2. Dynamika zmienności sezonowej

Uśredniony rozkład wskaźnika intensywności miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w latach 2001 i 2002 przedstawiono na rycinie 4.5. Przyjęto, że występowaniem zjawiska objęte są obszary, na których wartości odchylenia są wyższe od $0,5^{\circ}\text{C}$. Odchylenia temperatury minimalnej osiągają najwyższe wartości w centrum Warszawy oraz na terenach przemysłowych Żerania i Pragi-Północ. W tych obszarach dobowa temperatura minimalna w latach 2001 i 2002 była średnio o około 1°C wyższa niż na stacji Warszawa-Okęcie. Południowe i wschodnie rejony miasta cechują się odchyleniami ujemnymi. Osiągają one do -1°C w Powsinie, wschodniej części Wawra i Starej Miłosnej (por. Błażejczyk 2002). Niewielka liczba punktów



Rycina 4.5. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index), 2001 i 2002, wartości średnie roczne



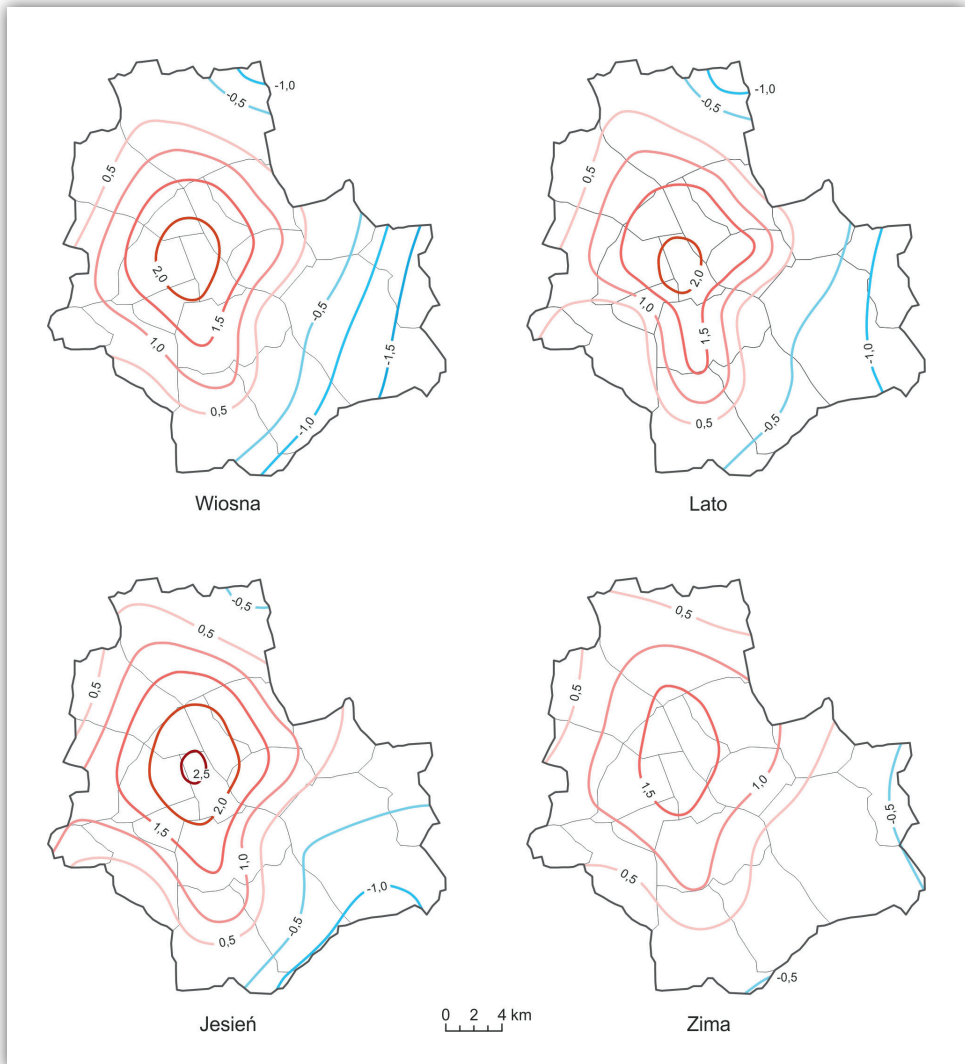
Rycina 4.6. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index), 2011 i 2012, przy zagęszczonej sieci stacji, wartości średnie roczne

pomiarowych i ograniczony zasób danych pozwala na uzyskanie jedynie ogólnego obrazu MWC dla tego okresu. Obszar objęty MWC jest niewielki i jego zasięg nie jest precyzyjnie określony. Potrzeba lepszego rozpoznania zasięgu tego zjawiska w Warszawie była powodem stopniowego zwiększania liczby punktów pomiarowych począwszy od roku 2006.

Zasięg MWC w latach 2011 i 2012 (ryc. 4.6) jest znacznie większy niż w okresie 2001 i 2002. Ma to związek z rozbudową sieci pomiarowej i uszczegółowieniem obrazu zjawiska, ale także ze stopniowym zwiększaniem się udziału terenów zabudowanych. MWC jest najbardziej intensywna w Śródmieściu, zachodniej części Woli, południowej części Żoliborza i na Pradze-Północ. Odchylenia temperatury minimalnej osiągają w tych obszarach wartość ponad $+2^{\circ}\text{C}$. Na południowych i północnych krańcach Warszawy oraz w południowo-wschodniej części miasta (Wawer, Wesoła) MWC nie występuje, jednak sytuacja może zmieniać się w związku z rozbudową terenów mieszkaniowych na obrzeżach miasta (np. w Wilanowie). Stosunkowo niskie wartości UHI-index w latach 2000 i 2001 wiążą się z ogólnym osłabieniem zjawiska MWC w tym okresie (por. rozdz. 4.3).

Na rycinie 4.7 przedstawiono zróżnicowanie przestrzenne miejskiej wyspy ciepła w porach roku, na podstawie danych z lat 2011 i 2012. Zjawisko jest najbardziej intensywne jesienią (IX–XI). Temperatura minimalna w północnej części Śródmieścia jest wtedy średnio o $2,5^{\circ}\text{C}$ wyższa niż na Okęciu. Wiosną (III–V)

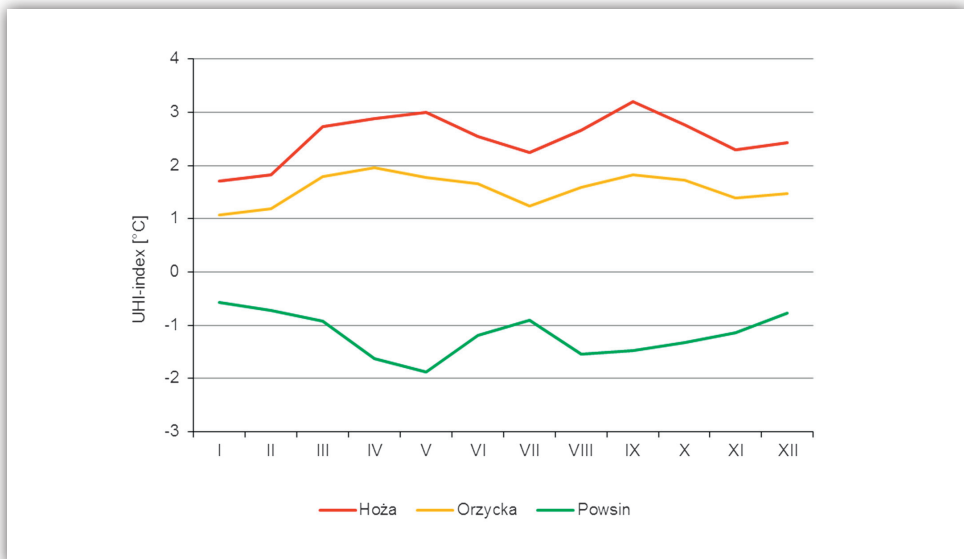
i latem (VI–VIII) rozkład przestrzenny MWC jest zbliżony do uśrednionego rozkładu w analizowanym okresie, jednak w obu tych sezonach, a zwłaszcza wiosną, obserwowany jest wysoki gradient temperatury minimalnej między centrum miasta a jego południowo-wschodnimi obrzeżami. Intensywność miejskiej wyspy ciepła osiąga wtedy około 2°C w centralnej części Warszawy. Zjawisko jest najmniej nasilonie zimą (XII–II) i w porównaniu z innymi porami roku jest wtedy najmniej wyraźne. Mniejszy jest wówczas gradient temperatury minimalnej między centrum miasta i jego obrzeżami. Sytuacja taka wiąże się z sezonem grzewczym



Rycina 4.7. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index) w porach roku, 2011 i 2012

i aktywnością niskich źródeł emisji ciepła oraz zanieczyszczeń na obszarach zabudowy jednorodzinnej, które nie korzystają z „ciepła systemowego”. Zimą intensywność MWC osiąga około $1,5^{\circ}\text{C}$ w Śródmieściu, na Pradze-Północ, w południowej części Białołęki oraz na Żoliborzu i w zachodniej części Woli.

Rycina 4.8 przedstawia przebieg roczny wartości wskaźnika intensywności miejskiej wyspy ciepła w trzech analizowanych wcześniej punktach pomiarowych – Hoża, Powsin i Orzycka. Wskaźnik intensywności MWC w centrum miasta osiąga swoje maksimum we wrześniu ($3,2^{\circ}\text{C}$), a minimum w styczniu ($1,7^{\circ}\text{C}$). Prawidłowości te są zgodne z przedstawionym wcześniej zróżnicowaniem sezonowym MWC w Warszawie. Latem, zwłaszcza w lipcu, wartości wskaźnika w punkcie Hoża są niższe aniżeli jesienią i wiosną. Średnia wartość wskaźnika dla lata to $2,5^{\circ}\text{C}$. Ma to związek z ograniczonym dopływem promieniowania słonecznego oraz słabszym nagrzewaniem punktu Hoża (zasłonięcie horyzontu 75%), osłoniętego przez zabudowę centrum miasta i jednocześnie swobodnym dopływem promieniowania słonecznego do punktu Okęcie (zasłonięcie horyzontu 1%), co powoduje zmniejszenie różnic temperatury minimalnej w tym okresie. Przebieg wskaźnika natężenia MWC w punkcie Orzycka przypomina przebieg w punkcie Hoża, jednak jego wartości są o $0,6\text{--}1,4^{\circ}\text{C}$ niższe niż w centrum miasta. W przebiegu wartości wskaźnika intensywności MWC na terenie pozamiejskim (Powsin) widoczne są prawidłowości odwrotne niż w centrum miasta. Wskaźnik w tym punkcie osiąga swoje maksimum w styczniu ($-0,6^{\circ}\text{C}$), a minimum w maju ($-1,9^{\circ}\text{C}$). Przez cały rok temperatura minimalna w punkcie Powsin jest niższa niż na stacji Warszawa-Okęcie. Sytuacja



Rycina 4.8. Przebieg roczny wskaźnika intensywności miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w punktach Hoża, Orzycka oraz Powsin, 2011 i 2012

ta pokazuje, że wzrost stopnia urbanizacji w rejonie stacji lotniskowej na Okęciu uniemożliwił traktowanie jej jako w pełni reprezentatywnej stacji pozamiejskiej. W porach przejściowych (wiosna, jesień) niskie wartości wskaźnika intensywności MWC w terenie pozamiejskim i wysokie w centrum miasta skutkują wysokim gradientem temperatury minimalnej pomiędzy tymi obszarami. Gradient ten zmniejsza się latem i – zwłaszcza – zimą.

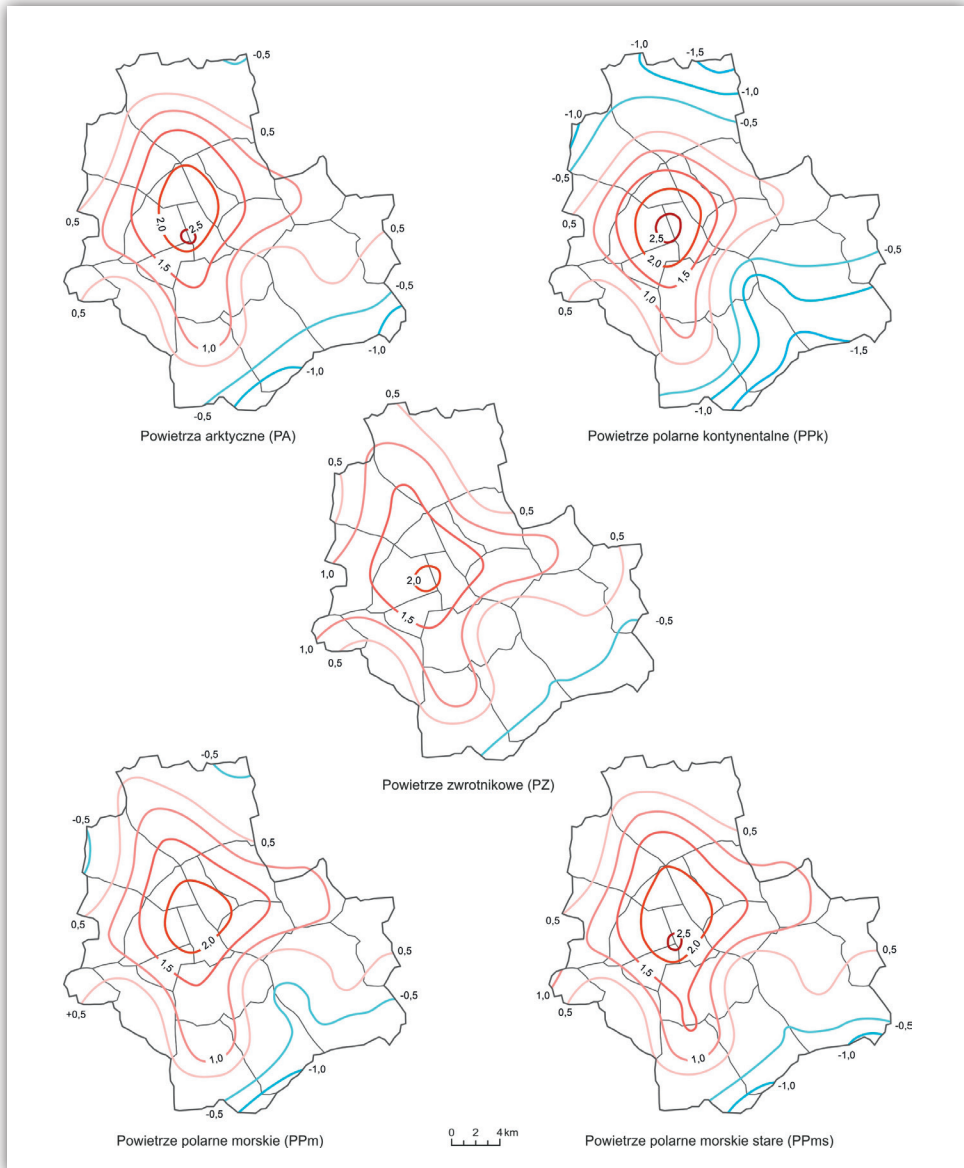
4.2.3. Dynamika miejskiej wyspy ciepła w masach powietrza

Zróznicowanie przestrzenne i natężenie miejskiej wyspy ciepła jest w dużym stopniu zależne od fizycznych cech atmosfery, to jest mas powietrza zalegających nad miastem. Ze względu na utrudniony dostęp do danych, analiza dynamiki miejskiej wyspy ciepła w masach powietrza ograniczona została do 2011 roku. Na rycinie 4.9 przedstawiono rozkład przestrzenny MWC w poszczególnych masach powietrza według M. Więclawa (2012). Średnio największe natężenie MWC obserwowane jest przy napływie powietrza polarnego kontynentalnego (PPk). Różnice temperatury minimalnej między Okęciem a centrum Warszawy dochodzą do 3°C, jednak zasięg przestrzenny MWC jest wtedy najmniejszy. Powietrze takie napływa nad Polskę znad Europy Wschodniej i środkowej Azji. W 2011 r. zalegało ono nad Warszawą przez około 8% dni, głównie jesienią (11% dni) (tab. 4.1). Tę masę powietrza cechuje niska wilgotność, a towarzyszy jej bezchmurna lub prawie bezchmurna pogoda, która po zachodzie słońca umożliwia szybkie wypromieniowanie ciepła w obszarach peryferyjnych miasta, co przyczynia się do powstawania dużych różnic temperatury minimalnej – około 4,5°C – między centrum Warszawy a północnymi i południowymi krańcami miasta. Powietrze takie zalega przez niewiele dni w lecie (3,3%), jednak wtedy towarzyszy mu pogoda słoneczna, gorąca i sucha.

Nieco mniejsze natężenie MWC obserwowane jest podczas zalegania powietrza arktycznego (PA) i polarnego morskiego starego (PPms), którego cechy są zbliżone do powietrza polarnego kontynentalnego. Intensywność MWC w tych masach powietrza osiąga maksymalnie około +2,5°C w centrum Warszawy. Zasięg przestrzenny MWC w obydwu masach powietrza jest zbliżony do siebie i większy niż w powietrzu polarnym kontynentalnym. Powietrze arktyczne zalegało przez około 13% dni w 2011 r. (głównie wiosną i zimą). PA bardzo rzadko napływa latem. Cechuje się ono niską temperaturą i niską wilgotnością powietrza. Powietrze polarne morskie stare występowało przez około 30% dni w 2011 r. z podobną częstością w każdej porze roku. Duże podobieństwo cech fizycznych powietrza polarnego morskiego starego do polarnego kontynentalnego powoduje, że zjawisko MWC występujące przy zaleganiu tej masy jest uciążliwe dla zdrowia, zwłaszcza latem.

Masą powietrza, która najczęściej zalega nad Warszawą jest powietrze polarne morskie (PPm). W 2011 r. występowało przez 43% dni. Natężenie MWC w PPM

jest mniejsze niż w innych masach powietrza, jednak w centrum Warszawy różnice temperatury minimalnej są średnio o ponad 2°C wyższe niż na Okęciu. Powietrze polarne morskie występuje przez ponad 50% dni w lecie. W zależności od obszaru źródłowego masa ta może być ciepła (południowa część strefy umiarkowanej Oceanu Atlantyckiego) lub chłodna (północna część strefy umiarkowanej Oceanu Atlantyckiego), jednak zawsze cechuje się wysoką wilgotnością powietrza.



Rycina 4.9. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index) w masach powietrza, 2011 i 2012, wartości średnie roczne

W 2011 r. najrzadziej zalegającą masą powietrza było powietrze zwrotnikowe. Najczęściej napływa ono nad Polskę latem i cechuje się bardzo wysoką temperaturą i zwykle niską wilgotnością. MWC w tej masie powietrza jest stosunkowo mało wyraźna w porównaniu do poprzednio wymienionych mas powietrza, również jej natężenie jest najmniejsze (około $+2^{\circ}\text{C}$ w centrum miasta). Należy jednak pamiętać, że masa ta jest jednorodna i wysoka temperatura powietrza podczas zalegania powietrza zwrotnikowego panuje nocą nad całym obszarem miasta – również w terenach peryferyjnych, przez co różnice temperatury minimalnej między centrum miasta a otoczeniem nie są wysokie. Nocny wypoczynek mieszkańców Warszawy podczas zalegania tej masy powietrza jest trudny, a na terenach, gdzie występuje zjawisko MWC jest jeszcze trudniejszy.

Tabela 4.1. Częstość (%) mas powietrza w porach roku i średnio w 2011 roku oraz w dziesięcioleciu 1991–2000

	PA	PPk	PPm	PPms	PZ
Wiosna	22,8	9,8	38,0	27,2	2,2
Lato	0,0	3,3	52,2	28,3	16,3
Jesień	13,2	11,0	44,0	27,5	4,4
Zima	17,8	8,9	37,8	35,6	0,0
2011	13,4	8,2	43,0	29,6	5,8
1991–2000	21,0	11,0	36,0	26,0	6,0

Źródło: Kuchcik, Oźga (2002).

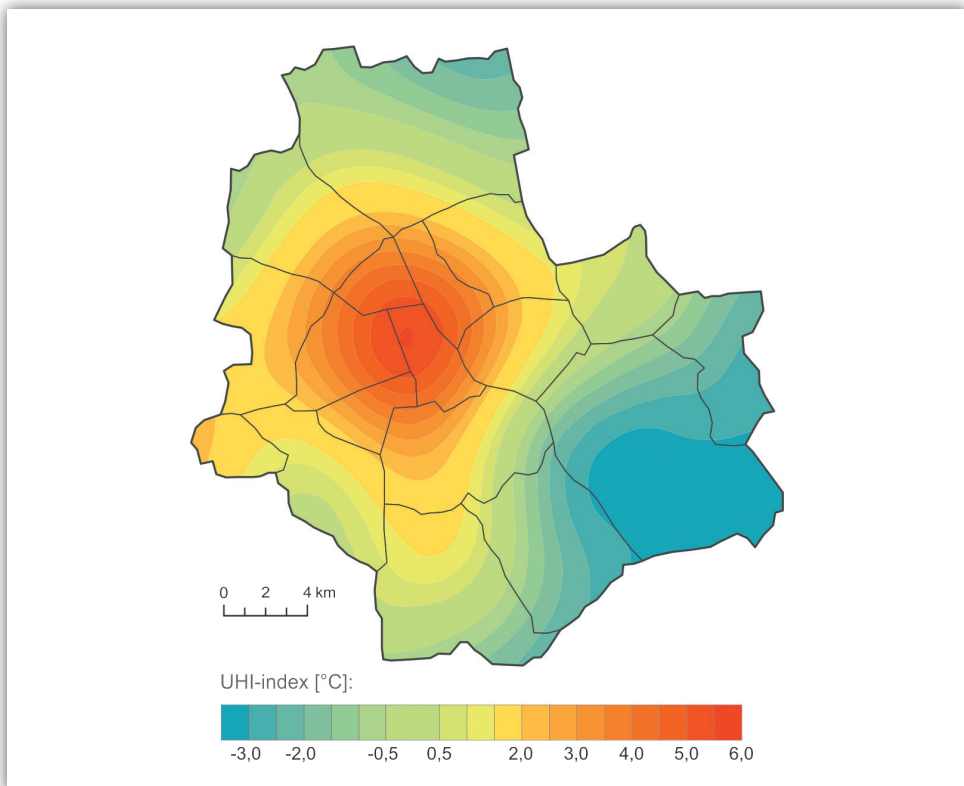
Rycina 4.9 przedstawia obraz uśredniony w roku w poszczególnych sezonach klimatycznych w różnych masach powietrza. Najwyższy średni UHI-index cechuje powietrze kontynentalne, które w 2011 r. z największą częstością występowało jesienią, w okresie najsilniejszej miejskiej wyspy ciepła (por. ryc. 4.7). Większe natężenie MWC osiąga także w powietrzu polarnym morskim starym oraz w arktycznym.

W celu zobrazowania skrajnych różnic dobowej temperatury minimalnej między centrum miasta a obszarami peryferyjnymi, wybrano sytuację z okresu między 9 a 13 maja 2011 roku. Warunki termiczne, jakie panowały w tych dniach na stacji Warszawa-Okęcie zaprezentowano w tabeli 4.2. Największe nasilenie miejskiej wyspy ciepła przypadło na 12 maja 2011 r. i w analizowanym okresie (lata 2011 i 2012) był to przypadek najbardziej intensywnej MWC (ryc. 4.10). Rycina 4.11 przedstawia mapę synoptyczną dla godziny 00 UTC 12 maja 2011 roku. Przez wszystkie dni wybranego okresu w Warszawie zalegała masa powietrza polarne-go morskiego. Różnica intensywności MWC między centrum miasta a jego południowymi obrzeżami osiągnęła w analizowanym okresie wartość średnio $7,8^{\circ}\text{C}$. 12 maja 2011 r. o godz. 4:00 czasu lokalnego różnica średniej godzinowej temperatury powietrza między punktem Hoża i Powsin była równa $9,9^{\circ}\text{C}$, przy różnicy

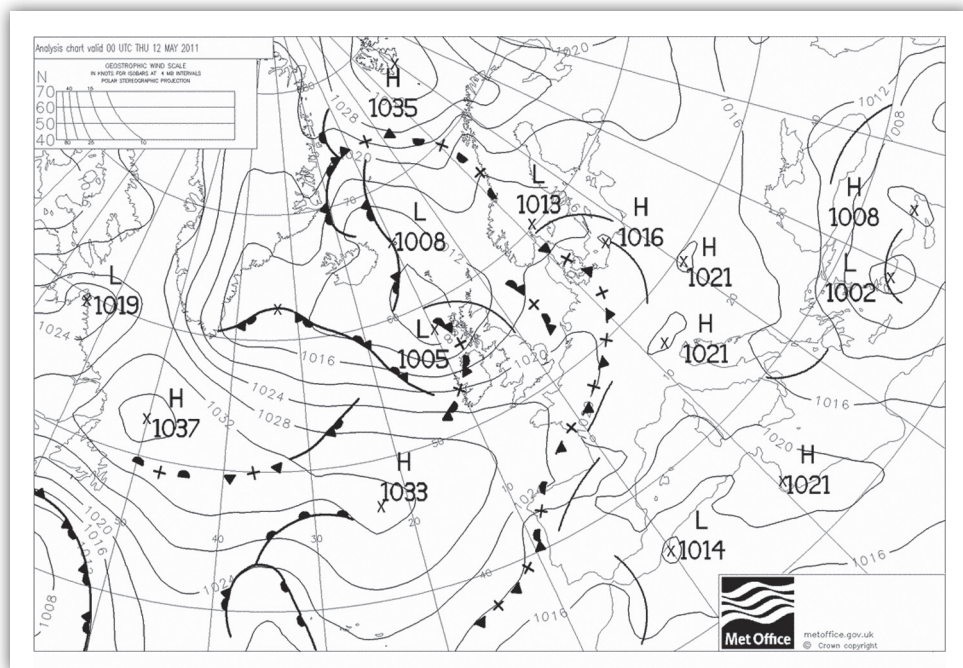
wartości wskaźnika intensywności MWC dla tej doby równej $9,3^{\circ}\text{C}$. Sytuacji tej towarzyszyła masa powietrza Ppm, której częstość napływu nad obszar Warszawy jest największa – 36% dni w latach 1991–2000 i aż 46% w 2011 roku. Świadczy to o niewielkiej zależności natężenia MWC od rodzaju masy powietrza, a raczej od sytuacji synoptycznej, tworzącej ogół warunków atmosferycznych sprzyjających lub nie powstaniu MWC.

Tabela 4.2. Warunki termiczne na stacji Warszawa-Okęcie w dniach 9–13 maja 2011 roku

	Temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$]			
	średnia	maks.	min.	amplituda
9 maja 2011	15,3	23,0	6,0	17,0
10 maja 2011	18,1	24,0	11,0	13,0
11 maja 2011	17,5	24,2	8,8	15,4
12 maja 2011	18,4	25,2	8,0	17,2
13 maja 2011	13,6	21,4	9,0	12,4



Rycina 4.10. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w dniu 12 maja 2011 roku



Rycina 4.11. Mapa synoptyczna, stan na godzinę 00 UTC 12 maja 2011 roku

Źródło: www.wetter3.de.

4.3. Wieloletnie zmiany miejskiej wyspy ciepła

Z punktu widzenia rozwoju miasta i obserwowanych zmian klimatu ważne jest prześledzenie, jak miejska wyspa ciepła zmieniła się w minionych latach i jakich zmian tego zjawiska można się spodziewać w nadchodzących dziesięcioleciach. Ogólnie biorąc, w latach 1981–2011 MWC pojawiała się w Warszawie przez blisko 87% dni. W poszczególnych porach roku częstość miejskiej wyspy ciepła wahała się od 80% zimą do 94% latem. W badanym okresie zdarzały się lata, gdy MWC była notowana każdego (rok 2010) lub prawie każdego dnia (rok 2011). Były także okresy (lata 2000 i 2001), gdy MWC występowała tylko przez 60–70% dni (tab. 4.3).

Rycina 4.12 przedstawia zmiany wskaźnika intensywności miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w Warszawie w latach 1981–2011. Przedstawione wartości dotyczą różnic pomiędzy stacją śródmiejską (Uniwersytet Warszawski) a stacją peryferyjną

Tabela 4.3. Częstość (%) miejskiej wyspy ciepła w Warszawie, 1981–2011

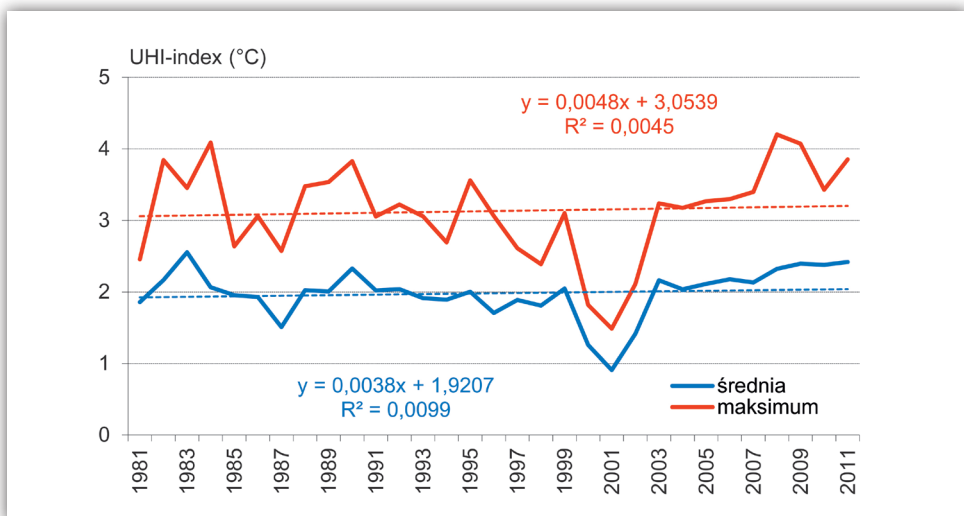
Częstość	Zima	Wiosna	Lato	Jesień	Rok
Średnia	80,1	88,0	94,4	84,9	86,8
Największa	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Najmniejsza	54,4	58,7	72,8	59,3	61,6

(Warszawa-Okęcie). Zarówno w przypadku wartości średnich rocznych, jak i wartości maksymalnych UHI-index dla każdego roku zaznacza się istotny statystycznie trend wzrostowy. W przebiegu wieloletnim wskaźnika UHI-index wyraźnie zaznaczają się lata 2000 i 2001, kiedy jego wartość średnia była najmniejsza w całym badanym okresie. Zadecydowało o tym wyraźnie rzadsze niż w innych latach występowanie miejskiej wyspy ciepła w miesiącach wiosennych (marzec i kwiecień) oraz jesiennych (październik i listopad). Przyczyny tego zjawiska można upatrywać w specyficznych warunkach cyrkulacyjnych i pogodowych występujących w tych miesiącach.

Analizując zmiany wskaźnika UHI-index w poszczególnych porach roku istotne statystycznie trendy wzrostu stwierdzono wiosną (dla średniej i maksymalnej wartości wskaźnika) oraz zimą i jesienią (dla wartości średniej wskaźnika). Latem i jesienią, w przypadku wartości maksymalnej UHI-index, nie zaobserwowano żadnego trendu zmian (tab. 4.4).

Tabela 4.4. Współczynniki trendu liniowego zmian maksymalnej i średniej wartości UHI-index w poszczególnych porach roku i w roku (wartości istotne statystycznie pogrubiono), Warszawa 1981–2011

Pory roku	Maksimum	Średnia
Zima	0,15	0,54
Wiosna	0,56	0,61
Lato	-0,01	0,23
Jesień	0,08	0,41
Rok	0,54	0,52



Rycina 4.12. Zmiany wskaźnika miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w Warszawie, 1981–2011

Sezonowe zróżnicowanie intensywności miejskiej wyspy ciepła pokazuje tabela 4.5. Zawiera ona uśrednione, najwyższe i najniższe w latach 1981–2011 średnie wartości wskaźnika UHI-index policzone dla kolejnych por roku i dla całego roku. W badanym okresie najwyższa średnia wartość UHI-index wahała się od 2,6°C zimą do 3,6°C latem. Najniższe, średnie wartości wskaźnika zmieniały się natomiast od 0,7°C jesienią do 1,1°C wiosną. Nieco inne relacje UHI-index pomiędzy porami roku mają miejsce, gdy rozpatrujemy maksymalne wartości wskaźnika. Najwyższe jego wartości zmieniały się od 8,0°C latem do 9,2°C zimą, a wartości najniższe – od 4,2°C zimą do 5,4°C wiosną. Największy zakres wahań wskaźnika UHI występuje zimą, a najmniejszy – jesienią.

Tabela 4.5. Średnie i maksymalne sezonowe i roczne wartości (°C) UHI-index w Warszawie, 1981–2011

	Pora roku				Rok
	Zima	Wiosna	Lato	Jesień	
Średnia wartość UHI-index					
Średnia	1,5	2,2	2,6	2,0	2,0
Najwyższa	2,6	3,3	3,6	3,5	2,6
Najniższa	0,7	1,1	1,1	0,7	0,9
Maksymalna wartość UHI-index					
Średnia	6,7	7,0	6,6	6,5	3,1
Najwyższa	9,2	8,6	8,0	8,1	4,2
Najniższa	4,2	5,4	4,4	5,2	1,5

W badaniach klimatu obszarów zurbanizowanych ważna jest także analiza sytuacji pogodowych, w których uruchamiane są systemy ogrzewania lub klimatyzacji. Stosuje się w tym celu wskaźniki: stopniodni ogrzewania (HDD – *Heating Degree Days*) oraz stopniodni chłodzenia (CDD – *Cooling Degree Days*). Wskaźniki te są powszechnie stosowane do szacowania kosztów eksploatacji budynków i mieszkań w Stanach Zjednoczonych oraz w Europie Zachodniej (według zaleceń EUROSTAT). W przypadku pierwszego ze wskaźników jako graniczną wartość średnią dobową temperatury (T_a), poniżej której należy włączać ogrzewanie przyjmuje się 15°C. Ogrzewanie powinno pozwolić na uzyskanie w pomieszczeniach temperatury równej 18°C. Im zatem większa wartość HDD w danym roku, tym więcej energii należy użyć do ogrzewania pomieszczeń. Wzór do obliczania wskaźnika HDD ma następującą postać (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/EN/nrg_esdgr_esms.htm):

$$HDD = \sum_{n=1}^{366} (18 - T_a)$$

gdzie n oznacza kolejny dzień roku, a T_a – średnią dobową temperaturę powietrza.

Wartości jednostkowe HDD oblicza się dla każdego dnia, a następnie sumuje dla całego roku. Dla T_a większej od 15°C przyjmuje się dla danego dnia wartość HDD równą 0.

Drugi ze wskaźników, stopniodnie chłodzenia (CDD), odzwierciedla zapotrzebowanie na energię w celu schłodzenia pomieszczeń do $18,3^\circ\text{C}$. Wzór do obliczenia wskaźnika CDD ma postać (<http://www.vesma.com/ddd/ddcales.htm>):

$$\text{CDD} = \sum_{n=1}^{366} (T_a - 18,3)$$

Wartości jednostkowe CDD oblicza się dla każdego dnia, a następnie sumuje dla całego roku. Dla T_a mniejszej od $18,3^\circ\text{C}$ przyjmuje się dla danego dnia wartość CDD równą 0.

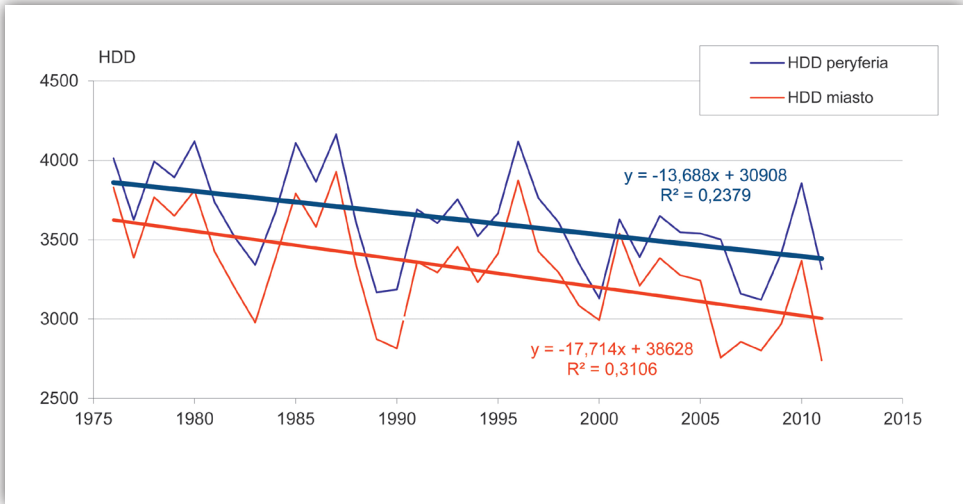
Wskaźniki HDD i CDD obliczono dla lat 1976–2011 dla stacji śródmiejskiej (Warszawa Uniwersytet) i stacji peryferyjnej (Warszawa-Okęcie). Poza samymi wartościami wskaźników HDD i CDD obliczono także liczbę dni w każdym roku, w których należy uruchamiać urządzenia grzewcze lub klimatyzacyjne, aby zapewnić w pomieszczeniach komfortowe warunki termiczne.

W badanym okresie liczba stopniodni ogrzewania w centrum Warszawy była wyraźnie większa (o 300–500 stopniodni) niż na jej peryferiach. Jednocześnie wartość HDD zmniejszała się systematycznie od 3600–3900 rocznie na początku okresu do 3000–3400 w 2011 roku. Świadczy to dobitnie o stopniowym zmniejszaniu zapotrzebowania energetycznego w Warszawie, zwłaszcza w centrum miasta (ryc. 4.13).

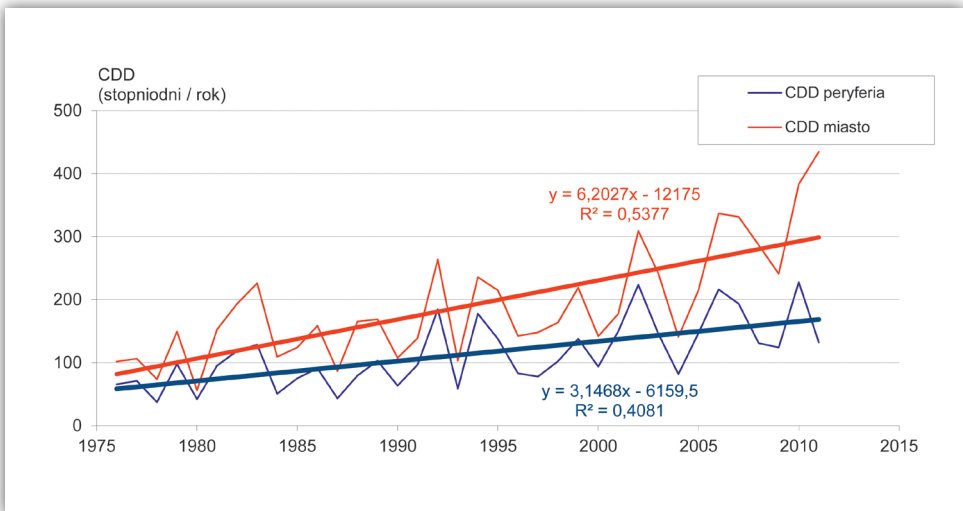
Jednocześnie, w ostatnich 35 latach znacząco zwiększyło się w Warszawie zapotrzebowanie na korzystanie z urządzeń klimatyzacyjnych, obniżających temperaturę w pomieszczeniach. Zapotrzebowanie to jest w centrum miasta o około 70% większe niż na jego peryferiach. W latach 1976–2011 wartość wskaźnika CDD zwiększyła się od około 60–80 do 200–300 stopniodni chłodzenia. Podobnie jak w przypadku wskaźnika HDD, wartość CDD zmieniała się wyraźniej w centralnej części miasta niż na jego peryferiach (ryc. 4.14).

Poza samymi wartościami analizowanych wskaźników HDD i CDD porównano także zmiany liczby dni, w których należy uruchamiać systemy grzewcze (tzn. dni ze średnią dobową temperaturą powietrza poniżej 15°C) lub klimatyzacyjne (dni z temperaturą średnią dobową powyżej $18,3^\circ\text{C}$). Liczba dni grzewczych była wyraźnie mniejsza w centrum Warszawy niż na jej peryferiach i zmieniała się od 270–280 w 1976 r. do 230–250 w 2011 r. (ryc. 4.15), co potwierdza obserwowane ocieplenie klimatu i skracanie okresu grzewczego.

Systemy klimatyzacyjne powinny być w Warszawie uruchamiane znacznie rzadziej niż systemy grzewcze. Dni wymagających stosowania klimatyzacji było

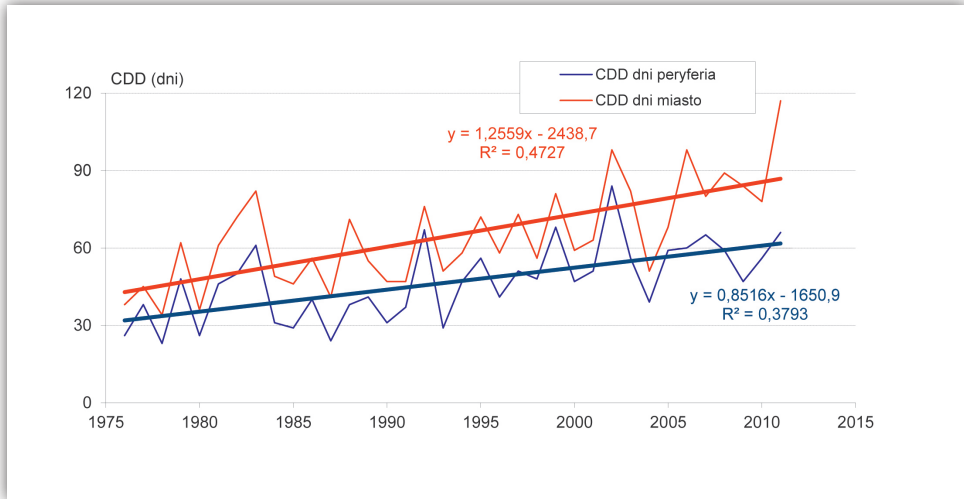


Rycina 4.13. Zmiany rocznych wartości wskaźnika HDD w Warszawie, 1976–2011

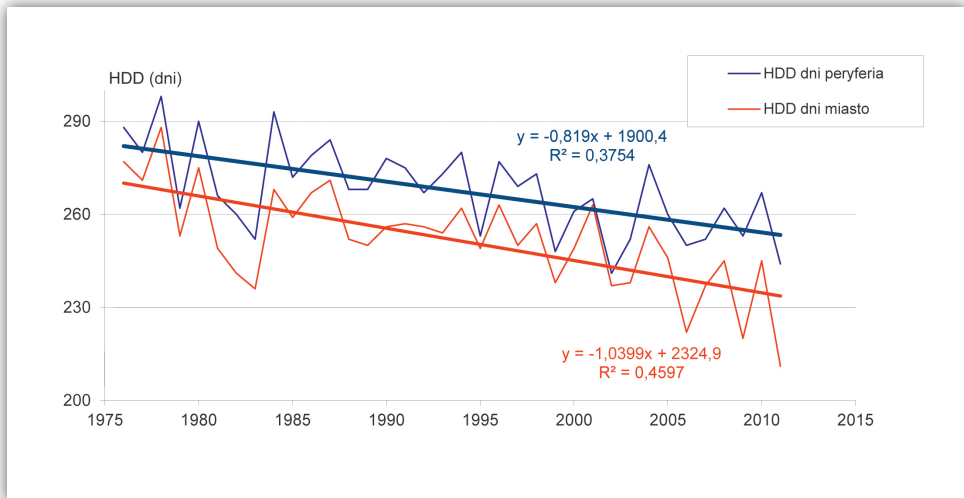


Rycina 4.14. Zmiany rocznych wartości wskaźnika CDD w Warszawie, 1976–2011

tylko 30–40 w roku 1976. Natomiast w 2011 r. było ich dwukrotnie więcej na peryferiach Warszawy (około 60) oraz dwupółkrotnie więcej (90) w centrum miasta (ryc. 4.16). Wyniki te wskazują na przesuwanie się zapotrzebowania energetycznego z zimowego sezonu grzewczego na letni okres korzystania z urządzeń klimatyzacyjnych.



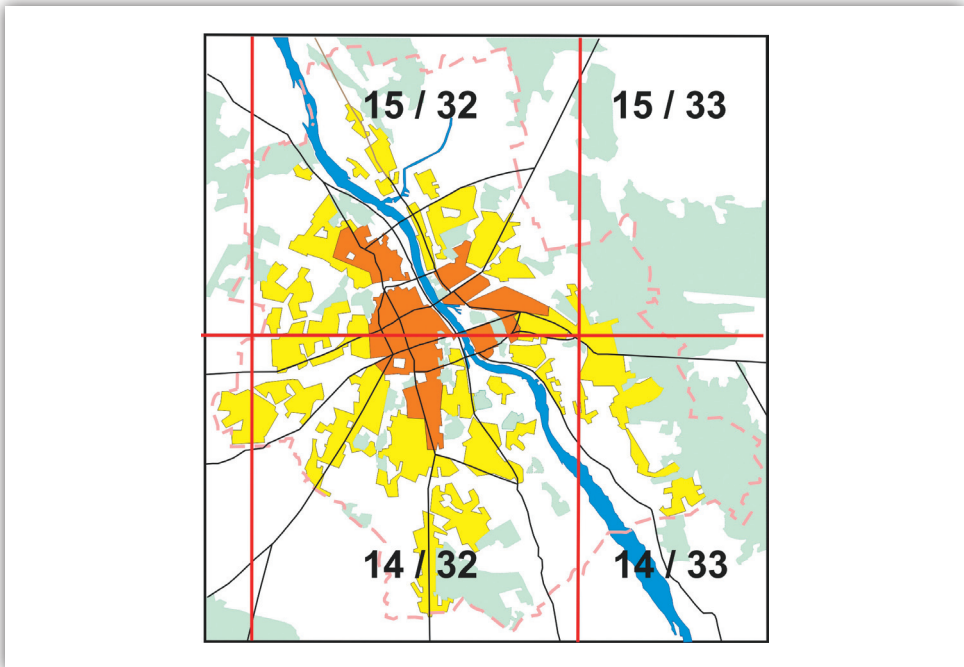
Rycina 4.15. Zmiany rocznej liczby dni z koniecznością uruchamiania systemów grzewczych w Warszawie (HDD dni), 1976–2011



Rycina 4.16. Zmiany rocznej liczby dni z koniecznością uruchamiania systemów klimatyzacyjnych w Warszawie (CDD dni), 1976–2011

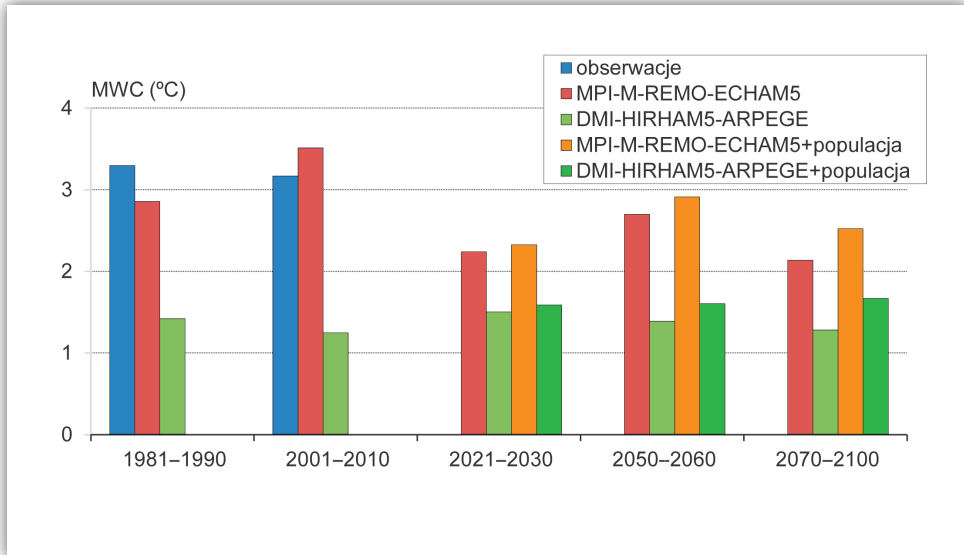
4.4. Prognoza zmian klimatu a miejska wyspa ciepła

Symulacje intensywności MWC do 2100 r. przeprowadzono dla scenariusza A1B zmian klimatu, dla dwóch modeli, MPI-M-REMO-ECHAM5 oraz DMI-HIRHAM5-ARPEGE. Scenariusz A1B przyjęto jako najbardziej prawdopodobny w badaniach predykcji klimatu. Wybrane modele dostarczają natomiast danych o różnej wiarygodności w stosunku do wartości obserwowanych. Intensywność miejskiej wyspy ciepła według pierwszego z tych modeli była bardziej zbliżona do wartości obserwowanych niż dla modelu drugiego. Dla obydwu modeli obszar Warszawy był reprezentowany przez dwa pola podstawowe. Podobnie, obszar pozamiejski był określony przez dwa pola (ryc. 4.17). Symulacje temperatury zostały wykonane w Międzywydziałowym Centrum Modelowania Matematycznego UW w ramach projektu KLIMADA „Przygotowanie i wprowadzenie strategii adaptacyjnych dla sektorów gospodarki wrażliwych na zmiany klimatu” koordynowanego przez Instytut Ochrony Środowiska PIB a finansowanego przez Ministerstwo Środowiska i Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Zasobów Wodnych (Liszewska i in. 2012).



Rycina 4.17. Pola podstawowe uwzględnione w symulacjach miejskiej wyspy ciepła w modelach MPI-M-REMO-ECHAM5 oraz DMI-HIRHAM5-ARPEGE

Obszar miasta – pola 14/32 i 15/32, obszar podmiejski – pola 14/33 i 15/33



Rycina 4.18. Obserwowane oraz modelowane uśrednione wartości maksymalne MWC w Warszawie, 1981–2100

Symulacje modelowe wykazują, że wartości średnie oraz uśrednione wartości maksymalne MWC powinny do końca XXI w. utrzymywać się w Warszawie na poziomie zbliżonym do obecnego (ryc. 4.18). Zjawisko miejskiej wyspy ciepła jest bardzo stabilne, a jego intensywność nie powinna ulegać większym fluktuacjom wieloletnim. Można co najwyżej założyć nieznaczny jego wzrost związany z rozwojem miasta. Uwzględniając wzrost liczby mieszkańców Warszawy w tempie podobnym do obserwowanego w pierwszej dekadzie obecnego wieku, można przyjąć, że w 2030 r. miasto będzie liczyło 1 790 tys., w 2060 r. – 1 900 tys., a pod koniec wieku – nieco ponad 2 miliony mieszkańców. Zgodnie ze wskaźnikami intensywności miejskiej wyspy ciepła przedstawionymi w rozdziale 2.3 natężenie MWC w centrum Warszawy może wzrosnąć o 0,1°C w 2030 r., 0,2°C w 2060 r. i 0,5°C w 2100 roku.

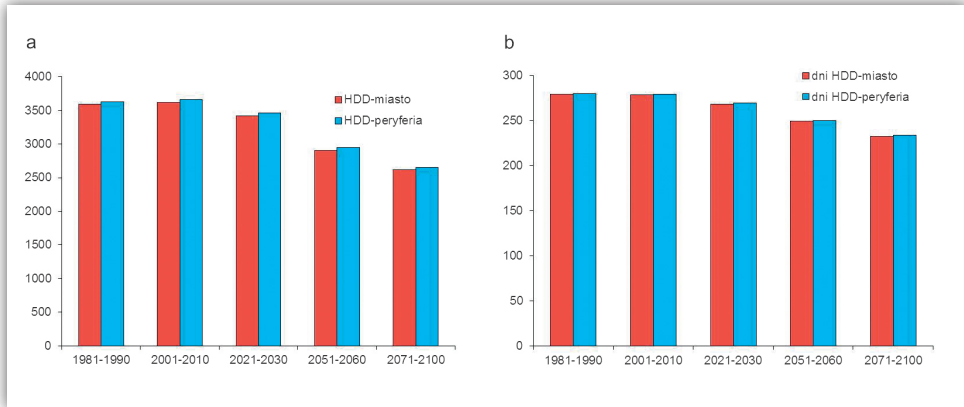
Prognozy temperatury powietrza w obszarze miejskim i podmiejskim Warszawy na kolejne lata XXI w. pokazują, że nie należy się spodziewać większych zmian liczby dni z miejską wyspą ciepła. W skali roku liczba takich dni będzie się wahała od 74 do 79% według modelu MPI-M-REMO-ECHAM5 oraz od 75 do 77% według modelu DMI-HIRHAM5-ARPEGE. Także w poszczególnych porach roku żaden z wykorzystanych modeli nie wskazuje na znaczące zmiany częstości MWC. Obydwa modele sugerują także, że w porównaniu do innych pór roku miejska wyspa ciepła będzie stosunkowo rzadziej występowała latem, a częściej – zimą (tab. 4.6).

Tabela 4.6. Częstość (%) miejskiej wyspy ciepła w Warszawie w kolejnych dziesięcioleciach XXI wieku według uwzględnionych modeli klimatycznych

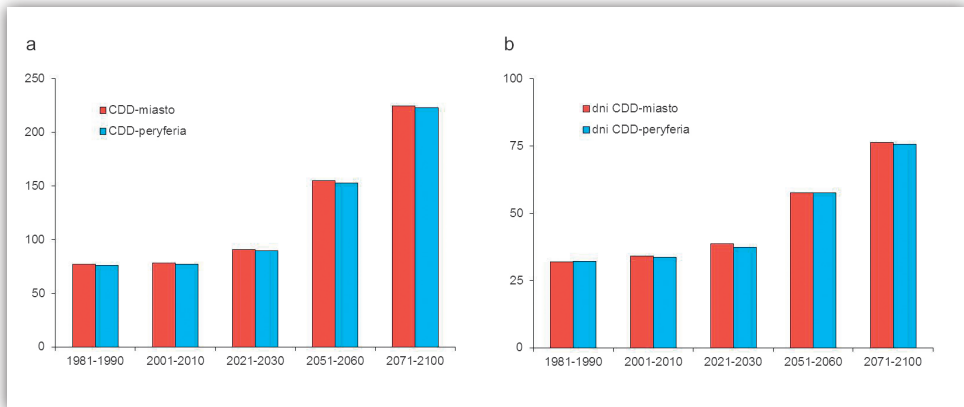
Okres:	2011-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050	2051-2060	2061-2070	2071-2080	2081-2090	2091-2100
Model DMI-HIRHAM5-ARPEGE									
Zima	79,1	83,7	82,7	79,0	77,6	84,9	78,1	82,2	83,6
Wiosna	74,1	73,3	77,4	71,6	79,8	77,6	79,7	78,8	79,2
Lato	68,2	73,8	68,9	71,0	76,0	71,1	71,0	74,0	74,7
Jesień	73,8	78,2	80,2	78,1	76,6	75,2	76,0	78,3	78,4
Rok	73,8	77,3	77,3	74,9	77,5	77,2	76,2	78,3	79,0
Model MPI-M-REMO-ECHAM5									
Zima	75,8	80,3	78,8	83,1	80,7	82,0	79,7	79,7	80,2
Wiosna	76,9	73,1	76,7	77,7	78,6	75,0	76,3	77,7	76,0
Lato	74,4	69,3	72,9	72,6	70,3	69,3	74,1	73,3	72,4
Jesień	78,4	78,2	77,2	76,7	78,3	78,2	78,2	78,6	74,6
Rok	76,4	75,3	76,4	77,5	77,0	76,1	77,1	77,3	75,8

W przypadku wskaźnika HDD jego wartości zmniejszają się znacząco, zwłaszcza w drugiej połowie XXI wieku. O ile do 2030 r. liczba stopniodni grzania w Warszawie i okolicach będzie wahała się na poziomie około 3500, to w ostatnich dekadach wieku zmniejszy się do około 2600. Jest to redukcja potrzeb grzewczych o około 28%. Jeśli jednak weźmiemy pod uwagę liczbę dni, podczas których konieczne jest i będzie ogrzewanie pomieszczeń, to redukcja ta nie jest już taka znacząca. W latach 2001–2010 liczba takich dni wynosiła około 280 w roku, natomiast po 2070 r. zmniejszy się do około 230. Jest to zatem redukcja jedynie o około 17% i nadal przez większość roku będzie występowała potrzeba ogrzewania pomieszczeń (ryc. 4.19). Należy dodać, że obydwie rozpatrywane charakterystyki warunków ogrzewania tylko nieznacznie różnią się pomiędzy samym obszarem miasta a jego peryferiami.

Znaczących zmian należy się natomiast spodziewać w odniesieniu do warunków termicznych, podczas których konieczne będzie uruchamianie urządzeń klimatyzacyjnych. O ile obecnie liczba takich dni wynosi jedynie około 32–34 w roku, o tyle pod koniec wieku może ich być aż 76, co stanowi wzrost o ponad 120%. Także sama intensywność sytuacji termicznych zmuszających do chłodzenia pomieszczeń zmieni się drastycznie. Liczba stopniodni chłodzenia (CDD) wzrośnie z obecnych 80 do ponad 220 pod koniec wieku, co stanowi wzrost aż o 185–190%. Różnice charakterystyk klimatyzacyjnych tylko nieznacznie różnią się pomiędzy miastem i jego peryferiami (ryc. 4.20).



Rycina 4.19. Liczba stopniogrzania (HDD) (a) oraz liczba dni, w których niezbędne jest ogrzewanie pomieszczeń (b) w różnych podokresach lat 1981–2100



Rycina 4.20. Liczba stopniogrzania (CDD) (a) oraz liczba dni, w których niezbędne jest klimatyzowanie pomieszczeń (b) w różnych podokresach lat 1981–2100

5. Uwarunkowania urbanistyczne miejskiej wyspy ciepła w Warszawie

- ▷ Natężenie MWC w Warszawie najsilniej determinuje udział terenów biologicznie czynnych (TBC), w nieco mniejszym zaś stopniu wskaźnik intensywności zabudowy czy odległość od centrum miasta. Najwyższa intensywność MWC cechuje osiedla z najniższym odsetkiem terenów biologicznie czynnych położone w centrum miasta.
- ▷ Ważnym elementem struktury przestrzennej Warszawy jest 8 korytarzy wymiany powietrza, które doprowadzają do nagrzanego centrum miasta świeże, chłodne i wilgotne powietrze z otaczających Warszawę terenów otwartych i lasów.
- ▷ Wydzielono 6 typów zabudowy o różnej intensywności miejskiej wyspy ciepła: wysoką, niską zwartą, niską rozproszoną, niską śródleśną, przemysłową, handlowo-usługową. Najsilniejsza MWC, osiągająca średnio w roku 2–3°C, występuje wśród wysokiej, zwartej zabudowy w centrum miasta oraz w gęsto zabudowanych osiedlach Żoliborza, Pragi, Woli, Ursusa i Mokotowa. MWC nie występuje na obszarach leśnych leżących na obrzeżach Warszawy oraz wzdłuż koryta Wisły.
- ▷ Realizacja prognozowanych do 2070 r. inwestycji budowlanych zmieni wyraźnie rozkład przestrzenny miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. Zwiększeniu ulegną nie tylko obszary o największym natężeniu MWC, ale także te, gdzie MWC nie jest skrajnie intensywna (1–2°C). Ograniczone zostaną tereny, gdzie MWC nie występuje.

Na masę powietrza zalegająca nad miastem silnie wpływają 4 podstawowe cechy podłoża, które decydują o wielkości i rodzaju tego oddziaływania:

- ▶ struktura: wymiary budynków, odległość między nimi, szerokość ulic i ich rozmieszczenie;
- ▶ pokrycie terenu: zabudowane, utwardzone, pokryte roślinnością, odsłonięta ziemia, woda;

- ▶ rodzaj materiału podłoża – sztuczne lub naturalne;
- ▶ funkcjonowanie miasta (antropogeniczna produkcja ciepła i zanieczyszczeń, zmiany w obiegu wodnym spowodowane działalnością człowieka).

Wymienione wyżej cechy podłoża, w zależności od możliwych kombinacji wspólnego oddziaływania, doprowadzają do powstania charakterystycznych stref klimatu miasta (tab. 5.1). Przykładowo, w centrum miasta na wielu obszarach znajdują się wysokie budynki położone blisko siebie, w związku z czym powierzchnia terenu jest w większości pokryta kamieniem, betonem, cegłą lub asfaltem. Notuje się tam duży dopływ ciepła antropogenicznego z palenisk, klimatyzatorów, kominów i samochodów. Z drugiej strony w mieście występują również obszary rzadko zabudowane, z jedno- lub dwukondygnacyjnymi budynkami o lekkiej konstrukcji i rozległymi terenami zielonymi, gdzie absorpcja ciepła antropogenicznego jest niewielka.

Odpowiednie działania planistyczne to jeden z najważniejszych sposobów łagodzenia negatywnych cech miejskiej wyspy ciepła oraz dostosowania struktur miejskich do klimatu poszczególnych regionów (np. górskiego, morskiego). E. Erell i inni (2011) stwierdzają, że klimat lokalny w szerokim zakresie wpływa na planowanie przestrzenne miast. Oddziaływanie klimatu lokalnego można przyporządkować do dwóch kategorii:

- ▶ oddziaływanie na pieszych w określonych obszarach miasta (np. kaniony uliczne, skwery, parki);
- ▶ oddziaływanie na zabudowę, głównie w zakresie bilansu energetycznego.

W procesie planowania przestrzennego klimatolodzy miejscy mogą odgrywać istotną rolę. Ich prace badawcze muszą dostarczać propozycji działań w zakresie planowania przestrzennego, które:

- ▶ są łatwo zrozumiałe i mogą przynieść mierzalne korzyści (np. dotyczące wpływu miejskiej wyspy ciepła na bilans energetyczny budynków);
- ▶ mają uzasadnienie ekonomiczne;
- ▶ mogą przynieść trwały efekt (m.in. meliorację klimatu lokalnego i polepszenie warunków odczuwalnych przez człowieka);
- ▶ mają charakter subsydiarny (planowanie przestrzeni miejskiej powinno obejmować różne grupy interesu);
- ▶ charakteryzują się kompleksowością (należy rozpatrzyć wszystkie możliwe skutki podjętych działań).

Poszczególne elementy klimatu miasta mogą być modyfikowane w trakcie procesu planowania przestrzennego. Najważniejsze z nich to: dopływ promieniowania słonecznego, ruch powietrza oraz temperatura i wilgotność powietrza. Najważniejszym zadaniem planowania przestrzennego jest wybór odpowiednich rozwiązań

Tabela 5.1. Uproszczona klasyfikacja stref klimatów miejskich oraz opisujące je wskaźniki

Nr	Strefy klimatu miasta	Obraz	Albedo	Grubość warstwy tarcia (m)	Współczynnik proporcji ¹	Odsetek powierzchni zabudowanych (nieprzepuszczalnych)	Odsetek powierzchni biologicznie czynnych	Ciepło antropogeniczne (W·m ⁻²)
1	Obszar intensywnie zagospodarowany, złożony z pojedynczych, wysokich, położonych blisko siebie budynków pokrytych materiałami okładzinowymi (wieżowce)		0,14-0,16	0,1-1,25	>2,0	>90	0-5	20-75
2	Obszar intensywnie zagospodarowany, o dużej gęstości zabudowy, złożony z 2-5-kondygnacyjnych budynków, połączonych ze sobą lub położonych blisko siebie, z cegły lub kamienia (np. starówki)		0,15	0,35	1,0-2,5	>85	10	20
3	Obszar dość intensywnie zagospodarowany, o średniej gęstości zabudowy, budynki ułożone w postaci rzędów, połączonych ze sobą lub położonych blisko siebie (np. osiedla mieszkaniowe)		0,15	0,30	0,5-1,5	75-85	25	15
4	Obszar dość intensywnie zagospodarowany, o małej lub średniej gęstości zabudowy, dominują duże, niskie budynki oraz rozległe parkingi (np. centra handlowe)		0,12-0,14	0,5-0,6	0,05-0,2	70-90	0	50-80
5	Obszar średnio zagospodarowany, o małej gęstości zabudowy, dominują budynki 1- lub 2-kondygnacyjne (np. podmiejskie osiedla mieszkaniowe)		0,20	0,15	0,2-0,6 wśród drzew >1	35-65	50	2
6	Obszar o różnym stopniu zagospodarowania, występują duże budynki wśród otwartej przestrzeni (np. szpitale, lotniska)		0,1-0,25	0,1-1,0	0,1-0,5 w zależności od drzew	<40	50	-
7	Obszar podmiejski, zabudowa rozproszona, występują pola uprawne (np. na obszarze gospodarstw rolnych)		0,20	0,10	>0,05 w zależności od drzew	<10	75	0
8	Lasy		0,1-0,4	2-5		0	100	0

¹ Współczynnik proporcji to iloraz średniej wysokości przeszkód terenowych (budynków, drzew) i średniej odległości między nimi (w mieście może to być iloraz wysokości kanionu ulicznego do jego szerokości).
Źródło: Oke (2004).

łagodzących negatywne aspekty klimatu lokalnego w zróżnicowanej strukturze miejskiej. Optymalne rozwiązanie w dużej mierze zależy od ogólnych cech klimatu danego obszaru. Przykładowo, ekspozycja budynków i pieszych na bezpośrednie promieniowanie słoneczne jest pożądana w strefie klimatu zimnego i umiarkowanego. Dzięki temu możliwa jest redukcja stresu zimna i zwiększenie oszczędności energii w budynkach. W strefie klimatu ciepłego oczekiwane jest natomiast stosowanie rozwiązań, które ograniczą oddziaływanie bezpośredniego promieniowania słonecznego (Brown, Gillespie 1995; Erell i in. 2011).

Meliorację warunków klimatycznych można osiągnąć m.in. dzięki odpowiedniemu zaplanowaniu geometrii ulic, orientacji budynków, doborze odpowiednich materiałów budowlanych, zakładaniu pasów drzew i innych terenów zielonych oraz kształtowaniu właściwości powierzchni miasta (kolor, struktura itd.). Bardzo ważną rolę w tej kwestii odgrywają następujące właściwości obiektów: albedo, emisyjność oraz przewodność i pojemność cieplna (tab. 5.2).

Tabela 5.2. Właściwości fizyczne wybranych materiałów (rodzaju podłoża) pochodzenia naturalnego i sztucznego

Materiał (rodzaj podłoża)	Albedo (%)	Emisyjność (%)	Przewodność cieplna (J·m ⁻² ·s ^{-0.5} ·K ⁻¹)	Pojemność cieplna (kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹)
Piasek suchy	25-35	84-91	600	1280
Piasek mokry	20-30		2500	2960
Trawa	20-30	90-95	-	-
Łąka	10-30	90-95	-	-
Las liściasty	10-20	95-97	-	-
Las iglasty	5-16	97-98		
Woda (przy dużym kącie padania promieni słonecznych)	5	92-97	1500	4180
Woda (przy małym kącie padania promieni słonecznych)	95	92-97	1500	4180
Asfalt	5-15	95	1205	1940
Beton	10-50	71-90	1780	2110
Cegła	20-50	90-92	950-1050	1370
Kamień	20-35	85-95	-	-
Dach pokryty papą	8-18	92	-	-
Dach pokryty dachówką	10-35	90	-	-
Dach pokryty gontem	10	90	-	-
Blacha falista	10-16	13-28	14	3930
Farba biała	50-90	85-95	-	-
Farba czerwona, brązowa, zielona	20-35	85-95	-	-
Farba czarna	2-15	90-98	-	-

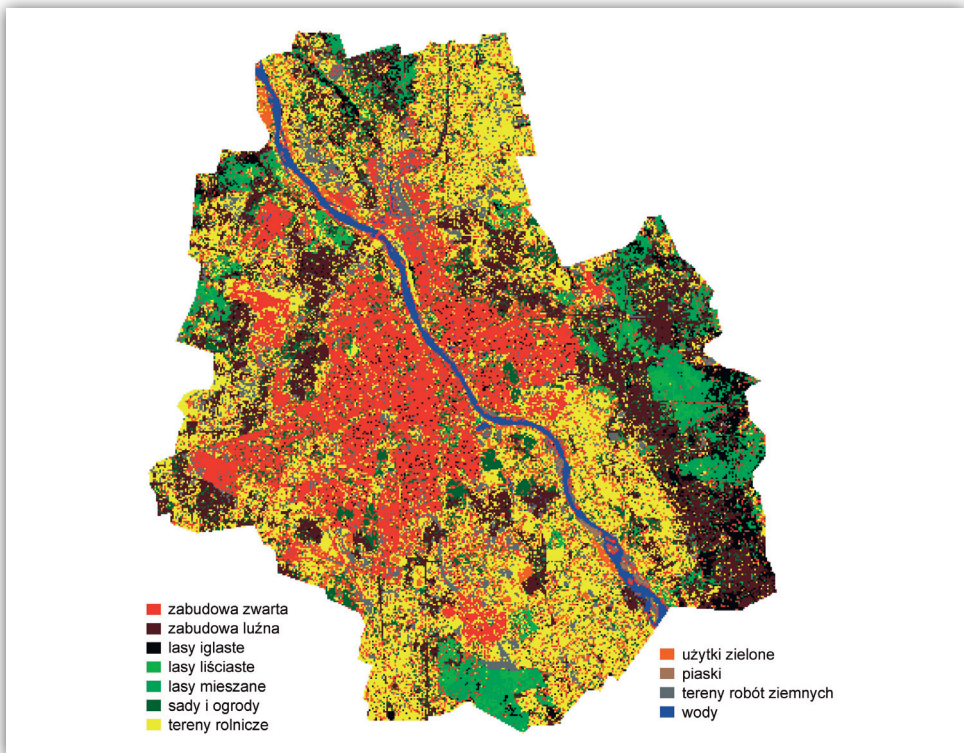
Źródło: Brown, Gillespie (1995); Erell i in. (2011).

Modyfikację warunków termiczno-wilgotnościowych można również osiągnąć dzięki budowie niewielkich zbiorników wodnych i instalacji urządzeń wodnych takich jak np. fontanny i kurtyny wodne. Fontanny powszechnie stosuje się w miastach śródziemnomorskich, licznie odwiedzanych latem przez turystów. W Warszawie, w kilku miejscach centrum miasta, w gorące dni instalowane są kurtyny wodne.

5.1. Użytkowanie terenu

W rozdziale 2.1 wspomniano, że jedną z metod badania MWC jest wykorzystanie obrazów satelitarnych. Metodę tę zastosowano w badaniach prowadzonych przez K. Błażejczyka (1996) oraz T. Kozłowską-Szczęsną i innych (1996). Badania oparto na obrazie zarejestrowanym w dniu 11 lipca 1987 r. o godz. 10:50, przy całkowitym braku zachmurzenia, przez skaner Thematic Mapper, zainstalowany na pokładzie satelity LANDSAT5. Obraz ten został poddany w Instytucie Geodezji i Kartografii (zespół dr. B. Bochenka) korekcji geometrycznej, przez dostosowanie do map topograficznych w skali 1 : 100 000, co przedstawiono na rycinie 5.1.

Analiza odbicia spektralnego w widzialnym i podczerwonym zakresie spektrum pozwoliła na przypisanie poszczególnym elementom treści różne typy pokrycia i użytkowania terenu. Terenowa rozdzielczość uzyskanego obrazu wynosi 30 m i jest zdeterminowana rozdzielczością obrazu satelitarnego. W wyniku przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej, została opracowana mapa uwzględniająca 11 kategorii pokrycia i użytkowania terenu (ryc. 5.1).



Rycina 5.1. Pokrycie i użytkowanie terenu w Warszawie, na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku

Kolejną mapą uzyskaną z analizowanego obrazu satelitarnego była mapa wskaźnika pokrycia roślinnością. Przetworzenie wielospektralnego obrazu satelitarnego polegało na obliczeniu dla każdego elementu tzw. znormalizowanego wskaźnika roślinności (NDVI) według wzoru:

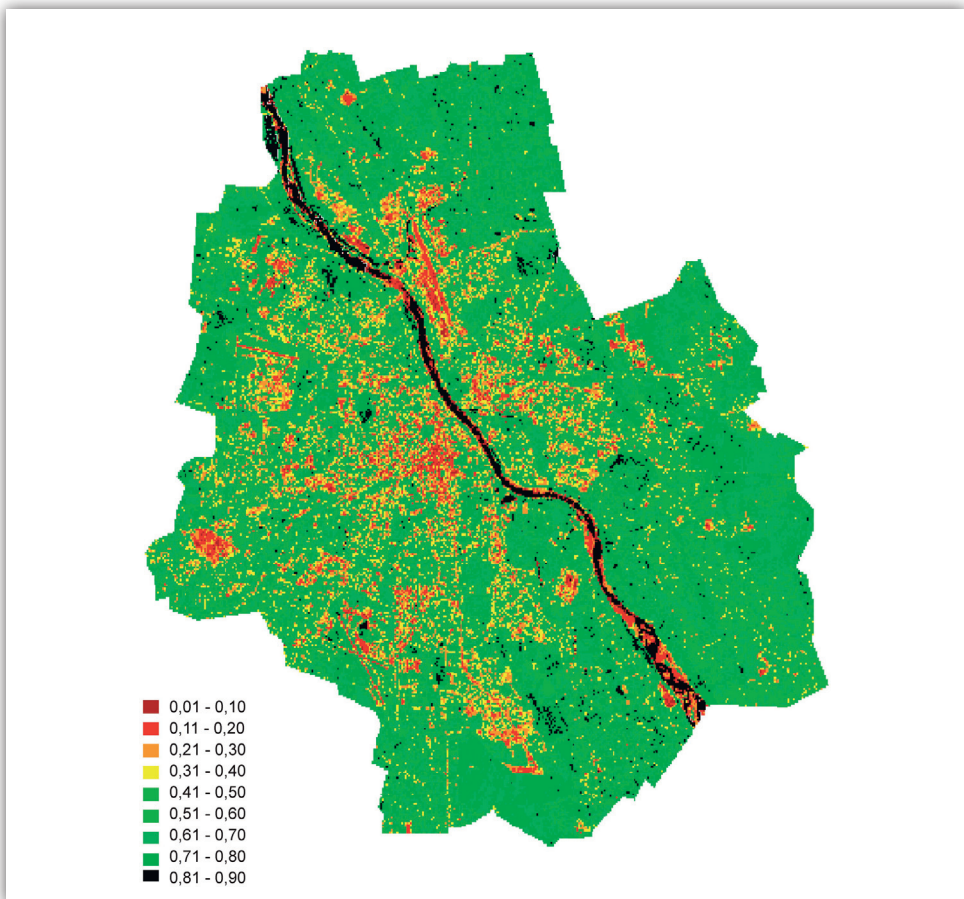
$$NDVI = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$$

gdzie:

TM3 – wartość odbicia spektralnego w kanale 3 (czerwonym) skanera TM,

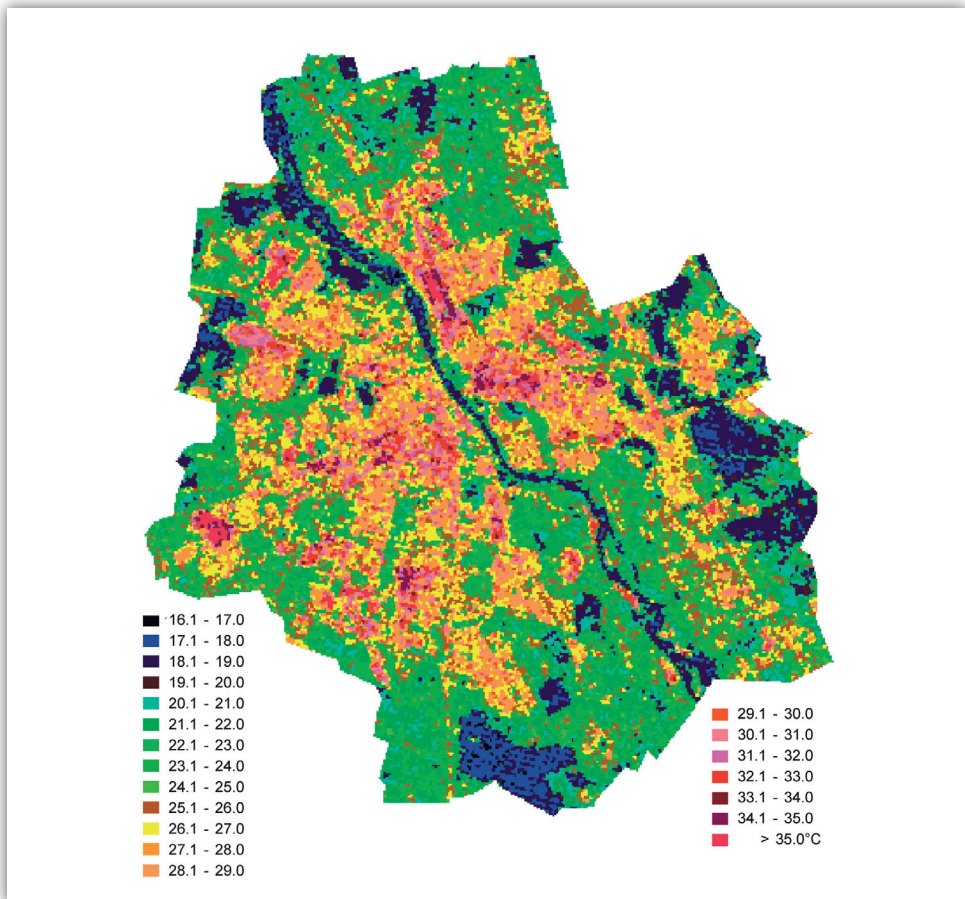
TM4 – wartość odbicia spektralnego w kanale 4 (podczerwonym) skanera TM.

Mapa przedstawia rozkład stopnia pokrycia terenu każdego piksela (o wielkości 30×30 m) roślinnością. Na większości obszaru Warszawy wskaźnik pokrycia roślinnością przekracza 0,40 (to znaczy, że w każdym pikselu zieleń stanowi co najmniej 40% terenu). W centrum miasta wskaźnik ten nie przekracza wartości 0,10 (ryc. 5.2).



Rycina 5.2. Wskaźnik pokrycia roślinnością (NDVI) w Warszawie, na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku

Ostatnim elementem uwzględnionym w badaniach była mapa rozkładu temperatury podłoża atmosfery (T_g). Powstała ona w wyniku przetworzenia obrazu zarejestrowanego w termalnym zakresie promieniowania ($10,5\text{--}12,5\ \mu\text{m}$). Przetworzenie obrazu termalnego polegało na obliczeniu dla każdego jego elementu wartości temperatury podłoża, za pomocą wzorów uwzględniających korekcję z tytułu wpływu atmosfery (ryc. 5.3). Należy dodać, że mapa prezentuje rozkład temperatury podłoża atmosfery typowy dla godzin okołopołudniowych w ciągu dnia z zachmurzeniem małym i umiarkowanym w ciepłej połowie roku. Podczas takich warunków pogodowych obserwuje się największe zróżnicowanie przestrzenne temperatury podłoża. W dniach pochmurnych oraz w półroczu chłodnym rozkład, a zwłaszcza zakres temperatury podłoża atmosfery może się różnić od zaprezentowanego na mapie.



Rycina 5.3. Rozkład temperatury podłoża w Warszawie, na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku

Źródło: Kozłowska-Szczęsna i in. (1996).

Przedstawione wyżej obrazy pozwoliły na określenie, jak poszczególne formy użytkowania terenu wpływają na obserwowaną w ich obrębie temperaturę podłoża oraz wskaźnik pokrycia roślinnością (NDVI). Tabela 5.3 pokazuje względne wartości temperatury podłoża (TS) obliczone w stosunku do powierzchni trawiastej murawy na lotnisku Okęcie. Najwyższymi wartościami TS cechowały się zwarta zabudowa miejska oraz tereny odkrytych piasków robót ziemnych (w okresie obrazowania satelitarnego trwały prace na południowym odcinku pierwszej linii metra), o bardzo niskich wartościach wskaźnika NDVI. Najchłodniejsze okazały się powierzchnie pokryte lasami, parkami i ogrodami (o wskaźniku NDVI przekraczającym 0,7), a także wodami (Błażejczyk, Błażejczyk 1999).

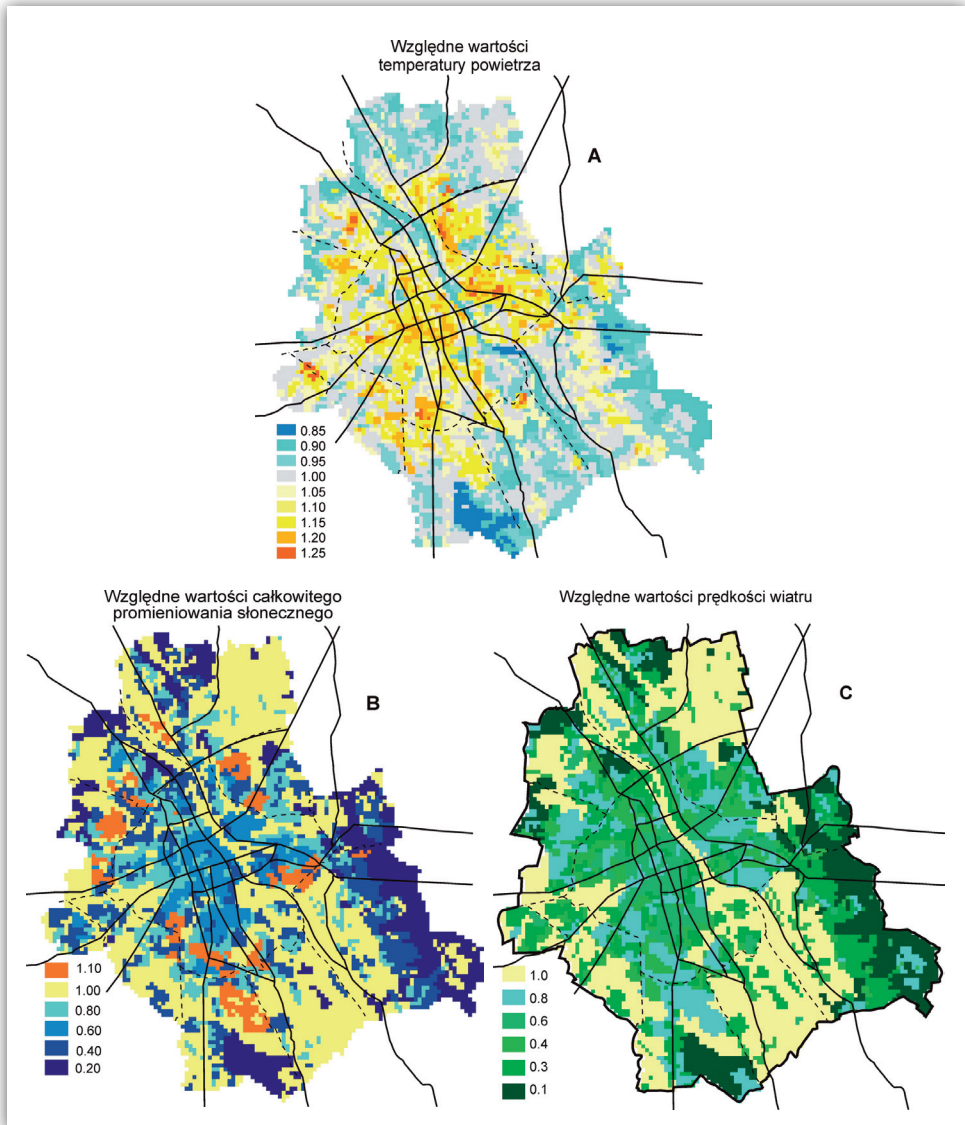
Tabela 5.3. Wskaźnik pokrycia roślinnością (NDVI) oraz względne wartości temperatury powierzchni (TS) w różnych typach użytkowania terenu w Warszawie

Typ pokrycia/użytkowania terenu		TS [°C]	NDVI [%]
Zabudowa	zwarta	1,20	0,2-0,3
	rozproszona	1,13	0,5
	willowa	1,12	0,6
	ogrodowa	1,05	0,7
Lasy	iglaste	0,95	0,8
	liściaste	0,95	0,7
	mieszane, parki	0,90	0,8
Tereny otwarte	pola i nieużytki	1,07	0,5-0,6
	łąki	1,00	0,7-0,8
	piaski	1,16	0,2
	roboty ziemne	1,15	0,2
	wody	0,85	0,2

Źródło: Błażejczyk, Błażejczyk (1999).

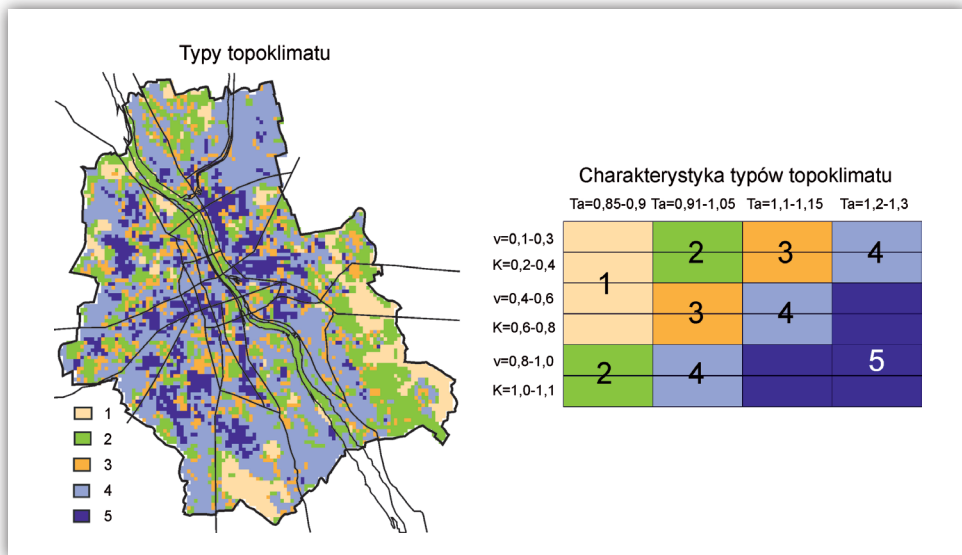
Dostarczone przez obrazy satelitarne szczegółowe informacje o typie użytkowania terenu, wskaźniku pokrycia zielenią oraz temperaturze podłoża zostały przetworzone w programie IDRISI w celu uzyskania zgeneralizowanego obrazu zróżnicowania różnych elementów klimatu. Podstawą utworzonego systemu informacji jest sieć pól podstawowych o wymiarach 250 × 250 m. Obszar miasta został podzielony na 7983 takie pola zajmujące łączną powierzchnię 493,32 km² (przed włączeniem

w granice miasta Wesołej)). Każde pole podstawowe zawiera cyfrową informację o względnych wartościach wybranych elementów meteorologicznych (ryc. 5.4). Jako pole odniesienia wybrano pole podstawowe, na terenie którego leży stacja meteorologiczna Warszawa-Okęcie. Informacje te pozwalają na wydzielenie jednostek topoklimatycznych oraz na obliczenie charakterystyk bioklimatycznych. W obecnych badaniach zastosowano wskaźnik UTCI, przedstawiony w rozdziale 2.3.



Rycina 5.4. Mapy rozkładu względnych wartości wybranych elementów meteorologicznych

Źródło: Błażejczyk (1996).



Rycina 5.5. Typy topoklimatu (1–5) w Warszawie jako kombinacja trzech zmiennych meteorologicznych: temperatury powietrza (Ta), prędkości wiatru (v) i całkowitego promieniowania słonecznego (K)

Źródło: Błażejczyk (1996).

Do przeliczenia wartości temperatury podłoża (T_g) na wartości temperatury powietrza (T_a) wykorzystano uogólnione wyniki badań topoklimatycznych prowadzonych w Zakładzie Klimatologii IGiPZ PAN. Przeanalizowano różnice $T_g - T_a$ obserwowane w różnych warunkach pogodowych ciepłej połowy roku, w zakresie T_g od 10 do 40°C. Stwierdzono, że wartość bezwzględna $T_g - T_a$ jest wprawdzie różna przy różnej temperaturze, niemniej jednak ma ona stałą proporcję w stosunku do temperatury podłoża. Podczas pogody bezchmurnej i z małym zachmurzeniem stosunek $(T_g - T_a)/T_g$ wynosi średnio 0,2 (dla powierzchni naturalnych) i 0,25 (dla nawierzchni sztucznych). Zatem temperaturę powietrza w każdym polu podstawowym obliczono przy pomocy następujących wzorów redukcyjnych: $T_a = 0,8 T_g$ dla powierzchni naturalnych i zabudowy luźnej oraz $T_a = 0,75 T_g$ w przypadku zabudowy zwartej.

Mapa jednostek topoklimatycznych Warszawy (ryc. 5.5) powstała z połączenia trzech warstw tematycznych przedstawiających względne wartości temperatury powietrza (T_a), prędkości wiatru (v) i całkowitego promieniowania słonecznego (K). Każde pole podstawowe zakwalifikowane do jednego z pięciu wyróżnionych typów topoklimatu cechuje się identycznymi cechami termicznymi, radiacyjnymi i anemologicznymi. Bardzo duże zróżnicowanie podłoża i zagospodarowania terenu w mieście powoduje wielkie rozdrobnienie wydzielonych topoklimatów. Zgrupowano je następnie według stopnia odchylenia T_a , v i K od wartości obserwowanych poza miastem. Stwierdzono, że lasy i parki Warszawy cechują się umiarkowanym i dużym osłabieniem

v i K, przy najmniejszych wartościach temperatury powietrza (typ 1 na ryc. 5.5). Topoklimat występujący na obszarach przemysłowych i o zwartej zabudowie śródmiejskiej charakteryzuje się natomiast umiarkowanym osłabieniem i przeciętnymi wartościami v i K przy znacznie podwyższonej T_a (typ 5 na ryc. 5.5). Pozostałe z wyróżnionych topoklimatów nie są tak mocno związane z zagospodarowaniem terenu w mieście. Najbardziej intensywną miejską wyspę ciepła obserwuje się w piątym typie topoklimatu. Natomiast typ 1 cechuje się brakiem miejskiej wyspy ciepła, a typ 2 – sporadycznym występowaniem miejskiej wyspy ciepła o małej intensywności (do $0,5^{\circ}\text{C}$).

5.2. Zagospodarowanie osiedli mieszkaniowych

W analizie wpływu zagospodarowania terenu w osiedlach mieszkaniowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła wykorzystano codzienne wartości temperatury minimalnej powietrza mierzone w 14 osiedlach mieszkaniowych na terenie Warszawy (numery stanowisk według tabeli 3.1: 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20). Osiedla te różnią się między sobą wiekiem i układem budynków, ale także udziałem terenów biologicznie czynnych i różnym stopniem rozwoju roślinności, ale też sąsiedztwem terenu otwartego (zielonego) lub zabudowanego. Są wśród nich osiedla 10–15-letnie (m.in. Kamińskiego, Włodarzewska), jak i wybudowane częściowo w latach 50. i 60. XX w. (np. Boksterska, Koło, Olbrachta). Są osiedla o bardzo jednorodnej strukturze (Kamińskiego, Koło, Limanowskiego), jak też osiedla o bardzo zróżnicowanym charakterze i wieku budynków (Hoża, Pańska). Zlokalizowane są w kilku dzielnicach Warszawy, od ścisłego centrum (Hoża, Pańska) po najbardziej peryferyjnie położone osiedle Kamińskiego w Białołęce, oddalone od centrum o 11 km (Kuchcik, Baranowski 2011; Szulczewska i in. 2014).

Istotną cechą różnicującą osiedla jest powierzchnia biologicznie czynna, na którą składają się trawniki, kwietniki, krzewy (w tym żywopłoty), nawierzchnie ziemne i trawiaste (w tym powierzchnie pod okapem drzew i krzewów) oraz powierzchnie wodne. Wykorzystywany w pracy wskaźnik terenów biologicznie czynnych (TBC) nie uwzględnia 50% powierzchni tarasów i stropodachów, urządzonych jako stałe trawniki lub kwietniki – uznawanych w *Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz.U. z 2002 r. Nr 75, poz. 690) za powierzchnie biologicznie czynne (Wysocki, Sikorski 2009; Szulczewska, Giedych 2010). Wskaźnik TBC waha się w analizowanych osiedlach od 16% do ponad 67% (patrz tab. 3.2).

Za miarę natężenia miejskiej wyspy ciepła przyjęto UHI-index, czyli odchylenie temperatury minimalnej na każdym z osiedli od temperatury minimalnej notowanej na stacji Warszawa-Okęcie, a dokładnie minimalne, średnie oraz maksymalne wartości odchyłeń w latach 2011 i 2012 z podziałem na pory roku.

Najwyższe absolutne wartości odchyłeń z pojedynczych osiedli notowano wiosną (do 7,6°C) i zimą (do 7,5°C), a średnia intensywność natężenia MWC była najwyższa wiosną (2,9°C) i jesienią (2,8°C). Wszystkie powyższe wartości oznaczające najbardziej intensywną MWC dotyczą osiedla przy ul. Hożej, leżącego w ścisłym centrum miasta, z bardzo małym udziałem terenów biologicznie czynnych (16%) i jednym z najwyższych wskaźnikiem intensywności zabudowy (WIZ) równym 2,23. Wiosnę (miesiące od marca do maja) cechuje nie tylko największe natężenie, ale też i zróżnicowanie natężenia MWC: największy zakres odchyłeń i największe różnice pomiędzy poszczególnymi osiedlami (ryc. 5.6).

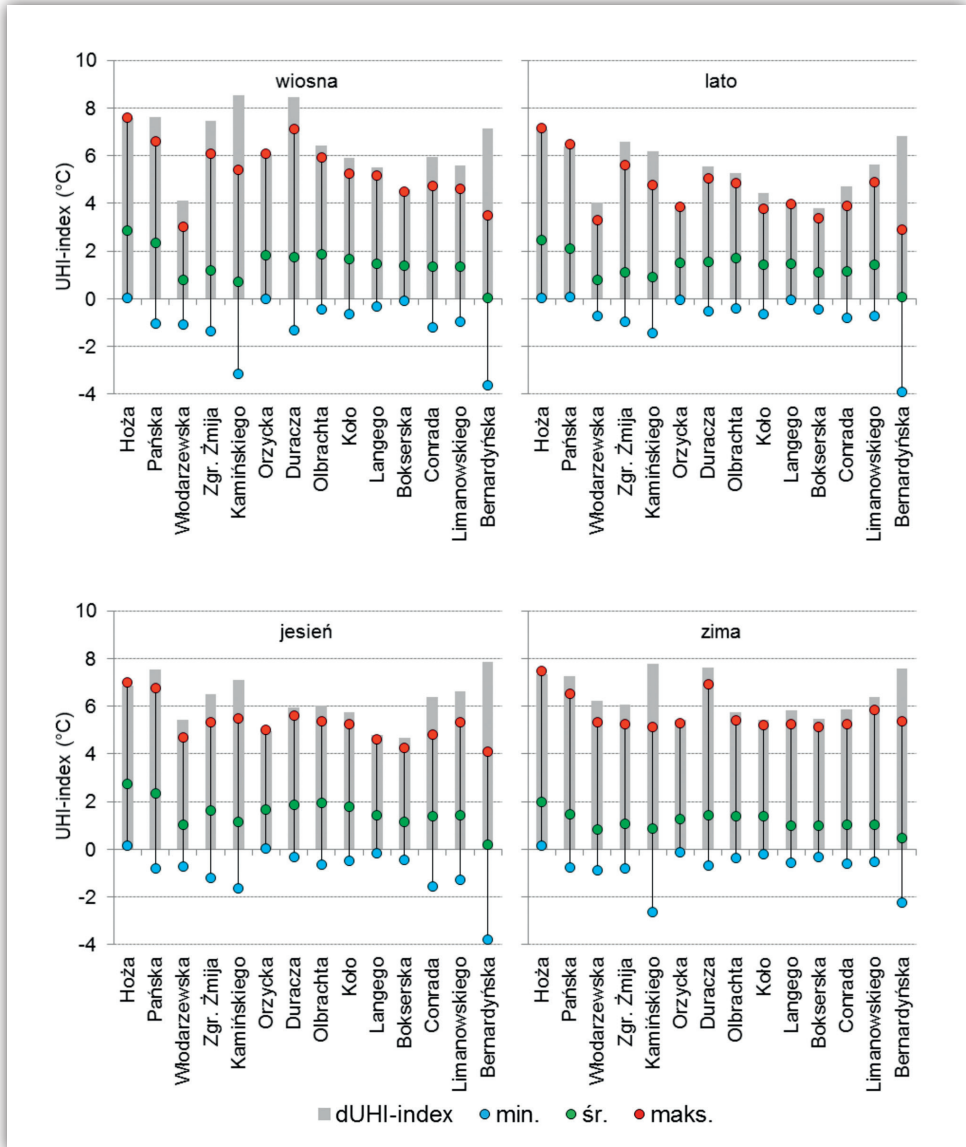
Średnie odchylenie temperatury powietrza z wszystkich osiedli waha się od 1,2°C zimą po 1,6°C jesienią, co oznacza, że o tyle średnio osiedla mieszkaniowe w Warszawie są cieplejsze od terenów poza miastem.

Na rycinie 5.6 osiedla ustawiono w kolejności wielkości wskaźnika terenów biologicznie czynnych. Jedynym osiedlem, które zawsze było cieplejsze od Okęcia jest Hoża, a średnie natężenie MWC w każdej porze roku jest tu najwyższe i wynosi 2,0–2,9°C. Najchłodniejsze jest osiedle Bernardyńska, o największym udziale terenów biologicznie czynnych (67,4%), które często (zwłaszcza latem i jesienią) bywa znacznie chłodniejsze niż Okęcie. Średnio temperatura zbliżona jest tu do notowanej na Okęciu, jedynie zimą odchylenie temperatury powietrza sięga 0,5°C.

Osiedlem o najmniejszym zróżnicowaniu temperatury i najbardziej stabilnych warunkach termicznych jest Bokserska, z prawie 59% udziałem terenów biologicznie czynnych (TBC), zabudową 3–4-kondygnacyjną z połowy XX w. i najniższym wskaźnikiem intensywności zabudowy spośród wszystkich osiedli, wynoszącym 0,56. Średnie wartości najwyższych i najniższych odchyłeń temperatury powietrza obliczone w grupach osiedli o różnym udziale TBC wyraźnie wskazują na spadek intensywności MWC wraz ze wzrostem udziału terenów zielonych. W analizie tej nie uwzględniono osiedla Włodarzewska, w którym lokalizacja czujnika pomiaru temperatury i wilgotności powietrza nie jest reprezentatywna dla warunków mikroklimatu intensywnej zabudowy – prezentuje raczej osiedle o zwiększonym udziale terenów biologicznie czynnych.

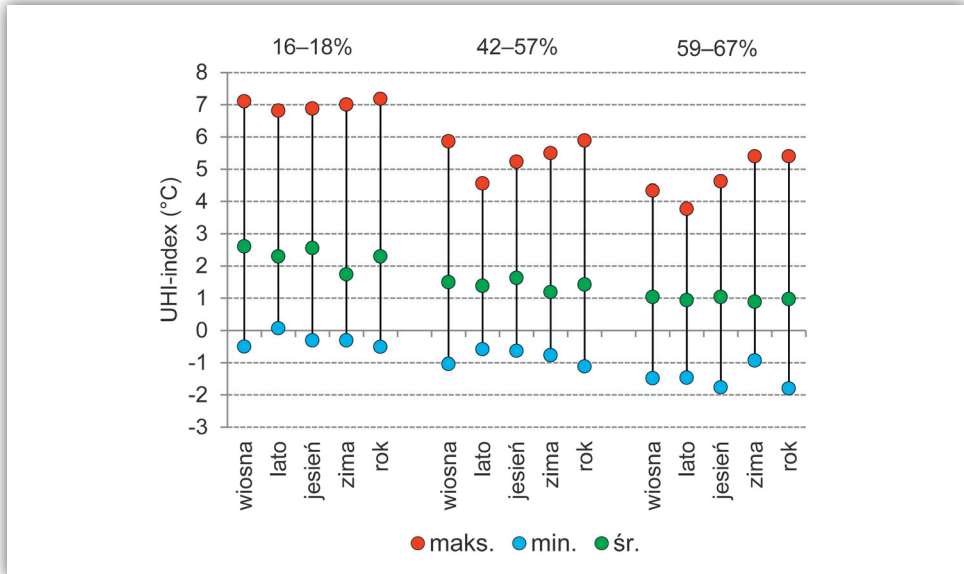
Najwyższa intensywność MWC cechuje osiedla z najniższym TBC (2 osiedla: Hoża i Pańska) – najwyższe wartości sięgają tu 7,1°C, a średnia równa jest 2,3°C. Wśród osiedli ze średnim (42–57%) udziałem terenów biologicznie czynnych (7 osiedli) intensywność MWC sięga 5,9°C, średnia jej wartość wynosi 1,4°C. Na osiedlach z najwyższym (powyżej 58%) udziałem TBC (4 osiedla: Conrada, Bokserska, Limanowskiego i Bernardyńska) intensywność MWC sięga 5,4°C, a średnio w roku wynosi zaledwie 1,0°C (ryc. 5.7). Udział terenów biologicznie czynnych wydaje się być zatem bardzo dobrym miernikiem intensywności MWC.

Wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ) jest dość dobrym, ale nie najlepszym miernikiem MWC, gdyż przyjmuje on wysokie wartości w osiedlach,



Rycina 5.6. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchylenia temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchylenia (dUHI-index) w kolejnych porach roku, 2011 i 2012

w których dominują wysokie budynki. W centrum miasta jego wysoka wartość jest równoznaczna z małym udziałem terenów biologicznie czynnych. Najniższe wartości wskaźnika obliczone są także dla osiedli o dużym udziale TBC i 3- lub 4-piętrowych blokach mieszkalnych (Bokserska, Limanowskiego). Bywa jednak, że WIZ jest wysoki na osiedlach z dużym udziałem terenów biologicznie czynnych

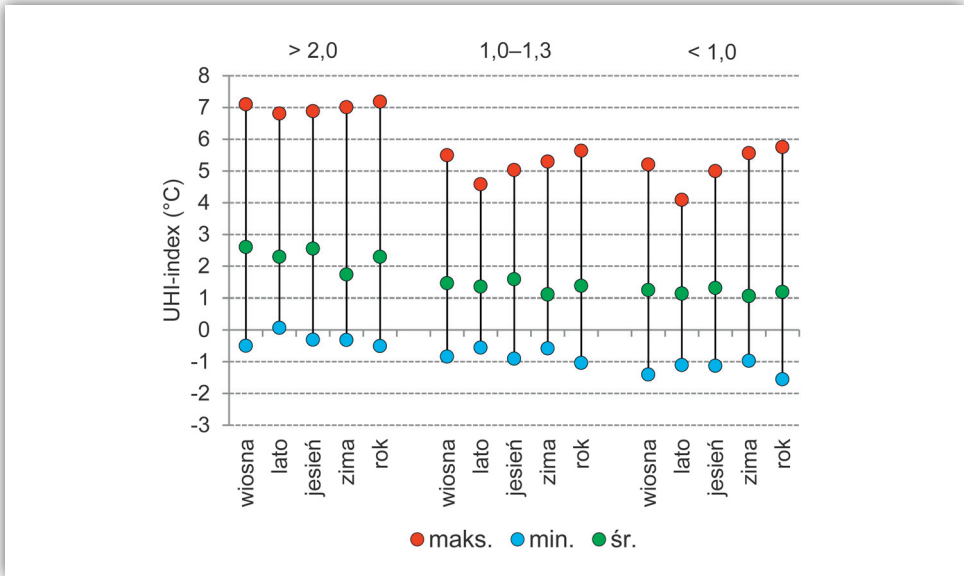


Rycina 5.7. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchylenia temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchylenia w osiedlach o różnym udziale terenów biologicznie czynnych (TBC), 2011 i 2012

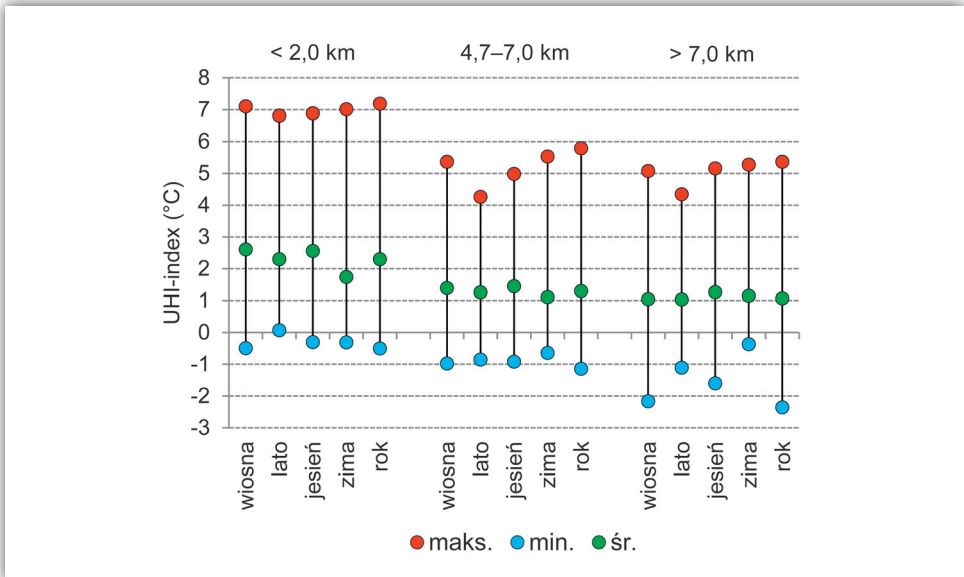
(Conrada), o korzystnych warunkach klimatu lokalnego osiedla i słabej MWC. Dlatego też średni roczny UHI-index na osiedlach ze wskaźnikiem intensywności zabudowy o wartościach 1,0–1,3 jest tylko o 0,2°C wyższe od notowanego na osiedlach ze wskaźnikiem poniżej 1. Najwyższe średnie odchylenia zaś są nawet nieco wyższe na mniej intensywnie zabudowanych osiedlach (ryc. 5.8).

W uproszczonych modelach MWC przyjmuje się, że wraz ze zbliżaniem się do centrum miasta maleje udział terenów biologicznie czynnych, wzrasta intensywność zabudowy oraz natężenie MWC. Jednakże w ostatnich latach w dzielnicach znacznie oddalonych od centrum, a nawet na peryferiach powstają osiedla o bardzo intensywnej zabudowie i małym udziale terenów zielonych. Dlatego też sama odległość osiedla od centrum miasta okazuje się być dość dobrym, jednak niewystarczającym wskaźnikiem intensywności MWC (ryc. 5.9).

W przypadku analizy 14 osiedli w Warszawie wraz z oddalaniem się od centrum miasta konsekwentnie maleją największe odchylenia temperatury, coraz niższe wartości mają odchylenia ujemne, ale średnie roczne odchylenie temperatury powietrza jest, podobnie jak przy wskaźniku intensywności zabudowy, tylko o 0,2°C niższe na osiedlach najbardziej oddalonych (powyżej 7 km) w stosunku do osiedli nieco bliższych (4,7–7,0 km). Brak przedziału 2,0–4,6 km wynika z braku osiedli objętych analizą leżących w takiej odległości od centrum (ryc. 5.9).



Rycina 5.8. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchylenia temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchylenia w osiedlach o różnej wartości wskaźnika intensywności zabudowy (WIZ), 2011 i 2012



Rycina 5.9. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchylenia temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchylenia w osiedlach położonych w różnej odległości od centrum miasta, 2011 i 2012

Podsumowując, wpływ zagospodarowania terenu na intensywność MWC jest wyraźnie widoczny, zwłaszcza gdy porównuje się osiedla pod względem udziału terenów biologicznie czynnych, w nieco mniejszym zaś stopniu istotne są wskaźnik intensywności zabudowy czy funkcja odległości od centrum miasta. Zatem można przyjąć, że wielkość terenów biologicznie czynnych odgrywa kluczową rolę w projektowaniu osiedli tak, by możliwie najbardziej zmniejszać zasięg i intensywność MWC. Z obecnych badań wynika, że by tak się działo udział TBC nie powinien być niższy niż 45–50% (Szulczewska i in. 2014). Wyznaczenie zaś dokładnego prognozy wymagałoby szerszych analiz na większej liczbie obszarów modelowych.

5.3. Tereny biologicznie czynne

W kontekście zmian klimatu, rozwoju miast na świecie i gwałtownie rosnącej liczby ich mieszkańców oraz związanego z tym wzrostu natężenia MWC, bardzo istotnym komponentem struktury przestrzennej przestrzeni miejskiej stają się tereny biologicznie czynne w mieście, które w opracowaniach urbanistycznych nazywane są „zieloną infrastrukturą” oraz ich połączenia z regionalnym i ponadregionalnym systemem przyrodniczym.

W Warszawie, począwszy od lat 70. XX w., opublikowano wiele prac dotyczących wpływu terenów biologicznie czynnych na warunki termiczno-wilgotnościowe, arosanitarne czy odczuwane przez człowieka (Wójcicka 1971; Kossowska-Cezak 1978, 1983; Szczepanowska 1984; Fortini 1985; Lewińska 2000; Błażejczyk 2002; Kuchcik 2003a; Gill i in. 2007; Szulczewska i in. 2014).

Drzewa, zwłaszcza liściaste, odgrywają dużą, pozytywną rolę w melioracji klimatu miasta. Zieleń parkowa przede wszystkim asymiluje dwutlenek węgla a produkuje tlen, którego deficyt notuje się zazwyczaj w mieście. Badania prowadzone przez pracowników Politechniki Warszawskiej, a częściowo obejmujące parki warszawskie wykazały, że w dużym parku stężenie zanieczyszczeń gazowych maleje już w odległości kilkunastu metrów od ulicy, a wpływ ulicy zanika we wnętrzu parku (park Praski). W mniejszym parku (Ogród Saski), otoczonym ulicami spadek stężenia zanieczyszczeń sięga 20–30% (Skorupski 1984). Drzewa emitują do atmosfery duże ilości pary wodnej: duży dąb transpiruje do atmosfery około 150 tys. litrów wody rocznie (Hanson 1991). Dlatego też wilgotność względna powietrza w parkach jest wyższa w stosunku do terenów o intensywnej zabudowie zimą średnio o 3–8%, zaś latem o 5–20% (Olszewski 1980; Makhelouf 2009). Tereny zieleni zarówno wskutek zacienienia, jak i innego niż powierzchnie sztuczne bilansu cieplnego powodują spadek temperatury gruntu oraz temperatury powietrza. Badania prowadzone w Warszawie wskazują, że typowy dla parków spadek temperatury

powietrza, widoczny zwłaszcza latem, rośnie w głąb parku i sięga średnio 2–3°C w porze nocnej i 1°C w ciągu dnia. Dużą stabilność termiczną notuje się pod okapem drzew, zaś duże zmiany termiczne nad trawnikami o dużej ekspozycji dosłonecznej (Kossowska-Cezak 1978; Olszewski 1978). W Paryżu spadek temperatury powietrza wewnątrz parków wzrasta wraz z wielkością obszaru zadrzewionego – zimą w Lasku Bulońskim, w stosunku do otaczających go budynków, wynosi średnio 2°C, latem zaś sięga 4°C (Makhelouf 2009).

Ogólnie parki, których rola w kształtowaniu warunków klimatycznych wzrasta w sezonie wegetacyjnym, traktowane są jako oazy chłodu i wilgoci, które dodatkowo redukują zanieczyszczenie powietrza i hałas. Jednak ich oddziaływanie na tereny zewnętrzne zmienia się w zależności od charakteru samych parków, jak i strefy klimatycznej, w jakiej są położone (Spronken-Smith, Oke 1998). Zazwyczaj warunki klimatyczne w parkach sprzyjają człowiekowi. Jednak bywają sytuacje, np. w bezwietrzne, gorące dni, kiedy podwyższona wilgotność powietrza oraz zmniejszone przewietrzanie powodują, że warunki biotermiczne są mniej korzystne, a nawet potrafią być obciążające dla człowieka (Błażejczyk 2002).

Wpływ trawników, najpopularniejszej formy zieleni miejskiej, na teren otaczający zależy głównie od ich wielkości. Przy 1000 m² obniżenie temperatury powietrza widoczne jest jedynie tuż przy powierzchni ziemi i sięga najbliższych ulic i placów. Dopiero trawniki o powierzchni około 3000 m² oddziałują na dalsze otoczenie (Kopacz-Lembowicz i in. 1984; Olszewski 1992).

Inną pozytywną cechą roślinności jest ta, że wiele gatunków drzew (m.in. sosna, świerk, modrzew) i krzewów wydziela fitoncydy, substancje lotne o charakterze bakteriobójczym, działające leczniczo na drogi oddechowe czy pobudzające układ nerwowy (Krzymowska-Kostrowicka 1997). Należy jednak zaznaczyć, że nie zawsze oddziaływanie drzew na klimat jest jednoznacznie pozytywne. Niektóre gatunki, np. wierzba, emitują duże ilości węglowodorów, które wchodząc w reakcje z tlenkami azotu emitowanymi przez pojazdy na drogach prowadzą do powstania niekorzystnego dla człowieka smogu fotochemicznego (Chameides i in. 1988; Kuttler, Strassburger 1999). Należy także pamiętać, że nieodpowiednio dobrana zieleń może w pewnych okresach roku powodować nasilenie problemów alergicznych. Zagadnienie to zostało szerzej omówione w rozdziale 6.

Zainteresowaniem klimatem i świadomością dobroczynnego, ochładzającego wpływu terenów biologicznie czynnych na klimat miasta wzrasta wraz z zmianami klimatu i coraz częstszymi okresami pogody upalnej. Według jednej ze Strategii Adaptacji do Zmian Klimatu w Środowisku Miejskim (ASCCUE), zakładając różne scenariusze emisji dwutlenku węgla, wzrost maksymalnej temperatury powierzchni czynnej do 2080 r. wyniesie na terenach wysoko zurbanizowanych 1,7–3,7°C. Dodanie w tym miejscu 10% terenów biologicznie czynnych obniżyłoby temperaturę w stosunku do obecnej o 0,7–1,2°C w zależności od scenariusza zmian klimatycznych.

Z kolei odjęcie 10% powierzchni biologicznie czynnej doprowadziłoby do wzrostu temperatury o 7,0–8,2°C w zależności od scenariusza (Gill i in. 2007).

Zielone dachy, które chronią budynek przed nadmiernym nagraniem latem i wychłodzeniem zimą nie tylko zmniejszają natężenie miejskiej wyspy ciepła (patrz rozdz. 7), ale też pozwalają na zaoszczędzenie energii zużytej na ogrzanie zimą i ochłodzenie latem wnętrz pomieszczeń. Rośliny porastające dach produkują także tlen, a wyłapując drobne zanieczyszczenia powietrza oraz asymilując dwutlenek węgla, przyczyniają się do zmniejszenia stężenia zanieczyszczeń powietrza. Są rezerwuarem wilgoci, zmniejszają ilość wody odprowadzanej do kanalizacji miejskiej oraz powodują wzrost wilgotności powietrza. Ponadto średnio o 8 dB zmniejszają poziom hałasu w pomieszczeniach znajdujących się bezpośrednio pod nimi (Banting i in. 2005; Brenneisen 2006).

Badania przeprowadzone w ramach projektu UHI, a także wyniki licznych badań dotyczących wpływu terenów biologicznie czynnych, zwłaszcza terenów zieleni na warunki termiczne w miastach, w tym na kształtowanie miejskiej wyspy ciepła, dowodzą, że obecność terenów biologicznie czynnych, niezależnie od tego, czy są one naturalne, czy wprowadzone przez człowieka, znacznie poprawiają warunki termiczne. Oddziaływanie zieleni na warunki termiczne i bioklimatyczne można w sposób skrótowy przedstawić następująco:

1. zieleń wysoka, łagodzi warunki termiczne; zmniejsza tempo nagrzewania się powietrza dniem i jego wychładzania nocą, a przez to łagodzi kontrasty termiczne. Oddziaływania te dotyczą nie tylko samego obszaru zadrzewień, ale także jego otoczenia, a ich zasięg zależy od wielkości oazy zieleni. Badania prowadzone w Stuttgarcie wskazują, że lepsze wyniki w redukowaniu MWC uzyskuje się, gdy w mieście istnieje wiele małych oaz zieleni niż gdy zieleń koncentruje się w dużych kompleksach;
2. poprawia warunki wilgotnościowe dzięki dostarczaniu do powietrza pary wodnej w procesie transpiracji. Obecność enklaw wilgoci poprawia warunki odczuwalne, ułatwia oddychanie i zmniejsza tempo wysuszania się skóry i błon śluzowych;
3. generuje lokalną cyrkulację powietrza dzięki różnemu nagrzewaniu się powierzchni sztucznych i pokrytych roślinnością, co łagodzi warunki termiczne i ułatwia wnikanie strug powietrza pomiędzy zabudowę;
4. ułatwia oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń, zwłaszcza pyłowych, przez co poprawia komfort życia mieszkańców;
5. poprawia warunki klimatu akustycznego, tłumiąc hałas generowany przez funkcjonowanie miasta;
6. w okresach bardzo wysokiej temperatury powietrza szczególnego znaczenia nabierają wody powierzchniowe, schładzające w dzień ich najbliższe otoczenie, jak i poprawiające warunki wilgotnościowe.

5.3.1. Zróznicowanie przestrzenne zielonej infrastruktury Warszawy

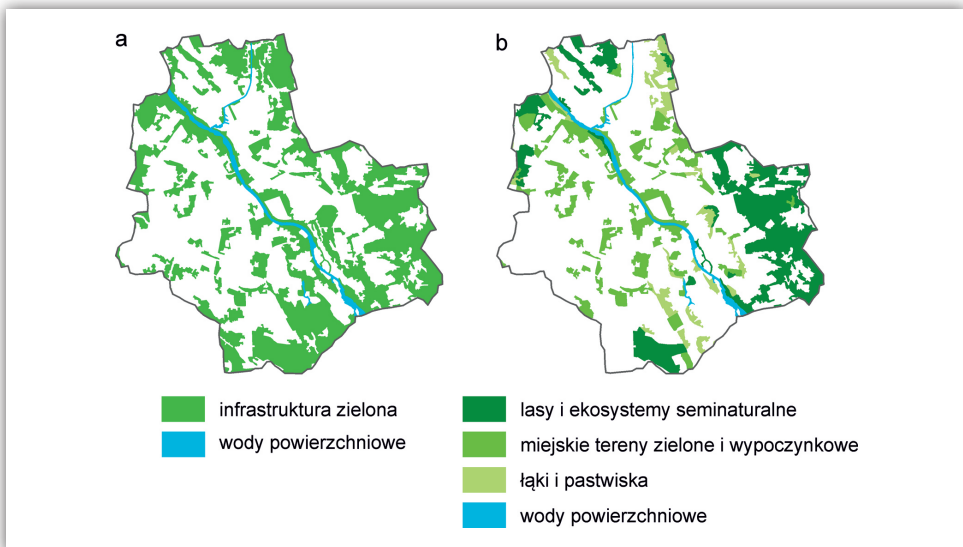
W eksperckim opracowaniu Koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju do 2030 r. Warszawa została zaklasyfikowana do grupy miast posiadających bardzo korzystne położenie geograficzne, związane z lokalizacją w dolinie dużej rzeki i bezpośrednią łącznością z dużymi kompleksami leśnymi (Degórski 2009). Występowanie w granicach administracyjnych miasta lasów oraz doliny dużej rzeki o relatywnie naturalnym charakterze wyróżnia Warszawę pośród stolic europejskich. W intensywnie zurbanizowanej przestrzeni dużego miasta tereny zielone przyjmują zazwyczaj formę parków miejskich lub innych terenów zieleni urządzonej. W przypadku Warszawy znaczna część terenów zieleni wymaga odrębnego potraktowania, gdyż duży udział mają lasy oraz mało przekształcone siedliska nadwiślańskie. Wymaga to pogodzenia ochrony przyrody z funkcją rekreacyjną i klimatyczną, jakkolwiek w aspekcie zmian klimatu najważniejsza jest rola tych obszarów w schładzaniu centrum miasta, wymianie powietrza i poprawie jego stanu sanitarnego. W odniesieniu do większości kompleksów leśnych Warszawy szczególne podejście wymusza status lasów ochronnych, parku krajobrazowego i obszaru chronionego krajobrazu, obszaru Natura 2000 (w odniesieniu do terenów zieleni nadwiślańskiej), a w przypadku innych obszarów, także z uwagi na inne formy ochrony przyrody, zabytkowy charakter lub szczególny krajobraz kulturowy w przestrzeni miejskiej (skarpa warszawska). Na niektórych obszarach powstałe w wielowiekowym procesie związku i zależności pomiędzy czynnikami kulturowymi i przyrodniczymi są tak silne, że spotykamy się ze zjawiskami podwójnej ochrony – przyrodniczej i kulturowej. Przykładem są rezerwy przyrody takie jak Las Natoliński, Skarpa Ursynowska i Olszynka Grochowska.

Najistotniejszymi komponentami systemu przyrodniczego Warszawy są lasy, tereny zieleni miejskiej, a głównie parki oraz otwarte tereny zieleni związane z doliną Wisły. Obecnie Warszawa charakteryzuje się znacznym udziałem terenów niezabudowanych. Tereny zieleni łącznie z gruntami rolnymi i wodami zajmują blisko połowę powierzchni miasta. Biorąc pod uwagę, że grunty rolne stanowią obecnie główny teren urbanizacji przestrzeni, bardziej celowe jest rozpatrywanie terenów zieleni Warszawy z ich wyłączeniem (ryc. 5.18). Część tych terenów jest objęta ochroną przyrody, ochroną urbanistyczną (zabytkowe obiekty) lub ochroną krajobrazową. Mimo olbrzymiej presji urbanizacyjnej nadal w strukturze użytkowania i pokrycia terenu Warszawy duże powierzchnie zajmują grunty rolne, tereny zieleni nieurządzonej, rozproszone systemy upraw i działek oraz ogródki działkowe.

Lasy na terenie m.st. Warszawy zajmują powierzchnię 7 258 ha, co stanowi blisko 14% powierzchni miasta. Łącznie z zadrzewieniami i zaroślami jest to blisko 20% powierzchni Warszawy. Czyni to Warszawę jedną z nielicznych stolic europejskich o tak dużym udziale kompleksów leśnych w ogólnej powierzchni miasta. Lasy

na terenie Warszawy, jako lasy ochronne, mają szczególne znaczenie dla kształtowania warunków życia człowieka w mieście. Wśród największych kompleksów leśnych należy wymienić:

- Las Bemowo, położony w dzielnicach Bemowo i Bielany oraz częściowo na terenie gminy Stare Babice, z powierzchnią 508,53 ha;
- Las Bielański, położony w dzielnicy Bielany, o powierzchni 151,83 ha, obejmuje teren rezerwatu „Las Bielański” i jego otulinę;
- Las Bródno, leży w dzielnicy Targówek i posiada powierzchnię 134,08 ha;
- Las Kabacki, położony w dzielnicach Ursynów i Wilanów, o powierzchni 924,72 ha;
- Las Sobieskiego, położony w dzielnicy Wawer, o powierzchni 516,60 ha. To drugi pod względem wielkości kompleks leśny Warszawy, w którym znajduje się rezerwat przyrody im. Jana III Sobieskiego;
- Las Osiedle Białoleśka Dworska, położony w dzielnicy Białoleśka, o powierzchni około 230 ha;
- Uroczysko Las Młociny, położone w dzielnicy Bielany, posiada powierzchnię 98,09 ha;
- Uroczysko Lasek na Kole, położone w dzielnicy Wola, a jego powierzchnia to 48,33 ha;
- Uroczysko Nowa Warszawa, położone w dzielnicy Bielany, o powierzchni około 200 ha.



Rycina 5.10. Przemianowe rozmieszczenie terenów biologicznie czynnych w Warszawie: łącznie z gruntami rolnymi (a), bez gruntów rolnych (b), według bazy *Corine Land Cover 2006* (European Environment Agency 2007)

Parki są kolejnym, bardzo istotnym elementem struktury zieleni miejskiej, która znacząco wpływa na kształtowanie się lokalnych warunków klimatycznych, zwłaszcza w strefie intensywnej urbanizacji, określonej w *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Warszawy* (2010) jako strefa miejska. W istniejącym układzie administracyjnym m.st. Warszawa posiada 76 parków o łącznej powierzchni około 715 ha (tab. 5.4). Pochodzą one z różnych epok historycznych. Począwszy od ogrodów barokowych (Ogród Saski), poprzez ogrody sentymentalne (park Arkadia Górna i Dolna), XIX-wieczne parki krajobrazowe (park Sielecki, park Praski), XX-wieczne parki miejskie w stylu krajobrazowym (park Skaryszewski, Morskie Oko) i parki modernistyczne (park Wielkopolski, park Dreszera).

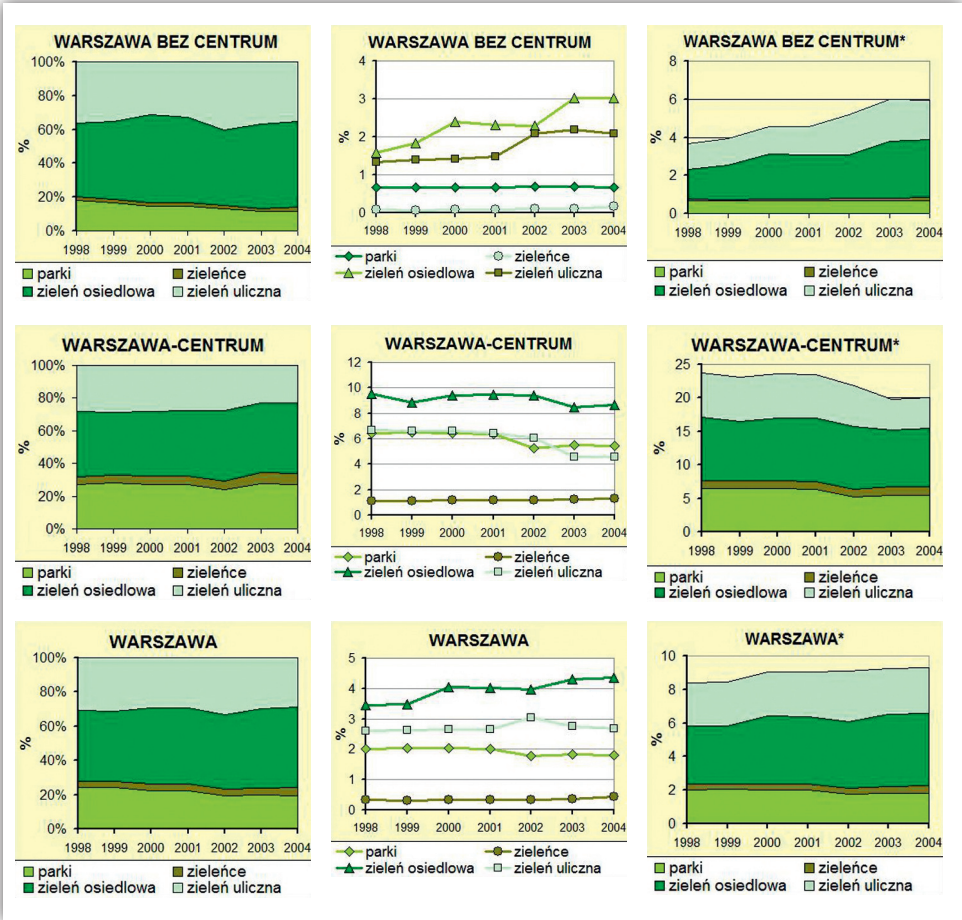
Tabela 5.4. Wykaz ważniejszych parków Warszawy

Lp.	Nazwa parku	Dzielnica	Powierzchnia (ha)
1	Ogród Krasieńskich	Śródmieście	9,20
2	Park Agrykola	Śródmieście	4,72
3	Park Czerwonego Krzyża	Śródmieście	2,12
4	Park Kazimierzowski	Śródmieście	4,00
5	Park im. Marszałka Edwarda Rydza-Śmigłego	Śródmieście	50,00
6	Park Mirowski	Śródmieście	4,66
7	Park Podzamcze	Śródmieście	4,75
8	Park Ujazdowski	Śródmieście	5,70
9	Park im. Romualda Traugutta	Śródmieście	10,36
10	Park Łazienkowski	Śródmieście	76,21
11	Park Świętokrzyski	Śródmieście	6,00
12	Park Saski	Śródmieście	15,49
13	Park Górczewska	Bemowo	20,47
14	Fort Bema	Bemowo	22,20
15	Park Strumykowa	Białołęka	2,40
16	Park Henrykowski	Białołęka	3,00
17	Park Picassa	Białołęka	3,70
18	Park przy Lesie Bielańskim	Bielany	5,85
19	Park Kępa Potocka	Bielany	11,50
20	Park osiedlowy Olszyna	Bielany	7,48
21	Park osiedlowy ul. Perzyńskiego	Bielany	1,58
22	Park Ruda	Bielany	3,76
23	Park Stawy Kellera	Bielany	2,14
24	Park Arkadia	Mokotów	11,02
25	Park Bartłomieja	Mokotów	1,35
26	Park Dolinka Służewska	Mokotów	22,80
27	Park Dreszera	Mokotów	2,70
28	Park Mauzoleum - Cmentarz Żołnierzy Radzieckich	Mokotów	16,50
29	Park Morskie Oko	Mokotów	17,90
30	Park Powstania Warszawskiego	Mokotów	9,86
31	Park Sielecki	Mokotów	3,16
32	Park im. Czesława Szczubetka	Mokotów	1,89

Lp.	Nazwa parku	Dzielnica	Powierzchnia (ha)
33	Park „Nad Balatonem”	Praga-Południe	3,20
34	Park im. Obwodu Praga Armii Krajowej	Praga-Południe	3,46
35	Park O.W.S. Waszyngtona	Praga-Południe	23,28
36	Park Skaryszewski	Praga-Południe	49,56
37	Park Znicza	Praga-Południe	1,90
38	Park Praski	Praga-Południe	16,70
39	Pole Mokotowskie	Ochota/Mokotów/Śródmieście	68,54
40	Park „Forty Korotyńskiego”	Ochota	4,84
41	Park im. Zastawa Malickiego	Ochota	5,86
42	Park im. Marii Skłodowskiej-Curie	Ochota	2,16
43	Park Szczęśliwicki	Ochota	30,11
44	Park Bródnowski	Targówek	25,4
45	Park im. Stefana Wiecheckiego „Wiecha”	Targówek	5,90
46	Park Achera	Ursus	1,79
47	Park Czechowicki	Ursus	4,00
48	Park im. Romana Kozłowskiego	Ursynów	11,60
49	Park im. Jana Pawła II	Ursynów	4,30
50	Park „Lasek Brzozowy”	Ursynów	1,87
51	Park „Przy Bażantarni”	Ursynów	9,00
52	Park Kombatantów	Włochy	4,46
53	Park ze Stawami Cietrzewia	Włochy	8,16
54	Park ze Stawem Koziorożca	Włochy	4,71
55	Park im. Edwarda Szymańskiego	Wola	20,45
56	Park Moczydło	Wola	19,94
57	Park Sowińskiego	Wola	8,30
58	Park Fosa i Stoki Cytadeli	Żoliborz	17,08
59	Park Kaskada	Żoliborz	6,00
60	Park Sady Żoliborskie	Żoliborz	3,60
61	Park Stefana Żeromskiego	Żoliborz	6,00

Ważnym składnikiem miejskich terenów zieleni są również skwery i zieleńce. Położone najczęściej w bezpośrednim sąsiedztwie miejsc zamieszkania, umożliwiają nie tylko kontakt z przyrodą okolicznym mieszkańcom, ale wtedy, gdy są wyposażone w wysoką zielenią zapewniają zacienienie miejsc odpoczynku lub zabaw dziecięcych, szczególnie istotne w dni gorące i upalne z silną insolacją. Obecnie, na terenie Warszawy znajduje się około 160 skwerów i zieleńców o łącznej powierzchni prawie 160 ha.

Wyniki badań zmian powierzchni terenów zieleni w Warszawie w latach 1998–2004 wskazują, że w dzielnicach, w których szczególnie istotne jest zachowanie i rozwój zieleni miejskiej, a głównie wysokiej, następuje jej ubytek. Analiza zmian poszczególnych form zieleni w Warszawie wykazała znaczące różnice w kierunkach procesów przestrzennych zachodzących w byłej gminie Centrum obejmującej silnie zurbanizowany rdzeń Warszawy i w dzielnicach otaczających ten rdzeń (Warszawa bez Centrum) – rycina 5.11. Z punktu widzenia miejskiej wyspy ciepła w Warszawie zmniejszenie powierzchni zieleni urządzonej na terenie najbardziej intensywnej zabudowy



Rycina 5.11. Struktura terenów zieleni publicznej oraz udział parków, zieleńców, zieleni osiedlowej i zieleni ulicznej w powierzchni geodezyjnej badanych kategorii terenu, 1995–2004

* – udział skumulowany
 Źródło: Degórska (2008).

w obrębie silnie zurbanizowanego rdzenia miasta należy do szczególnie negatywnych zjawisk. Dotyczy to zwłaszcza zmniejszania powierzchni parków, zieleni ulicznej i w mniejszym wymiarze zieleni osiedlowej. Na obszarach otaczających silnie zurbanizowany rdzeń odnotowano wzrost wszystkich kategorii zieleni. Niemniej jednak w części dzielnic należących do tej strefy nastąpił ubytek niektórych form zieleni: parków na Bielanach, zieleńców na Bemowie, zieleni ulicznej w Wesołej, zieleni osiedlowej na Bielanach, w Rembertowie, Targówku, Wawrze, Wesołej i Wilanowie.

W melioracji klimatu w skali lokalnej istotne są także fragmenty krajobrazu naturalnego i kulturowego chronione w formie zespołów przyrodniczo-krajobrazowych, m.in. Arkadia w dzielnicy Mokotów, od południa i zachodu

granicząca z parkiem Królikarnia, a od strony północnej z terenami Klubu Sportowego Warszawianka.

Szczególne znaczenie dla warunków klimatycznych Warszawy ma niezabudowane pasmo łąk, zadrzewień i zakrzewień nadwiślańskich, z relatywnie naturalną rzeką oraz licznymi łachami, wyspami i odsypami w obrębie międzywala, które stanowi główny korytarz wentylacji Warszawy (patrz rozdz. 5.4) (Lorenc, Mazur 2003).

Tereny biologicznie czynne są jedną z największych wartości Warszawy w kontekście łagodzenia MWC. Zatem zmniejszanie ich powierzchni na obszarze najbardziej intensywnej miejskiej wyspy ciepła, które następuje m.in. na skutek braku zatwierdzonych planów zagospodarowania przestrzennego oraz reprivatyzacji atrakcyjnych terenów zielonych, następnie ich odsprzedaży deweloperom – jest zjawiskiem jednoznacznie negatywnym i jako takie powinno zostać objęte szczególnym nadzorem oraz ograniczone.

5.4. Korytarze wymiany powietrza

Ważnym elementem struktury przestrzennej Warszawy, który w sposób istotny kształtuje warunki klimatyczne i bioklimatyczne są korytarze wymiany powietrza. Doprowadzają one do nagrzanego centrum miasta świeże, chłodne i wilgotne powietrze z otaczających silnie zurbanizowany rdzeń Warszawy terenów otwartych i lasów, a głównie ze stref zasilania położonych na przedłużeniu korytarzy.

Głównymi czynnikami mającymi wpływ na przewietrzanie miasta są z jednej strony uwarunkowania wynikające z prędkości i kierunku wiatru, z drugiej zaś ze struktury przestrzennej zabudowy. Warszawa znajduje się w przeważającym oddziaływaniu wiatrów zachodnich, a istniejąca zabudowa miasta w sposób znaczący modyfikuje strumienie napływających mas powietrza. Na zmianę kierunku wiatrów zachodnich największy wpływ mają al. Krakowska, a częściowo ul. Żwirki i Wigury oraz Aleje Jerozolimskie. Te ciągi uliczne ukierunkowują masy powietrza z południowego zachodu na północny wschód. Wiatry z kierunków od północnego zachodu do północnego wschodu kierowane są w stronę Wisły arterią komunikacyjną ul. Płochocińskiej, częściowo ul. Marywilską i Kanałem Żerańskim. Napływ powietrza z kierunku wschodniego i północno-wschodniego jest ograniczony wielopiętrowymi budynkami mieszkalnymi na osiedlach Bródno i Targówek. Główny kanał przewietrzający Warszawę stanowi dolina Wisły. Przepływają nią masy powietrza głównie z kierunku północnego, północno-zachodniego i południowo-wschodniego.

Istotny jest również wpływ struktury przestrzennej miasta na prędkość wiatru, od której zależy efektywność przewietrzania. Według 30-letnich badań średniej prędkości wiatru mierzonej na peryferiach miasta (Okęcie) i w jego centrum (Obserwatorium Astronomiczne w Alejach Ujazdowskich) odnotowano blisko

60-procentową różnicę pomiędzy tymi punktami. Prędkość ta wynosiła odpowiednio 4,1 i 1,7 m·s⁻¹. Oznacza to, iż w centrum miasta prędkość wiatru jest dużo mniejsza niż na przedmieściach (Kosieradzka 2011). Podobne osłabienie ruchu powietrza w centrum miasta (Twarda) w stosunku do obszarów peryferyjnych (Okęcie) stwierdzili także T. Kozłowska-Szczęśna i inni (1996), U. Kossowska-Cezak i P. Bareja (1998) oraz K. Błażejczyk (2002).

Po raz pierwszy koncepcja klinów nawietrzających została zaprezentowana w *Szkicu Planu Regulacyjnego Warszawy* T. Tołwińskiego w 1916 r. (Miller 2009).

Korytarze wymiany powietrza, nazywane też klinami nawietrzającymi, powinny być pozbawione barier urbanistycznych hamujących swobodny przepływ powietrza. W systemie wentylacji miasta szczególna rola przypada korytarzom umożliwiającym swobodny przepływu powietrza w obydwu kierunkach, zwłaszcza przez strefę śródmieścia i osiedli mieszkaniowych, które nie tylko wprowadzają zregenerowane i schłodzone powietrze do tej strefy, ale także umożliwiają odpływ z niej zanieczyszczonego i ogrzanego powietrza (Błażejczyk 2013). Ukształtowanie systemu wymiany i regeneracji powietrza w dużym mieście poprzez odpowiednie zaplanowanie jego struktury funkcjonalno-przestrzennej, stanowi podstawę planów poprawy warunków termicznych i jakości powietrza, niemniej jednak wymaga obligatoryjności potwierdzonej umocowaniem prawnym. Duże znaczenie ma także zagospodarowanie stref zasilania korytarzy napływu powietrza. W obszarach tych najważniejszą rolę odgrywają duże kompleksy leśne i łąkowe.

Drożność korytarzy wymiany powietrza jest jednym z podstawowych wyzwań na najbliższe dekady. *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy* (SUKZPMW 2010) ustaliło 8 korytarzy wymiany powietrza (ryc. 5.12):

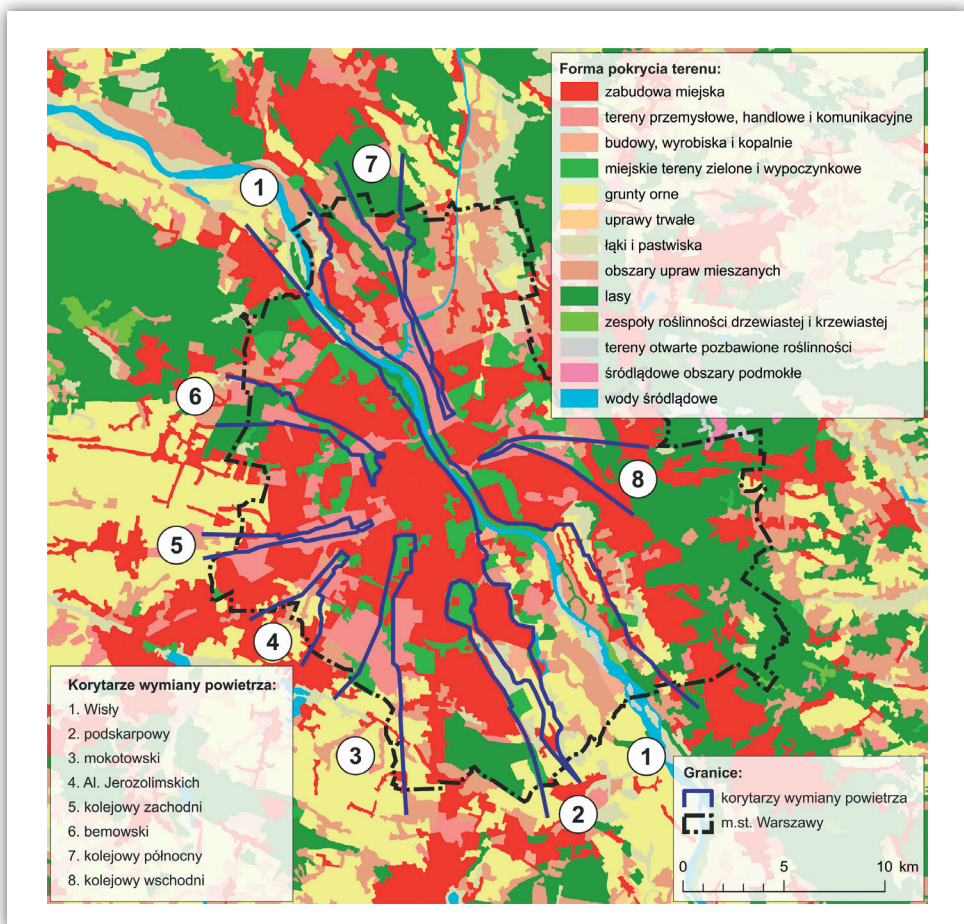
- korytarz Wisły,
- korytarz podskarpowy,
- korytarz mokotowski,
- korytarz Al. Jerozolimskich,
- korytarz kolejowy zachodni,
- korytarz bemowski,
- korytarz kolejowy północny,
- korytarz kolejowy wschodni.

Na obszarach korytarzy wymiany powietrza *Studium* określa następujące zasady zagospodarowania:

- zakaz lokalizowania urządzeń i instalacji mogących niekorzystnie wpływać na jakość powietrza,
- zakaz lokalizowania zabudowy ograniczającej swobodny przepływ mas powietrza,

- obowiązek zagospodarowania obszaru w sposób sprzyjający wymianie powietrza,
- zagospodarowanie obszarów na warunkach określonych w *Studium*.

Mimo przytoczonych ustaleń zawartych w części tekstowej *Studium*, kierunki zagospodarowania przestrzennego określone rysunkiem dopuszczają różne formy zainwestowania głównie w kategorii obszarów określonych jako wspomagające, przy zachowaniu 60% powierzchni biologicznie czynnej. W granicach obszarów podstawowych Systemu Przyrodniczego Warszawy (SPW) koncentrujących tereny o wysokich walorach przyrodniczych, w większości objętych prawnymi formami ochrony przyrody, znajduje się przeważająca część korytarza Wisły i część korytarza



Rycina 5.12. System korytarza wymiany powietrza na tle użytkowania i pokrycia terenu w 2006 roku

Opracowanie własne na podstawie *Corine Land Cover 2006 (European Environment Agency 2007)* i Pawlak, Teisseyre-Sierpińska (2006).

podskarpowego. Pozostałe korytarze nawiązują do terenów określonych w *Studium* jako wspomagające SPW i włączają tylko małe kompleksy zieleni, co nie sprzyja ochronie tych korytarzy przed zabudową.

Optymalnie zaprojektowany system wentylacji miasta powinien zachować cały układ jako tereny zieleni objęte zakazem zabudowy, co w obecnym systemie planowania przestrzennego i presji deweloperów wydaje się bardzo mało realne. Innym alternatywnym rozwiązaniem może być pogodzenie rozwoju funkcji mieszkaniowej z zabezpieczeniem funkcji klimatycznej układu wentylacji miasta poprzez jednoznaczne ustalenia wiążące w zakresie zabudowy. W przypadku braku możliwości wprowadzenia zakazu zabudowy w takich strukturach dopuścić można wyłącznie parterowe lub maksymalnie 1,5-kondygnacyjne budownictwo jednorodzinne, aczkolwiek z obligatoryjnymi ustaleniami wiążącymi w zakresie powierzchni biologicznie czynnej (minimum 70%), usytuowania budynków (orientowanie ich dłuższymi osiami równoległe do osi korytarzy nawietrzających), konieczności wyposażenia w siećową infrastrukturę grzewczą. Wskazane byłoby także pozostawienie niezabudowanych pasm w części osiowej korytarzy wymiany powietrza. W odniesieniu do obecnie istniejącej zabudowy należy przeciwdziałać ubytkowi powierzchni biologicznie czynnej w ciągach nawietrzających i ich otoczeniu na rzecz zwiększania udziału w nich terenów zieleni miejskiej. W sytuacji występowania przegród architektonicznych należałoby w miarę możliwości usuwać obiekty utrudniające przepływ powietrza. Konieczne jest także sukcesywne eliminowanie istniejących źródeł emisji zanieczyszczeń w obrębie korytarzy wymiany powietrza, w ich sąsiedztwie i w strefach zasilających, a także wprowadzenie zakazu lokalizowania nowych źródeł, w tym lokalnych kotłowni na rzecz wspomnianych już rozwiązań systemowych.

Sprawność funkcjonowania systemu wentylacji warunkowana jest właściwym zaprojektowaniem układu korytarzy wymiany powietrza, aby zapewnić jego funkcjonowanie przy wietrze ze wszystkich kierunków, a zwłaszcza z przeważających, jak i odpowiednim zagospodarowaniem i użytkowaniem terenów w obrębie wyznaczonego systemu wentylacji miasta oraz terenów zasilających ten system. Już w 2006 r. większość korytarzy, oprócz korytarza Wisły i podskarpowego, charakteryzowało duże zainwestowanie, a obecne procesy przestrzenne prowadzą do dalszego ich zabudowywania, tworzenia barier poprzecznych i zmniejszania szerokości.

Optymalnie zaprojektowany dla Warszawy system wymiany i regeneracji powietrza w wyniku żywiołowej urbanizacji przestrzeni został znacznie uszczuplony. Wynika to z faktu, że dotychczas obowiązujące *Studium* (SUKZPMW 2010) nie precyzuje jednoznacznie ustaleń zagospodarowania przestrzennego, a przede wszystkim brak wskazań odnośnie zabezpieczenia użytkowania przyrodniczego w obrębie korytarzy wymiany powietrza. Obowiązujące *Studium* nie ogranicza jednoznacznie możliwości rozwoju zabudowy w korytarzach nawietrzających.

Ważną strukturą wzmacniającą system klimatyczny Warszawy powinien być tzw. Zielony Pierścień Warszawy. Pierścień taki zapewni ochronę obszarom źródłowym napływu czystego i schłodzonego powietrza nad miasto, głównie wzdłuż korytarzy napływu powietrza. Funkcja ta może być zachowana pod warunkiem, że struktura taka będzie obligatoryjnie wyznaczana w Planie Obszaru Metropolitalnego Warszawy i uwzględniana w studiach uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego gmin położonych w okolicach Warszawy oraz miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego (MPZP). Zielony pierścień powinien charakteryzować się dużą lesistością i zachowaniem kompleksów łąkowych, zwłaszcza na głównych kierunkach napływu mas powietrza nad miasto. Wyznaczenie takiej struktury przewiduje koncepcja Przestrzennego Zagospodarowania Kraju do 2030 r., jak i projekt Planu Zagospodarowania Przestrzennego Obszaru Metropolitalnego Warszawy. W porównaniu z innymi stolicami europejskimi Warszawa zajmuje uprzywilejowaną pozycję, mając duże kompleksy leśne w obrębie miasta (część lasów Mazowieckiego Parku Krajobrazowego, Las Kabacki, Las Bielański, Las Młociński, Park Leśny Bemowo), jak i w swoim najbliższym otoczeniu (Puszcza Kampinoska, część lasów Mazowieckiego Parku Krajobrazowego, Lasy Chojnowskie, Lasy Otwockie, Lasy Legionowskie i Pomiechowskie). Wymienione lasy wraz z dużymi kompleksami łąk i innych terenów otwartych w podwarszawskim pasmie doliny Wisły stanowią główne obszary zasilania korytarzy napływu powietrza, tworzą ważne struktury przyrodnicze w sieci ekologicznej obszaru metropolitalnego Warszawy, Mazowsza i kraju, a niektóre także w europejskiej sieci ekologicznej Natura 2000 (Degórska 2012). Wprowadzenie obligatoryjności wyznaczania zielonych pierścieni wokół dużych miast oraz systemu wentylacji miasta wraz z jednoznacznymi ustaleniami wiążącymi w zakresie ich zagospodarowania stanowić może ważny kierunek polityki przestrzennej w procesie adaptacji dużych miast do zmian klimatu. Kompleksowe podejście do funkcjonowania środowiska pozwala na połączenie ochrony przyrody z systemem wentylacji miasta i z układem terenów zieleni miejskiej, leśnej i łąkowej, ze szczególnym uwzględnieniem niezabudowanych pasm dolin rzecznych. Przykład takiego podejścia zawarto m.in. w opracowaniu wykonanym dla Krakowa (Błażejczyk, Degórska 2013), w którym dodatkowo zintegrowano najważniejsze struktury układu wentylacji miasta z projektem sieci ekologicznej (Degórska 2013).

W obszarach zasilania głównych korytarzy napływu powietrza, zwłaszcza położonych na przeważających kierunkach wiatrów, szczególnie pożądane będą duże kompleksy leśne lub łąkowe, a w przypadku występowania terenów zabudowanych, wyposażenie takich obszarów w siećową infrastrukturę grzewczą oraz eliminowanie istniejących i niedopuszczanie do powstawania nowych źródeł emisji.

Polityka przestrzenna miasta w odniesieniu do systemu wymiany powietrza, określona w *Studium*, nie chroni większości korytarzy przed zabudową, co

w przyszłości przyczyni się do znacznego obniżenia ich efektywności przewietrzania. Stwierdzenie to dotyczy części korytarzy napływu powietrza.

Korytarz Wisły. Główny korytarz przewietrzający Warszawę stanowi dolina Wisły. Przepływają nią masy powietrza przede wszystkim z kierunku północnego i północno-zachodniego oraz południowo-wschodniego. W części środkowej i północnej korytarz ten nawiązuje do międzywala Wisły, gdzie przewiduje się zachowanie zieleni nadrzecznej. Od Łuku Siekierkowskiego na południowy wschód znacznie rozszerza się, włączając tereny przeznaczone w *Studium* kierunkowo pod zabudowę mieszkaniową, głównie o przewadze zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej – do 12 m wysokości. Miejscami *Studium* dopuszcza zabudowę mieszkaniową wielorodzinną lub usługową do wysokości 20 m. Nowa zabudowa mieszkaniowa jednorodzinna lokalizowana jest często szeregowo (głównie w dzielnicy Wawer), prostopadle do osi doliny, a zatem stanowi czynnik znacznie ograniczający swobodny przepływ powietrza. W układzie korytarza Wisły, oprócz pasma nadwiślańskiego, ważną rolę odgrywa też pasmo zieleni nawiązujące do ciągu starorzecza z Jeziorkiem Czerniakowskim, Jeziorkiem Wilanowskim i Jeziorkiem Powsinkowskim. Korytarz Wisły jest bardzo dobrze chroniony różnymi formami ochrony przyrody (m.in. obszar Natura 2000 Dolina Środkowej Wisły, rezerwat przyrody: Jeziorko Czerniakowskie, Morysin, Wyspy Zawadowskie, Ławice Kiełpińskie, zespół przyrodniczo-krajobrazowy Zakole Wawerskie. Do korytarza przylegają: Las Bielański (rezerwat przyrody i obszar Natura 2000) i Las Młociński (park leśny). Większość korytarza Wisły leży w granicach Warszawskiego Obszaru Chronionego Krajobrazu.

Zarówno w północnej, jak i południowej części korytarza znajdują się duże źródła emisji zanieczyszczeń powietrza i ciepła antropogenicznego – elektrociepłownie: Żerań i Siekierki. Stanowią one wysokie źródła emisji, zatem zanieczyszczenia zazwyczaj ulegają rozproszaniu bądź zostają przetransportowane poza obszar opracowania. Niemniej przy pogodzie inwersyjnej należy się liczyć z osiadaniami zanieczyszczeń w korytarzu Wisły. Dodatkowo, technologiczna emisja ciepła sprawia, że w sąsiedztwie tych obiektów panuje podwyższona temperatura powietrza.

Główną strefę zasilającą ten korytarz w chłodniejsze powietrze stanowią: Puszcza Kampinoska (park narodowy, obszar Natura 2000), tereny otwarte w dolinie Wisły (obszar Natura 2000) oraz Lasy Chotomowskie i inne kompleksy leśne tego rejonu. Wymienione tereny wchodzi w skład Warszawskiego Obszaru Chronionego Krajobrazu. Z uwagi na dopuszczoną przez *Studium* zabudowę i zwiększającą się presję zabudowy, korytarz ten w przyszłości może zostać ograniczony głównie do międzywala Wisły i pasma wilanowskiego.

Korytarz podskarpowy obejmuje południowe pasmo skarpy warszawskiej i obszar podskarpowy. Jego funkcja klimatyczna polega przede wszystkim na odprowadzeniu zanieczyszczonego powietrza spływającego ze zurbanizowanych terenów lewobrzeżnej Warszawy. Niekorzystne warunki bioklimatyczne panują głównie

w strefie podskarpia. *Studium* obejmuje terenami zieleni tylko około 1/5 korytarza, a zatem jego zachowanie w długiej perspektywie może być zagrożone. Obszarem zasilania tego korytarza jest częściowo Las Kabacki (rezerwat przyrody), a głównie położone w niewielkiej odległości Lasy Chojnowskie chronione jako park krajobrazowy. W jego obrębie znajduje się Las Natoliński, obszar Natura 2000, rezerwat przyrody Skarpa Ursynowska oraz fragment rezerwatu przyrody Las Kabacki.

Korytarz mokotowski przebiega na linii dość częstych wiatrów, od lotniska na Okęciu do strefy zabudowy śródmiejskiej. Pozytywną stroną tego korytarza jest występowanie dużego terenu otwartego pokrytego głównie roślinnością trawiastą, związanego z lotniskiem. Obszar zasilania stanowią natomiast Lasy Chojnowskie i duże kompleksy łąkowe związane z doliną Raszynki. *Studium* przewiduje zachowanie tylko niewielkich terenów zieleni urządzonej, głównie w jego końcowej części wchodzącej w strefę śródmieścia, dopuszczając jednocześnie rozwój zabudowy wielorodzinnej i usługowej, która w środkowej części korytarza dochodzić może do 30 m wysokości. Dalsze istnienie tego korytarza jest dramatycznie zagrożone m.in. przez osiedla Eko-Park i Marina-Wyględów, a także presję nowej zabudowy mieszkaniowej i wielofunkcyjnej (m.in. Fort Mokotów). Dodać należy, że wiele wysokich budynków zlokalizowano poprzecznie do przebiegu osi tego korytarza. Sprawność korytarza mokotowskiego obniżyć będzie urbanizujący się obszar Raszyn–Rybie–Dawidy, stanowiący dotychczasowy obszar zasilania z kierunku południowego.

Korytarz Al. Jeruzolimskich charakteryzuje korzystne położenie na linii częstych wiatrów zachodnich. Jego funkcjonowanie jest jednak zagrożone przez wprowadzanie wielorodzinnej i wielofunkcyjnej wysokiej zabudowy oraz zabudowy jednorodzinnej. *Studium* praktycznie nie przewiduje terenów zieleni w obrębie tego korytarza. Jego funkcjonowanie jest bardzo ograniczone, a zjawisko kongestii w Al. Jeruzolimskich sprawia, że można go klasyfikować jako tzw. korytarz dymny, wprowadzający do śródmieścia Warszawy zanieczyszczenia komunikacyjne, bez możliwości regeneracji powietrza. Pozbawiony jest także efektywnej strefy zasilania.

Korytarz kolejowy zachodni mimo położenia na linii głównego kierunku wiatru (W–E) i korzystnych warunków przewietrzania, nie ma kontaktu z terenami zielonymi w strefie zewnętrznej i całkowicie jest pozbawiony terenów zieleni, w związku z infrastrukturą kolejową. Sprzedaż gruntów kolejowych w sąsiedztwie torów może także ograniczyć jego powierzchnię przez zabudowę, która już zaczęła wkraczać w jego części zachodniej.

Korytarz bemowski stanowi bardzo cenny element systemu nawietrzania z uwagi na usytuowanie na linii częstego kierunku wiatru (NW–SE), dzięki czemu wprowadza do strefy zurbanizowanej czyste i stosunkowo chłodne powietrze znad Puszczy Kampinoskiej, będącej jego głównym obszarem zasilania. Lasy kampinoskie podlegają ochronie w formie parku narodowego, będącego jednocześnie obszarem Natura 2000. Warszawski fragment obszaru zasilania korytarza stanowi

Park Leśny Bemowo. W *Studium* przewidziano jedynie około 1/3 jego powierzchni jako tereny zieleni, pozostałe to głównie teren lotniska Bemowo, a zatem w przewadze roślinność trawiasta, co pozwala na zachowanie jego funkcji nawietrzającej.

Korytarz kolejowy północny związany jest z linią kolejową i trasą komunikacyjną wzdłuż ul. Marywilskiej, które dywnikają masy powietrza z kierunku północnego. Korytarz ten wprowadza czyste i schłodzone powietrze głównie z Lasów Legionowskich. Obecnie jego funkcjonowanie ogranicza nieco zabudowa mieszkaniowa i usługowa przy ul. Marywilskiej. *Studium* zachowuje tylko niewielkie kompleksy leśne w północnej jego części. Zagrożenia dla jakości powietrza stanowią tu zanieczyszczenia komunikacyjne.

Korytarz kolejowy wschodni jest związany z linią kolejową i umożliwia napływ czystego i schłodzonego powietrza z Lasów Rembertowskich i Lasów Otwockich. W jego obrębie większy płat zieleni stanowi rezerwat Olszynka Grochowska oraz rezerwat leśny Kawęczyn. Bezpośrednią strefą zasilania z kierunku południowo-wschodniego są lasy Mazowieckiego Parku Krajobrazowego oraz lasy w okolicach Rembertowa, Wesołej i Sulejówka, wraz ze znajdującym się tam cennym obszarem wodno-błotnym objętym ochroną w formie rezerwatu przyrody (Bagno Jacka) oraz rezerwatem im. Jana III Sobieskiego.

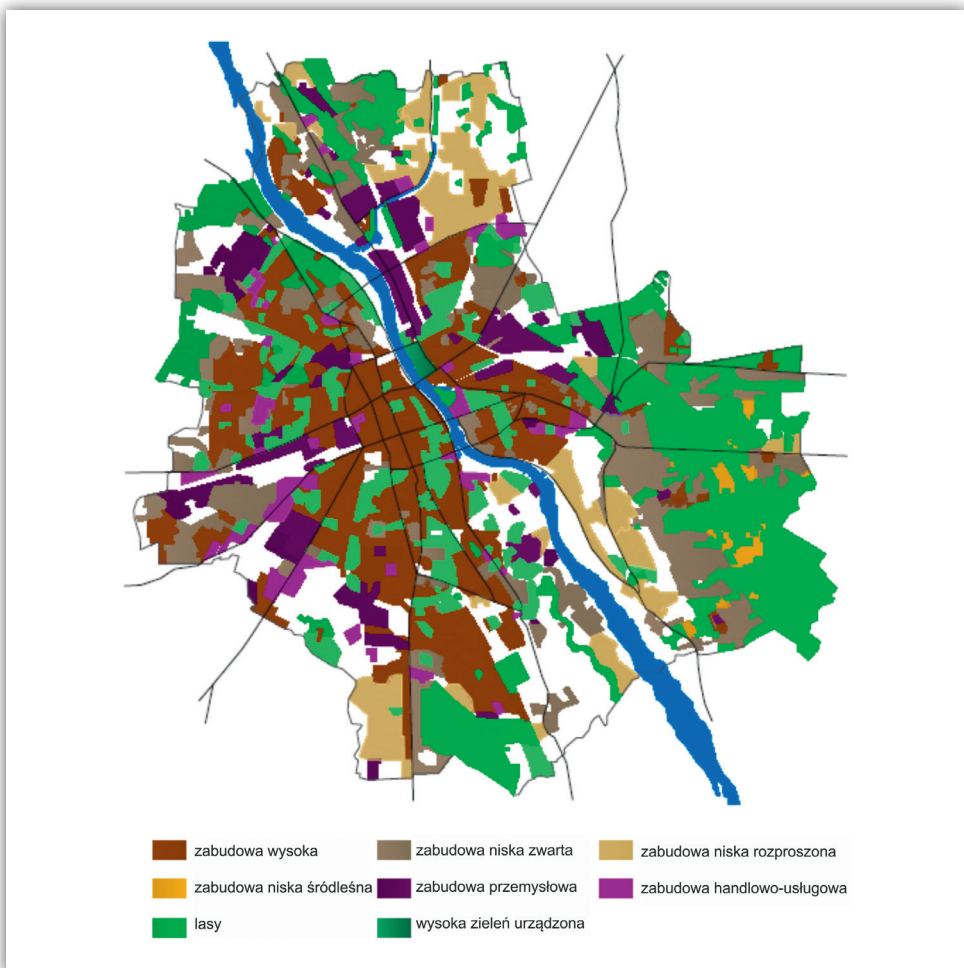
Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że korytarze nawietrzające w obecnych uwarunkowaniach prawnych zostaną w znacznie większym stopniu zabudowane, a korytarze kolejowe zawężone, co ograniczy ich sprawność w zakresie wymiany i regeneracji powietrza. Korytarz Wisły może zostać rozczłonkowany na korytarz nadwiślański, ograniczony do międzywala Wisły i korytarz wilanowski zachowany jako wąskie pasmo z jeziorami Czerniakowskim, Wilanowskim i Powinkowskim, a w scenariuszu bardziej pesymistycznym zagraża mu fragmentacja. Proces żywiołowej urbanizacji obniżający wydajność korytarzy wymiany powietrza i ich stref zasilania doprowadzić może do rozwoju dotychczas sporadycznych epizodów powstawania smogu w strefie śródmiejskiej Warszawy oraz ogólnego zwiększenia zanieczyszczenia powietrza, co w konsekwencji pogorszy warunki arosanitarne. Przewidywane zmiany zagospodarowania przestrzennego będą ograniczać zasilanie centrum miasta stosunkowo chłodnym powietrzem, które częściowo mogłoby łagodzić skutki wpływu wysokiej temperatury powietrza na jakość życia, zmniejszając intensywność i zasięg MWC.

5.5. Układ urbanistyczny

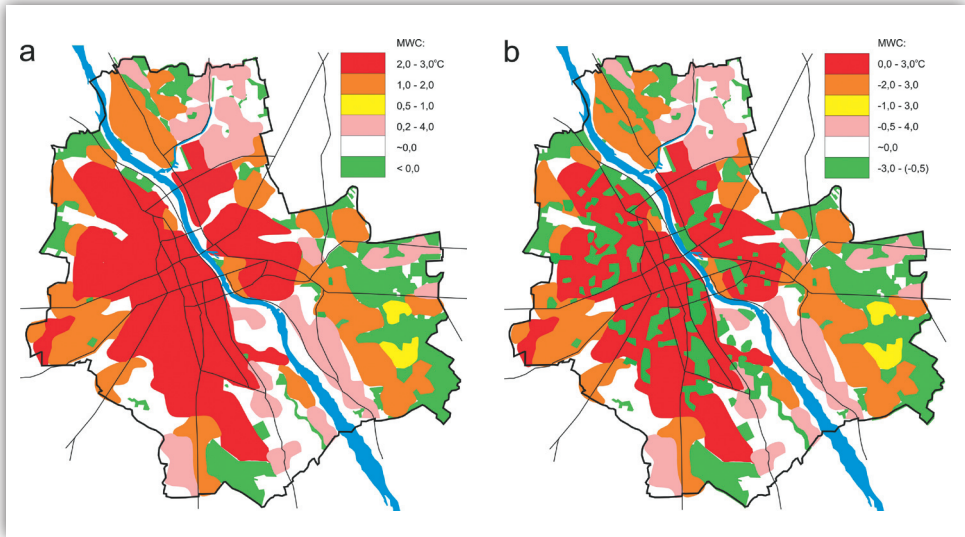
Intensywność i zasięg miejskiej wyspy ciepła zależy od przestrzennego rozmieszczenia różnych form zagospodarowania terenu. Dlatego też, do oceny zjawiska

MWC w nadchodzących latach przeanalizowano strategiczne dokumenty planów rozwojowych Warszawy. Podstawą tych analiz było *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Warszawy*, uchwalone przez Radę Warszawy dnia 7 października 2010 r. (Nr XCII/2689/2010) oraz poprzedzające ten dokument *Opracowanie ekofizjograficzne...* wykonane w 2006 r. (Pawlak, Teisseyre-Sierpińska 2006). W 2013 r. niektóre zapisy *Studium* zostały zmienione Uchwałą Nr LXI/1669/2013 Rady m.st. Warszawy z dnia 11 lipca 2013 roku.

Na podstawie powyższych dokumentów wykonano dwa wyciągi kartograficzne rozmieszczenia tych form zagospodarowania terenu, które mają wpływ na powstanie, intensywność i zasięg przestrzenny miejskiej wyspy ciepła (ryc. 5.13). Stan zagospodarowania terenu dla 2010 r. zaktualizowano na podstawie obrazów



Rycina 5.13. Rozmieszczenie i zasięg wybranych form zagospodarowania terenu, mających wpływ na występowanie miejskiej wyspy ciepła



Rycina 5.14. Rozkład różnych kategorii miejskiej wyspy ciepła w Warszawie przy obecnym zagospodarowaniu terenu (2010); noc (a), dzień (b)

satelitarnych i wizji lokalnych w terenie. W odniesieniu do 2070 r. przyjęto założenie, że do tego czasu zostaną zrealizowane zamierzenia inwestycyjne w zakresie budowy nowych osiedli mieszkaniowych i terenów przemysłowo-usługowych, przewidziane w *Studium*.

Korzystając z syntetycznych wskaźników intensywności MWC, przedstawionych w rozdziale 2.2, wykonano zobrazowanie możliwego zasięgu i intensywności miejskiej wyspy ciepła w Warszawie dla dwóch okresów doby: godzin nocnych i porannych (22:00–8:00) oraz dla godzin okołopołudniowych (10:00–15:00). Rozróżnienia tego dokonano w związku z wyraźnie różną strukturą termiczną miasta nocą i dniem, przedstawioną w rozdziale 4.2. O ile nocą w kształtowaniu miejskiej wyspy ciepła odgrywa rolę przede wszystkim sama obecność zabudowy i sztucznych nawierzchni, o tyle dniem stosunki termiczne są silnie modyfikowane przez zacienienie (drzewami i/lub budynkami) oraz osłabienie lub wzmocnienie prędkości wiatru w kanionach ulicznych.

Wydzielono 6 kategorii obszarów o różnej intensywności miejskiej wyspy ciepła. W godzinach nocnych najsilniejsza MWC, osiągająca średnio 2–3°C występuje wśród wysokiej, zwartej zabudowy w centrum miasta oraz w gęsto zabudowanych osiedlach Żoliborza, Pragi, Woli, Ursusa i Mokotowa. Nieco słabsza MWC (1–2°C) pokrywa się w większości z obszarami zwartej i niskiej zabudowy mieszkaniowej i handlowo-usługowej. Wśród luźnej zabudowy mieszkaniowej Targówka, Wawra, Wilanowa i Wesołej miejska wyspa ciepła ma niewielką intensywność, wynoszącą 0,2–0,4°C. Na większych obszarach niezabudowanych zarówno otoczonych

zabudową, jak i na jej obrzeżach MWC nie występuje. MWC nie występuje także na obszarach leśnych leżących na obrzeżach Warszawy oraz wzdłuż koryta Wisły; temperatura powietrza jest tam nawet niższa niż w terenie pozamiejskim (ryc. 5.14a).

Rozkład miejskiej wyspy ciepła zmienia się w godzinach dziennych. Na obszarach zabudowanych temperatura powietrza może być zarówno wyższa, jak i niższa niż poza miastem. Wartości różnic temperatury maksymalnej (dT_{maks}) są zależne od konkretnej lokalizacji. W miejscach nasłonecznionych i zacisznych temperatura powietrza może być znacznie wyższa niż za miastem, natomiast w miejscach zacienionych, z wymuszonym zwiększonym przepływem powietrza temperatura może być niższa niż na peryferiach. Dużej zmienności przestrzennej należy się spodziewać wśród zabudowy zwartej wysokiej (dT_{maks} od 0 do $+3^{\circ}C$). Wśród zabudowy niskiej dT_{maks} może się zmieniać lokalnie od -2 do $+4^{\circ}C$. W ciągu dnia ważną rolę w kształtowaniu warunków termicznych w mieście odgrywają tereny zieleni wysokiej (parki, lasy, większe skwery). W ich obrębie temperatura powietrza może być nawet o $3-4^{\circ}C$ niższa niż wśród sąsiadującej zabudowy. Wyższa jest tam także wilgotność powietrza. Stwarza to bardzo dobre warunki do nawet krótkotrwałego zregenerowania obciążonego układu termoregulacyjnego i krwionośnego, zmuszonego wśród zabudowy do intensywnych procesów dostosowawczych. Ma to szczególne znaczenie dla osób starszych i dzieci, których organizmy są w większym stopniu obciążane reakcjami termoregulacyjnymi niż organizmy osób w sile wieku (ryc. 5.14b).

5.5.1. Prognozowane zmiany urbanistyczne

Intensywny proces urbanizacji zwiększa wrażliwość miast na negatywne skutki MWC. Zabudowywane są bowiem tereny zieleni, również w obrębie korytarzy napowietrzających strefę zabudowy miejskiej, przez co ograniczane są naturalne możliwości wentylacji i schładzania miasta.

Dogęszczanie zabudowy jest zjawiskiem nieuniknionym. Dlatego bardzo istotne dla rozwoju przestrzennego każdego miasta jest prawidłowe planowanie struktur przestrzennych, w tym także terenów trwale utrzymywanych jako tereny zielone, którego celem nadrzędnym będzie dobra wentylacja miasta i wysoka jakość warunków życia mieszkańców.

Dokumenty strategiczne opracowane dla Warszawy, zarówno *Studium* (SUKZPMW 2010), jak i *Strategia rozwoju* (2005), zakładają rozwój przestrzeni zurbanizowanych. Warszawa dysponuje w swych granicach administracyjnych dużą ilością niezabudowanych przestrzeni oraz terenów wymagających przekształceń, rehabilitacji i zmiany funkcji. Warszawa może zaplanować dobrą dostępność mieszkańców do zielonej infrastruktury pod warunkiem, że takie obszary będą wskazane w studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego miasta, a następnie chronione miejscowymi planami zagospodarowania przestrzennego.

Tabela 5.5. Wyniki szacunku liczby ludności według trzech wariantów dla Warszawy w latach 2010–2035 (liczba ogółem w tys. z uwzględnieniem osób niezameldowanych)

Wariant	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Stagnacyjny	1 966	1 986	2 006	2 012	2 001	1 981
Koncentracyjny	1 970	2 002	2 045	2 080	2 097	2 104
Dekoncentracyjny	1 962	1 971	1 964	1 925	1 872	1 818

Źródło: Śleszyński (2012).

W dłuższym horyzoncie czasowym zakłada się stosunkowo słaby rozwój demograficzny (tab. 5.5) przy dalszym rozwoju budownictwa mieszkaniowego, z dużym udziałem zabudowy jednorodzinnej.

Według analizy chłonności terenów pod względem różnego rodzaju kategorii zabudowy, w granicach administracyjnych jest dość miejsca na dodatkowe zasiedlenie 1,4 mln osób (tab. 5.6), czyli prawie podwojenia liczby mieszkańców (Buczek, Śleszyński 2008). Analiza rozwoju demograficznego Warszawy do 2035 r. (tab. 5.5) nie wskazuje zatem na tak duży popyt na grunty inwestycyjne, a głównie mieszkaniowe, w stosunku do przewidzianych w *Studium* (SUKZPMW 2010).

Zgodnie z polityką przestrzenną miasta wyrażoną w *Studium* (SUKZPMW 2010) najwięcej nowych terenów inwestycyjnych, głównie mieszkaniowych, oferują Białołęka i Wawer – dzielnice prawobrzeżnej Warszawy, zaś w części lewobrzeżnej – Wilanów, Ursynów, Wola, Mokotów i Włochy. Wiąże się z tym potrzeba rozwoju terenów zieleni w tym parków i zieleni osiedlowej. Dotyczy to w szczególności dzielnic: Włochy, Wola, Mokotów i Wilanów, a z niewymienionych dzielnic Ursus – z związku z dużym niedoinwestowaniem tych dzielnic w zakresie zielonej infrastruktury, także w aspekcie przyszłego rozwoju miasta. W dzielnicy Wawer wskazuje się na potrzebę skutecznych rozwiązań ukierunkowanych na ochronę gruntów leśnych przed zabudową i lepsze dostosowanie terenów leśnych do funkcji rekreacyjnej, co jest szczególnie ważne w związku z brakiem publicznych terenów zieleni urządzonej w tej dzielnicy. To właśnie w tych dzielnicach w perspektywie najbliższych 50 lat ubędzie najwięcej terenów otwartych, jakkolwiek będą to głównie grunty rolne, i tylko częściowo zadrzewione i zakrzaczone.

Na podstawie aktualnie obowiązującego *Studium* (SUKZPMW 2010) wykonano mapę rozmieszczenia form zagospodarowania terenu w 2070 r., które mają wpływ na powstanie, zasięg przestrzenny i intensywność miejskiej wyspy ciepła (ryc. 5.15). Przyjęto przy tym założenie, że do tego roku zostaną zrealizowane zamierzenia inwestycyjne w zakresie budowy nowych osiedli mieszkaniowych i terenów przemysłowo-usługowych.

Tabela 5.6. Chłonność inwestycyjna w dzielnicach Warszawy według analizy chłonności terenu na podstawie kierunków zagospodarowania przestrzennego

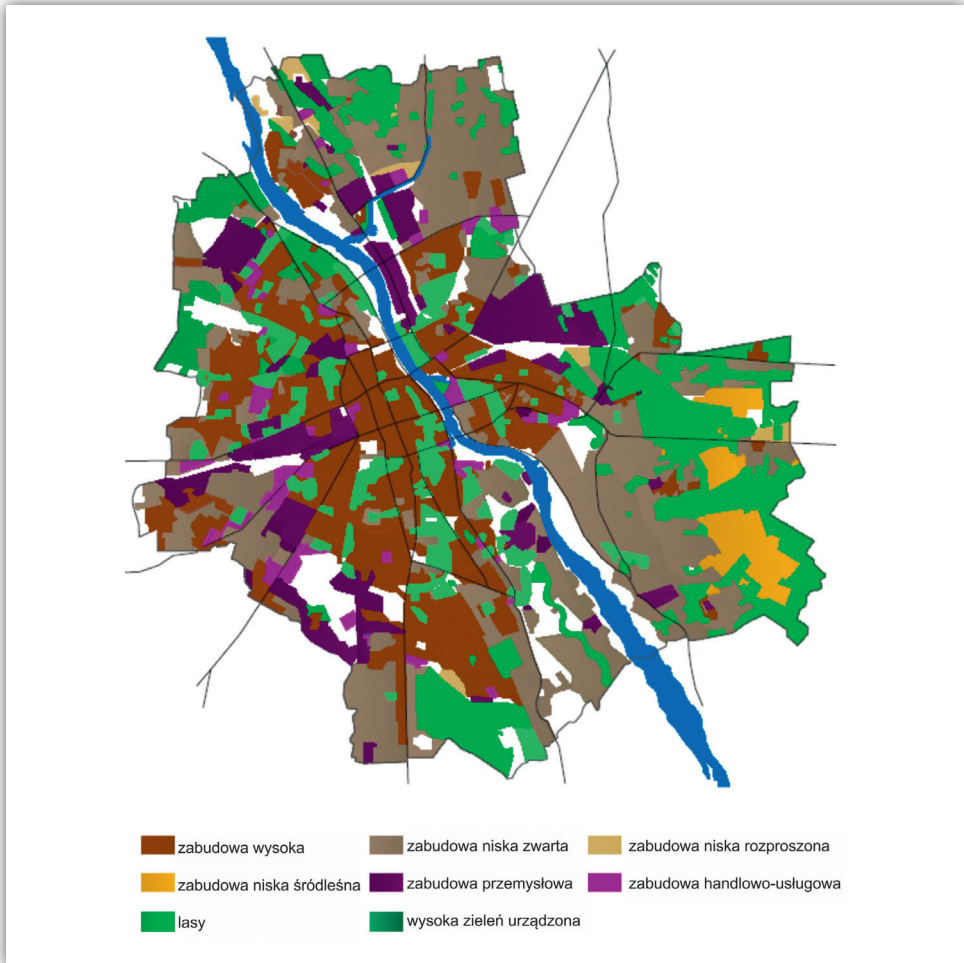
Dzielnica	Istniejąca powierzchnia użytkowa		Powierzchnia zabudowy brutto		Dopuszczalna powierzchnia zabudowy			Chłonność ⁴⁾
	tys. m ²	m ² na osobę ¹⁾	tys. m ²	m ² na osobę ¹⁾	tys. m ²	tys. osób ²⁾	% ³⁾	tys. osób
Bemowo	3 004	27,1	3 604	32,5	7 475	150	40,8	77
Białołęka	2 770	32,2	3 324	38,7	15 323	306	14,2	240
Bielany	3 139	23,4	3 766	28,1	7 224	144	47,3	69
Mokotów	6 500	28,8	7 800	34,5	12 840	257	50,1	101
Ochota	2 242	25,0	2 690	30,0	3 910	78	60,2	24
Praga-Południe	4 535	24,8	5 442	29,7	9 572	191	50,2	83
Praga-Północ	1 462	20,3	1 755	24,3	3 494	70	46,0	35
Rembertów	686	29,6	823	35,6	2 482	50	23,7	33
Śródmieście	3 639	28,2	4 367	33,8	7 005	140	55,9	53
Targówek	2 767	22,5	3 320	27,0	5 831	117	50,9	50
Ursus	1 398	28,2	1 678	33,9	3 975	79	30,7	46
Ursynów	4 585	31,0	5 502	37,3	10 660	213	38,2	103
Wawer	2 486	36,1	2 984	43,4	9 958	199	23,5	139
Wesoła	944	42,3	1 133	50,8	2 583	52	27,5	29
Wilanów	1 254	70,5	1 505	84,5	6 058	121	21,2	91
Włochy	1 208	30,5	1 450	36,6	5 840	117	20,9	88
Wola	3 240	23,4	3 887	28,1	8 906	178	42,7	100
Żoliborz	1 399	28,9	1 679	34,6	3 438	69	43,5	35
Razem	47 258	27,6	56 710	33,2	126 574	2 531	44,8	1 397

1) liczba ludności zarejestrowanej w 2008 r.; 2) dopuszczalna powierzchnia zabudowy brutto podzielona przez 50 m² na osobę; 3) udział powierzchni zabudowy mieszkaniowej brutto istniejącej w stosunku do dopuszczalnej; 4) różnica powierzchni zabudowy mieszkaniowej brutto dopuszczalnej i istniejącej, podzielona przez 50 m² na osobę.
Źródło: Buczek, Śleszyński (2008).

Porównując zasięgi poszczególnych form zagospodarowania terenu w Warszawie, największe zmiany widać na obszarze dzielnic: Targówek, Wawer, Wilanów i Mokotów. Większość terenów wolnych od zabudowy lub zajętych pod zabudowę niską luźną jest w planach rozwoju miasta przeznaczona pod zabudowę niską zwartą. Wyraźnemu zwiększeniu ulegnie także odsetek terenów z zabudową przemysłową oraz śródleśną. Zestawienie ilościowe aktualnych i prognozowanych powierzchni różnych typów zagospodarowania terenu przedstawia tabela 5.7.

Wykorzystując syntetyczne wskaźniki intensywności MWC, wykonano wizualizację możliwego zasięgu i intensywności miejskiej wyspy ciepła w Warszawie w horyzoncie czasowym 2070 roku. Wykonano ją dla dwóch okresów doby: godzin nocnych i porannych oraz dla godzin okołopołudniowych.

W przypadku zrealizowania do 2070 r. prognozowanych inwestycji budowlanych rozkład miejskiej wyspy w Warszawie ciepła zmieni się bardzo wyraźnie. Zwiększeniu ulegną nie tylko obszary o najbardziej intensywnej MWC (2–3°C),



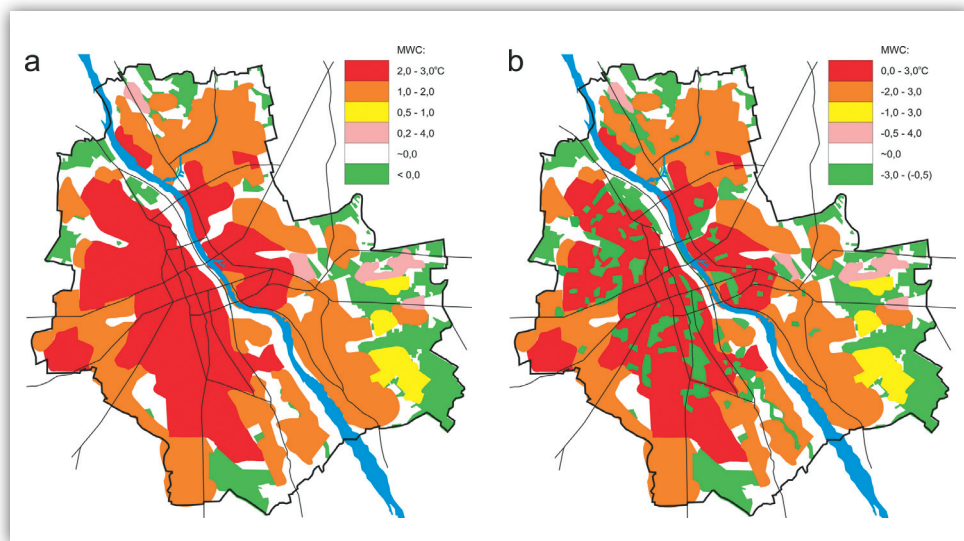
Rycina 5.15. Rozmieszczenie i zasięg wybranych form zagospodarowania terenu, mających wpływ na występowanie miejskiej wyspy ciepła – prognoza dla 2070 roku

ale także te, gdzie nie jest ona tak silna ($1-2^{\circ}\text{C}$). Ograniczone zostaną tereny, gdzie MWC nie występuje oraz obszary leśne, gdzie temperatura powietrza nocą jest niższa niż poza miastem (ryc. 5.16a).

Jak już napisano wyżej, w kształtowaniu warunków termicznych wewnątrz miasta w godzinach dziennych bardzo ważną rolę odgrywają parki i zadrzewione skwery oraz zieleń ogrodowa. Dlatego też niepokojący jest brak tych form zagospodarowania terenu na obszarach przeznaczonych pod zwartą zabudowę niską (Targówek, Wawer, Wilanów – ryc. 5.16b), których zasięg ma ulec znacznemu powiększeniu. Brak ten należy bezwzględnie wypełnić na etapie ustalania szczegółowych planów zagospodarowania tych terenów.

Tabela 5.7. Odsetek terenów zajętych przez różne typy zagospodarowania terenu w Warszawie w 2010 roku (stan obecny) i 2070 roku (prognoza)

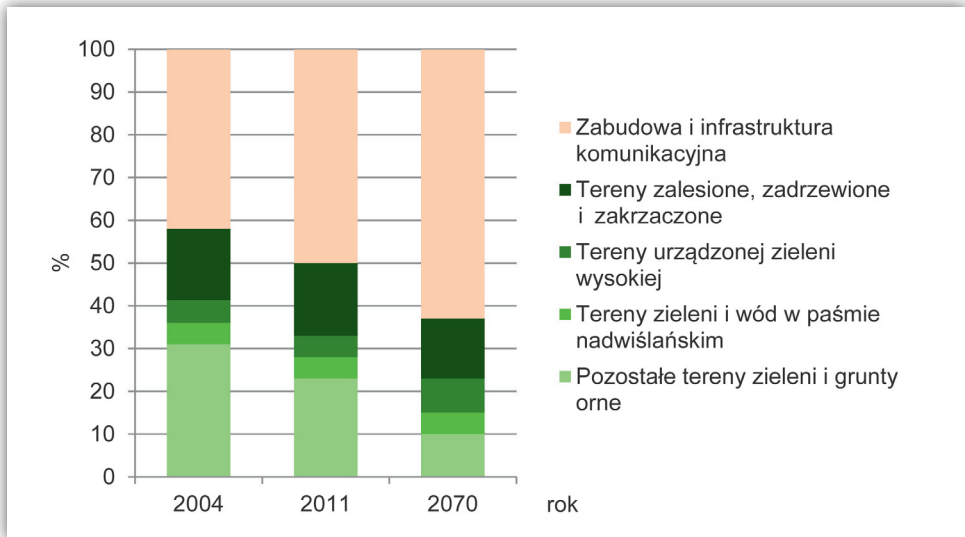
Typ zagospodarowania terenu	Rok 2010	Rok 2070
Zabudowa wysoka	19,6	20,1
Zabudowa niska zwarta	15,1	30,5
Zabudowa niska rozproszona	7,5	1,1
Zabudowa śródleśna	0,9	2,3
Zabudowa przemysłowa	6,4	9,8
Zabudowa handlowo-usługowa	2,2	2,2
Lasy	19,7	13,6
Zieleń wysoka urządzona	7,0	6,6
Wisła	2,9	2,9
Tereny otwarte	18,8	10,9



Rycina 5.16. Rozkład różnych kategorii miejskiej wyspy ciepła w Warszawie przy prognozowanym na 2070 rok zagospodarowaniu terenu; noc (a), dzień (b)

5.5.2. Prognozowane zmiany zielonej infrastruktury Warszawy

Wśród najmniej korzystnych szacowanych zmian dla 2070 r. dotyczących zielonej infrastruktury Warszawy, przewidywać można ubytek gruntów leśnych, zadrzewionych i zakrzewionych z 20 do około 14% w wariacie ubytku głównie terenów zadrzewionych i zakrzaczonych, a także wylesianie, które dotknie część lasów nawet do 12–13%. Wskazuje na to struktura własności lasów warszawskich (bez zadrzewień i zakrzewień),



Rycina 5.17. Zmiany powierzchni zielonej infrastruktury w latach 2004–2011 i jej prognoza na 2070 rok

Opracowanie własne na podstawie *Ewidencji gruntów i budynków 2011* oraz bazy *Corine Land Cover 2006* (European Environment Agency 2007).

w której z 7100 ha aż 3200 ha stanowią lasy prywatne. Przewidywać można, że bez zmiany uwarunkowań prawnych, zadrzewione tereny prywatne w pierwszej kolejności wypadną z użytkowania leśnego, jakkolwiek presja budownictwa mieszkaniowego może także uszczuplić kompleksy leśne. Obecnie zabudowa coraz częściej wkracza nawet w obręb Mazowieckiego Parku Krajobrazowego. Częściowe straty powierzchni leśnej wiązać się będą z planowaną budową autostrady, która według projektowanego przebiegu przetnie kompleksy leśne Mazowieckiego Parku Krajobrazowego.

Znacząco zmniejszy się udział zielonych terenów otwartych, zapewniających obecnie korzystne warunki napływu czystego powietrza do centrum Warszawy. Przewiduje się, że poza strefą zabudowy o charakterze śródmiejskim procesy urbanizacji obejmą głównie obecne grunty rolne. Szacować można, że udział terenów otwartych rozpatrywanych łącznie z gruntami rolnymi ulegnie znacznemu ograniczeniu z 50 do około 35–37% (ryc. 5.17)

W wyniku prowadzonej polityki przestrzennej miasta dojdzie do niewielkiego ubytku zieleni nad Wisłą, co może się wiązać z kształtowaniem bulwarów, przystani rzecznych i innych usług związanych z ożywieniem nabrzeża. Zgodnie z zapisami *Strategii rozwoju* (2005) główne zmiany dotyczyć powinny jakości przestrzeni w zakresie kształtowania parku rzeczno (park wiślany), łączącego funkcje rekreacyjne z ochroną przyrody ożywionej i ochroną krajobrazu oraz działaniem najważniejszego dla Warszawy korytarza przepływu powietrza.

Warszawa nie posiada wiążącego dokumentu, np. programu rozwoju zieleni miejskiej, dlatego też przewidywanie dalszych zmian w tym zakresie jest niezmiernie trudne. Ponadto nieuregulowany status prawny wielu terenów zieleni i brak ustalonych granic stanowią dodatkowe utrudnienia dla precyzowania dalszej formy zagospodarowania i ochrony terenu przed zabudową.

Uwzględniając zmiany zachodzące w ostatnich kilkunastu latach (Degórska 2008) w obrębie takich form jak zieleni parkowa, zieleńce, skwery, zieleni uliczna i osiedlowa, można przypuszczać, że nadal ubywać będzie zieleni osiedlowej w zurbanizowanym rdzeniu Warszawy, może także dochodzić do niewielkiego zmniejszenia powierzchni parków, zieleńców i zieleni przyulicznej, natomiast na terenie dzielnic objętych bardzo intensywną zabudową wielorodzinną przewiduje się znaczne zwiększenie zieleni parkowej, skwerów i zieleńców. Do 2070 r. przewiduje się blisko dwukrotny wzrost takich obszarów i znacznie bardziej równomierne nasycenie dzielnic wymienionymi formami zieleni miejskiej.

6. Wpływ miasta na warunki odczuwalne

- ▷ Miejska wyspa ciepła jest zjawiskiem jednoznacznie negatywnym latem, zwłaszcza w kontekście wpływu na warunki odczuwane przez człowieka. Zimą zaś MWC można rozpatrywać jako zjawisko pozytywne z punktu widzenia gospodarki.
- ▷ Do oceny wpływu całego miasta oraz różnych typów zabudowy na klimat odczuwalny wykorzystano wskaźnik UTCI. Poszczególne typy zabudowy i formy użytkowania terenu w Warszawie silnie oddziałują na możliwe obciążenia cieplne organizmu.
- ▷ W czasie dni bezchmurnych i z małym zachmurzeniem zarówno w nocy, jak i w ciągu dnia najwyższe wartości UTCI obserwowano w kanionie ulicznym. W ciągu dnia UTCI osiągało tam 36°C (silny stres ciepła), a niewiele niższe wartości notowano na stacji podmiejskiej. Z kolei na zadrzewionym skwerze oraz w zadrzewionej dzielnicy willowej wartości UTCI dniem osiągały 29–31°C (co wskazuje na umiarkowany stres ciepła).
- ▷ Zieleń miejska, zwłaszcza wysoka, silnie oddziałuje na warunki odczuwalne: łagodzi warunki termiczne, podwyższa wilgotność, generuje lokalną cyrkulację powietrza, ułatwia oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń, poprawia warunki klimatu akustycznego.
- ▷ Zmiany klimatu będą miały różnorodny wpływ na warunki bioklimatyczne w Warszawie: latem wzrośnie częstość sytuacji pogodowych silnie obciążających termicznie organizm, zimą z kolei warunki termiczne będą wyraźnie łagodniejsze niż obecnie. Zmiany te znajdą odzwierciedlenie w stanie zdrowia mieszkańców.

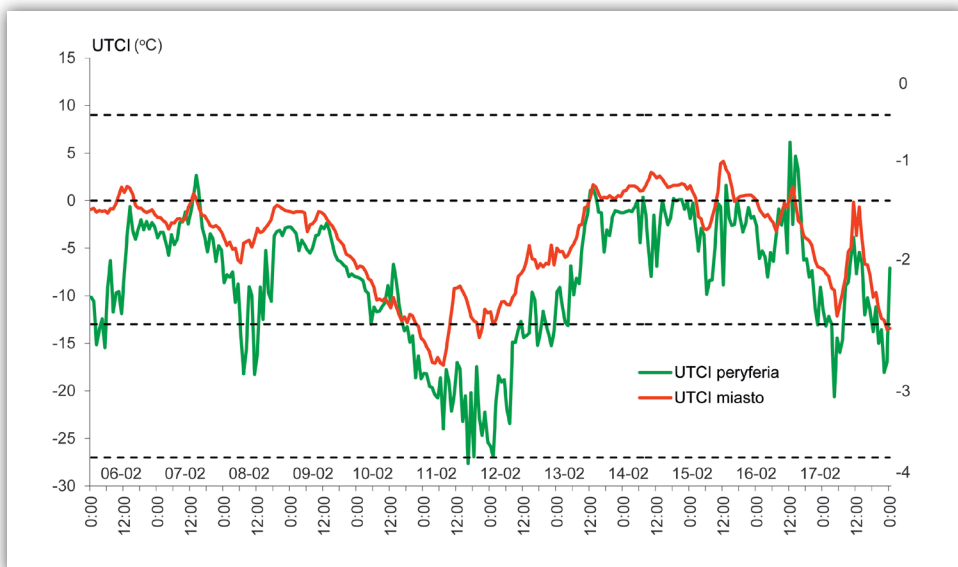
Miejska wyspa ciepła nie jest szczególnie uciążliwym zjawiskiem z punktu widzenia gospodarki czy ekonomii, a wzrost temperatury w mieście w okresie zimowym jest cechą pożądaną i korzystną. Jednakże MWC staje się zjawiskiem jednoznacznie negatywnym latem, zwłaszcza w kontekście wpływu na warunki odczuwane przez człowieka. Zmniejszenie wychłodzenia nocnego w mieście, zwłaszcza w coraz częstszych okresach pogody upalnej, prowadzi do wielu niebezpiecznych dla organizmu

człowieka sytuacji, opisanych w rozdziałach 2.3 oraz 7. Dlatego też istotna jest analiza zmienności czasowej nie tylko temperatury powietrza, ale także warunków biotermicznych, które określono poprzez uniwersalny wskaźnik obciążeń cieplnych UTCI, opisany w rozdziale 2.3.

6.1. Zmienność dobowa i sezonowa

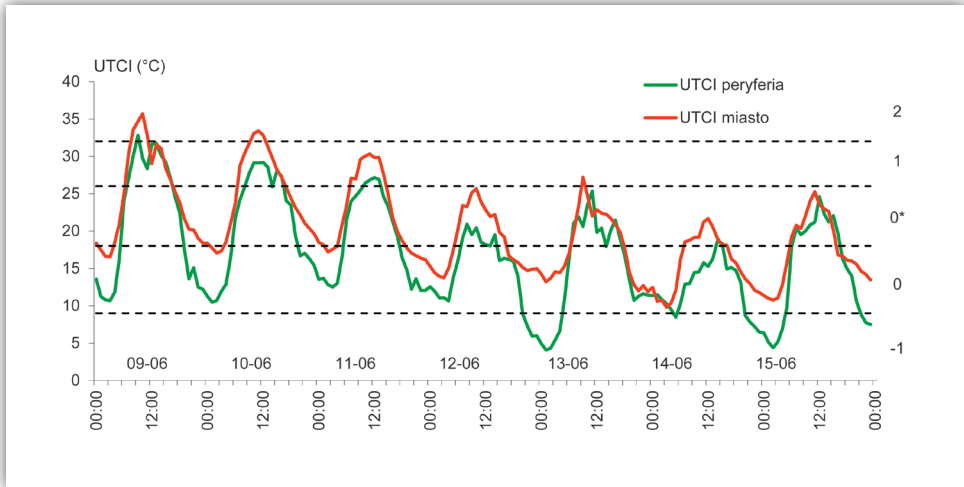
W celu porównania warunków biotermicznych panujących w centrum Warszawy (ul. Twarda) i na terenach podmiejskich (Borowa Góra) przeprowadzono badania eksperymentalne w dwóch okresach: 6–17 lutego 2007 r. i 9–16 czerwca 2008 roku. W pierwszym z nich dominowała pogoda pochmurna i mroźna przy małej i umiarkowanej prędkości wiatru ($1\text{--}4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). 16 i 17 lutego były dniami relatywnie pogodnymi. Najniższa temperatura powietrza (około -15°C) wystąpiła 11 lutego. W czerwcu dominowały dni bezchmurne, jedynie 14 i 15 czerwca w godzinach okołopołudniowych pojawiły się pojedyncze chmury konwekcyjne. Typowy przebieg dobowy temperatury powietrza był następujący: w nocy $6\text{--}10^{\circ}\text{C}$, w ciągu dnia $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$. Wiatr był słaby ($< 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

W lutym wartość wskaźnika obciążeń cieplnych UTCI w centrum miasta, w porównaniu do terenu podmiejskiego, była większa średnio o około 4°C . Maksymalna



Rycina 6.1. Przebieg dobowy UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Borowa Góra) w lutym 2007 roku

Kategorie stresu cieplnego: 0 – brak stresu cieplnego, -1 – łagodny stres zimna, -2 – umiarkowany stres zimna, -3 – silny stres zimna, -4 – bardzo silny stres zimna



Rycina 6.2. Przebieg dobowy UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Borowa Góra) w czerwcu 2008 roku

Kategorie stresu cieplnego: -1 – łagodny stres zimna, 0 – brak stresu cieplnego (0* – strefa komfortu termicznego), 1 – umiarkowany stres ciepła, 2 – silny stres ciepła

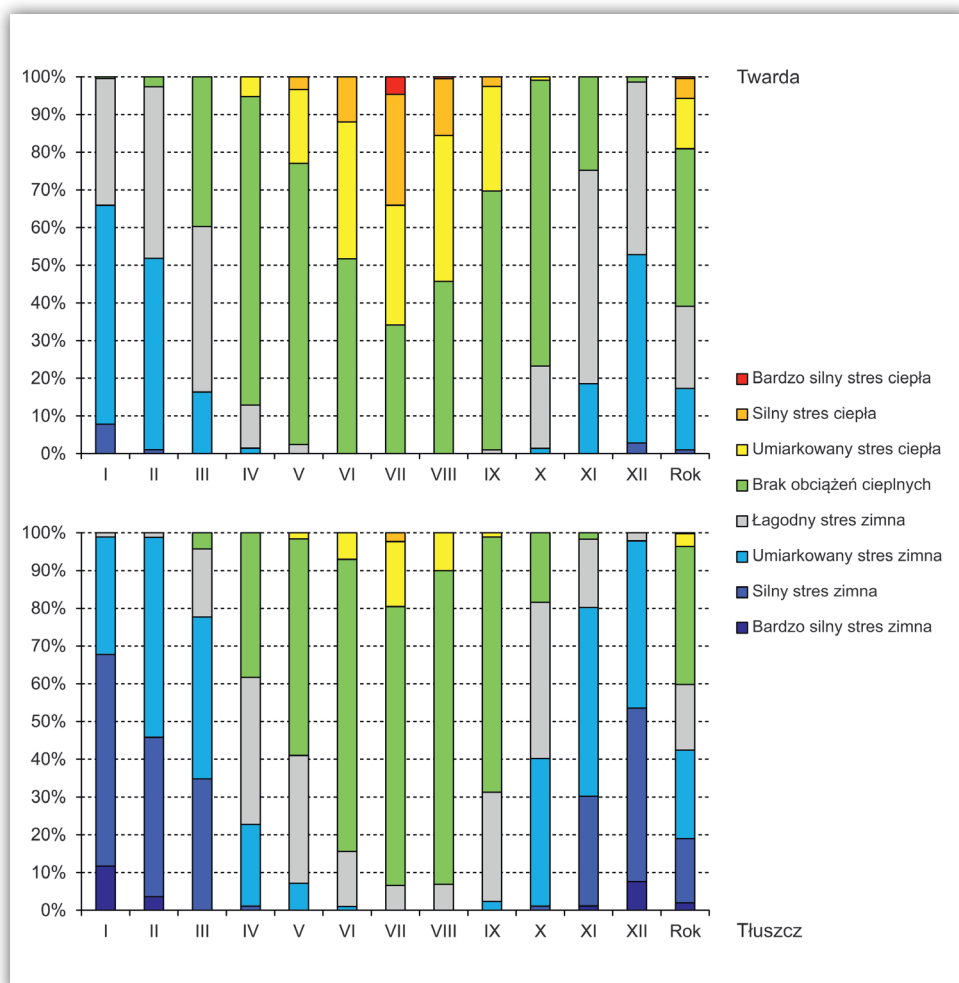
różnica wyniosła 16,6°C. Jedynie w kilku przypadkach centrum miasta było chłodniejsze niż teren podmiejski. Sytuacja taka wystąpiła w godzinach okołopołudniowych, gdy stanowisko pomiarowe w mieście znajdowało się w cieniu okolicznych budynków, natomiast stanowisko poza miastem było poddane silnej insolacji. Niskie wartości UTCI w zimie na terenie podmiejskim były częściowo spowodowane większymi w porównaniu z centrum miasta prędkościami wiatru (ryc. 6.1).

W czerwcu, podobnie jak w lutym, wartość UTCI w centrum miasta była większa niż na terenie podmiejskim średnio o około 4°C. Maksymalna różnica wystąpiła wczesnym rankiem i osiągnęła wartość 9,4°C. Zróżnicowanie wskaźnika stresu cieplnego między tymi obszarami było znacząco mniejsze w ciągu dnia z powodu zacienienia stanowiska pomiarowego w centrum miasta. Z tego też powodu, przez krótki czas w określonych porach dnia, stres ciepła w centrum miasta jest mniejszy niż na terenie podmiejskim (ryc. 6.2).

Różnice obciążeń cieplnych (UTCI) między centrum miasta a terenem podmiejskim reprezentowanym przez stację zlokalizowaną w dzielnicy domów jednorodzinnych w Tłuszczu oddalonym o 37 km na północny wschód od centrum Warszawy są wyraźne także przy porównaniu danych miesięcznych i rocznych (ryc. 6.3). W latach 2004–2010 stres cieplny w centrum miasta wystąpił w około 19% dni, natomiast na terenie podmiejskim jedynie w około 4% dni. Silny stres ciepła w centrum miasta wystąpił od maja do sierpnia (najczęściej w lipcu – w około 30% dni), podczas gdy na terenie podmiejskim jedynie w lipcu (około

2% dni). Bardzo silny stres ciepła wystąpił jedynie w centrum miasta. Stres zimna w śródmieściu notowany był w około 39% dni, najczęściej o natężeniu łagodnym i umiarkowanym. Nie wystąpiły tu dni z bardzo silnym stresem zimna. Na terenie podmiejskim stres zimna był notowany w ciągu około 60% dni w roku. Bardzo silny stres zimna wystąpił tylko w około 2% dni roku (maksimum w styczniu – około 12% dni).

Porównanie sytuacji obciążających organizm człowieka w centrum Warszawy i w Tłuszczu wykazuje, że w Warszawie wśród obciążeń przeważa silny i bardzo silny stres gorąca, zaś w Tłuszczu obciążający dla organizmu jest raczej silny i bardzo silny stres zimna.



Rycina 6.3. Przebieg roczny UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Tłuszcz) o godzinie 12 UTC, 2004–2010

6.2. Rola zagospodarowania terenu w kształtowaniu klimatu odczuwalnego

Natężenie MWC zależne od zagospodarowania terenu znajduje odzwierciedlenie nie tylko w różnicy temperatury powietrza, ale także w zróżnicowaniu warunków odczuwalnych. Jak opisano w rozdziale 5.2, najsilniejszymi determinantami MWC w osiedlach mieszkaniowych były intensywność zabudowy (WIZ) i związane z nią udział terenów biologicznie czynnych (TBC).

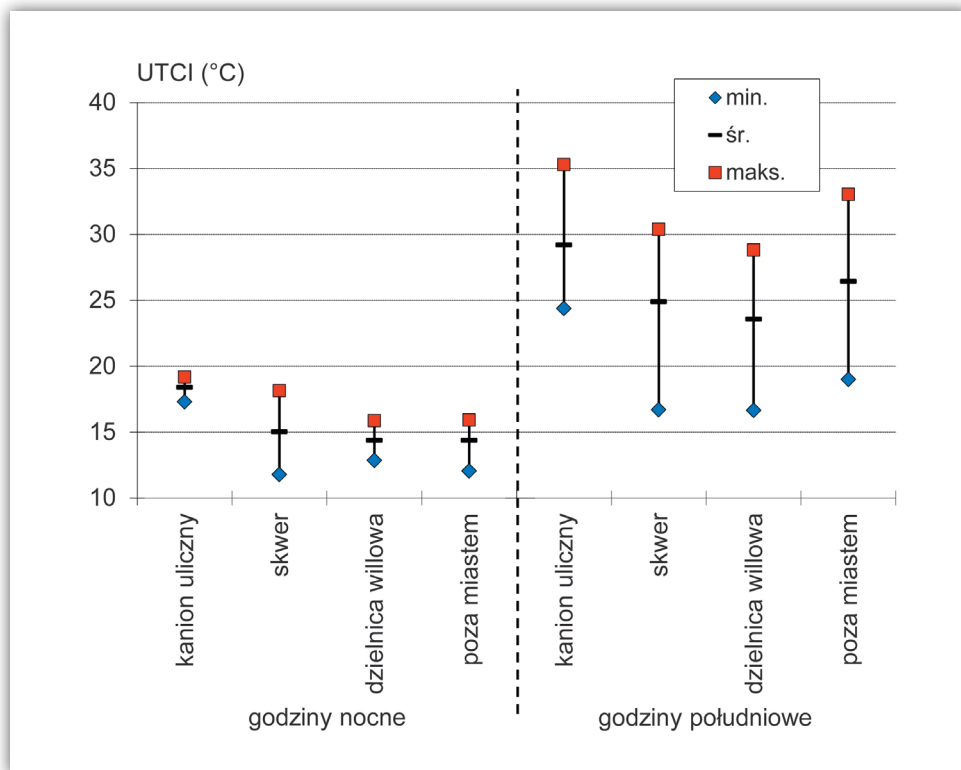
Na kształtowanie warunków termicznych w mieście wpływa głównie roślinność wysoka, i to nie tylko zgromadzona w parkach. Niektóre wyniki badań dowodzą braku wpływu pojedynczego drzewa w kanionie ulicznym na temperaturę odczuwalną, ale już nawet niewielkie grupy drzew (Akbari i in. 1997; Streiling, Matzarakis 2003) czy szpalery drzew wzdłuż ulicy wywierają wyraźny pozytywny wpływ na temperaturę powietrza, temperaturę odczuwalną, hałas i zanieczyszczenie przygruntowej warstwy powietrza.

Na osiedlach mieszkaniowych znaczenie ma także zacienienie terenów rekreacyjnych. W gorące dni temperatura ławek i przyrządów do zabaw na wyeksponowanych na promieniowanie słoneczne placach zabaw potrafi przewyższać 50°C, dlatego istotne jest także sadzenie wysokich drzew wokół miejsc wypoczynku i rekreacji (Rosner 2014).

Do oceny wpływu różnych typów zabudowy na klimat odczuwalny wykorzystano wskaźnik UTCI, a analizy prowadzono w różnych skalach przestrzennych. Stwierdzono, że poszczególne typy zabudowy i formy użytkowania terenu w Warszawie silnie oddziałują na możliwe obciążenia cieplne organizmu.

Rycina 6.4 pokazuje wartości wskaźnika UTCI obserwowane latem 2002 r., w godzinach nocnych i dziennych, w różnych typach zabudowy: w kanionie ulicznym, na skwerze częściowo zacienionym drzewami oraz w dzielnicy willowej na przedmieściach. Dla porównania zamieszczono także wartości UTCI obserwowane w tym samym czasie na stacji podmiejskiej w Borowej Górze. Wybrano dni bezchmurne i z małym zachmurzeniem. Zarówno w godzinach nocnych, jak i dziennych, najwyższe wartości UTCI obserwowano w kanionie ulicznym. W ciągu dnia UTCI osiągało tam 36°C, co mówi o występowaniu silnego stresu ciepła. Niewiele niższe, maksymalne wartości UTCI notowano także na stacji podmiejskiej. Natomiast na zadrzewionym skwerze oraz w zadrzewionej dzielnicy willowej wartości UTCI dniem osiągały 29–31°C (co wskazuje na umiarkowany stres ciepła), a wartości średnie wskaźnika znajdowały się w tych miejscach w kategorii oznaczającej „brak obciążeń cieplnych”. Dla porównania, wartości średnie UTCI w kanionie ulicznym i poza miastem znajdowały się w kategorii „umiarkowany stres ciepła”.

Zestawiono także odchylenia wartości UTCI (Δ UTCI) obserwowanych w różnych typach zagospodarowania terenu od wartości notowanych poza miastem na

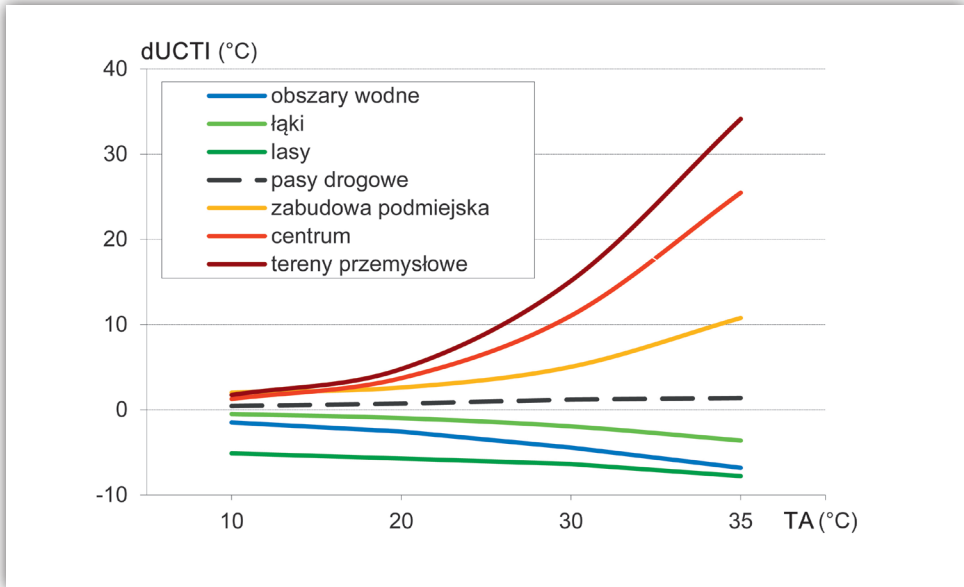


Rycina 6.4. Średnie (śr.), najniższe (min.) i najwyższe (maks.) wartości UTCI w różnych typach zabudowy w Warszawie w różnych porach dnia, lipiec 2002 roku

Warunki pogodowe w czasie pomiarów: temperatura powietrza od 12°C (noc) do 25°C (dzień), prędkość wiatru 2–6 m·s⁻¹, wilgotność względna powietrza 60–80%

stacji referencyjnej (Okęcie). Odchylenia te wahają się, zależnie od ogólnych warunków pogodowych, od -11,5 do 35,5°C. Największe, ujemne odchylenia stwierdzono dla obszarów wodnych oraz leśnych. Natomiast największe dodatnie odchylenia obserwowano dla terenów przemysłowych i w dzielnicach centralnych miasta. Jak już wspomniano, odchylenia UTCI zależały od ogólnych warunków pogodowych. I tak na przykład, w lasach dodatnie wartości dUTCI występowały w dniach pochmurnych z niską temperaturą powietrza, natomiast odchylenia ujemne stwierdzano w słonecznych dniach gorących z małą prędkością wiatru. W dniach z bardzo wysoką temperaturą powietrza (około 35°C) najbardziej obciążające termicznie okazały się dzielnice przemysłowe i centrum miasta, gdzie wartości dUTCI osiągały 27–35°C (ryc. 6.5).

Za pomocą metody kartowania topoklimatycznego K. Błażejczyka (2002), zmodyfikowanej przez A. Kunert (2010) dokonano także modelowania wartości



Rycina 6.5. Odchylenia wskaźnika UTCI (dUCTI) w różnych typach zagospodarowania terenu od warunków pozamiejskich w dniach pogodnych przy różnej temperaturze powietrza

UTCI dla różnych typów zagospodarowania terenu w różnych scenariuszach pogodowych. Jako przykład wyników modelowania zestawiono dane dla 6 scenariuszy różniących się stopniem zachmurzenia (pogody pochmurnej i słonecznej) oraz temperaturą powietrza na stacji pozamiejskiej ($T_a = 10, 20$ i 30°C) oraz prędkością wiatru (v). Na wybranych przykładach przyjęto taką samą wilgotność względną powietrza równą 50%. Ogólnie biorąc, najważniejszym czynnikiem decydującym o zakresie obciążeń cieplnych jest temperatura powietrza. Niemniej, sposób zagospodarowania terenu ma wyraźny wpływ modyfikujący wartości UTCI. W przypadku każdego scenariusza temperatury powietrza centrum miasta oraz tereny przemysłowe podwyższają kategorię obciążeń cieplnych. Najmniejszego zróżnicowania przestrzennego obciążeń cieplnych można się spodziewać w warunkach pogodowych cechujących się umiarkowanymi wartościami temperatury powietrza ($T_a = 20^\circ\text{C}$), prędkości wiatru ($4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz wilgotności względnej powietrza (50%). Wyraźnie większe kontrasty termiczne występują przy pogodzie chłodnej ($T_a = 10^\circ\text{C}$). W tych warunkach in plus wyróżniają się wnętrza lasów, w których wartości UTCI są podobne jak w terenach silnie zurbanizowanych. Natomiast podczas pogody gorącej ($T_a = 30^\circ\text{C}$) silnego i bardzo silnego stresu ciepła należy się spodziewać w większości typów zabudowy (poza śródleśną), w pasach drogowych oraz na łąkach i odkrytych terenach podmiejskich (tab. 6.1).

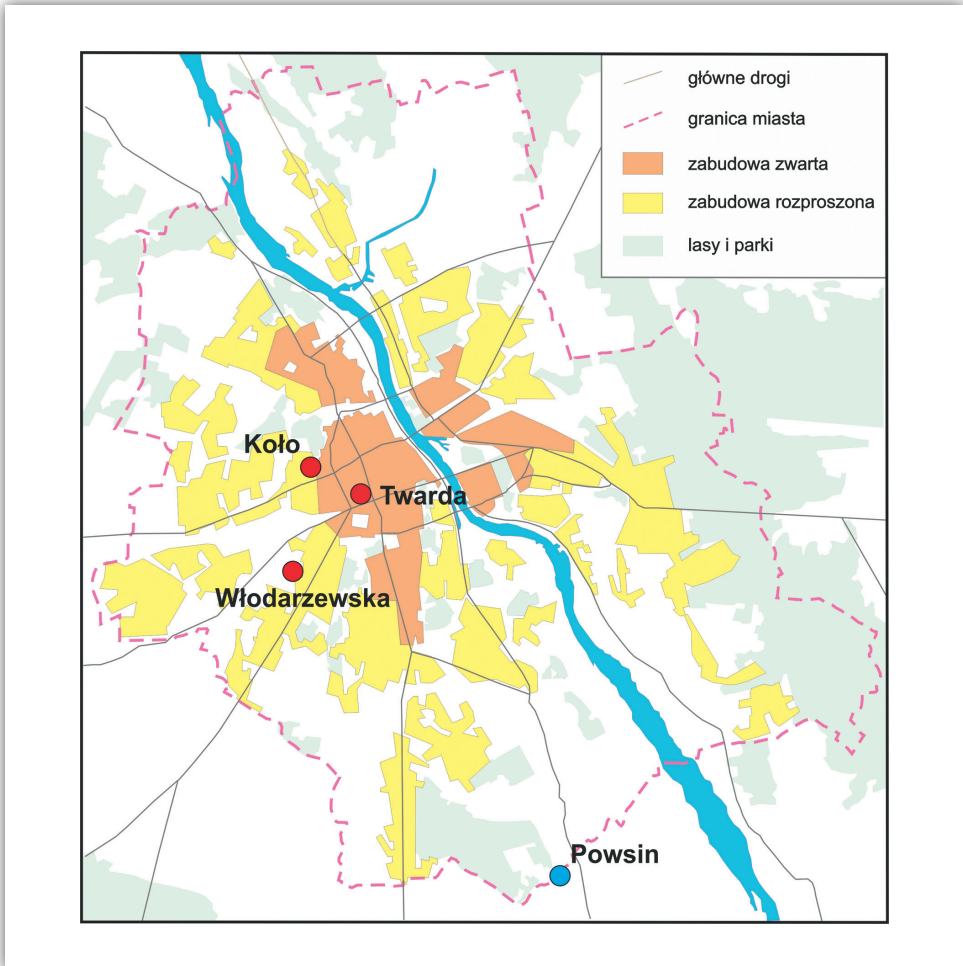
Tabela 6.1. Wartości UTCI (°C) w różnych typach użytkowania terenu oraz w różnych scenariuszach pogodowych

Typ użytkowania terenu	Pogoda							
	słoneczna		pochmurna		słoneczna		pochmurna	
	Ta = 10°C, v = 8 m·s ⁻¹		Ta = 20°C, v = 4 m·s ⁻¹		Ta = 30°C, v = 2 m·s ⁻¹			
Teren podmiejski	-4,0	-6,7	20,7	14,3	34,4	29,5		
Łąki	-4,8	-7,6	19,6	12,9	32,8	27,6		
Lasy	6,0	5,0	18,0	16,2	27,6	26,2		
Pasy drogowe	-2,8	-5,6	21,9	15,6	35,8	31,0		
Zabudowa podmiejska	0,2	-2,6	24,2	18,1	38,2	33,5		
Zabudowa śródleśna	-0,6	-2,5	18,2	15,1	30,1	27,7		
Zwarta zabudowa miejska	4,2	1,9	26,3	22,3	41,7	38,7		
Obszary przemysłowe	4,9	2,6	27,4	23,5	43,7	40,7		
Brzegi wód	-7,1	-9,9	17,1	10,2	30,0	24,5		
Kategorie obciążeń cieplnych:								
Umiarkowany stres zimna								
Łagodny stres zimna								
Brak obciążeń cieplnych								
Umiarkowany stres ciepła								
Silny stres ciepła								
Bardzo silny stres ciepła								

Na zagadnienie obciążeń cieplnych w różnych typach użytkowania terenu należy także spojrzeć przez pryzmat oddziaływania lokalnych czynników mikroklimatycznych. Analizując to zagadnienie, wykorzystano wyniki badań marszrutowych przeprowadzonych na terenie dwóch osiedli warszawskich, Koło i Włodarzewska, w maju i czerwcu 2013 r. (ryc. 6.6). Osiedla te różnią się wiekiem i intensywnością zabudowy (WIZ), stopniem zurbanizowania oraz powierzchnią terenów biologicznie czynnych (TBC). Dla kontrastu wybrano także rejon ulicy Twardej w centrum miasta oraz Ogród Botaniczny PAN w Powsinie, leżący na granicy Warszawy, który traktowano jako obszar referencyjny.

Osiedle Koło, wybudowane w latach 60. XX w., składa się z 4- lub 5-kondygnacyjnych ceglanych budynków, w bliskim sąsiedztwie parku Moczydło. Liczne wolne i obszerne przestrzenie między budynkami to głównie tereny zielone (trawniki z wysokimi, liściastymi drzewami) i nieliczne parkingi. TBC sięga tu 54,3%, zaś WIZ 0,8 (patrz tab. 3.2).

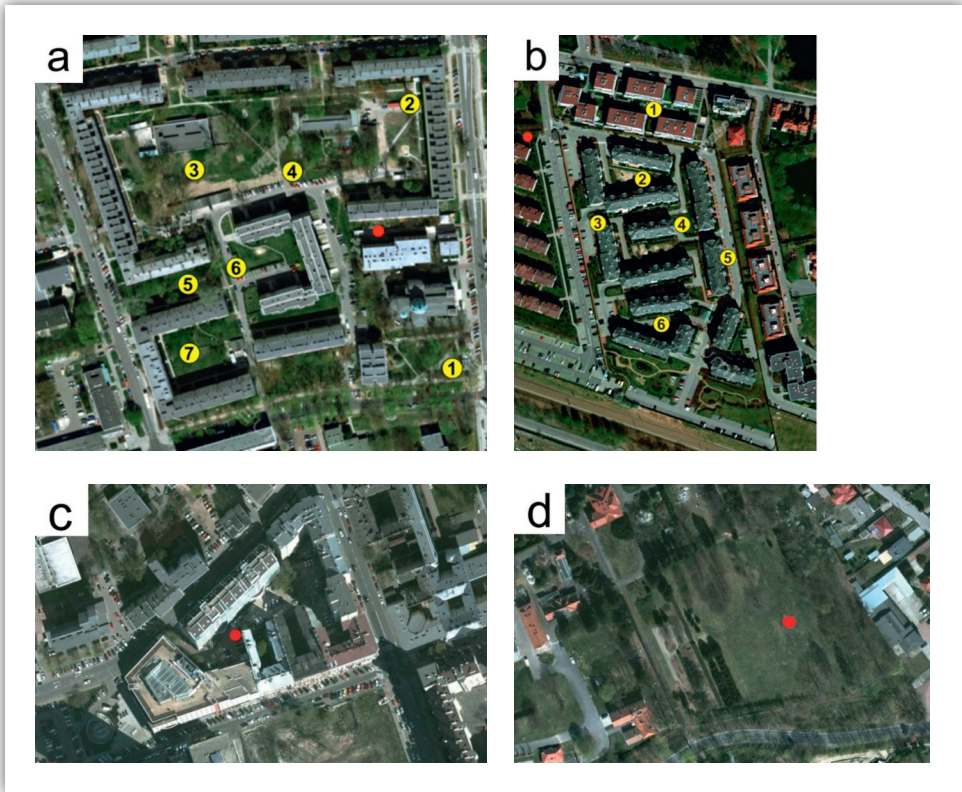
Osiedle Włodarzewska wybudowane zostało w latach 1995–2000. Cechuje je bardzo gęsta zabudowa 4- lub 5-piętrowymi budynkami i podziemnymi



Rycina 6.6. Lokalizacja obszarów badań pilotażowych oraz peryferyjnej stacji referencyjnej w Powsinie

parkingami oraz licznymi drogami wewnątrz osiedla. Zlokalizowane jest w pobliżu Parku Szczęśliwickiego i otoczone licznymi obszarami zielonymi, jednak gęsta zabudowa i specyficzne ułożenie budynków „zamykające” osiedle, utrudnia dopływ powietrza z terenów otaczających do jego wnętrza. Obszary zielone to niewielkie, rozproszone trawniki i klomby, częściowo zorganizowane na dachach podziemnych parkingów oraz niewielkie drzewa, głównie iglaste. TBC wynosi 41%, zaś WIZ 1,25 (tab. 3.2).

Okolice stacji na ul. Twardej to budynki pochodzące sprzed II wojny światowej oraz nowoczesne bloki mieszkalne i biurowe, o średniej wysokości 6 lub 7 pięter. Udział TBC jest najmniejszy spośród analizowanych terenów



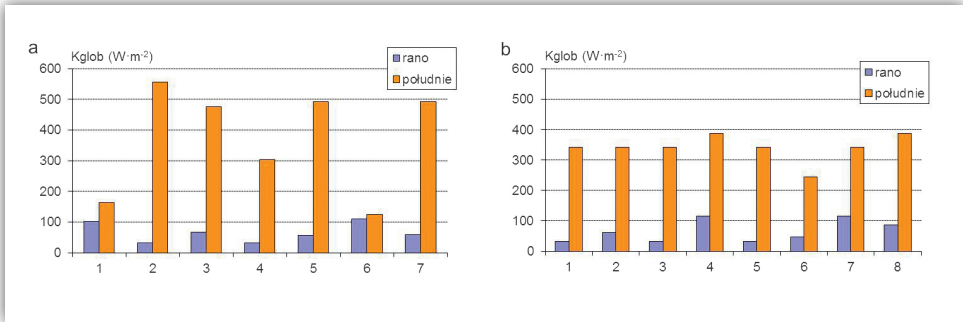
Rycina 6.7. Widok analizowanych obszarów: osiedle Koło (a), osiedle Włodarzewska (b), okolice budynku Twarda 51/55 (c) oraz stacja w Powsinie (d)

Żółte punkty wskazują miejsca pomiarów marszutowych, czerwone punkty wskazują lokalizację ciągłych pomiarów termiczno-wilgotnościowych

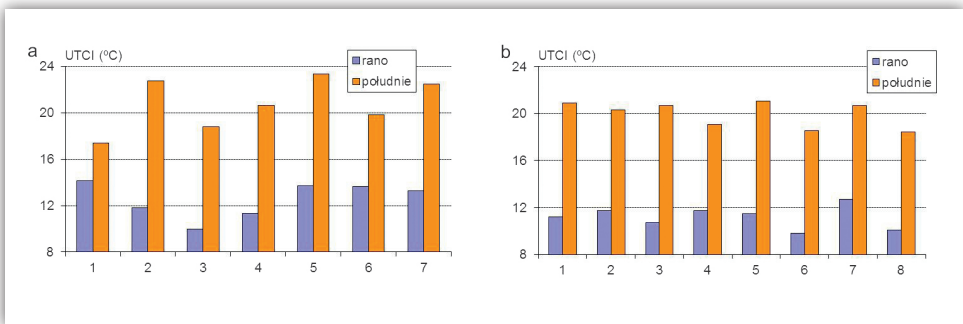
otaczających posterunki monitoringu i sięga jedynie 4%, a cała wolna przestrzeń pomiędzy budynkami wykorzystana jest jako parking (tab. 3.2, ryc. 6.7).

Na osiedlach Koło i Włodarzewska w czasie badań marszutowych w dniach 21 i 22 maja 2013 r. poszczególne punkty pomiarowe różniły się stopniem zacienienia przez budynki i drzewa. O ile na osiedlu Koło, z luźną zabudową, ilość promieniowania docierającego do wielu punktów była podobna jak w terenie odświetlonym, to na osiedlu Włodarzewska każdy z punktów przez dłuższy lub krótszy czas był zacieniony przez otaczające budynki (ryc. 6.8).

Specyficzne cechy zagospodarowania terenu sprawiły, że na osiedlu Koło temperatura powietrza wykazywała wyraźne zróżnicowanie pomiędzy punktami pomiarowymi. Najniższa była w miejscach zacienionych przez drzewa oraz na rozległych trawnikach. Z kolei na osiedlu Włodarzewska, gdzie występują małe odległości pomiędzy budynkami i tylko niewielkie trawniki, temperatura powietrza nie



Rycina 6.8. Średnie wartości całkowitego promieniowania słonecznego (Kglob) w poszczególnych punktach pomiarowych na osiedlach Koło (a) i Włodarzewska (b), 21 i 22 maja 2013 roku



Rycina 6.9. Średnie wartości Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Ciepłych (UTCI) w poszczególnych punktach pomiarowych na osiedlach Koło (a) i Włodarzewska (b), 21 i 22 maja 2013 roku

różniła się istotnie pomiędzy punktami, mimo że część z nich znajdowała się w cieniu budynków i nad trawnikami.

Porównywane osiedla różniły się jeszcze wyraźniej, jeśli analizie poddano warunki biotermiczne, odczuwane przez człowieka. Na osiedlu Włodarzewska obciążenia ciepłe organizmu były bardzo wyrównane i trudno było znaleźć miejsce, gdzie można liczyć na ich złagodzenie. Z kolei na osiedlu Koło poza miejscami, gdzie występuje silne obciążenie ciepłe (punkty: 2, 5 i 7) znajdują się swoiste „oazy” warunków łagodnych, w których organizm człowieka może się zregenerować (punkty: 1, 3 i 4) (ryc. 6.9).

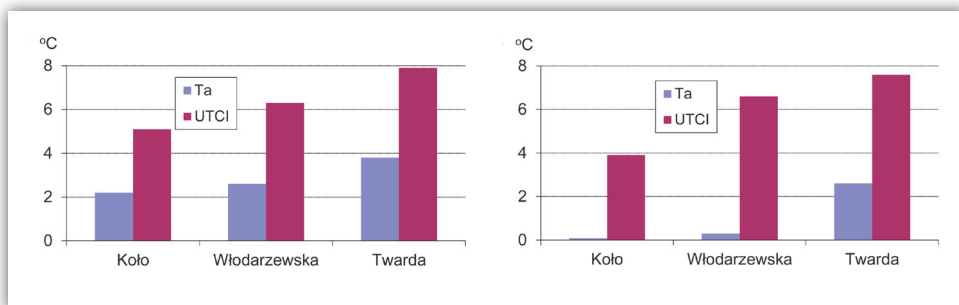
Porównując wyniki badań warunków odczuwalnych panujące na osiedlach i w centrum z danymi ze stacji pozamiejskiej w Powsinie, można stwierdzić, że na osiedlu Koło, o najmniejszym zurbanizowaniu i największym udziale terenów biologicznie czynnych, wartości UTCI były wyraźnie niższe niż na silnie zurbanizowanym osiedlu Włodarzewska oraz w centrum Warszawy. Średnio, różnice te na Kole

wynosiły 5,1°C rano i 3,9°C w południe, a na Twardej – 7,9°C rano i 7,6°C w południe. Ważne jest także zróżnicowanie wewnątrz badanych osiedli. Największe różnice dUTCI były obserwowane w południe na zazielenionym osiedlu Koło (tab. 6.2, ryc. 6.10).

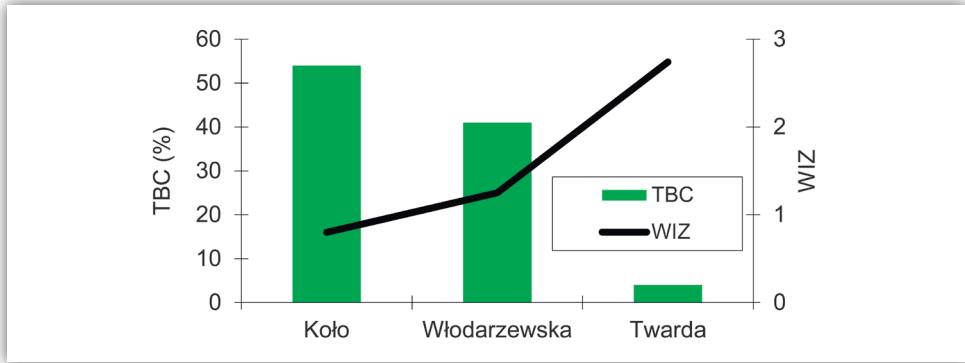
Tabela 6.2. Różnice wskaźnika obciążeń cieplnych (dUTCI) pomiędzy badanymi osiedlami a peryferiami Warszawy (Ogród Botaniczny w Powsinie), 21 i 22 maja 2013 roku

Osiedle	Pora dnia	Średnio	Najcieplejsze miejsce na osiedlu [°C]	Najchłodniejsze miejsce na osiedlu [°C]
Koło (TBC 54%, WIZ 0,8)	rano	5,1	5,9	-0,5
	południe	3,9	6,9	0,0
Włodarzewska (TBC 41%, WIZ 1,25)	rano	6,3	6,8	5,4
	południe	6,6	8,1	2,7
Twarda (TBC 4%, WIZ 2,74)	rano	7,9	-	-
	południe	7,6	-	-

Potwierdzeniem przyjaznego (na osiedlu Koło) i niekorzystnego (na osiedlu Włodarzewska) dla mieszkańców sposobu zagospodarowania terenu jest bezpośrednie porównanie obciążeń cieplnych z obserwowanymi w centrum miasta (ulica Twarda). Osiedle Koło cechowało się niższymi o średnio 5,4°C wartościami UTCI niż centrum Warszawy. W miejscu najcieplejszym UTCI było niższe o prawie 3°C, a w miejscu najchłodniejszym – aż o blisko 9°C. Daje to możliwość zarówno nocnego, jak i dziennego zregenerowania organizmu po powrocie na osiedle z miejsc o dużej gęstości zabudowy. Osiedle Włodarzewska było średnio tylko o około 1°C chłodniejsze niż centrum Warszawy. W miejscach najcieplejszych obciążenia cieplne były porównywalne z tymi w centrum miasta (różnica UTCI bliska zeru), zaś w miejscach najchłodniejszych UTCI było tylko o niecałe 3°C niższe niż



Rycina 6.10. Różnica temperatury powietrza (Ta) oraz Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Cieplnych (UTCI) między obszarami badań i stacją w Powsinie w godzinach porannych (a) i południowych (b)



Rycina 6.11. Udział terenów biologicznie czynnych (TBC) oraz wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ) na analizowanych terenach

w Śródmieściu. Niewiele niższa, w porównaniu z centrum, temperatura powietrza o świcie na osiedlu Włodarzewska sugeruje utrudniony nocny wypoczynek mieszkańców tego osiedla, zwłaszcza w okresie fal upałów.

Ogólnie, wyniki badań wykazują rosnące zróżnicowanie zarówno temperatury powietrza, jak i warunków odczuwalnych wraz ze wzrostem udziału TBC i spadkiem intensywności zabudowy (ryc. 6.11).

6.3. Prognozowane zmiany obciążeń cieplnych do 2100 roku

Korzystając z omówionej w rozdziale 4.4 bazy prognozowanych do 2100 r. parametrów meteorologicznych, obliczono codzienne wartości wskaźnika UTCI dla obszaru Warszawy dla scenariusza A1B. Wykorzystano dane dobowe dotyczące temperatury maksymalnej powietrza, maksymalnego natężenia całkowitego promieniowania słonecznego oraz średnich wartości wilgotności względnej powietrza i prędkości wiatru. Wykorzystano przy tym model MPI-M-REMO-ECHAM5.

W celu sprawdzenia wiarygodności prognozowanych wartości UTCI porównano wartości wskaźnika obliczone na podstawie danych obserwacyjnych ze stacji Warszawa-Okęcie oraz danych modelowanych przez zastosowany model klimatu w latach 1993–2002. Dane pomiarowe i modelowane są ze sobą ściśle skorelowane (współczynnik korelacji 0,75 istotny statystycznie na poziomie ufności 99%). Można zatem przyjąć, że wartości modelowane UTCI dobrze odzwierciedlają wartości rzeczywiste wskaźnika.

Biorąc powyższe założenie pod uwagę, obliczono dla lat 2001–2100 coroczną częstość dni z wartościami UTCI wyższymi od 32°C ($UTCI > 32^\circ\text{C}$), oznaczającymi silny, bardzo silny i skrajnie silny stres gorąca, oraz z wartościami niższymi od

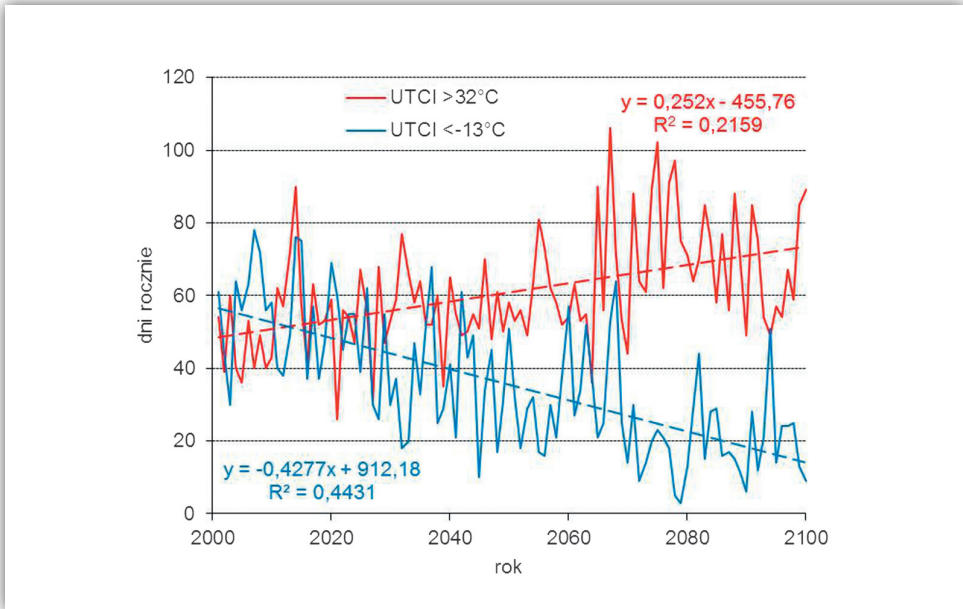
-13°C (UTCI < -13°C) mówiącymi o silnym, bardzo silnym i skrajnie silnym stresem zimna. Przyjęte do analizy zakresy UTCI są szczególnie ważne z punktu widzenia obciążeń cieplnych człowieka i wpływają znacząco na zagrożenie dla zdrowia mieszkańców (Błażejczyk i in. 2013). Dni z wartościami UTCI ponad 32°C dominują w ciepłych miesiącach roku (maj–wrzesień), a dni z UTCI poniżej -13°C w miesiącach od listopada do marca. Porównując częstości analizowanych kategorii UTCI w pierwszej i ostatniej dekadzie XXI w., widać zarówno wyraźny spadek dni ze stresem zimna oraz znaczący wzrost dni ze stresem gorąca (tab. 6.3).

Tabela 6.3. Częstość dni z różnymi kategoriami UTCI w Warszawie w pierwszej i ostatniej dekadzie XXI wieku

Kategorie stresu ciepła	Zima		Wiosna		Lato		Jesień	
	2001-2010	2091-2100	2001-2010	2091-2100	2001-2010	2091-2100	2001-2010	2091-2100
UTCI < -13°C	45,6	19,5	6,0	1,5	-	-	6,8	0,5
UTCI od -13°C do +32°C	54,5	80,6	93,6	97,6	96,3	89,0	92,0	97,3
UTCI > 32°C	-	-	0,5	1,0	3,7	10,9	0,1	1,1

Zmiany częstości dni ze skrajnymi warunkami gorąca i zimna są także dobrze widoczne w analizie ich sum rocznych. O ile na początku obecnego wieku liczba dni z UTCI poniżej 13°C i z UTCI powyżej 32°C była do siebie zbliżona (40–60 takich dni rocznie), to w kolejnych latach widać systematyczny wzrost dni ze stresem do około 70–80 pod koniec wieku. W przypadku dni ze stresem zimna mamy sytuację odwrotną; liczba takich dni spada wyraźnie, aby pod koniec wieku osiągnąć 10–20 rocznie (ryc. 6.12). Obydwie zmiany będą miały znaczący wpływ na termiczną jakość życia w mieście. Zmniejszą się roczne kontrasty termiczne, co zmusi organizm człowieka do dostosowania się do nowego rytmu rocznego. Obecnie, miesiące zimowe są okresem odpoczynku od stresu ciepła oraz regeneracji układu termoregulacyjnego i krwionośnego. Pod koniec wieku zimowy okres odnowy organizmu będzie znacznie krótszy i słabszy niż obecnie.

Zmiany te będą miały konsekwencje dla zdrowia mieszkańców stolicy. Badania K. Błażejczyka i innych (2013) wykazały, że w pierwszej dekadzie XXI w. rocznie w Warszawie notuje się około 200 zgonów spowodowanych stresem gorąca i około 2500 zgonów spowodowanych stresem zimna. Przewidywane zmiany klimatu, zwłaszcza temperatury powietrza, spowodują, że pod koniec obecnego wieku liczby zgonów związanych ze stresem gorąca i stresem zimna będą zbliżone do siebie i wyniosą odpowiednio 600 i 900 przypadków rocznie. Przyjmując obserwowane w latach 1993–2002 liczby zgonów spowodowanych stresem zimna i stresem gorąca za 100%, można stwierdzić, że w pierwszym przypadku nastąpi 2,3-krotny spadek – do 42% okresu referencyjnego, a w drugim przypadku 2,6-krotny wzrost – do 158% okresu referencyjnego.



Rycina 6.12. Roczna częstość dni ze skrajnymi obciążeniami cieplnymi (UTCI < -13°C i UTCI > 32°C) w Warszawie, 2001–2100

Zmiany klimatu będą miały różnorodny wpływ na warunki bioklimatyczne w Warszawie. Z jednej strony należy się liczyć ze znaczącym wzrostem częstości sytuacji pogodowych silnie obciążających termicznie organizm w okresie letnim. Z drugiej natomiast strony warunki termicznie zimą będą wyraźnie łagodniejsze niż obecnie. Zmiany te będą miały swe odzwierciedlenie w stanie zdrowia mieszkańców. Najważniejszą wskazówką dla służby zdrowia w Warszawie jest konieczność przygotowania się w cieplej połowie roku na wzrost liczby pacjentów, zwłaszcza w podeszłym wieku i z problemami układu krążenia. Ważne jest także stworzenie systemu monitoringu i informowania społeczeństwa o pojawiających się zagrożeniach biotermicznych.

7. Wpływ miejskiej wyspy ciepła na jakość życia i stan zdrowia mieszkańców

- ▷ Ciepło w organizmie człowieka pochodzi z dwóch źródeł, zewnętrznego (tzw. ciepło otoczenia) oraz wewnętrznego, związanego z przebiegającymi reakcjami metabolicznymi.
- ▷ Nadmiar ciepła może być usuwany z organizmu na drodze biernej poprzez promieniowanie, konwekcję i przewodzenie oraz na drodze czynnej przez parowanie potu. Przegrzanie organizmu może doprowadzić do omdlenia cieplnego, wystąpienia kurczów cieplnych, obrzęku termicznego, wyczerpania bądź udaru cieplnego.
- ▷ Zjawisko miejskiej wyspy ciepła prawdopodobnie wywiera istotny wpływ na zwiększenie częstości występowania przypadków udaru cieplnego i zaostrzeń powszechnie występujących przewlekłych chorób układu oddechowego i krążenia.
- ▷ Czynniki ryzyka wystąpienia wyżej wymienionych negatywnych efektów zdrowotnych są wiek (< 5. roku życia i > 65. roku życia), ciąża, niepełnosprawność (głównie w zakresie układów ruchu i nerwowego), niski status socjoekonomiczny, czy wykluczenie społeczne.
- ▷ Stopień zanieczyszczenia powietrza, w szczególności ozonem oraz pyłami PM_{2,5} i PM₁₀ zwiększa negatywne efekty wywołane wzrostem temperatury otoczenia.
- ▷ Warunki klimatyczne charakterystyczne dla miejskiej wyspy ciepła sprzyjają wzrostowi potencjału alergizującego szaty roślinnej.
- ▷ Zanieczyszczenia atmosferyczne dodatkowo zwiększają potencjał alergizujący roślin, ułatwiają penetrację alergenów do dróg oddechowych i nasilają przebieg reakcji alergicznej.
- ▷ Odpowiedni dobór szaty roślinnej w strategiach łagodzenia zjawiska miejskiej wyspy ciepła ma kluczowe znaczenie w profilaktyce chorób alergicznych.

Zjawisko miejskiej wyspy ciepła jest szczególnie uciążliwe, a nawet niebezpieczne dla człowieka, w okresie letnim. Organizm ludzki jest wyraźnie dostosowany do istnienia dobowego rytmu aktywności oraz temperatury wewnętrznej. W ciągu dnia, na skutek aktywności fizycznej, w organizmie gromadzone są niekiedy znaczne ilości ciepła, a wysoka temperatura powietrza utrudnia jego usunięcie do otoczenia. Noc jest porą doby, w której organizm nie produkuje dodatkowych ilości ciepła, a niższa temperatura otoczenia umożliwia usunięcie z organizmu jego nadwyżki (Aschoff i in. 1974). Tymczasem miejska wyspa ciepła, poprzez utrzymującą się wśród zabudowy podwyższoną temperaturę w godzinach nocnych, zaburza ten naturalny cykl. Niewiele jest badań, które w sposób bezpośredni dotyczą wpływu MWC na stan zdrowia. Do nielicznych wyjątków należą badania prowadzone w Holandii przez H. Daanena i in. (2013), które dowiodły, że MWC sprzyja zwiększeniu umieralności w miastach w porównaniu z terenami rolniczymi.

Dodatkowym problemem jest wpływ MWC na zmianę fizjologii roślin w kierunku zwiększenia ich potencjału alergizującego (rozdz. 6.2). Zaproponowano listę roślin, które powinny być wprowadzane w mieście, w miejsce egzemplarzy silnie alergizujących.

7.1. Wpływ podwyższonej temperatury powietrza w mieście na zdrowie

Miejska wyspa ciepła jest zjawiskiem termicznym, dlatego też analizując jej możliwy wpływ na zdrowie mieszkańców miast należy się skupić na gospodarce cieplnej organizmu w warunkach podwyższonej temperatury powietrza. Związek pomiędzy ekstremalnymi zjawiskami pogodowymi a zdrowiem populacji podlegającej ich wpływom jest znany i opisywany w literaturze naukowej od wielu lat. Większość doniesień naukowych dotyczących tej tematyki skupia się na wpływie fal upałów (ang. *heat waves*) na zdrowie mieszkańców miast. Z uwagi na swój charakter, miejska wyspa ciepła poprzez brak bądź niewielką redukcję temperatury w okresie wieczorno-nocnym działać może na zasadzie wzmacniacza efektu fali upałów. Dzieje się tak, ponieważ brak nocnego okresu regeneracji organizmu (odpoczynek od upału w chłodniejszym otoczeniu) powoduje efekt nakładania się stresu termicznego organizmu przez kolejne dni upałów (Semenza i in. 1996; Bouchama, Knochel 2002; Endlicher i in. 2008). Dlatego też negatywne skutki zdrowotne związane z upałami często nie są wystarczająco wyraźnie zaznaczone w pierwszych dniach występowania tego typu zjawisk pogodowych, a dopiero po kilku dniach (tzw. efekt opóźnienia – ang. *harvesting effect*) (Kyselý 2004; Kuchcik 2006; Ye i in. 2011). Zatem nie tylko wysokość temperatury stanowi kluczowy element determinujący wpływ zjawiska pogodowego na zdrowie, ale również czas

jego trwania. Nie wszyscy mieszkańcy miast są jednakowo wrażliwi na wpływ ekstremalnych zjawisk pogodowych. Uważa się, że osoby starsze (powyżej 65. roku życia), małe dzieci, kobiety w ciąży, osoby z przewlekłymi chorobami układu oddechowego, sercowo-naczyniowego, osoby z chorobami psychicznymi, osoby niepełnosprawne, głównie w zakresie układu ruchu, stanowią grupę obarczoną szczególnie wysokim ryzykiem wystąpienia niepożądanych efektów zdrowotnych przy narażeniu na wysoką temperaturę otoczenia (Naughton i in. 2002; Yaron, Niermayer 2004; Flynn i in. 2005; Fouillet i in. 2006; Vandentorren i in. 2006; Tan 2008). Wśród innych czynników mających wpływ na wystąpienie negatywnych skutków zdrowotnych narażenia na wysoką temperaturę wymienia się izolację społeczną (Klinenberg 2002; Naughton i in. 2002; Bouchama i in. 2007). Znaczenie izolacji społecznej i jej wpływ na umieralność związaną z narażeniem na upały można uznać w dużej mierze za niedoszacowane, z uwagi na brak osób z najbliższego otoczenia mogących dostarczyć badaczom informacji umożliwiających uznanie niektórych zdarzeń za związane z narażeniem na wysokie temperatury. Wśród innych czynników blisko związanych z izolacją społeczną wymienić można samotne zamieszkiwanie (Semenza i in. 2011), brak współmałżonka (Canouï-Poitrine i in. 2006), czy nieopuszczanie mieszkania (Bouchama i in. 2007).

Kolejnym czynnikiem mającym związek ze zwiększoną umieralnością w okresie ekstremalnych upałów jest przynależność etniczna. J. Greenberg i inni (1983) porównali współczynnik umieralności w okresie fali upałów wśród osób rasy białej i czarnej poprzez analizę kart zgonu. Współczynnik umieralności wśród populacji czarnej był ponad dwukrotnie wyższy niż populacji białej (2,1/100 tys. vs. 0,8/100 tys.). Podobne wyniki otrzymali A. Henschel i inni (1969), którzy dokonali oceny kart zgonów i zapisów w dokumentacji szpitalnej, czy J. Shwartz (2005). Jednak w tym przypadku nie do końca wiadomo, czy determinantą jest czynnik rasy, czy związany z nią niski status ekonomiczny, który jest ważnym czynnikiem związanym ze zwiększonym ryzykiem zgonu bądź wystąpienia negatywnych skutków zdrowotnych w wyniku narażenia na upały (Jones i in. 1982; Greenberg i in. 1983; Curriero i in. 2002; Naughton i in. 2002; Borrell i in. 2006). T. Jones i inni (1982) przeprowadzili ocenę ryzyka wystąpienia udaru mózgu w zależności od statusu socjoekonomicznego określonego na podstawie takich zmiennych jak: średni czas pobierania nauki w latach, warunki mieszkaniowe i poziom ubóstwa. Ryzyko udaru mózgu w populacji o wysokim statusie socjoekonomicznym został określony na 6,5–8,1/100 tys., podczas gdy w populacji o niskim statusie socjoekonomicznym na 36,5–55,8/100 tys. M. Naughton i inni (2002) przeprowadzili ocenę wskaźnika umieralności w okresie fali upałów w Chicago w 1999 roku. Okazało się, że bytowanie poniżej wyznaczonego w tym badaniu poziomu ubóstwa, określonego jako roczny dochód gospodarstwa wynoszący poniżej 10 000 USD, pociągało za sobą podwyższone ryzyko zgonu. Autorzy zasugerowali, że wynika to głównie

z gorszych warunków mieszkaniowych i braku dostępu do pomieszczeń klimatyzowanych. Ogólnie dostęp do klimatyzacji, zwłaszcza w obrębie własnego mieszkania, jest uważany za jeden z najistotniejszych czynników ochronnych w stosunku do ryzyka wystąpienia zgonu związanego z falami upałów (Bouchama i in. 2007). Innym czynnikiem powiązanim ściśle z niskim statusem socjoekonomicznym jest opóźnienie w dostępie do pomocy medycznej podyktowane względami finansowymi (Kovats i in. 2004; Medina-Ramon i in. 2006).

Wiele badań epidemiologicznych dotyczących wpływu ekstremalnych zjawisk pogodowych na zdrowie populacji skupia się na analizie umieralności związanej z falami upałów. Wydaje się jednak, że dane uzyskane z takich analiz mogą być niedoszacowane. Spowodowane jest to faktem, że część zgonów, zwłaszcza wśród osób mieszkających samotnie bądź zaliczanych do grupy osób społecznie izolowanych, może nie zostać zaliczonych do zgonów związanych z falami upałów z uwagi na opóźnienie w postawieniu rozpoznania przyczyny zgonu (Donoghue i in. 1997). Niemniej, związek wysokich wartości temperatury otoczenia i wzrostu umieralności całkowitej został udowodniony w wielu badaniach. M. Baccini i inni (2008) badali wartość wskaźnika umieralności dziennej w 15 miastach europejskich. W miastach basenu Morza Śródziemnego na każdy jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury ponad przyjętą wartość progową ($29,4^{\circ}\text{C}$) odnotowano $3,12\%$ wzrostu wartości dziennego wskaźnika umieralności. Dla miast północnoeuropejskich na każdy jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury ponad przyjętą wartość progową ($23,3^{\circ}\text{C}$) odnotowano wzrost wartości dziennego wskaźnika umieralności o $1,84\%$. A. Zanobetti i J. Shwartz (2008) zauważyli podobną zależność, badając umieralność w dziewięciu miastach Stanów Zjednoczonych. Zaobserwowali, że na każdy wzrost temperatury średniej o $5,6^{\circ}\text{C}$ wskaźnik umieralności wzrasta o $1,8\text{--}2,7\%$. Umieralność całkowita i jej związek z wzrostem temperatury otoczenia w dużej mierze zależy jednak od regionu, w którym dokonywane są analizy. W przeprowadzonym przez A. McMichaela i innych (2008) badaniu (projekt ISOTHURM) stwierdzono, że w zależności od położenia geograficznego badanego miasta wzrost wskaźnika umieralności na każdy jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury ponad przyjęty przedział $17\text{--}31^{\circ}\text{C}$ może się znacząco różnić. Według uzyskanych danych rozbieżność wzrostu wskaźnika umieralności wyniosła ponad 18% .

Temperatura otoczenia ma także znaczący wpływ na jakość snu. Charakter zjawiska miejskiej wyspy ciepła, poprzez minimalizację nocnego spadku temperatury otoczenia, może wpływać negatywnie na jakość snu osób żyjących w zasięgu tego zjawiska. Uważa się, że najbardziej odpowiednią temperaturą otoczenia podczas snu jest 23°C (Pan i in. 2012). Podwyższona temperatura otoczenia wydłuża fazę czuwania i skraca w istotny sposób fazę snu wolnofalowego SEM oraz fazę REM, przyczyniając się do znacznego pogorszenia jakości snu (Okamoto-Mizuno, Mizuno 2012). Zaburzenia snu mają z kolei istotny wpływ na rozwój nadciśnienia

tętniczego, cukrzycy typu 2, zespołu metabolicznego. Schorzenia te nasilają procesy prowadzące do uszkodzania naczyń i rozwoju miażdżycy, a co za tym idzie zwiększenia ryzyka powikłań sercowo- i mózgowo-naczyniowych. Bezpośrednimi fizjologicznymi wykładnikami zaburzeń snu są: wzrost temperatury ciała, zwiększona częstość akcji serca, zwiększone wydzielanie kortykosteroidów i katecholamin, zwiększone zużycie tlenu przez organizm (Prejbisz i in. 2010).

Wymienione procesy przyczyniają się do gorszej kontroli nadciśnienia tętniczego i cukrzycy oraz wystąpienia powikłań narządowych tych chorób. Wpływ wysokiej temperatury otoczenia na wstępowanie incydentów sercowo- i mózgowo-naczyniowych znalazł potwierdzenie w wielu badaniach. K. Ebi i inni (2004) stwierdzili, że wzrost minimalnej bądź maksymalnej temperatury otoczenia o 3°C wiąże się z 6–18% wzrostem częstości przyjęć do szpitala osób powyżej 70. roku życia z objawami zawału mięśnia sercowego, niestabilnej dławicy piersiowej, nasilenia objawów niewydolności serca czy udarów mózgu. J. Dawson i inni (2008) zauważyli, że wzrost temperatury średniej o 1°C w ciągu 24 godzin prowadzi do 2,1% wzrostu częstości przyjęć do szpitala osób z objawami udaru niedokrwiennego mózgu. Należy tu zaznaczyć, że nie wszystkie choroby związane z dysfunkcją układu sercowo-naczyniowego w takim samym stopniu reagują na wzrost temperatury otoczenia. Udarы krwotoczne i udary niedokrwienne mózgu, choć klasyfikowane jednakowo jako incydenty mózgowo-naczyniowe, reagują różnie na wzrost temperatury otoczenia. Podczas gdy wraz ze wzrostem temperatury otoczenia rośnie częstość udarów niedokrwiennych, spada częstość udarów krwotocznych (Green i in. 2009; Wang i in. 2009). Inne badania epidemiologiczne, nie rozróżniające typu udaru, a rozpatrujące te choroby łącznie, wskazują na jednoznacznie negatywny wpływ podwyższonej temperatury otoczenia. P. Koken i inni (2003) analizowali wpływ wzrostu temperatury otoczenia na różne typy chorób sercowo-naczyniowych. Stwierdzili, że na każdy jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury maksymalnej wzrasta o 17,5% częstość przyjęć do szpitala osób z zawałem mięśnia sercowego oraz o 13,2% osób z zaostrzeniem objawów przewlekłej niewydolności krążenia.

Kolejną grupą chorób zaostrzających się w okresach upałów są przewlekłe choroby układu oddechowego. Podstawową trudnością w analizie wpływu ekstremalnych zjawisk pogodowych na występowanie chorób układu oddechowego jest fakt, że zaostrzenia tych chorób mogą mieć związek nie tylko z samą temperaturą otoczenia, ale także z obecnymi w atmosferze zanieczyszczeniami. Z uwagi na fakt, że większość badań epidemiologicznych prowadzona była w dużych miastach, gdzie ilość zanieczyszczeń atmosferycznych jest znaczna i rośnie w okresach ekstremalnych zjawisk pogodowych, nie można oszacować rozdzielnie wpływu wymienionych czynników na zaostrzenia tej grupy chorób (Ren i in. 2006). R. Green i inni (2009) stwierdzili 2% wzrostu częstości hospitalizacji związanych z przewlekłymi chorobami układu oddechowego na każde 5,6°C wzrostu temperatury odczuwalnej. S. Lin i inni (2009)

zaobserwowali natomiast 2,7–3,1% wzrost częstości przyjęć do szpitala osób z chorobami układu oddechowego na każdy jeden stopień Celsjusza wzrostu temperatury ponad przyjętą wartość progową. Wiele badań potwierdza znaczący wpływ wzrostu zanieczyszczeń powietrza na częstość przyjęć do szpitala osób z przewlekłymi chorobami układu oddechowego, takimi jak astma czy przewlekła obturacyjna choroba płuc. Wśród zanieczyszczeń atmosferycznych mających najistotniejszy wpływ na zaostrzenie przebiegu tego typu chorób wymienia się zanieczyszczenia gazowe (dwutlenek azotu, dwutlenek siarki, tlenek węgla, ozon) oraz składniki pyłu zawieszonego, należące do najdrobniejszych jego frakcji, poniżej 10 μm i 2,5 μm (PM10 i PM2,5) (Fukuda i in. 2011; Tramuto i in. 2011; Santus i in. 2012). Wysoka temperatura otoczenia może także wpływać na częstość występowania zapaleń płuc. X. Ye i inni (2001) dowodzili, że wzrost o 1°C maksymalnej temperatury dobowej w Tokio przekładał się na 3,8% wzrostu częstości zapaleń płuc w tym rejonie. Z innych chorób, które mogą ulegać zaostrzeniu w wyniku narażenia na wysoką temperaturę otoczenia można ponadto wymienić cukrzycę i przewlekłą niewydolność nerek (Green i in. 2009).

Liczne polskie badania także wskazują na obciążający wpływ wysokiej temperatury powietrza na funkcjonowanie organizmu (Kuchcik 2001, 2006, 2007, 2013; Kuchcik, Błażejczyk 2001; Kozłowska-Szczęśna i in. 2004; Błażejczyk, Błażejczyk 2013; Błażejczyk i in. 2013). Podczas fal upałów występuje zwiększona liczba zachorowań i zgonów, do czego oprócz stresu termicznego przyczynia się także zwiększona koncentracja pyłków roślin alergizujących i zanieczyszczeń powietrza (Pałczyński i in. 2012).

Badania M. Kuchcik (2006, 2013) dotyczące umieralności w grupie wiekowej powyżej 65. roku życia dowodzą, że jakkolwiek średni wzrost ryzyka zgonu w falach upałów w lipcu wynosi 19% w grupie zgonów ogółem i 22% z powodu chorób układu krążenia, wzrost umieralności w poszczególnych falach upałów bywa znacznie wyższy. I tak w fali upałów z lipca 1994 r., z temperaturą przekraczającą 36°C, wzrost ryzyka zgonu wahał się od 23% w Szczecinie, 33% w Warszawie, 43% we Wrocławiu, 49% w Poznaniu aż do 63% w Łodzi, natomiast w przypadku chorób układu krążenia wynosiło ono: w Warszawie 37%, w Szczecinie 38%, w Poznaniu 42% i aż 62% we Wrocławiu oraz 64% w Łodzi.

Z kolei K. Błażejczyk i inni (2013) badali wpływ stresu ciepła, spowodowanego całym kompleksem czynników termicznych opisanych wskaźnikiem UTCI, na umieralność mieszkańców Warszawy. Stwierdzili, że wzrost umieralności jest proporcjonalny do stopnia zaostrzenia obciążeń cieplnych organizmu spowodowanego czynnikami termicznymi otoczenia.

7.2. Termoregulacja i zespoły przegrzania

Utrzymanie równowagi cieplnej (homeostazy) organizmu w dużej mierze zależy od prawidłowego, zrównoważonego bilansu cieplnego. Jest to możliwe dzięki sprawnie działającym mechanizmom termoregulacyjnym ustroju. Ciepło w organizmie człowieka pochodzi z dwóch źródeł: zewnętrznego (tzw. ciepło otoczenia) oraz wewnętrznego, związanego z przebiegającymi w organizmie reakcjami metabolicznymi. Aby utrzymać prawidłową temperaturę wewnętrzną ciała wynoszącą $37,0 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, organizm musi zachować równowagę pomiędzy ciepłem przyjmowanym, wytwarzanym i oddawanym do otoczenia. Organizm ludzki oddaje ciepło na drodze biernej przez promieniowanie, przewodzenie i konwekcję oraz na drodze czynnej poprzez parowanie wytwarzanego potu (Błażejczyk, Kunert 2011; Fiala i in. 2012). Ośrodek termoregulacji jest zlokalizowany w przedniej i tylnej części podwzgórza. Nie wykrywa on temperatury samego podwzgórza, czy krwi przez nie przepływającej, a jedynie mierzy różnicę w stosunku do tzw. poziomu nastawienia (ang. *set-point*). Impulsy z termoreceptorów skóry regulują poziom nastawienia ośrodka termoregulacji.

W zimnym otoczeniu impulsacja przewodzona z termoreceptorów skóry do ośrodkowego układu nerwowego podwyższa *set-point* układu termoregulacji, co powoduje, że temperatura podwzgórza (choć sama się nie zmienia) staje się niższa od poziomu nastawienia ośrodka termoregulacji. Proces ten uruchamia mechanizmy zachowania ciepła (zmniejszenie przepływu skórnej krwi, wzrost produkcji ciepła endogennego poprzez wzrost napięcia i drżenia mięśniowego). W otoczeniu gorącym następuje odwrócenie tego mechanizmu, *set-point* ustawiany jest na poziom niższy, wobec czego temperatura podwzgórza przekracza poziom nastawienia układu i uruchamiane zostają mechanizmy utraty ciepła (Makowiec-Dąbrowska 1999). Zasadniczym mechanizmem oddawania ciepła w organizmie jest zwiększenie skórnej przepływu krwi. Podwyższa to temperaturę skóry, która w warunkach komfortu termicznego wynosi około $28\text{--}32^{\circ}\text{C}$. Jeśli temperatura otoczenia przekracza temperaturę skóry, mechanizmy biernego oddawania ciepła do otoczenia stają się nieefektywne i ciepło z zewnątrz zaczyna napływać do organizmu. Zwiększenie temperatury skóry powoduje zmniejszenie gradientu skóra–otoczenie, zmniejszając w ten sposób pobieranie ciepła z zewnątrz. Jeśli ten mechanizm termoregulacji jest niewystarczający i w organizmie następuje akumulacja ciepła, uruchamiane są gruczoły potowe, a produkowany pot usuwa ciepło z organizmu poprzez mechanizm parowania. Jest to mechanizm niezwykle skuteczny, lecz przy dużej wilgotności otoczenia przestaje mieć znaczenie termoregulacyjne i przyczyniać się może jedynie do utraty płynów i soli z organizmu (Zajac-Nędza 2003; Błażejczyk, Szyguła 2004).

Stan, w którym temperatura wewnętrzna ciała przekracza 38°C nazywamy hipertermią. Powoduje ona kilkukrotny wzrost przepływu skórnej, przyspieszenie akcji serca i wzrost objętości wyrzutowej serca. Zwiększenie ukrwienia skóry,

zwłaszcza w połączeniu z wysiłkiem fizycznym, wiąże się z upośledzeniem ukrwienia narządów jamy brzusznej. Nadmierne rozszerzenie naczyń powoduje spadek ciśnienia tętniczego, mogące prowadzić do hipotonii. Na wzrost temperatury wewnętrznej ciała układ oddechowy odpowiada wzrostem częstości i spłyceniem oddechu, co powoduje wzrost ciśnienia CO₂ w płynach ustrojowych. Jednocześnie nadmierne pocenie powoduje utratę elektrolitów i wody, przyczyniając się do dalszego spadku ciśnienia tętniczego i odwodnienia. Podwyższona temperatura wewnętrzna ciała zaburza również fosforylację oksydacyjną w komórkach nerwowych, co upośledza funkcję wielu układów i narządów.

Wśród klinicznych postaci zespołu przegrzania wymienić należy omdlenie cieplne, które powstaje w wyniku utraty płynów w łożysku naczyniowym i braku możliwości utrzymania prawidłowych wartości ciśnienia tętniczego. Kurcze cieplne są wynikiem utraty wraz z potem elektrolitów, zwłaszcza gdy organizm uzupełnia utracony płyn poprzez przyjmowanie płynów o charakterze hipotonicznym. W klimacie gorącym, zwłaszcza podczas chodzenia czy stania, może wystąpić tzw. obrzęk termiczny. Wywołany jest on jednoczasowym rozkurczem naczyń obwodowych i ortostatycznym przemieszczeniem krwi do najniższej położonych części ciała. Kolejnym przykładem zespołu związanego z przegrzaniem jest tzw. wyczerpanie cieplne. W zespole tym temperatura ciała wzrasta powyżej 38°C, ale nie przekracza 40°C. Osoby z wyczerpaniem cieplnym skarżą się na złe samopoczucie, osłabienie, bóle głowy, nudności i wymioty. Obserwuje się wówczas obfite pocenie i przyspieszoną pracę serca.

Najbardziej niebezpiecznym zespołem przegrzania jest udar cieplny. W zespole tym temperatura wewnętrzna ciała przekracza 40°C, obserwuje się przyspieszoną częstotliwość tętna, przyspieszenie oddechu, duszność, osłabienie, nudności i wymioty, kurczowe bóle mięśni, pobudzenie psychoruchowe, napady drgawkowe, majaczenie i utratę przytomności. Skóra u osób z udarem cieplnym jest sucha i zaczerwieniona, co jest objawem dysregulacji mechanizmów termoregulacyjnych ustroju. W udarach o ciężkim przebiegu może wystąpić uszkodzenie mięśni i hemoliza wewnątrznaczyniowa (w wyniku rozwoju rozsianego zespołu wykrzepiania wewnątrznaczyniowego). Szczególnie niebezpiecznym powikłaniem udaru cieplnego jest ostra niewydolność nerek, która powstaje w wyniku zmniejszenia przepływu krwi przez nerki oraz czopowania kanalików nerkowych przez uwalnianą z uszkodzonych mięśni mioglobinę. W przebiegu udaru cieplnego można obserwować również objawy niekardiogenego obrzęku płuc, uszkodzenia wątroby i krwawień do ośrodkowego układu nerwowego (Zajac-Nędra 2003). Udar cieplny jest stanem nagłego zagrożenia życia i wymaga natychmiastowej pomocy medycznej.

7.3. Wpływ miejskiej wyspy ciepła na alergenowość szaty roślinnej (na przykładzie wybranych osiedli)

Do strategii adaptacyjnych i łagodzących zjawisko miejskiej wyspy ciepła zalicza się również te, które polegają na wprowadzaniu na tereny zurbanizowane nowych nasadzeń roślin. Przykłady takich działań stanowią: strategie zielonych dachów, zielonych fasad, zwiększanie udziału terenów zielonych czy stosowanie punktowych nasadzeń roślin ceniolubnych (Gago i in. 2013). Strategie tego typu potrafią bardzo efektywnie łagodzić zjawisko miejskiej wyspy ciepła, lecz nieodpowiedni dobór szaty roślinnej do tego typu interwencji może spowodować drastyczny spadek jakości życia okolicznych mieszkańców cierpiących na choroby alergiczne spowodowane uczuleniem na pyłki roślin (alergiczny nieżyt nosa, alergiczny nieżyt spojówek, astma, pokrzywka). Dlatego też niezwykle ważny jest odpowiedni dobór roślin w taki sposób, aby nie zaostbrały one objawów alergii. Choć brak jest bezpośrednich badań dotyczących wpływu zjawiska miejskiej wyspy ciepła na alergenowość roślin, to istnieje szereg udowodnionych czynników pośrednio wskazujących, że na skutek tego zjawiska możemy mieć do czynienia ze zmianą fizjologii roślin w kierunku zwiększenia ich potencjału alergizującego.

Istotą zjawiska MWC jest występowanie w obszarach zurbanizowanych podwyższonej temperatury powietrza w porównaniu do terenów pozamiejskich. W cieplejszych warunkach klimatycznych (także wobec zwiększonego stężenia dwutlenku węgla, a więc w środowisku typowym dla terenów zurbanizowanych, szczególnie tych z wyraźnie zaznaczonym zjawiskiem MWC) rośliny produkują większe ilości pyłków (Cecchi i in. 2010; Ziska, Beggs 2011). Dodatkowo, przy obecności charakterystycznych dla terenów wysoce zurbanizowanych zanieczyszczeń powietrza (takich jak tlenki siarki, azotu, węgla, ozon, cząstki pyłu zawieszonego) dochodzi do zmian w fizjologii roślin. Warunki takie pobudzają rośliny do produkcji większej ilości białek, także tych opłaszczających ziarna pyłku (Beck i in. 2013; Todea i in. 2013). W wyniku tego procesu ziarna zawierają na swojej powierzchni więcej białek, tj. alergenów odpowiedzialnych za wywoływanie objawów alergii. Tym samym są w stanie łatwiej zainicjować reakcje alergiczne u osób uczulonych. Białka te mogą także zmieniać swój charakter, powodując łatwiejsze łączenie się z przeciwciałami klasy IgE, odpowiedzialnymi za reakcje uczuleniowe o typie natychmiastowym. Te obserwacje potwierdzili L. Cuinica i inni (2014), badając wpływ ditlenku azotu na rozwój pyłków kilku gatunków drzew. Kolejnym czynnikiem mogącym wpływać na alergenowość roślin w obrębie MWC jest fakt, że w cieplejszych warunkach klimatycznych rośliny zmieniają swój kalendarz pyleń. Zaczynają one pylić wcześniej i zjawisko to utrzymuje się przez dłuższy okres (Bielory i in. 2012). Alergeny obecne na powierzchni pyłków mogą także zostać

przeniesione na cząstki pyłu zawieszonego (D'Amato 2001). Jest to szczególnie niebezpieczne, jeśli substancje białkowe opłaszczą cząstki pyłu zawieszonego należące do najdrobniejszych frakcji tj. PM_{2,5} i PM₁₀.

Same pyłki, z uwagi na swoją wielkość (nie mniejszą niż 15 µm), nie są w stanie dotrzeć do drobnych dróg oddechowych, mogą zatem być odpowiedzialne głównie za wywoływanie objawów alergicznego zapalenia spojówek, alergicznego zapalenia błony śluzowej nosa czy wystąpienie alergicznych zmian skórnych. Transfer alergenów na mniejsze cząstki powoduje, że docierają one z łatwością do najdalszych części układu oddechowego, mogąc prowokować napady astmy oskrzelowej. Ułatwiona penetracja alergenów do układu oddechowego sprawia, że większa powierzchnia błony śluzowej tego układu narażona jest na kontakt z alergenem. Przebywa on wtedy w organizmie dłużej, a w połączeniu z drażniącym działaniem zanieczyszczeń powietrza na błonę śluzową dróg oddechowych może nie tylko wywoływać objawy alergii wziewnej u osób uczulonych, ale również ułatwiać alergizację u osób, u których alergia jeszcze się nie rozwinęła. Dlatego też obecność w powietrzu alergenów i zanieczyszczeń atmosferycznych może działać synergicznie zarówno w stosunku do wyzwalania objawów alergii, jak i zwiększonego ryzyka rozwoju alergii u osób nie dotkniętych jeszcze tym schorzeniem. Z powyższych powodów alergie powietrzno pochodne u osób zamieszkujących tereny zurbanizowane obserwowane są znacząco częściej niż u osób mieszkających na terenach pozamiejskich i wiejskich (Samel-Kowalik i in. 2009). Dlatego tak ważne jest, by dobór roślin w środowisku wysoce zurbanizowanym był przeprowadzany z zachowaniem szczególnej ostrożności. Rośliny, które zaliczamy do roślin wiatropylnych mogą produkować w sezonie pylenia olbrzymie ilości pyłków. Jeden kwiat dębu w sezonie pylenia może wyprodukować około 400 tys. pyłków, jeden kwiatostan leszczyny około 4 mln, a brzozy 5,5 mln. Do wywołania reakcji alergicznej u osoby uczulonej wystarczy już obecność 50–80 ziaren pyłku/m³ (Gawlik 2000). Zatem jeden tylko kwiatostan brzozy może skutecznie „skazić alergologicznie” około 100 tys. m³ powietrza. Można zatem zaryzykować stwierdzenie, że ze względu na potencjał alergizujący nawet pojedyncza roślina w środowisku miejskim może mieć znaczenie i wywierać istotny wpływ na „jakość alergologiczną” powietrza, którym oddychają mieszkańcy.

W trakcie badania ekofizjograficznego wykonanego na potrzeby projektu UHI na trzech terenach pilotażowych programu (Włodarzewska, Włodarzewska-tory i Koło) stwierdzono obecność 1189 egzemplarzy drzew i krzewów należących do 97 różnych gatunków (tab. 7.1).

Na podstawie wytycznych Polskiego Towarzystwa Alergologicznego, danych literaturowych, konsultacji z lokalnymi alergologami uzupełnionych o doświadczenia własne autorów, gatunki roślin z terenów pilotażowych podzielono na cztery klasy alergenowości:

- klasa 3 – gatunki roślin często uczulające,
klasa 2 – gatunki roślin rzadziej uczulające,
klasa 1 – gatunki roślin uczulające bardzo rzadko bądź dostępne jedynie pojedyncze doniesienia literaturowe o możliwości wywołania alergii powietrzno pochodnej typu natychmiastowego,
klasa 0 – gatunki roślin nie uczulających (do klasy tej zaliczono także żeńskie egzemplarze roślin dwupiennych z klas wyższych z uwagi na brak produkcji pyłków).

Jeśli rozpatrywany gatunek rośliny nie został wymieniony w jakichkolwiek wyciecznych bądź w wywiadach z lekarzami alergologami, klasyfikacji alergeności dokonano na podstawie analizy bazy danych czasopism naukowych EBSCO Host. Do poszukiwania informacji w bazie EBSCO użyto łacińskich nazw roślin. Jeśli w ciągu ostatnich 15 lat znaleziono przynajmniej 3 doniesienia naukowe bądź opisy przypadków dotyczące możliwości wywołania alergii powietrzno pochodnej typu natychmiastowego gatunek klasyfikowano jako klasa 1, jeśli nie – klasa 0.

Tabela 7.1. Gatunki roślin wyszczególnione w opracowaniu ekofizjograficznym terenów pilotażowych

<i>Abies concolor</i>	<i>Cotoneaster horizontalis</i>	<i>Mahonia aquifolium</i>	<i>Rhus typhina</i>
<i>Abies koreana</i>	<i>Cotoneaster lucidus</i>	<i>Malus purpurea</i>	<i>Ribes alpinum</i>
<i>Acer campestre</i>	<i>Crataegus monogyna</i>	<i>Malus sp.</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
<i>Acer negundo</i>	<i>Crataegus xmedia</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Rosa sp.</i>
<i>Acer platanoides</i>	<i>Daphne mezereum</i>	<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	<i>Salix alba</i>
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Deutzia scabra</i>	<i>Philadelphus sp.</i>	<i>Salix babylonica</i>
<i>Acer saccharinum</i>	<i>Elaeagnus angustifolia</i>	<i>Physocarpus opulifolius</i>	<i>Salix caprea</i>
<i>Aesculus hippocastanum</i>	<i>Euonymus fortunei</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Salix caprea „Klimanrock”</i>
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Picea pungens</i>	<i>Salix fragilis</i>
<i>Berberis thunbergii</i>	<i>Forsythia xintermedia</i>	<i>Pinus mugo</i>	<i>Sambucus nigra</i>
<i>Betula pendula</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Sorbus aria</i>
<i>Buxus sempervirens</i>	<i>Hedera helix</i>	<i>Platanus xhispanica</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>
<i>Caragana arborescens</i>	<i>Hydrangea sp.</i>	<i>Populus alba</i>	<i>Spiraea „Grefsheim”</i>
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Ilex aquifolium</i>	<i>Populus nigra</i>	<i>Spiraea japonica</i>
<i>Catapla bignonioides</i>	<i>Juglans nigra</i>	<i>Populus simonii</i>	<i>Spiraea xvanhouttei</i>
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	<i>Juniperus „Blue Carpet”</i>	<i>Potentilla fruticosa</i>	<i>Symphoricarpos albus</i>
<i>Chaenomeles japonica</i>	<i>Juniperus sabina</i>	<i>Prunus avium</i>	<i>Syringa vulgaris</i>
<i>Chamaecyparis pisifera</i>	<i>Juniperus sp.</i>	<i>Prunus cerasifera</i>	<i>Tamarix sp.</i>
<i>Chamaecyparis sp.</i>	<i>Juniperus virginiana</i>	<i>Prunus domestica subsp. syriaca</i>	<i>Taxus baccata</i>
<i>Cornus alba</i>	<i>Juniperus xmedia</i>	<i>Pyracantha coccinea</i>	<i>Thuja occidentalis</i>
<i>Corylus colurna</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Pyrus pyraeaster</i>	<i>Tilia cordata</i>
<i>Cotinus coggygria</i>	<i>Ligustrum vulgare</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Tilia platyphyllos</i>
<i>Cotoneaster dammeri</i>	<i>Lonicera maackii</i>	<i>Quercus rubra</i>	<i>Viburnum opulus</i>
	<i>Lonicera xylosteum</i>	<i>Reynoutria sachalinensis</i>	<i>Weigela florida</i>
	<i>Magnolia sp.</i>		<i>Wisteria sp.</i>

Źródło: opracowanie własne.

W obrębie terenów pilotażowych stwierdzono obecność 38 egzemplarzy roślin klasy 3, co stanowi 3,2% całkowitej liczby roślin. Do klasy tej zaliczono następujące



Rycina 7.1. Występowanie roślin klasy 3 na terenach pilotażowych: Koło (a), Włodarzewska (b), Włodarzewska-tory (c)

gatunki: brzozę brodawkowatą (*Betula pendula*) – 35 szt., olchę czarną (*Alnus glutinosa*) – 2 szt. i leszczynę turecką (*Corylus colurna*) – 1 szt. (ryc. 7.1).

Stwierdzono także obecność 78 egzemplarzy roślin klasy 2, co stanowi 6,6% całkowitej liczby roślin. Do klasy tej zaliczono następujące gatunki: buk pospolity (*Fagus sylvatica*) – 7 szt., dąb czerwony (*Quercus rubra*) – 3 szt., dąb szypułkowy (*Quercus robur*) – 1 szt., jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior*) egzemplarz męski – 2 szt., lipa drobnolistna (*Tilia cordata*) – 7 szt., lipa szerokolistna (*Tilia platyphyllos*) – 16 szt., platan klonolistny (*Platanus xhispanica*) – 1 szt., topola biała (*Populus alba*) egzemplarz męski – 10 szt., topola czarna (*Populus nigra*) egzemplarz męski – 16 szt., topola Simona (*Populus simonii*) egzemplarz męski – 2 szt., wierzba babilońska (*Salix babylonica*) egzemplarz męski – 6 szt., wierzba biała (*Salix alba*) egzemplarz męski – 2 szt., wierzba iwa (*Salix caprea*) egzemplarz męski – 4 szt., wierzba krucha (*Salix fragilis*) egzemplarz męski – 1 szt. (ryc. 7.2).



Rycina 7.2. Rozmieszczenie roślin klasy 2 na terenach pilotażowych: Koło (a), Włodarzewska (b), Włodarzewska-tory (c)

Do roślin klasy 1 zaliczono następujące gatunki: bez czarny (*Sambucus nigra*), cis pospolity (*Taxus baccata*) egzemplarz męski, cyprysik groszkowy (*Chamaecyparis pisifera*), cyprysik (*Chamaecyparis sp.*), czereśnia ptasia (*Prunus avium*), grab pospolity (*Carpinus betulus*), jałowiec (*Juniperus sp.*), jałowiec „Blue Carpet” (*Juniperus „Blue Carpet”*), jałowiec Pfitzera (*Juniperus xmedia*), jałowiec sabiński (*Juniperus sabina*), jałowiec wirginijski „Grey Owl” (*Juniperus virginiana*), kasztanowiec zwyczajny (*Aesculus hippocastanum*), klon jawor (*Acer pseudoplatanus*), klon jesionolistny (*Acer negundo*) egzemplarz męski, klon polny (*Acer campestre*), klon pospolity (*Acer platanoides*), klon srebrzysty (*Acer saccharinum*) egzemplarz męski, ligustr pospolity (*Ligustrum vulgare*), lilak pospolity (*Syringa vulgaris*), morwa biała (*Morus alba*), oliwnik wąskolistny (*Elaeagnus angustifolia*), robinia biała (*Robinia pseudoacacia*), róża ogrodowa (*Rosa sp.*), sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*), świerk kłujący (*Picea pungens*), świerk pospolity (*Picea abies*), żywotnik zachodni (*Thuja occidentalis*).

Do roślin klasy 0 zaliczono następujące gatunki: ałyca „Pissardii” (*Prunus cerasifera*), berberys thunberga (*Berberis thunbergii*), bluszcz pospolity (*Hedera helix*), bukszpan wiecznie zielony (*Buxus sempervirens*), cis pospolity (*Taxus baccata*) egzemplarz żeński, dereń biały (*Cornus alba*), forsycja pośrednia (*Forsythia intermedia*), głóg jednoszyjkowy (*Crataegus monogyna*), głóg pośredni (*Crataegus media*), grujecznik japoński (*Cercidiphyllum japonicum*) egzemplarz męski, grusza pospolita (*Pyrus pyraster*), hortensja ogrodowa (*Hydrangea sp.*), irga błyszcząca (*Cotoneaster lucidus*), irga dammera (*Cotoneaster dammerii*), irga pozioma (*Cotoneaster horizontalis*), jabłoń (*Malus sp.*), jabłoń purpurowa (*Malus purpurea*), jarzab mączny (*Sorbus aria*), jarzab pospolity (*Sorbus aucuparia*), jaśminowiec (*Philadelphus sp.*), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior*) egzemplarz żeński, jodła jednobarwna (*Abies concolor*), jodła koreańska (*Abies koreana*), kalina koralowa (*Viburnum opulus*), karagana syberyjska (*Caragana arborescens*), klon jesionolistny (*Acer negundo*) egzemplarz żeński, kosodrzewina (*Pinus mugo*), krzewuszką cudowną (*Weigela florida*), magnolia (*Magnolia sp.*), mahonia (*Mahonia aquifolium*), modrzew europejski (*Larix decidua*), ognik szkarłatny (*Pyracantha coccinea*), orzech czarny (*Juglans nigra*), ostrokrzew kolczasty (*Ilex aquifolium*), perukowiec podolski (*Cotinus coggygia*), pęcherznica kalinolistna (*Physocarpus opulifolius*), pięciornik krzewiasty (*Potentilla fruticosa*), pigwowiec japoński (*Chaenomeles japonica*), porzeczka alpejska (*Ribes alpinum*), rdest sachaliński (*Reynoutria sachalinensis*), suchodrzew Maacka (*Lonicera maackii*), suchodrzew pospolity (*Lonicera xylosteum*), sumak octowiec (*Rhus Typina*), surmia bigoniowa (*Catapla bignonioides*), śliwa mirabelka (*Prunus domestica subsp. syriaca*), śnieguliczka biała (*Symphoricarpos albus*), tamaryszek (*Tamarix sp.*), tawuła japońska (*Spiraea japonica*), tawuła norweska (*Spiraea „Grefsheim”*), tawuła van Houtte’a (*Spiraea xvanhouttei*), topola czarna (*Populus nigra*) egzemplarz żeński, trzmielina Fortune’a (*Euonymus fortunei*), wawrzynek wilczełyko (*Daphne mezereum*), winobluszcz pięciolistkowy (*Parthenocissus quinquefolia*), wisteria (*Wisteria sp.*), żylistek szorstki (*Deutzia sabra*).

Wyniki analizy z uwzględnieniem występowania roślin różnych klas z podziałem na tereny badane przedstawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Liczba egzemplarzy roślin o różnej alergeności na obszarze badanych osiedli

Obszar	Klasa alergeności			
	0	1	2	3
Koło (469 egzemplarzy)	134 (28,6%)	273 (58,2%)	54 (11,5%)	8 (1,7%)
Klasa 2 i 3 łącznie			62 (13,2%)	
Włodarzewska-tory (101 egzemplarzy)	49 (48,5%)	39 (38,6%)	9 (8,9%)	4 (4%)
Klasa 2 i 3 łącznie			13 (12,9%)	
Włodarzewska (619 egzemplarzy)	302 (48,8%)	276 (44,6%)	15 (2,4%)	26 (4,2%)
Klasa 2 i 3 łącznie			41 (6,6%)	

Przeprowadzone analizy pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- ▶ Odsetek roślin zaliczanych do klasy 2 i 3 łącznie, a więc stanowiących potencjalny problem alergologiczny zawiera się w przedziale od 6,6 do 13,2% ogółu szaty roślinnej terenów badanych.
- ▶ Odsetek roślin zaliczanych dla klasy 3, a więc tych o najwyższym potencjale alergizującym zawiera się w przedziale od 1,7 do 4,2% ogółu szaty roślinnej terenów badanych.
- ▶ Największa liczba roślin zaliczanych do klasy 3 znajduje się w rejonie badawczym Włodarzewska – 26 egzemplarzy, najmniejsza w rejonie badawczym Włodarzewska-tory – 4 egzemplarze.
- ▶ Wśród roślin o najwyższym potencjale alergizującym przewagę stanowią brzozy – 92,1% ogółu roślin klasy 3.
- ▶ W rejonach Włodarzewska i Koło stwierdzono obecność dwóch obszarów bliskiej koncentracji roślin klasy 3 – w północno-wschodnim obszarze osiedla Koło (6 egzemplarzy roślin klasy 3) oraz w północno-zachodnim obszarze osiedla Włodarzewska (7 egzemplarzy roślin klasy 3).

Powyższe wyniki wskazują jednoznacznie na konieczność nie tylko powiększenia udziału terenów biologicznie czynnych, ale także odpowiedniego doboru szaty roślinnej w strategiach łagodzenia zjawiska miejskiej wyspy ciepła. Rozważne nasadzenia roślin nie powodujących nasilenia alergii powietrzno pochodnych ma szczególne znaczenie, zwłaszcza w świetle rosnącej liczby alergii i zaostrzenia jej przebiegu.

7.4. Wrażliwość demograficzna miast na wysoką temperaturę powietrza

W rozdziałach 7.1 i 7.2 przedstawiono podstawowe problemy, jakie wiążą się z oddziaływaniem podwyższonej, w stosunku do terenów pozamiejskich, temperatury powietrza. Ekspozycja mieszkańców na obciążające warunki termiczne, zwłaszcza w okresie letnim, wpływa na obniżanie jakości życia, w tym zagrożenie zdrowia. MWC znacząco nasila te negatywne oddziaływania. Na największe ryzyko związane z wysoką temperaturą narażeni są głównie ludzie starsi (powyżej 65 lat), małe dzieci, osoby chore na choroby układu oddechowego, sercowo-naczyniowego, osoby niepełnosprawne głównie ruchowo i bezdomni.

Symulacje zmian klimatu w XXI w. wskazują, że liczba i czas trwania okresów z bardzo wysoką temperaturą powietrza będzie się stopniowo zwiększać (Kuchcik 2013).

Model ECHAM5 wydaje się znacznie zaniżać możliwe wartości temperatury powietrza, zaś ARPEGE – prawdopodobnie zawyżać. Według pierwszego modelu do

końca XXI w. liczba fal upałów będzie niższa niż obecnie, a pod koniec wieku zbliży się do notowanej w latach 1981–2010. Z kolei według ARPEGE w każdym 10-leciu przewiduje wzrost liczby fal upałów. Według niego po 2070 r. będziemy mieć do czynienia z krotnością ponad 4,5 obecnej liczby 3-dniowych fal upałów i blisko 8-krotną liczbą fal 5-dniowych. Można założyć, że prognozy obu modeli, analizowane razem, wydają się stanowić dobre ramy, których z dużym prawdopodobieństwem nie przekroczą warunki termiczne do końca XXI wieku. Taki wzrost częstości skrajnie gorących warunków będzie prowadził do być może nawet 2,5-krotnego wzrostu umieralności nimi spowodowanej (Kuchcik 2013). Także kilkukrotny wzrost umieralności szacowany jest wraz ze wzrostem częstości warunków odczuwanych jako silny stres gorąca (Błażejczyk i in. 2013).

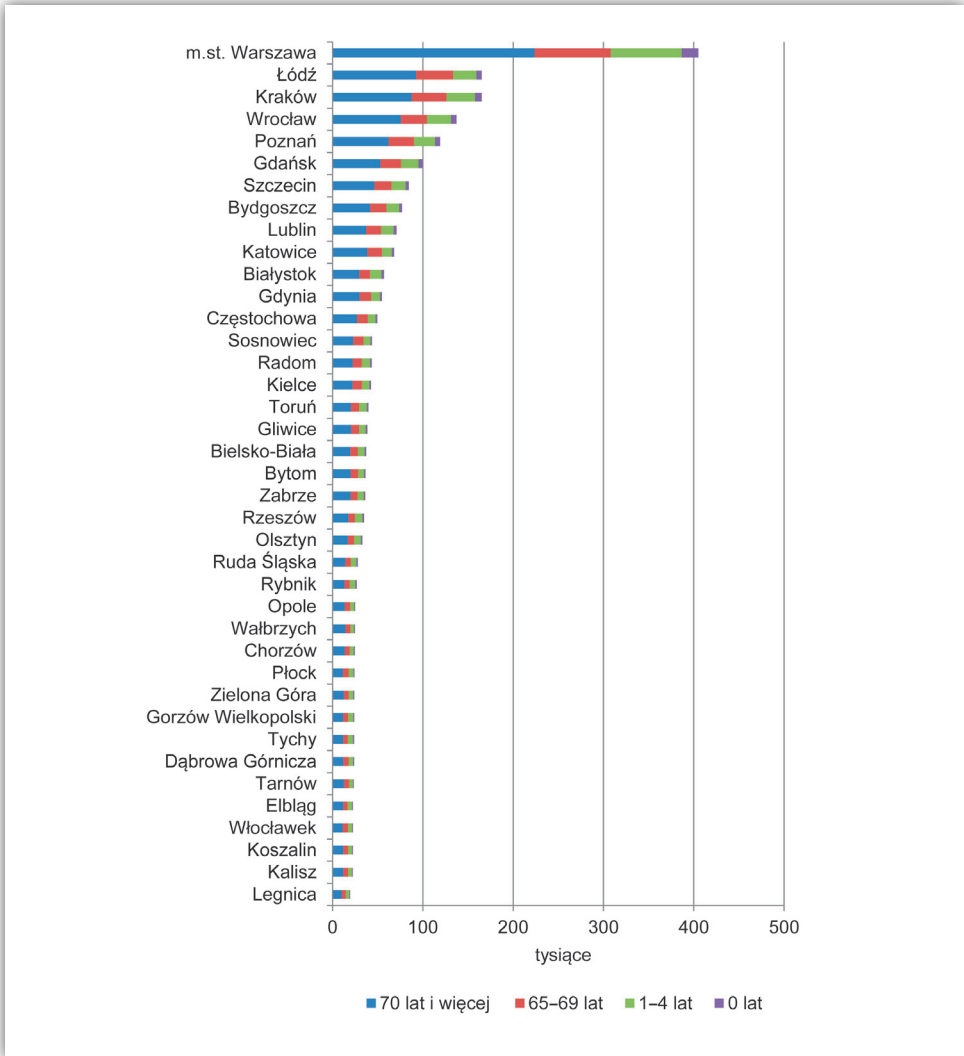
Prognozowany wzrost częstości okresów upalnych, a co za tym idzie także nocy tropikalnych, będzie powodował wzrost problemów zdrowotnych związanych z ekspozycją na wysoką temperaturę otoczenia nie tylko osób starszych, ale także osób pracujących, w sile wieku (Błażejczyk, Błażejczyk 2013). Obserwowane zmiany dotkną głównie mieszkańców dużych miast, które tracą naturalne możliwości schładzania powietrza wskutek intensyfikacji żywiołowej zabudowy i ubytków zieleni oraz zabudowywania korytarzy nawietrzających i schładzających strefy intensywnej zabudowy miejskiej.

W celu określenia wrażliwości demograficznej dużych miast (powyżej 100 tys. mieszkańców), związanej z ekspozycją ich mieszkańców na wysoką temperaturę, zaproponowano stosowanie następujących mierników:

- ▶ bezwzględne demograficzne ryzyko termiczne miast (BDRT) – określone liczbą mieszkańców w wieku do 4 lat włącznie oraz 65 lat i więcej w danym mieście;
- ▶ demograficzny wskaźnik ryzyka termicznego (DWRT) – określony udziałem mieszkańców w wieku do 4 lat włącznie oraz 65 lat i więcej w danym mieście, w ogólnej liczbie mieszkańców.

Pod względem liczby ludności, Warszawa stanowi ośrodek o największej koncentracji mieszkańców narażonych na ryzyko termiczne BDRT (405,1 tys.) (w tym 223,5 tys. to ludność w wieku 75 lat i więcej). W odniesieniu do sumarycznej liczby ludności zagrożonej ryzykiem termicznym BDRT badanych miast, aż 17,4% z tej liczby mieszka w Warszawie, co stanowi 3,7% ogólnej liczby ludności tych miast. Pod względem liczebności grup największe ryzyko dotyczyć będzie ludzi najstarszej grupy wiekowej (75 lat i więcej). Kolejnych pięć miast o dużym ryzyku termicznym BDRT to: Łódź, Kraków, Wrocław, Poznań i Gdańsk (ryc. 7.3).

Jest to problem, który w znacznie szerszym zakresie niż obecnie musi być brany pod uwagę przez społeczność miasta, samorząd miejski, placówki służby zdrowia

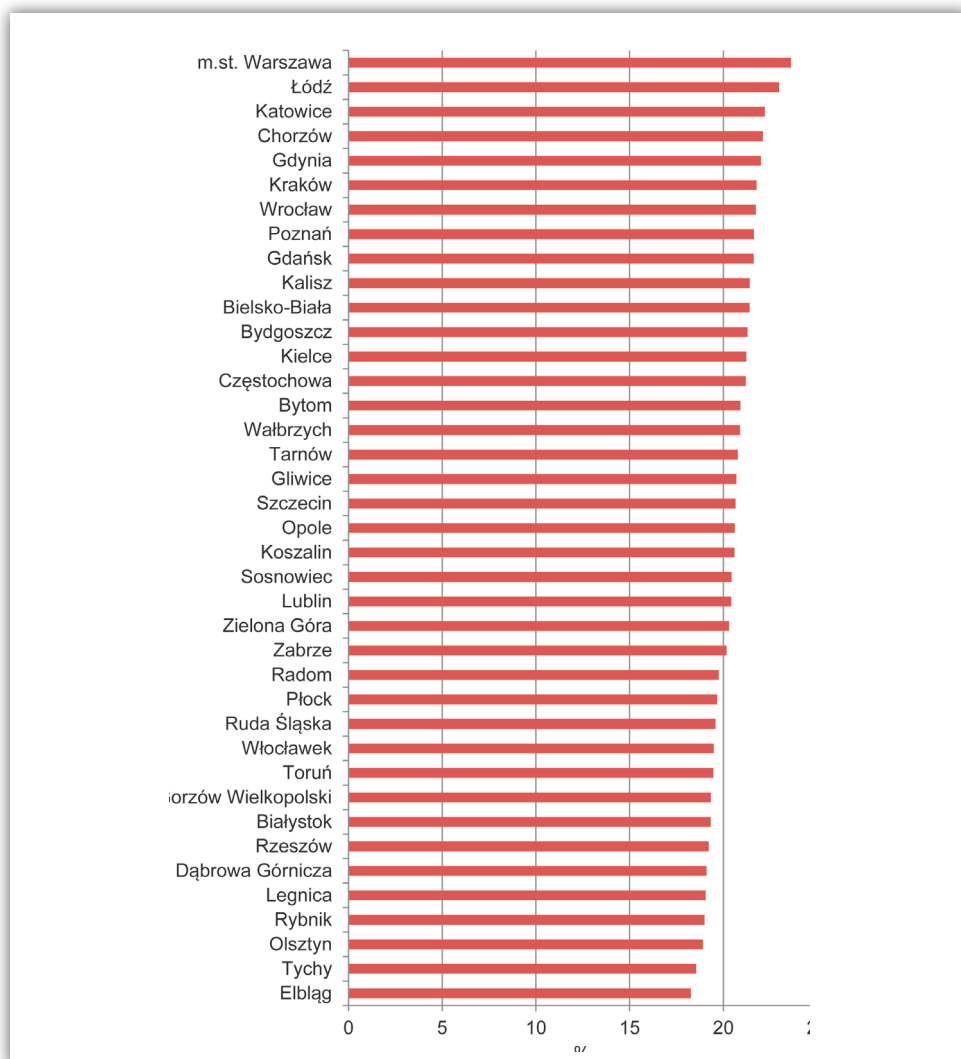


Rycina 7.3. Bezwzględne demograficzne ryzyko termiczne (BDRT) w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców (według stanu na 31 grudnia 2012 roku)

Opracowanie własne na podstawie danych GUS (2013).

i ośrodki opiekuńcze, system edukacyjny oraz systemy monitorowania i ostrzegania ludności o występujących zagrożeniach termicznych.

Analiza porównawcza dużych miast pod względem wskaźników DWRT wykazuje, że największym odsetkiem ludności danego miasta objętym ryzykiem termicznym i podwyższonym ryzykiem termicznym charakteryzują się Warszawa, a następnie Łódź, Katowice, Chorzów i Gdynia (ryc. 7.4). Zróżnicowanie miast pod względem wartości tych wskaźników można ocenić jako umiarkowane, ponieważ zakres wartości DWRT waha się od 18,3% w Elblągu do 23,6% w Warszawie.



Rycina 7.4. Demograficzny wskaźnik ryzyka termicznego (DWRT) w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców (według stanu na 31 grudnia 2012 roku)

Opracowanie własne na podstawie danych GUS (2013).

Spośród analizowanych charakterystyk demograficznych, ludność w wieku powyżej 70 lat stanowiła cechę najbardziej różnicującą wrażliwość miast na wysokie temperatury powietrza. Ta grupa wiekowa stanowi coraz większą populację narażoną na negatywny wpływ klimatu w związku ze zwiększającą się długością życia. Scenariusze zmian klimatu wskazują, że problem ten w kolejnych dziesięcioleciach XXI w. będzie narastał, a najbardziej nasili się w schyłkowym okresie XXI wieku.

8. Sposoby ograniczania miejskiej wyspy ciepła i adaptacji do niej

- ▷ W celu wypracowania metod działań ograniczających intensywność i zasięg MWC przeprowadzono (na 3 obszarach reprezentujących różne typy zabudowy) badania symulujące wielkość MWC w warunkach zmienionego sposobu zagospodarowania terenu, w tym przede wszystkim zwiększonego udziału terenów biologicznie czynnych.
- ▷ Symulacje pokazały, że w zależności od rodzaju i zakresu wprowadzanych zmian intensywność MWC uległaby tylko nieznacznemu złagodzeniu (przy dosadzeniu drzew i powiększaniu trawników), a maksymalnie (przy wyburzeniu kilku budynków i wprowadzeniu zielonych dachów) byłaby niższa o od 0,5°C latem do 1,0°C zimą w stosunku do stanu obecnego.
- ▷ Katalog działań ograniczających miejską wyspę ciepła zawiera m.in.: zachowanie w przestrzeni miasta powierzchni niezabudowanych i istniejących obszarów zieleni wysokiej, zachowanie i odnowę korytarzy wymiany powietrza, wprowadzanie zadrzewień na obszarach intensywnej zabudowy, rozwój zadrzewień przyulicznych, zacienianie zielenią placów miejskich, skwerów i placów zabaw, wprowadzanie na szerszą skalę zielonych dachów oraz tzw. zielonych ścian.
- ▷ Wszelkie zmiany struktury roślinności powinny uwzględniać jej alergenicność.
- ▷ Katalog działań adaptacyjnych zawiera m.in.: wprowadzenie programów edukacyjnych na różnych szczeblach kształcenia (uświadamiających istotę i konsekwencje MWC), prowadzenie stałego monitoringu miejskiej wyspy ciepła, stworzenie systemu informowania społeczeństwa o zasięgu i intensywności MWC, wprowadzenie systemu wspomaganie i wczesnego ostrzegania o zwiększonym ryzyku problemów kardiologicznych i alergicznych, związanych z falami upałów i epizodami intensywnej miejskiej wyspy ciepła.

Podstawowym celem projektu UHI było opracowanie metod działań ograniczających intensywność i zasięg MWC. Wyniki wielu badań, przedstawionych szerzej w rozdziale 5.2 dowodzą, że szczególną rolę pełnią w tym zakresie roślinność oraz sposób zagospodarowania terenu. W ramach projektu przeprowadzono także eksperyment terenowy, mający na celu zweryfikowanie powyższych prawidłowości. Szczegółowe pomiary terenowe przeprowadzono na obszarze dwóch osiedli: Koło oraz Włodarzewska i porównano je z danymi reprezentującymi centrum miasta (Twarda) oraz teren podmiejski (Powsin). Wyniki pomiarów szczegółowo omówiono w rozdziale 5.3. Najważniejszym wnioskiem z badań terenowych było stwierdzenie, że sama MWC i temperatura odczuwalna są silnie powiązane ze wskaźnikiem intensywności zabudowy (WIZ) oraz odsetkiem terenów biologicznie czynnych (TBC).

W związku z powyższym przeprowadzono badania symulujące wielkość MWC w warunkach zmienionego sposobu zagospodarowania terenu. Obliczenia symulujące temperaturę powietrza wśród zabudowy na tle temperatury powietrza w terenie podmiejskim przeprowadzono za pomocą programu ENVI-Met, przy współpracy z Zakładem Fizyki Budynków, Instytutu Architektury Politechniki Wiedeńskiej.



Rycina 8.1. Zagospodarowanie terenu na osiedlu Włodarzewska: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (zastąpienie 2 budynków przez trawniki i drzewa) (b)



Rycina 8.2. Zagospodarowanie obszaru Twarda: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (dodatkowe drzewa i powierzchnie przepuszczalne) (b) oraz zmiany proponowane w scenariuszu 2 (dodatkowe drzewa, powierzchnie przepuszczalne i zielone dachy) (c)

Do badań symulacyjnych wybrano trzy obszary: osiedle Włodarzewska, osiedle Zacisze i rejon ulicy Twardej. Każdy z obszarów reprezentuje inny typ zabudowy. Włodarzewska to osiedle mieszkaniowe z blokami wielorodzinnymi, o gęstej zabudowie (WIZ = 1,25) i niewielkiej powierzchni terenów biologicznie czynnych (TBC = 41%). Zacisze to osiedle domów jednorodzinnych, ze stosunkowo gęstą zabudową (WIZ = 0,66, TBC = 46%). Rejon ulicy Twardej to ścisłe centrum Warszawy,

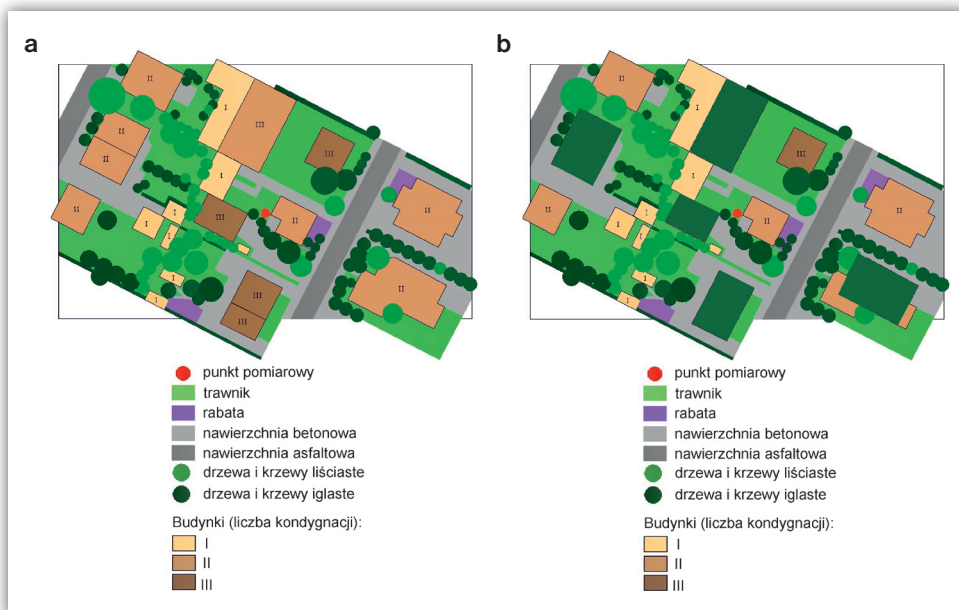
z głębokimi podwórkami-studniami, otoczonymi 7- lub 8-piętrowymi budynkami (WIZ = 2,74) i bardzo małym odsetkiem TBC (4%).

Biorąc pod uwagę rolę zieleni, zaproponowane scenariusze zmian zagospodarowania polegały przede wszystkim na zwiększeniu odsetka TBC, a w przypadku osiedla Włodarzewska – także rozgęszczenia zabudowy. W miejsce usuniętych dwóch budynków zaproponowano założenie trawników i zasadzenie drzew (ryc. 8.1).

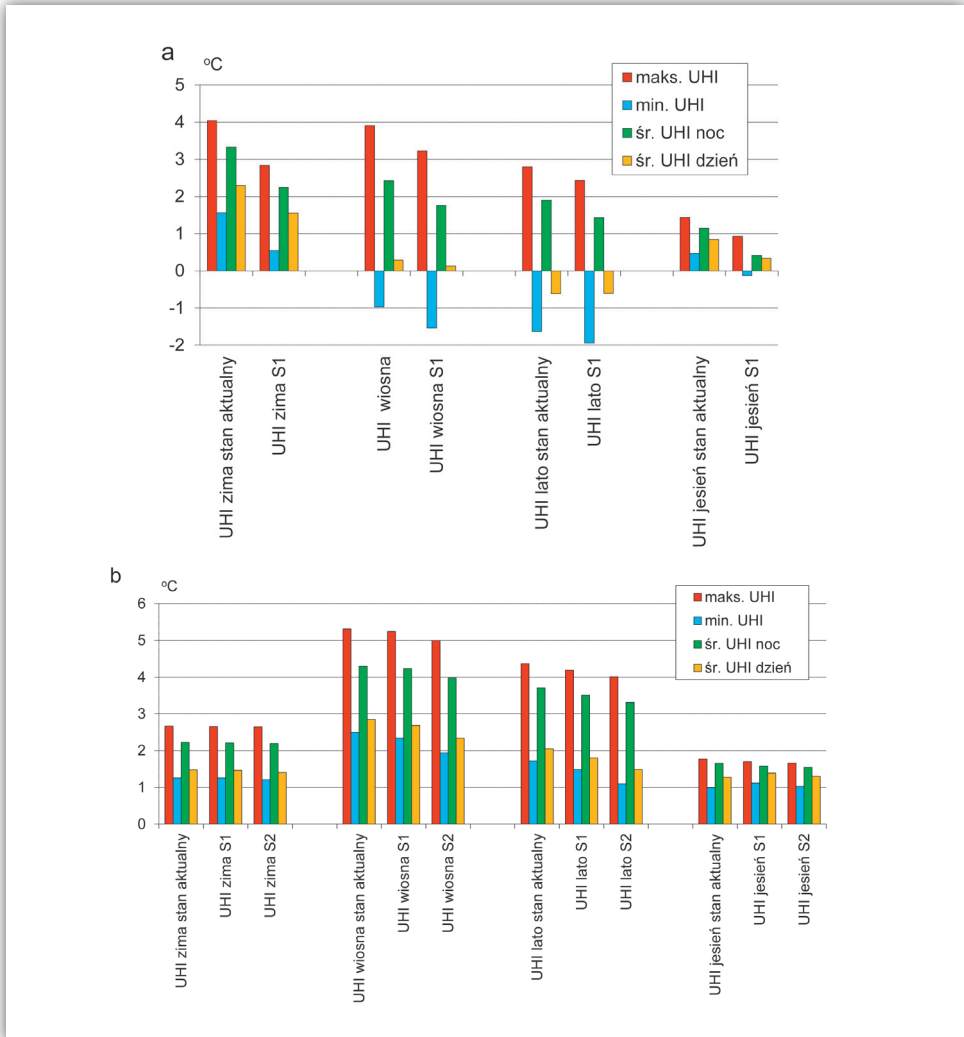
W przypadku obszaru Twarda zaproponowano dwa scenariusze zmian. W pierwszym wprowadzono na podwórka trawniki i drzewa oraz zaproponowano ciągi drzew wśród ulic utaczających badany kwartał. W drugim scenariuszu, poza zielenią wprowadzoną w scenariuszu 1, zaproponowano także pokrycie wszystkich dachów zielenią (ryc. 8.2.).

W przypadku osiedla Zacisze, z uwagi na duży udział zieleni niskiej i drzew w ogrodach przydomowych, zaproponowano jedynie wprowadzenie na części budynków zielonych dachów (ryc. 8.3).

W wyniku przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych uzyskano wartości temperatury powietrza w czterech dniach roku, reprezentujących różne jego pory. Wartości temperatury odnosiły się do terenu podmiejskiego oraz do centralnego punktu każdego z osiedli. Na tej podstawie obliczono wartości wskaźnika UHI-index dla wybranych okresów w ciągu doby: dla najniższej temperatury dobowej (maks. UHI), dla najwyższej temperatury dobowej (min. UHI), dla średniej temperatury godzin nocnych, t.j. pomiędzy godziną 21 a 7 rano (śr. UHI noc) oraz



Rycina 8.3. Zagospodarowanie terenu na osiedlu Zacisze: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (wprowadzenie zielonych dachów) (b)



Rycina 8.4. Symulowane różne charakterystyki miejskiej wyspy ciepła na osiedlu Włodarzewska (a) i obszarze Twarda (b), dla wybranych 4 dni reprezentujących pory roku; S1- scenariusz 1, S2 - scenariusz 2

dla średniej temperatury godzin dziennych, tj. pomiędzy godziną 10 a 16 (śr. UHI dzień) (ryc. 8.4).

Symulacje wykonane dla osiedla Włodarzewska pokazały, że w każdym z sezonów wartości wskaźników UHI były niższe po wprowadzeniu proponowanych zmian od 0,5°C latem do 1,0°C zimą (ryc. 8.4a). W przypadku obszaru Twarda wprowadzenie w życie pierwszego scenariusza zmian przyniosłoby tylko nieznaczne złagodzenie MWC, zwłaszcza w okresie letnim. Jesienią zaś wskaźniki UHI byłyby mniej korzystne niż przy obecnym stanie zagospodarowania. Dopiero wprowadzenie drugiego

scenariusza zmian (trawniki, drzewa i zielone dachy) przyniosłoby niewielkie obniżenie wskaźników UHI o 0,3–0,5°C (ryc. 8.4b). Na osiedlu Zacisze żadne proponowane zmiany ograniczające MWC nie wpłynęłyby na intensywność zjawiska.

Doświadczenia z innych miast europejskich oraz wnioski z przeprowadzonych badań mówią, że nie da się wprawdzie zlikwidować zjawiska miejskiej wyspy ciepła, można jednak poprzez odpowiednie działania planistyczne na szczeblu ogólnomiejskim i lokalnym zmniejszać jej intensywność. Odpowiednie działania planistyczne ułatwią także adaptację mieszkańców miast do tego zjawiska.

8.1. Katalog działań ograniczających

Wśród działań ograniczających miejską wyspę ciepła powinny się znaleźć następujące:

- ▶ zachowanie w przestrzeni miasta powierzchni niezabudowanych – pozwoli to na złagodzenie procesów nagrzewania się przestrzeni miejskiej, a poprzez łatwiejszy ruch powietrza – na łagodzenie stresu termicznego;
- ▶ zachowanie klinów wymiany powietrza (i ich odnowa), które pozwalają na penetrację w głąb miasta świeżego, czystego, stosunkowo chłodnego i wilgotnego powietrza, poprawiającego jakość życia w mieście;
- ▶ zachowanie już istniejących obszarów zieleni wysokiej – pozwoli to na lokalne obniżenie temperatury w sąsiedztwie zabudowy, a poprzez ograniczenie nasłonecznienia na łagodzenie latem stresu termicznego oraz na regenerację przeciążonych ciepłem organizmów mieszkańców, którzy mogą się tu schronić;
- ▶ wprowadzenie na obszarach przewidywanych dla dalszej intensywnej zabudowy terenów zieleni z zadrzewieniem;
- ▶ rozwój zadrzewień przyulicznych jako naturalnego zacienienia chodników;
- ▶ zacienianie zielenią placów miejskich, skwerów i placów zabaw;
- ▶ wprowadzanie na szerszą skalę zielonych dachów oraz tzw. zielonych ścian.

Wzorując się na pozytywnych doświadczeniach innych miast, można także zaproponować następujące rodzaje działań mających na celu łagodzenie miejskiej wyspy ciepła (Cole i in. 2008):

- ▶ projekty demonstracyjne – polegają na realizacji określonego działania łagodzącego/adaptacyjnego, która ma na celu zwrócenie uwagi mieszkańców na daną kwestię oraz ukazanie przyniesionych efektów (przykład: wprowadzenie technologii zielonych dachów na budynku urzędu miasta w Chicago oraz informowanie o ich pozytywnym wpływie na klimat i optymalizację bilansu energetycznego budynku);

- ▶ projekty motywacyjne – polegają na udzieleniu niewielkiego wsparcia finansowego i pomocy technicznej w realizacji określonego działania łączącego/adaptacyjnego (przykład: przekazanie mieszkańcom Sacramento i okolic 350 000 sadzonek drzew oraz pomoc w ich zasadzeniu);
- ▶ miejskie programy leśne – polegają na działaniach zmierzających do zwiększenia udziału terenów leśnych na terenach miast, m.in. przez sadzenie drzew na nieużytkach;
- ▶ modernizacja budynków – zmiany mają na celu zmniejszenie zużycia energii w budynkach zarówno na ogrzewanie, jak i klimatyzację, a tym samym optymalizację bilansu energetycznego, m.in. ocieplanie budynków i uszczelnianie stolarki okiennej;
- ▶ zamówienia publiczne – uwzględnianie w zamówieniach publicznych odpowiednich materiałów i technologii wymusza zastosowanie pożądaných rozwiązań (np. w programie „Zielona Aleja” w Chicago władze miejskie w zamówieniach na budowę lub remont chodników oczekują zastosowania materiałów przepuszczalnych, co korzystnie wpływa na bilans wodny w mieście; docelowo program zakłada, że łączna długość chodników wybudowanych w tej technologii wyniesie około 3200 km);
- ▶ uchwały władz miasta (Rada Warszawy, Rady dzielnic) określające zasady gospodarowania oraz wprowadzania w życie przedsięwzięć pozwalających na ograniczenie miejskiej wyspy ciepła;
- ▶ plany zagospodarowania przestrzennego, które poprzez odpowiednie zapisy będą wymuszały na inwestorach działania służące ochronie terenów biologicznie czynnych;
- ▶ rozporządzenia dotyczące zagospodarowania krajobrazu, które pozwolą spojrzeć na problem zagospodarowania terenu z perspektywy całego miasta, a nie jego niewielkich fragmentów; działania tego typu powinny służyć przede wszystkim ochronie korytarzy wymiany powietrza oraz obszarów cennych ekologicznie;
- ▶ przepisy i standardy budowlane, które wprowadzą nowe sposoby ograniczania emisji ciepła z budynków (np. barwa i faktura elewacji i dachów, nowe rodzaje materiałów budowlanych o zwiększonej izolacyjności termicznej);
- ▶ normy jakości powietrza, ograniczające szkodliwe działanie zwłaszcza tych zanieczyszczeń, które uwalniają się lub koncentrują w warunkach podwyższonej temperatury w mieście.

8.2. Katalog działań adaptacyjnych

W warunkach zmian klimatu i zmian urbanistycznych w mieście konieczne będzie także rozpoczęcie intensywnych działań adaptacyjnych:

- ▶ wprowadzenie programów edukacyjnych na różnych szczeblach kształcenia, uświadamiających istotę i konsekwencje miejskiej wyspy ciepła dla zdrowia i jakości życia mieszkańców;
- ▶ prowadzenie stałego monitoringu miejskiej wyspy ciepła, pozwalającego na stworzenie systemu wyprzedzającego informowania społeczeństwa o prognozowanym zasięgu i intensywności MWC, w tym wskazanie miejsc, gdzie będzie ona największa;
- ▶ wprowadzenie rozwiązań prawnych i mechanizmów finansowych pozwalających na wyposażenie obiektów użyteczności publicznej oraz mieszkań w urządzenia klimatyzacyjne;
- ▶ wprowadzenie systemu wczesnego ostrzegania o zwiększonym ryzyku problemów kardiologicznych związanych z falami upałów i epizodami intensywnej miejskiej wyspy ciepła;
- ▶ wprowadzenie systemu wspomagania osób chorych i w podeszłym wieku w sytuacji występowania fal upałów i epizodów intensywnej miejskiej wyspy ciepła;
- ▶ prowadzenie monitoringu zagrożeń alergicznych oraz uruchomienie systemu wsparcia dla pacjentów alergicznych;
- ▶ zmianę struktury roślinności osiedlowej w kierunku zastąpienia roślin silnie alergizujących gatunkami niealergizującymi; przy planowaniu zieleni miejskiej należy się kierować nie tylko estetyką, ale także alergienowością roślin. Rekomendujemy następujące gatunki roślin o niskim potencjale alergennym: drzewa – klon, kasztanowiec, robinia, bez, jarzębina, sosna, świerk, jodła, modrzew oraz żeńskie egzemplarze topoli, jesionu i wierzby; krzewy – irga, bukszpan, dereń, forsycja, pigwowiec, sumak, berberys, głóg; rośliny pnące – bluszcz pospolity, rdestówka bucharska, winobluszcz pięciolistkowy.

Należy zdawać sobie sprawę, że skuteczne przeciwdziałanie miejskiej wyspie ciepła będzie możliwe, jeśli nastąpi współdziałanie wielu różnych grup interesu społecznego, poczynając od władz miejskich, kończąc na wolontariuszach zaangażowanych w starania na rzecz poprawy warunków miejsca zamieszkania.

Wśród ogółu mieszkańców można wyróżnić kilka grup osób, które w sposób szczególny należy objąć działaniami edukacyjnymi. Są to:

- ▶ planiści miejscy i urzędnicy odpowiedzialni za kształtowanie przestrzeni miejskiej;

- ▶ zarządy i członkowie spółdzielni mieszkaniowych;
- ▶ uczniowie szkół podstawowych i średnich;
- ▶ osoby mniej odporne na zagrożenia związane z miejską wyspą ciepła (np. osoby starsze, samotne, cierpiące na choroby układu krążenia, o niższym statusie ekonomicznym) oraz służby społeczne odpowiedzialne za opiekę nad nimi.

W ramach działań edukacyjnych można przeprowadzać różnego rodzaju szkolenia, zajęcia podczas imprez cyklicznych (w przypadku Warszawy np. w trakcie „Lata w mieście”), konsultacje z ekspertami itd. W popularyzacji problemu wykorzystywać można ulotki, broszury, akcje promocyjne, happeningi, artykuły w prasie i radio, strony internetowe czy media społecznościowe. Ciekawą formą działań edukacyjnych są nagrody, przyznawanie wyróżnień osobom lub instytucjom szczególnie zasłużonym w działaniach łagodzących i adaptacyjnych.

Zarówno w działaniach ograniczających, jak i adaptacyjnych jest niezbędna zgodna współpraca naukowców (klimatologów, meteorologów), urbanistów i architektów, lekarzy i służb socjalnych oraz władz miasta. Konieczna jest także partycypacja społeczna poprzez stowarzyszenia i placówki edukacyjne.

9. Podsumowanie

Miejska wyspa ciepła (MWC) jest zjawiskiem klimatycznym powszechnie występującym w obszarach miejskich. Polega ono na występowaniu podwyższonej temperatury w mieście w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych, co można porównać do wyspy ciepła (lub niekiedy archipelagu) otoczonej „oceanem” względnego chłodu.

Powstanie miejskiej wyspy ciepła jest wynikiem:

- ▶ zmniejszonego albedo różnorodnych sztucznych powierzchni w mieście (asfalt, beton, dachy pokryte papą, ciemne ściany budynków) oraz samej geometrii miasta (wielokrotne odbicia promieni słonecznych w kanionach ulicznych) – prowadzących do zwiększonego pochłaniania promieniowania słonecznego i silnego nagrzewania się podłoża;
- ▶ zmienionej struktury promieniowania długofalowego (cieplnego) na obszarach zabudowanych – obserwuje się zwiększony dopływ promieniowania emitowanego przez nagrzane powierzchnie ścian;
- ▶ małego udziału naturalnych powierzchni roślinnych, które sprzyjają stabilizacji bilansu cieplnego – im większa część miasta pokryta jest przez nieprzepuszczalne powierzchnie, tym bardziej zmniejsza się parowanie z gleby i szaty roślinnej, a tym samym zwiększa się temperatura. Nasłonecznione fragmenty ulic mogą być cieplejsze od ich części zacienionej nawet o kilkanaście stopni Celsjusza;
- ▶ aktywności człowieka, na którą składa się ciepło produkowane przez urządzenia grzewcze i klimatyzacyjne, przemysł, ruch samochodowy;
- ▶ efektu cieplarnianego towarzyszącego miastu: zwiększone zanieczyszczenie powietrza nad miastem oraz zwiększona zawartość gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery prowadzi do zwiększenia ilości ciepła emitowanego przez warstwę powietrza nad miastem do jego wnętrza.

Podstawową miarą miejskiej wyspy ciepła jest różnica minimalnej temperatury powietrza, pomiędzy miastem i terenem pozamiejskim. W opracowaniu natężenie MWC zdefiniowano jako różnicę dobowej temperatury minimalnej w danym punkcie pomiarowym w porównaniu do stacji lotniskowej Warszawa-Okęcie i oznaczono symbolem UHI-index.

Intensywność MWC mierzy się głównie różnicą temperatury minimalnej między miastem a jego otoczeniem, czasem jednak wykorzystuje się różnice średniej dobowej, a nawet maksymalnej temperatury powietrza. Różnice średniej dobowej temperatury dają jedynie bardzo uogólnione informacje o MWC, jednak podkreślają jej stabilność niezależnie od warunków pogodowych. Różnice temperatury maksymalnej natomiast mówią o możliwym, całodobowym występowaniu MWC. Ma to duże znaczenie z punktu widzenia warunków termicznych odczuwanych w ciągu dnia przez ludzi mieszkających i poruszających się po mieście.

Związki statystyczne pomiędzy wielkością miasta a odchyleniami temperatury minimalnej powietrza w mieście w stosunku do terenów pozamiejskich są powszechnie stosowane jako syntetyczne wskaźniki intensywności natężenia miejskiej wyspy ciepła (Oke 1973; Park 1987; Błażejczyk i in. 2006). Podobne syntetyczne wskaźniki intensywności MWC, znalezione na podstawie badań prowadzonych w Polsce (Kunert, Błażejczyk 2011), zostały wykorzystane do przedstawienia możliwego zasięgu i intensywności miejskiej wyspy ciepła w Warszawie obecnie oraz w horyzoncie czasowym 2070 roku.

Badania MWC w Warszawie prowadzono na podstawie sieci pomiarów topoklimatycznych należącej do Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk, która została wzbogacona o stanowiska pomiarowe założone w ramach projektu KBN N527/0669/33 „Ocena wskaźnika terenów biologicznie czynnych jako standardu kształtowania struktury przestrzennej terenów mieszkaniowych” kierowanego przez B. Szulczewską z SGGW. Obecnie w ramach sieci działa 28 czujników pomiaru temperatury powietrza. Uzupełnieniem sieci są dane pozyskiwane ze stacji: IMGW PIB na Okęciu, UW na Krakowskim Przedmieściu, WIOŚ, IOŚ PIB oraz firmy LAB-EL.

Zasięg przestrzenny MWC w Warszawie odzwierciedla zasięg obszaru intensywnej zabudowy i jest raczej stały. Zmienia się zaś intensywność MWC. Widoczna jest jej dynamika dobową, sezonową oraz roczną, opisana z wykorzystaniem różnych metod: przebiegów dobowych oraz rocznych i sezonowych map rozkładu UHI-index. Nocą MWC jest zjawiskiem raczej stałym, choć o zmieniającym się natężeniu. Zanikanie MWC obserwowane jest natomiast w ciągu dnia na skutek licznych zacienionych przestrzeni w mieście, co skutkuje wolniejszym nagrzewaniem się wnętrza miasta.

W latach 2001–2012 zasięg MWC w Warszawie znacznie się powiększył. Wpłynęło na to niewątpliwie stopniowe zwiększanie się powierzchni terenów zabudowanych. MWC jest najbardziej intensywna w Śródmieściu, zachodniej części Woli, południowej części Żoliborza i na Pradze-Północ. Średnie roczne wartości UHI-index osiągają w tych obszarach ponad $+2^{\circ}\text{C}$. Na południowych i północnych krańcach Warszawy oraz w południowo-wschodniej części miasta (Wawer, Wesoła) MWC nie występuje, jednak sytuacja może zmieniać się w związku z rozbudową terenów mieszkaniowych na obrzeżach miasta (np. w Wilanowie, Wawrze, Targówku).

Zjawisko MWC jest najbardziej intensywne jesienią (IX–XI). Temperatura minimalna w północnej części Śródmieścia jest wtedy średnio o $2,5^{\circ}\text{C}$ wyższa niż na Okęciu. Wiosną (III–V) i latem (VI–VIII) rozkład przestrzenny MWC jest zbliżony do uśrednionego rozkładu rocznego, jednak zwłaszcza wiosną obserwowany jest wysoki gradient temperatury minimalnej między centrum a południowo-wschodnimi obrzeżami miasta. Zimą (XII–II) MWC jest najmniej nasiloną (do $1,5^{\circ}\text{C}$) i najmniej wyraźną.

Zróznicowanie przestrzenne i natężenie miejskiej wyspy ciepła jest też w dużym stopniu zależne od masy powietrza zalegającej nad miastem. Średnio największe natężenie MWC obserwowane jest w masie powietrza polarnego kontynentalnego (PPk). Średnia wartość UHI-index w centrum Warszawy dochodzi wtedy do $+3^{\circ}\text{C}$, jednak zasięg przestrzenny MWC jest najmniejszy. Nieco mniejsze natężenie MWC ($+2,5^{\circ}\text{C}$) obserwowane jest w powietrzu arktycznym (PA) i polarnym morskim starym (PPms).

W latach 1981–2011 MWC pojawiała się w Warszawie przez blisko 87% dni, wahając się od 80% zimą do ponad 94% dni latem. W badanym okresie zdarzały się lata, gdy MWC była notowana każdego (2010 r.) lub prawie każdego dnia (2011 r.). Były także okresy (lata 2000 i 2001), gdy występowała tylko przez 60–70% dni. W latach 1981–2011 notuje się nieznaczny, nieistotny statystycznie trend wzrostowy intensywności MWC. W przebiegu wieloletnim wskaźnika UHI-index wyraźnie zaznaczają się lata 2000–2002, kiedy jego wartość była najmniejsza w całym badanym okresie.

Uwzględniając prognozy zmian klimatu można stwierdzić, że zarówno średnie, jak i maksymalne natężenie MWC powinny do końca XXI w. utrzymywać się w Warszawie na poziomie zbliżonym do obecnego. Należy jednak założyć nieznaczny wzrost intensywności MWC związany ze wzrostem wielkości miasta. Uwzględniając wzrost liczby mieszkańców Warszawy w tempie podobnym do obserwowanego w pierwszej dekadzie obecnego wieku, można przyjąć, że w 2030 r. miasto będzie liczyło 1 790 tys., w 2060 r. 1 900 tys., a pod koniec wieku – nieco ponad 2 miliony mieszkańców. Zatem zgodnie ze wskaźnikami intensywności MWC przedstawionymi w rozdziale 2.3 UHI-index w centrum Warszawy może wzrosnąć o $0,1^{\circ}\text{C}$ w 2030 r., $0,2^{\circ}\text{C}$ w 2060 r. i $0,5^{\circ}\text{C}$ w 2100 roku.

Zieleń, zwłaszcza wysoka, silnie oddziałuje na warunki termiczne i bioklimatyczne, co można w sposób skrótowy przedstawić następująco:

- ▶ łagodzi warunki termiczne, zmniejszając tempo nagrzewania się powietrza dnem i jego wychładzania nocą;
- ▶ poprawia warunki wilgotnościowe, a obecność enklaw wilgoci poprawia warunki odczuwalne, ułatwia oddychanie i zmniejsza tempo wysuszania się skóry i błon śluzowych;
- ▶ generuje lokalną cyrkulację powietrza dzięki różnemu nagrzewaniu się powierzchni sztucznych i pokrytych roślinnością, co łagodzi warunki termiczne i ułatwia wnikanie strug powietrza pomiędzy zabudowę;

- ▶ ułatwia oczyszczanie powietrza z zanieczyszczeń, zwłaszcza pyłowych, przez co poprawia komfort życia mieszkańców;
- ▶ poprawia warunki klimatu akustycznego, tłumiąc hałas generowany przez funkcjonowanie miasta.

Ważnym elementem struktury przestrzennej Warszawy, który w sposób istotny kształtuje warunki klimatyczne i bioklimatyczne są także korytarze wymiany powietrza. Doprowadzają one do nagrzanego centrum miasta świeże, chłodne i wilgotne powietrze z otaczających Warszawę terenów otwartych i lasów. Dokumenty planistyczne zakładają funkcjonowanie 8 korytarzy wymiany powietrza: Wisły, podskarpowy, mokotowski, Al. Jerozolimskich, kolejowy zachodni, bemowski, kolejowy północny, kolejowy wschodni. Polityka przestrzenna miasta w odniesieniu do systemu wymiany powietrza nie chroni jednak większości korytarzy przed zabudową, co w przyszłości przyczyni się do znacznego obniżenia ich efektywności.

Natężenie MWC jest silnie zależne od zagospodarowania terenu. Znajduje to odzwierciedlenie nie tylko w różnicy temperatury powietrza, ale także w zróżnicowaniu warunków odczuwalnych. Poszczególne typy zabudowy i formy użytkowania terenu w Warszawie silnie oddziałują na możliwe obciążenia cieplne organizmu. Najwyższa intensywność MWC cechuje osiedla z najniższym odsetkiem terenów biologicznie czynnych (TBC). Na osiedlach Hoża i Pańska (z TBC poniżej 20%) najwyższe wartości MWC sięgają 7,1°C. Wśród osiedli ze średnim TBC (42–57%) intensywność MWC sięga 5,9°C, a na osiedlach z najwyższym TBC (powyżej 58%) 5,4°C. Zatem udział terenów biologicznie czynnych wydaje się być bardzo dobrym miernikiem intensywności MWC. Dość dobrym, ale nie najlepszym miernikiem MWC jest wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ). W centrum miasta jego wysoka wartość jest równoznaczna z małym udziałem terenów biologicznie czynnych. Bywa jednak, że WIZ jest wysoki na osiedlach z dużym udziałem terenów biologicznie czynnych (np. Conrada), charakteryzujących się słabą MWC. Dlatego też średni roczny UHI-index na osiedlach ze wskaźnikiem intensywności zabudowy o wartościach 1,0–1,3 jest tylko o 0,2°C wyższy od notowanego na osiedlach ze wskaźnikiem poniżej 1.

Na podstawie analizy sposobu zagospodarowania terenu wydzielono 6 kategorii obszarów o różnej intensywności miejskiej wyspy ciepła. W godzinach nocnych najsilniejsza MWC, osiągająca średnio 2–3°C, występuje wśród wysokiej, zwartej zabudowy w centrum miasta oraz w gęsto zabudowanych osiedlach Żoliborza, Pragi-Północ i Pragi-Południe, Woli, Ursusa i Mokotowa. Nieco słabsza MWC (1–2°C) pokrywa się w większości z obszarami zwartej i niskiej zabudowy mieszkaniowej i handlowo-usługowej. Wśród luźnej zabudowy mieszkaniowej Targówka, Wawra, Wilanowa i Wesołej miejska wyspa ciepła ma niewielką intensywność, wynoszącą 0,2–0,4°C. Na większych obszarach niezabudowanych otoczonych zabudową, jak i na jej obrzeżach MWC nie występuje. MWC nie występuje także na obszarach

leśnych leżących na obrzeżach Warszawy oraz wzdłuż koryta Wisły; temperatura powietrza jest tam nawet niższa niż w terenie pozamiejskim.

W przypadku zrealizowania do 2070 r. prognozowanych inwestycji budowlanych w Warszawie rozkład miejskiej wyspy ciepła zmieni się bardzo wyraźnie. Zwiększeniu ulegną nie tylko obszary o największym natężeniu MWC (2–3°C), ale także te, gdzie nie jest tak intensywna (1–2°C). Ograniczone zostaną tereny, gdzie MWC nie występuje oraz obszary leśne, gdzie temperatura powietrza nocą jest niższa niż poza miastem. W godzinach dziennych, w kształtowaniu warunków termicznych wewnątrz miasta bardzo ważną rolę odgrywają parki i zadrzewione skwery, cmentarze oraz zieleń ogrodowa. Dlatego tak niepokojący jest brak tych form zagospodarowania terenu na obszarach przeznaczonych pod zwartą zabudowę niską (np. Targówek, Wawer, Wilanów), których zasięg ma ulec znacznemu powiększeniu. Brak ten należy bezwzględnie wypełnić na etapie ustalania szczegółowych planów zagospodarowania tych terenów.

Miejska wyspa ciepła jest zjawiskiem termicznym, więc analizując jej możliwy wpływ na zdrowie mieszkańców miast, skupiono się na gospodarce cieplnej organizmu w warunkach podwyższonej temperatury powietrza. Z uwagi na swój charakter, MWC poprzez brak bądź niewielką redukcję temperatury w okresie wieczorno-nocnym działa na zasadzie wzmacniania efektu fali upałów. Dlatego też MWC jest zjawiskiem jednoznacznie negatywnym latem, przede wszystkim w kontekście wpływu na warunki odczuwane przez człowieka. Zmniejszenie wychłodzenia nocnego w mieście, zwłaszcza w coraz częstszych okresach pogody upalnej, prowadzi do wielu niebezpiecznych dla organizmu człowieka sytuacji zdrowotnych.

Różnice obciążeń cieplnych między centrum Warszawy a terenami podmiejskimi są bardzo wyraźnie widoczne w ciągu całego roku. W latach 2004–2010 zwiększony stres ciepła w centrum miasta wystąpił w około 19% dni, natomiast na terenie podmiejskim jedynie w około 4% dni. Charakterystyczne jest to, że bardzo silny stres ciepła wystąpił jedynie w centrum miasta. Dla kontrastu, stres zimna w centrum miasta notowany był w około 39%, a w terenie podmiejskim – w ciągu około 60% dni w roku.

Jedną z najważniejszych strategii łagodzących zjawisko miejskiej wyspy ciepła jest wprowadzanie na tereny zurbanizowane nowych nasadzeń roślin. Strategie te potrafią efektywnie łagodzić MWC, lecz nieodpowiedni dobór szaty roślinnej do tego typu interwencji może powodować pogorszenie jakości życia mieszkańców cierpiących na choroby alergiczne spowodowane uczuleniem na pyłki. Dlatego też niezwykle ważny jest odpowiedni dobór roślin w taki sposób, aby nie zaostrzały one objawów alergii.

Doświadczenia z innych miast europejskich oraz wnioski z przeprowadzonych badań mówią, że nie da się zlikwidować zjawiska miejskiej wyspy ciepła, można jednak poprzez odpowiednie działania planistyczne na szczeblu ogólnomiejskim

i lokalnym wpływać na jego intensywność. Wśród działań ograniczających MWC powinny się znaleźć: – zachowanie w przestrzeni miasta powierzchni niezabudowanych; – zachowanie korytarzy wymiany powietrza, a także i ich odnowa; – zachowanie już istniejących obszarów zieleni wysokiej; – wprowadzanie na obszarach dalszej intensywnej zabudowy terenów zieleni z zadrzewieniem; – rozwój zadrzewień przyulicznych; – zacienianie zielenią placów miejskich, skwerów i placów zabaw; – wprowadzanie na szerszą skalę zielonych dachów oraz tzw. zielonych ścian, przy czym zmiany struktury roślinności powinny uwzględniać alergenicność roślin. Rekomendowane są następujące gatunki roślin o niskim potencjale alergennym: drzewa – klon, kasztanowiec, robinia, bez, jarzębina, sosna, świerk, jodła, modrzew oraz żeńskie egzemplarze topoli, jesionu i wierzby; krzewy – irga, bukszpan, dereń, forsycja, pigwowiec, sumak, berberys, głóg; rośliny pnące – bluszcz pospolity, rdestówka bucharska, winobluszcz pięciolistkowy.

Aby przygotować władze miasta i jego mieszkańców do tego niekorzystnego, szczególnie latem, zjawiska, konieczne jest ponadto wdrożenie programów i działań adaptacyjnych. Do najważniejszych z nich należą: wprowadzenie programów edukacyjnych na różnych szczeblach kształcenia, uświadamiających istotę i konsekwencje MWC, prowadzenie stałego monitoringu miejskiej wyspy ciepła, stworzenie systemu informowania społeczeństwa o zasięgu i intensywności MWC, wprowadzenie rozwiązań prawnych i mechanizmów finansowych pozwalających na wyposażenie obiektów użyteczności publicznej oraz mieszkań w urządzenia klimatyzacyjne, wprowadzenie systemu wczesnego ostrzegania o zwiększonym ryzyku problemów kardiologicznych związanych z falami upałów i epizodami intensywnej miejskiej wyspy ciepła oraz wspomaganie osób chorych i w podeszłym wieku w sytuacji występowania fal upałów i epizodów intensywnej miejskiej wyspy ciepła.

Bibliografia

- Adamczyk A.B., Błażejczyk K., Baranowski J., Kuchcik M., 2008, *Warunki termiczne aglomeracji warszawskiej*, [w:] Kłysik K., Wibig J., Fortuniak K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, s. 11–20.
- Akbari H., Bell R., Brazel T., Cole D., Estes M., Heisler G., Hitchcock D., Johnson B., Lewis M., McPherson G., Oke T., Parker D., Perrin A., Rosenthal J., Sailor D., Samenow J., Taha H., Voogt J.A., Winner D., Wolf K., Zalph B., 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban heat island basics*, Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, <http://www.epa.gov/heatisld/resources/pdf/BasicsCompendium.pdf> (dostęp: 10.06.2014).
- Akbari H., Kurn D.M., Bretz S.E., Hanford J.W., 1997, *Peak power and cooling energy savings of shade trees*, Energy and Buildings, 25, s. 139–148.
- Ali-Toudert F., Mayer H., 2006, *Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate*, Building and Environment, 2, s. 94–108.
- Ali-Toudert F., Mayer H., 2007, *Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons*, Solar Energy, 81, s. 742–754.
- Arnfield J., 2003, *Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*, International Journal of Climatology, 23, s. 1–26.
- Aschoff J., Biebach H., Heise A., Schmidt T., 1974, *Day-night variation in heat balance*, [w:] Monteith J.L., Mount L.E. (red.), *Heat loss from animals and man*, Butterworths, London, s. 147–173.
- Baccini M., Biggeri A., Accetta G., Kosatsky T., Katsouyanni K., Analitis A., Anderson H., Bisanti L., Danova J., 2008, *Heat effect on mortality in 15 European cities*, Epidemiology, 19, s. 711–719.
- Banting D., Doshi H., Li J., Missios P., Au A., Currie B.A., Verratti M., 2005, *Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*, Department of Architectural Science, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada.
- Bärring L., Mattsson J.O., Lindqvist S., 1985, *Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden*, Journal of Climatology, 5, s. 433–444.
- Beck I., Jocher S., Gilles S., McIntyre M., Buters J.T.M., Shmidt-Weber C., Behrendt H., Ring J., Menzel A., Traidl-Hoffmann C., 2013, *High environmental ozone levels lead to enhanced allergenicity of birch pollen*, PLOS ONE, 8, 11, s. 1–7.
- Bielory L., Lyons K., Goldberg R., 2012, *Climate change and allergic disease*, Current Allergy And Asthma Reports, 12, 6, s. 485–494.
- Błażejczyk K., 1994, *Klimatologiczno-fizjologiczny model wymiany ciepła między człowiekiem i otoczeniem (MENEX)*, Przegląd Geograficzny, 66, 1–2, s. 33–55.
- Błażejczyk K., 1996, *Topoklimat Warszawy*, [w:] Stola W., Grzeszczak J. (red.), *Przemiany struktury przestrzennej obszarów wiejskich w strefach podmiejskich Polski i Rumunii*, Conference Papers, 25, IGiPZ PAN, Warszawa, s. 13–25.
- Błażejczyk K., 2002, *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej*, Dokumentacja Geograficzna, 26, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Błażejczyk K., 2003, *Biologiczne cechy klimatu Polski*, Przegląd Geograficzny, 75, 4, s. 525–543.
- Błażejczyk K., 2004, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, Prace Geograficzne, 192, IGiPZ PAN.
- Błażejczyk K., 2005, *Weather recreation index for Europe*, [w:] 17th International Congress of Biometeorology, Annalen der Meteorologie, 41, 2, s. 604–607.
- Błażejczyk K., 2011, *Mapping of UTCI in local scale (the case of Warsaw)*, Prace i Studia Geograficzne, 47, s. 275–283.
- Błażejczyk K., 2013, *System wymiany i regeneracji powietrza jako czynnik poprawy warunków aero-sanitarnych i bioklimatycznych w mieście*, [w:] Degórska B., Baścik M., *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby-ochrona-kształtowanie*, IGiPz UJ, UMK, WGiK PW, s. 179–181.
- Błażejczyk K., Bąkowska M., Więclaw M., 2006, *Urban heat island in large and small cities*, [w:] 6th International Conference on Urban Climate, 12–16 June 2006, Göteborg, Sweden, Preprints, s. 794–797.

- Błażejczyk K., Błażejczyk A., 1999, *Influence of urbanisation level on the heat load in man in Warsaw*, [w:] de Dear R.J., Potter J.C. (red.), *Proceedings of 15th International Congress of Biometeorology & International Conference On Urban Climatology*, Macquarie University, Sydney, Australia, 8–12 November 1999, (wyd. na CD-ROM), s. 6.
- Błażejczyk K., Błażejczyk A., 2013, *Climate change and heat stress in the 21st century - an example from Poland*, [w:] Cotter J.D., Lucas S.J.E., Mundel T. (red.), *Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Ergonomics*, 11–15 February, Queenstown, New Zealand, International Society for Environmental Ergonomics, s. 31–33.
- Błażejczyk K., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., 2010, *UTCI – Nowy wskaźnik oceny obciążeń cieplnych człowieka*, *Przegląd Geograficzny*, 82, 1, s. 49–71.
- Błażejczyk K., Degórska B., 2013, *Możliwości poprawy jakości powietrza*, [w:] Degórska B., Baścik M., *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby-ochrona-kształtowanie*, IGiP UJ, UMK, WGiK PW, s. 182–183.
- Błażejczyk K., Idzikowska D., Błażejczyk A., 2013, *Forecast changes for heat and cold stress in Warsaw in the 21st century and their possible influence on mortality risk*, *Papers on Global change*, IGBP, 20, s. 47–62.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Błażejczyk A., Milewski P., Szmyd J., 2014, *Assessment of urban thermal stress by UTCI – experimental and modelling studies: an example from Poland*, *DIE ERDE*, 145, 1–2, s.16–33.
- Błażejczyk K., Kunert A., 2006, *Differentiation of bioclimatic conditions of urban areas (the case of Poland)*, [w:] *6th International Conference on Urban Climate*, 12–16 June 2006, Göteborg, Sweden, Preprints, s. 213–216.
- Błażejczyk K., Kunert A., 2011, *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce*, wydanie 2, poprawione i uzupełnione, Monografie IGiPZ PAN, 13, Warszawa.
- Błażejczyk K., Matzarakis A., 2007, *Assessment of bioclimatic differentiation of Poland based on the human heat balance*, *Geographia Polonica*, 80, 1, s. 63–82.
- Błażejczyk K., Szyguła Z., 2004, *Wpływ gorącego otoczenia na zdolność wysiłkową sportowca. Jak przygotować zawodnika do startu w Igrzyskach Olimpijskich w Atenach*, *Sport Wyczynowy*, 42, 5–6, s. 45–63.
- Borrell C., Mari-Dell'olmo M., Rodrigues-Sanz M., Garcia-Olalla P., Caya J., Benach J., Muntaner C., 2006, *Socioeconomic position and excess mortality during heat wave of 2003 in Barcelona*, *European Journal of Epidemiology*, 21, s. 633–640.
- Bouchama A., Dehbi M., Mohamed G., Matthies F., Shoukri S., Menne B., 2007, *Prognostic factors in heat wave related deaths: a meta-analysis*, *Archives of Internal Medicine*, 167, s. 2170–2176.
- Bouchama A., Knochel J., 2002, *Heat stroke*, *New England Journal of Medicine*, 346, s. 1978–1988.
- Brenneisen S., 2006, *Space for urban wildlife: Designing green roofs as habitats in Switzerland*, *Urban Habitats* 4, 1, s. 27–36, <http://www.urbanhabitats.org/v04n01/index.html> (dostęp : 10.06.2014).
- Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B., Havenith G., 2012, *Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)*, *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, s. 481–494.
- Brown R.D., Gillespie T.J., 1995, *Microclimatic landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency*, Wiley, New York.
- Buczek G., Śleszyński P., 2008, *Prognoza przyrostu powierzchni usługowych w Warszawie*, opracowanie wykonane w ramach przygotowania „Prognozy zapotrzebowania na ciepło dla m.st. Warszawy w perspektywie długoletniej”, realizowanego przez REAS dla Vattenfall Heat Poland oraz Urzędu m.st. Warszawy i Stołecznego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej, m.szynopsis, 25 s.
- Budyko M.I., 1975, *Klimat i życie*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Burt J.E., O'Rourke P.A., Terjung W.H., 1982a, *The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature II. Man in an urban environment*, *International Journal of Biometeorology*, 26, 1, s. 25–35.
- Burt J.E., O'Rourke P.A., Terjung W.H., 1982b, *The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature I. Modelling considerations*, *International Journal of Biometeorology*, 26, 1, s. 3–23.
- Canoui-Poitaine F., Cadot E., Spira A., 2006, *Excess deaths during the August 2003 heat wave in Paris, France*, *Revue D'épidémiologie Et De Santé Publique*, 54, 2, s. 127–135.

- Carlson T.N., Augustine J.A., Boland F.E., 1977, *Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas*, Bulletin of the American Meteorological Society, 58, 1301–1303.
- Cecchi L., D'Amato G., Ayres J., Galan C., Forastiere F., Forsberg B., Gerritsen J., Nunes C., Behrendt H., Akdis C., Dahl R., Annesi-Maesano I., 2010, *Projections of the effects of climate change on allergic asthma: the contribution of aerobiology*, Allergy, 65, 9, s. 1073–1081.
- Chameides W.L., Lindsay R.W., Richardson J., Kiang C.S., 1988, *The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study*, Science, 241, s. 1473–1475.
- Christen A., Vogt R., 2004, *Energy and radiation balance of a central European city*, International Journal of Climatology, 24, 11, s. 1395–1421.
- Chudzia D., Ropuszyński P., 1998. *Automatyczne stacje meteorologiczne w badaniach klimatu miasta*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3, Łódź, s. 495–497.
- Cole D., Dietsch N., Gero G., Hitchcock D., Lewis M., Magee J., Sarkowich M., Yarbrough J., Zalph B., 2008, *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Heat Island Reduction Activities*, Climate Protection Partnership Division in the U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs, <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm> (dostęp: 10.06.2014).
- Cuinica L., Abreu I., Esteves da Silva J., 2014, *Effect of air pollutant NO₂ on Betula pendula, Ostrya carpinifolia and Carpinus betulus pollen fertility and human allergenicity*, Environmental Pollution, 186, s. 50–55.
- Curriero F., Heiner K., Samet J., Zeger S., Strug L., Patz J., 2002, *Temperature and mortality in 11 cities of eastern United States*, American Journal of Epidemiology, 155, s. 80–87.
- Daanen H.A.M., Jonkhoff W., Bosch P., Broeke ten H., 2013, *The effect of global warming and urban heat island on mortality, morbidity and productivity in The Netherlands*, [w:] Cotter J.D., Lucas S.J.E., Mundel T. (red.), *Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Ergonomics*, 11–15 February 2013, Queenstown, New Zealand, International Society for Environmental Ergonomics, s. 16–19.
- D'Amato G., 2001, *Airborne paucimicronic allergen-carrying particles and seasonal respiratory allergy*, Allergy, 56, s. 1109–1111.
- Dawson J., Weir C., Wright F., Bryden C., Aslanyan S., Lees K., 2008, *Associations between meteorological variables and acute stroke hospital admissions in the West of Scotland*, Acta Neurologica Scandinavica, 117, s. 85–89.
- Degórska B., 2008, *Prawidłowości różnicowania przestrzennego i zmian struktury poziomej krajobrazu obszaru metropolitalnego Warszawy na przełomie XX i XXI wieku*, [w:] Degórska B., Deręgowska A. (red.), *Atlas Warszawy, Zmiany krajobrazu obszaru metropolitalnego Warszawy na przełomie XX i XXI wieku*, z. 10, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Degórska B., 2012, *Spatial growth of urbanised land within the Warsaw Metropolitan Area in the first decade of the 21st century*, Geographia Polonica, 85, 3, s. 77–96.
- Degórska B., 2013, *Koncepcja kształtowania struktury przestrzennej sieci ekologicznej Krakowa*, [w:] Degórska B., Baścik M. (red.), *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby-ochrona-kształtowanie*, IGiPZ UJ, UMK, WGiK PW, s. 251–263.
- Degórski M., 2009, *Korytarze ekologiczne w koncepcji Przestrzennego Zagospodarowania Kraju*, [w:] Jędrzejewski W., Ławreszuk D. (red.), *Ochrona łączności ekologicznej w Polsce*, materiały konferencji międzynarodowej „Wdrażanie koncepcji korytarzy ekologicznych w Polsce”, Białowieża, 20–22 XI 2008 r., Zakład Badania Ssaków PAN, Białowieża, s. 83–88.
- Donoghue E., Graham M., Jentzen J., Lifshultz B., Luke J., Mirchandani H., 1997, *Criteria for the diagnosis of heat related deaths*, National Association of Medical examiners: position paper, American Journal of Forensic Medicine and Pathology, 18, s. 11–14.
- Dubicka M., Szymanowski M., 2003, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu – struktura przestrzenna i czasowa*, Prace Geograficzne, 188, IGiPZ PAN, s. 145–166.
- Ebi K., Exuzides K., Lau E., Kelsh M., Barnston A., 2004, *Weather changes associated with hospitalization for cardiovascular diseases and stroke in California, 1983–1998*, International Journal of Biometeorology, 49, s. 48–58.
- Emeis S., 2010, *Measurement Methods in Atmospheric Sciences. In situ and remote*, Quantifying the Environment, 1, Borntreger Stuttgart, XIV, s. 257.

- Endlicher W., Jendritzky G., Fischer J., Redlich J.P., 2008, *Heat waves, urban climate and human health*, [w:] Marzluff J.M., Shulenberger E., Endlicher W., Alberti M., Bradley G., Ryan C., ZumBrunnen C., Simon U. (red.), *Urban ecology: an international perspective on the interaction between humans and nature*, Springer, New York, s. 269–278.
- Erell E., Pearlmutter D., Williamson T., 2011, *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*, Routledge, London.
- European Environment Agency, 2007, *CLC2006 technical guidelines*, http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_17/at_download/file (dostęp: 10.06.2014).
- Ewidencja gruntów i budynków, 2011, *Zbiornice zestawienia dotyczące danych ewidencyjnych gruntów i budynków*, Biuro Geodety Województwa Mazowieckiego w Warszawie, CD.
- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G., 2012, *UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation*, *International Journal of Biometeorology*, 56, 3, s. 429–441.
- Flynn A., Mcgreevy C., Mulkerrin E., 2005, *Why do older patients die in a heatwave?*, *The Quarterly Journal of Medicine Association of Physicians of Great Britain and Ireland*, 98, s. 227–229.
- Fortini J., 1985, *Wpływ rzeźby terenu i zabudowy mieszkaniowej na ukształtowania się warunków klimatu lokalnego*, Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa.
- Fortuniak K., 2001, *Wpływ właściwości termicznych podłoża na intensywność miejskiej wyspy ciepła – analiza modelowa nocnego wychładzania powierzchni gruntu*, *Prace i Studia Geograficzne*, 29, s. 297–302.
- Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Fortuniak K., 2008, *Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon*, *Theoretical and Applied Climatology*, 91, s. 245–258.
- Fortuniak K., Kłysik K., Wibig J., 2006, *Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź*, *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 1–3, s. 91–101.
- Fouillet A., Rey G., Laurent F., Pavillon G., Bellec S., Guiheneuc-Jouyau C., Clavel J., Jouglé E., Hémon D., 2006, *Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France*, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80, s. 16–24.
- Freitas C.R. de, 1985, *Assessment of human bioclimate based on thermal response*, *International Journal of Biometeorology*, 29, s. 97–119.
- Fukuda K., Hider P., Epton M., Jennings L., Kingham S., 2011, *Including viral infection data supports an association between particulate pollution and respiratory admissions*, *Australian & New Zealand Journal Of Public Health*, 35, 2, s. 163–169.
- Gago E., Roldan J., Pacheco-Torres R., Ordóñez J., 2013, *The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 25, s. 749–758.
- Gartland L., 2008, *Heat islands. Understanding and mitigating heat in urban areas*, Earthscan, London.
- Gawlik R., 2000, *Immunoterapia swoista*, *Alergologia*, 2, 5, <http://www.alergia.org.pl> (dostęp: 06.06.2014).
- Gill S.E., Handley J.F., Ennos A.R., Pauleit S., 2007, *Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure*, *Built Environment*, 33, 1, s. 115–133.
- Givoni B., 1976, *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publications, London.
- Goh K.C., Chang C.H., 1999, *The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 h for Singapore*, *International Journal of Climatology*, 19, 9, s. 1011–1023.
- Górczyński W., Kosińska S., 1916, *O temperaturze powietrza w Polsce*, *Pamiętnik Fizjograficzny*, 23, 262.
- Green R., Basu R., Malig B., Broadwin R., Kim J., Ostro B., 2009, *The effect of temperature on hospital admission in nine California counties*, *International Journal of Public Health*, 55, s. 113–121.
- Greenberg J., Bromberg J., Reed C., Gustafson T., Beauchamp R., 1983, *The epidemiology of heat related deaths, Texas 1950, 1970–79 and 1980*, *American Journal of Public Health*, 73, s. 805–807.
- GUS, 2013, *Rocznik Demograficzny*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa, http://stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/rs_rocznik_demograficzny_2013.pdf (dostęp: 16.07.2014).
- Haeger-Eugensson M., Holmer B., 1999, *Advection caused by the urban heat island circulation as a regulating factor on the nocturnal urban heat island*, *International Journal of Climatology*, 19, 9, s. 975–988.

- Hamilton I.G., Davies M., Steadman P., Stone A., Ridley I., Evans S., 2009, *The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation*, Building and Environment, 44, s. 807–817.
- Hämmerle M., Gál T., Unger J., Matzarakis A., 2014, *Different aspects in the quantification of the sky view factor in complex environments*, Acta Climatologica et Chorologica, Universitatis Szegediensis, 47–48, s. 53–62.
- Hanson R.L., 1991, *Evapotranspiration and droughts*, [w:] Paulson R.W., Chase E.B., Roberts R.S., Moody D.W., *Compilers, national water summary 1988-89, hydrologic events and floods and droughts*, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2375, s. 99–104.
- Havenith G., 2001, *An individual model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response*, Journal of Applied Physiology, 90, s. 1943–1954.
- Havenith G., Fiala D., Błażejczyk K., Richards M., Bröde P., Holmér I., Rintamaki H., Benschabat Y., Jendritzky G., 2012, *The UTCI-clothing model*, International Journal of Biometeorology, 56, 3, s. 461–470.
- Henschel A., Burton L., Margolies L., Smith J., 1969, *An analysis of the heat deaths in St. Louis during July 1966*, American Journal of Public Health, 59, s. 2232–2242.
- Höppe P., 1984, *Die Energiebilanz des Menschen*, Wissenschaftliche Mitteilungen Meteorologische Institut, Universität München, 49.
- Höppe P., 1999, *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*, International Journal of Biometeorology, 43, 2, s. 71–75.
- Howard L., 1833, *The Climate of London*, Harvey & Darton, 1–3, London.
- Ichinose T., Shimodozono K., Hanaki K., 1999, *Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo*, Atmospheric Environment, 33, s. 3897–3909.
- IUPS, 2003, *Glossary of terms for thermal physiology*, 3rd edition revised by The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences, Journal of Thermal Biology, 28, 1, s. 75–106.
- Jendritzky G., 1990, *Bioklimatische Bewertungsgrundlage der Räume am Beispiel von mesoskaligen Bioklimakarten*, [w:] Schirmer H. (red.), *Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen*, Akademie für Räumforschung und Landesplanung, Hannover, 114, s. 7–69.
- Jendritzky G., Nübler W., 1981, *A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms*, Archiv für Meteorologie, Geophysic und Bioklimatologie, Ser. B, 29, 4, s. 313–326.
- Johnson G.T., Oke T.R., Lyons T.J., Steyn D.G., Watson I.D., Voogt J.A., 1991, *Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 1: Theory and tests against field data*, Boundary-Layer Meteorology, 56, 3, s. 275–294.
- Jones T.A., Liang A.P., Rilbourne E.M., Griffin M.R., Patriarca P.A., Wassilak S.G.G., Mullan R.J., Herick R.F., Donnel H.D., Choi K., Thacker S.B., 1982, *Morbidity and mortality associated with the July 1980 heat wave in St. Louis and Kansas City*, JAMA, 247, s. 3327–3331.
- Klinenberg E., 2002, *Heat Wave: a social autopsy of disaster*, University of Chicago Press, Chicago, s. 1–320.
- Kłysik K., 1996, *Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emission in Łódź, Poland*, Atmospheric Environment, 30, s. 3397–3404.
- Kłysik K., 1998, *Struktura przestrzenna miejskiej wyspy ciepła w Łodzi*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica, 3, Łódź, s. 385–391.
- Kłysik K., Fortuniak K., 1999, *Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland*, Atmospheric Environment, 33, s. 3885–3895.
- Koken P., Piver W., Ye F., Elixhauser A., Olsen L., Portier C., 2003, *Temperature, air pollution, and hospitalization for cardiovascular diseases among elderly people In Denver*, Environmental Health Perspectives, 111, s. 1312–1317.
- Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Martyn D., Olszewski K., 1984, *Wpływ zieleni miejskiej na klimat lokalny*, [w:] Szczepanowska H. (red.), *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego*, Instytut Kształtowania Środowiska, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, s. 61–78.
- Kosieradzka D., 2011, *Struktura przestrzenna miasta a systemy przewietrzania na przykładzie Warszawy*, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa.
- Kossowska U., 1973a, *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy*, Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, 12, s. 141–185.

- Kossowska U., 1973b, *Przebieg roczny powietrza w Warszawie w różnych okresach obserwacyjnych*, Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, 12, s. 87–96.
- Kossowska U., 1976, *Zmiany roczne różnic temperatury powietrza między śródmieściem i peryferiami Warszawy*, Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, 8, s. 113–120.
- Kossowska-Cezak U., 1978, *Wpływ dużego kompleksu zieleni miejskiego na warunki termiczno-wilgotnościowe (na przykładzie warszawskiego Ogrodu Zoologicznego)*, Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, 26, s. 11–36.
- Kossowska-Cezak U., 1983, *Wpływ zieleni miejskiej na warunki termiczno-wilgotnościowe*, Prace i Studia Geograficzne, 4, s. 55–67.
- Kossowska-Cezak U., 1992, *Wpływ zabudowy miejskiej na zmienność temperatury z dnia na dzień*, Prace i Studia Geograficzne, 11, s. 95–114.
- Kossowska-Cezak U., 1998, *Wpływ rozwoju terytorialnego Warszawy na warunki termiczne*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica, 3, s. 51–57.
- Kossowska-Cezak U., Bareja P., 1998, *Wpływ zabudowy miejskiej Warszawy na kierunek i prędkość wiatru*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica, 3, s. 463–465.
- Kovats R.S., Hajat S., Wilkinson P., 2004, *Contrasting pattern of mortality and hospital admissions during hot weather and heat waves in Greater London, UK*, Occupational and Environmental Medicine, 61, s. 893–898.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1996, *Środowisko fizycznogeograficzne w Warszawie – niektóre zagadnienia*, [w:] Atlas Warszawy, 4, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Błażejczyk K., 2001, *Charakterystyczne cechy klimatu Warszawy*, Prace Geograficzne, 180, IGiPZ PAN.
- Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Kuchcik M., 2004, *Wpływ środowiska atmosferycznego na zdrowie i samopoczucie człowieka*. Monografie IGiPZ PAN 4, 194 s.
- Kozłowska-Szczęśna T., Podogrocki J., 1995, *Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Krawczyk B., 1979, *Bilans ciepłoty ciała człowieka jako podstawa podziału bioklimatycznego obszaru Iwonicza*, Prace Geograficzne, 131, IGiPZ PAN.
- Krivoruchko K., 2011, *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*, Esri Press, Redlands.
- Krüger E.L., Minella F.O., Rasia F., 2011, *Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil*, Building and Environment, 46, 3, s. 621–634.
- Kruszewski J., Silny W., Mazurek H., Czarnecka-Operacz M., 2004, *Standardy w alergologii. Część I. Testy skórne*, Alergologia Współczesna, 1, 1, s. 51–59.
- Krzymowska-Kostrowicka A., 1997, *Geoekologia turystyki i wypoczynku*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kuchcik M., 2001, *Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy*, Prace i Studia Geograficzne, 28, s. 233–243.
- Kuchcik M., 2003a, *Topoclimatic conditions at various urban structures in Warsaw*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 2542, Studia Geograficzne, 75, s. 505–514.
- Kuchcik M., 2003b, *Warunki topoklimatyczne w różnych dzielnicach Warszawy*, [w:] Błażejczyk K., Krawczyk B., Kuchcik M., (red.), *Postępy w badaniach klimatycznych i bioklimatycznych*, Prace Geograficzne, 188, IGiPZ PAN, s. 179–190.
- Kuchcik M., 2006, *Fale upałów w Polsce w latach 1993–2002*, Przegląd Geograficzny, 78, 3, s. 397–412.
- Kuchcik M., 2007, *Skrajne warunki termiczne w Polsce – zagrożenie dla człowieka*, Balneologia Polska, 49, 3, s. 211–212.
- Kuchcik M., 2013, *The attempt to validate the applicability of two climate models for the evaluation of heat wave related mortality in Warsaw in the 21st century*, Geographia Polonica, 86, 4, s. 295–311.
- Kuchcik M., Baranowski J., 2011, *Różnice termiczne między osiedłami mieszkaniowymi o różnym udziale powierzchni czynnej biologicznie*, Prace i Studia Geograficzne, 47, s. 365–372.
- Kuchcik M., Baranowski J., Adamczyk A.B., Błażejczyk K., 2008, *The network of microclimatic measures in Warsaw agglomeration*, [w:] Kłysik K., Wibig J., Fortuniak K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, s. 123–128.

- Kuchcik M., Błażejczyk K., 2001, *Wpływ warunków pogodowych na zachorowalność i umieralność mieszkańców Warszawy*, [w:] Krawczyk B., Węclawowicz G. (red.), *Badania środowiska fizyczno-geograficznego aglomeracji warszawskiej*, Prace Geograficzne, 180, s. 71–87.
- Kuchcik M., Ożga M., 2002, *Katalog mas powietrza w Warszawie za lata 1961–1970 oraz 1991–2001*, plik komputerowy.
- Kunert A., 2010, *Modeling of UTCI index in various types of landscape*, [w:] Matzarakis A., Mayer H., Chmielewski F.M. (red.), *Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology*, *Berichte der Meteorologische Institute*, Universität Freiburg, 20, s. 302–307.
- Kunert A., Błażejczyk K., 2011, *Zróżnicowanie temperatury powietrza w skali lokalnej w różnych typach krajobrazu Polski*, *Przegląd Geograficzny*, 83, 1, s. 69–90.
- Kuttler W., Strassburger A., 1999, *Air quality measurements in Urban greek areas – a case study*, *Atmospheric Environment*, 33, s. 4101–4108.
- Kysely J., 2004, *Mortality and displaced mortality during heat waves in the Czech Republic*, *International Journal of Biometeorology*, 49, 2, s. 91–105.
- Landsberg H.E., 1981, *The urban climate*, Academic Press, New York.
- Lewińska J., 1967, *Opady atmosferyczne w Wielkim Krakowie*, *Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego*, 91.
- Lewińska J., 1996, *Geneza i rozwój miejskiej wyspy ciepła w Krakowie oraz możliwości jej minimalizacji*, *Folia Geographica, Geographia-Physica*, 26–27 (1994/1995), UJ, s. 75–87.
- Lewińska J., 2000, *Klimat miasta, zasoby, zagrożenia, kształtowanie*, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Oddział w Krakowie, Kraków.
- Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W., 1990, *Klimat obszarów zurbanizowanych*, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa, 167 s.
- Lin S., Luo M., Walker R., Liu X., Hwang S., Chinery R., 2009, *Extreme high temperatures and hospital admissions for respiratory and cardiovascular diseases*, *Epidemiology*, 20, 5, s. 738–746.
- Lindberg F., Grimmond C.S.B., Yogeswaran N., Kotthaus S., Allen L., 2013, *Impact of city changes and weather on anthropogenic heat flux in Europe 1995–2015*, *Urban Climate*, 4, s. 1–15.
- Lindner-Cendrowska K., 2013, *Assessment of bioclimatic conditions in cities for tourism and recreational purposes (a Warsaw case study)*, *Geographia Polonica*, 86, 1, s. 55–66.
- Liszewska M., Konca-Kędzierska K., Jakubiak B., 2012, *Opracowanie scenariuszy zmian klimatu dla Polski i wybranych regionów*, manuskrypt, Międzywydziałowe Centrum Modelowania Matematycznego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego.
- Lopes C., Adnot J., Santamouris M., Klitsikas N., Alvarez S., Sanchez F., 2001, *Managing the growth of the demand for cooling in urban areas and mitigating the urban heat island effect*, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE) congress, Mandelieu-la-Napoule, 11–16.06.2001, vol. II.
- Lorenc H. (red), 2009, *Zagrożenia kłeskami żywiołowymi*, [w:] Najgebauer A. (red.), *Modele zagrożeń aglomeracji miejskiej wraz z systemem zarządzania kryzysowego np. Warszawy*, Redakcja Wydawnictw Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa, s. 103–152.
- Lorenc H., Mazur A., 2003, *Współczesne problemy klimatu Warszawy*, IMGW, Warszawa.
- Lowry W.P., 1977, *Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis*, *Journal of Applied Meteorology*, 16, s. 129–135.
- Makhelouf A., 2009, *The effect of green spaces on urban climate and pollution*, *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering* 6, 1, s. 35–40.
- Makowiec-Dąbrowska T., 1999, *Wpływ warunków środowiska pracy na zdolność do pracy*, [w:] Induski J. (red.), *Higiena Pracy*, tom 1, Oficyna Wydawnicza Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi, Łódź, s. 102–117.
- Matson M., McClain E.P., McGinnis Jr. D.F., Pritchard J.A., 1978, *Satellite detection of urban heat islands*, *Monthly Weather Review*, 106, 1725–1734.
- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H., 2007, *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Application of the RayMan model*, *International Journal of Biometeorology*, 51, s. 323–334.
- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H., 2010, *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – Basics of the RayMan model*, *International Journal of Biometeorology*, 54, s. 131–139.
- Mayer H., 1988, *Results from the Research Program “STADKLIMA BAYERN” for Urban Planning*, *Energy and Buildings*, 11, s. 115–121.
- Mayer H., Höppe P., 1987, *Thermal comfort of man in different urban environments*, *Theoretical and Applied Climatology*, 38, 1, s. 43–49.

- McMichael A.J., Wilkinson P., Kovats R.S., Pattenden S., Hajat S., Armstrong B., Vajanapoom N., Nicu E.M., Mahomed H., Kingkeow C., Kosnik M., O'Neill M.S., Romieu I., Ramirez-Aguilar M., Barreto M.L., Gouveia N., Nikiforov B., 2008, *International study of temperature, heat and urban mortality: the ISOTHURM project*, *International Journal of Epidemiology*, 37, 5, s. 1121–1131.
- Medina-Ramon M., Zanobetti A., Cavanagh D., Schwartz J., 2006, *Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis*, *Environmental Health Perspectives*, 114, s. 1331–1336.
- Merecki R., 1915, *Klimatologia ziem polskich*, Warszawa.
- Miller P., 2009, *Warszawska bryza*, <http://www.um.warszawa.pl/o-warszawie/kompendium-wiedzy/warszawska-bryza> (dostęp: 03.06.2014).
- Montavez J.P., Rodriguez A., Jimenez J.I., 2000, *A study of the urban heat Island of Granada*, *International Journal of Climatology*, 20, s. 899–911.
- Morgan D.L., Baskett R.L., 1974, *Comfort of man in the city. An energy balance model of man-environment coupling*, *International Journal of Biometeorology*, 18, s. 184–198.
- Naughton M., Henderson A., Mirabelli M., Kaiser R., Wilhelm J., Kieszak S., Rubin C., McGeehin M., 2002, *Heat-related mortality during 1999 heat wave in Chicago*, *American Journal of Prevention Medicine*, 22, s. 221–227.
- Ng E. (red.), 2010, *Designing High-Density Cities: For Social and Environmental Sustainability*, Earthscan, London.
- Okamoto-Mizuno K., Mizuno K., 2012, *Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm*, *Journal Of Physiological Anthropology*, 1, s. 14.
- Oke T.R., 1973, *City size and the urban heat island*, *Atmospheric Environment*, 7, 8, s. 769–779.
- Oke T.R., 1981, *Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations*, *Journal of Climatology*, 1, 3, s. 237–254.
- Oke T.R., 1982, *The energetic basis of the urban heat island*, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 108, 455, s. 1–24.
- Oke T.R., 1984, *Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning*, *Energy and Buildings*, 7, 1.
- Oke T.R., 1987, *Boundary Layer Climates*, 2nd edition, Routledge, London.
- Oke T.R., 2004, *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*, IOM Report, 81, World Meteorological Organization, Geneva.
- Olszewski K., 1978, *Rola trawników w kształtowaniu warunków termiczno-wilgotnościowych w mieście*, *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW*, 26, 11, s. 93–116.
- Olszewski K., 1980, *Próba określenia wpływu trawników na warunki termiczno-wilgotnościowe w mieście w porze dziennej*, *Acta Universitatis Lodzianensis, Seria II*, 28, s. 133–140.
- Olszewski K., 1992, *Wilgotność względna powietrza w warunkach śródmiejskich*, *Prace i Studia Geograficzne*, 11, s. 115–123.
- Pałczyński C., Dudek W., Kręcisz B., 2012, *Zmiany klimatu, miejska wyspa ciepła i choroby alergiczne*, *Alergia*, 4, s. 26–28.
- Pan L., Lian Z., Lan L., 2012, *Investigation of sleep quality under different temperatures based on subjective and physiological measurements*, *Heating, ventilating, air-conditioning and refrigerating research (HVAC & R Research)*, 18, 5, s. 1030–1043.
- Papadopoulos A.M., 2001, *The influence of street canyons on the cooling loads of buildings and the performance of air conditioning systems*, *Environment and Buildings*, 33, s. 601–607.
- Papritz A., Stein A., 2002, *Spatial prediction by linear kriging*, [w:] Stein A., van der Meer F., Gorte B. (red.), *Spatial Statistics for Remote Sensing*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 83–114.
- Park H., 1986, *Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities*, *First International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality, Part II, Atmospheric Environment*, 20, 10, s. 1859–1866.
- Park H., 1987, *Variations in the urban heat island intensity affected by geographical environments*, *Environmental Research Center Papers*, 11, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- Parsons K.C., 2003, *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*, Taylor & Francis, London, New York.
- Paszyński J., Miara K., Skoczek J., 1999, *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego*, *Dokumentacja Geograficzna*, 14, IGI PZ PAN.

- Pawlak W., 2009, *Efektywne albedo powierzchni miejskiej*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 9, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 165 s.
- Pawlak J., Teisseyre-Sierpińska M. (red.), 2006, *Opracowanie ekofizjograficzne do studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*, Miejska Pracownia Planowania Przestrzennego i Strategii Rozwoju, Urząd m.st. Warszawy, <https://architektura.um.warszawa.pl/ekofizjografia> (dostęp: 10.06.2014).
- Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Ottle C., Breon F.M., Nan H., Zhou L., Myneni R.B., 2012, *Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities*, Environmental Science & Technology, 46, 2, s. 696–703.
- Prejbisz A., Kabat M., Kluk M., Januszewicz A., 2010, *Zaburzenia snu a nadciśnienie tętnicze*, Nadciśnienie Tętnicze, 14, 5, s. 411–419.
- Priyadarsini R., 2009, *Urban heat island and its impact on building energy consumption*, Advances in Building Energy Research, 3, 1, s. 261–270.
- Psikuta A., Fiala D., Laschewski G., Jendritzky G., Richards M., Błażejczyk K., Mekjavić I., Rintamäki H., de Dear R., Havenith G., 2012, *Evaluation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application*, International Journal of Biometeorology, 56, 3, s. 443–460.
- Quattrochi D.A., Luvall J.C., Richkman D.L., Estes M.G., Laymon C.A., Howell B.F., 2000, *A decision support information system for urban landscape management using thermal infrared data*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66, 10, 1195–1207.
- Rapiejko P., Ratajczyk J., Weryszko-Chmielewska E., Chłopek K., Kupryjanowicz M., Pu M., Modrzyński M., 2001, *Wieloośrodkowa analiza stężenia pyłku roślin w 2000 roku*, Alergologia Współczesna, 1, 6, s. 23–27.
- Ren C., Williams G., Tong S., 2006, *Does particulate matter modify the association between temperature and cardiorespiratory diseases?* Environmental Health Perspectives, 114, 1690–1696.
- Rosenfeld A.H., Akbari H., Bretz S.E., Fishman B.L., Kurn D.M., Sailor D.J., Taha H., 1995, *Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates*, Energy and Buildings, 22, s. 255–265.
- Rosner L., 2014, *Shade trees, cool summer*, Biotope City Journal, <http://www.biotope-city.net/article/shade-trees-cool-summer> (dostęp: 10.06.2014).
- Saaroni H., Ziv B., 2003, *The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park: the case of Tel Aviv, Israel*, International Journal of Biometeorology, 47, 3, s. 156–165.
- Sailor D.J., Lu L., 2004, *A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas*, Atmospheric Environment, 38, 17, s. 2737–2748.
- Samel-Kowalik P., Lipiec A., Tomaszewska A., Raciborski F., Walkiewicz A., Lusawa A., Borowicz J., Gutowska-Ślesik J., Smoliński B., 2009, *Występowanie alergii i astmy w Polsce – badanie ECAP*, Gazeta Farmaceutyczna, 3, s. 32–34.
- Santus P., Russo A., Madonini E., Allegra L., Blasi F., Centanni S., Mladonova A., Schiraldi G., Amaducci S., 2012, *How air pollution influences clinical management of respiratory diseases. A case-crossover study in Milan*, Respiratory Research, 13, 10, s. 1–12.
- Semenza J.C., Ploubidis G.B., George L.A., 2011, *Climate change and climate variability: personal motivation for adaptation and mitigation*, Environmental Health, 10:46, <http://www.ehjournal.net/content/pdf/1476-069X-10-46.pdf> (dostęp: 29.10.2014).
- Semenza J.C., Rubin C., Falter K., Selanikio J., Flanders W., Howe H., Wilhelm J., 1996, *Heat related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago*, New England Journal of Medicine, 335, s. 84–90.
- Shahgedanova M., Burt T.P., Davies T.D., 1997, *Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow*, International Journal of Climatology, 17, 13, s. 1451–1465.
- Shwartz J., 2005, *Who is sensitive to extremes of temperature? A case-only analysis*, Epidemiology, 16, s. 67–72.
- Skorupski W., 1984, *Wyniki badań nad składem powietrza atmosferycznego na terenach zieleni i ulicach miejskich w Warszawie*, [w:] Szczepanowska H.B. (red.), *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego*, Instytut Kształtowania Środowiska, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, s. 95–108.
- Spronken-Smith R.A., Oke T.R., 1998, *The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates*, International Journal of Remote Sensing, 19, 1, s. 2085–2104.
- SPZPOMW, 2011, *Studium Planu Zagospodarowania Przestrzennego Obszaru Metropolitalnego Warszawy*, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego w Warszawie, http://siskom.waw.pl/plani-styka/aglomeracja/studium_pzpomw_wyd_2.pdf (dostęp: 15.07.2014).

- Staiger H., Laschewski G., Grätz A., 2012, *The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics*, International Journal of Biometeorology, 56, 1, s. 165–176.
- Stewart I.D., 2011, *A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature*, International Journal of Climatology, 31, 2, s. 200–217.
- Stopa-Boryczka M. (red.), 2003, *Studies on the climate of Warsaw*, Warsaw University, Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Ryczywolska E., Wawer J., 1984, *Badania wpływu zabudowy na klimat lokalny w Warszawie*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, s. 29–35.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Mierzwiński B., Wawer J., 1991, *Zależność pola temperatury powietrza od charakteru zabudowy*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 1213, Prace Instytutu Geograficznego, A, V, Wrocław, s. 187–188.
- Stopa-Boryczka M., Kossowska-Cezak U. (red.), 1992, *Z badań klimatu Warszawy*, Prace i Studia Geograficzne, 11.
- Strategia rozwoju, 2005, *Strategia Rozwoju Miasta Stołecznego Warszawy do 2020 roku*, Biuro Strategii Rozwoju i Integracji Europejskiej, Urząd m.st. Warszawy, <http://strategia.um.warszawa.pl/content/strategia-rozwoju-miasta-stolecznego-warszawy-do-2020-roku> (dostęp: 14.07.2014).
- Streiling S., Matzarakis A., 2003, *Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study*, Journal of Arboriculture, 29, 6, s. 309–316.
- Streutker D.R., 2002, *A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas*, International Journal of Remote Sensing, 23, 13, 2595–2608.
- SUKZPMW, 2010, *Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego m.st. Warszawy ze zmianami*, 2010, Załącznik Nr 1 do Uchwały Nr LXI/1669/2013 Rady m.st. Warszawy z dnia 11 lipca 2013 r. – ujednolicona forma Załącznika Nr 1 do Uchwały Nr LXXXII/2746/2006 Rady m.st. Warszawy z dnia 10.10.2006 r., z wyróżnieniem zmian, http://bip.warszawa.pl/Menu_przedmiotowe/ogloszenia/plany_zagospodarowania/Studium.htm (dostęp: 10.06.2014).
- Szczepanowska H.B. (red.), 1984, *Wpływ zieleni na kształtowanie środowiska miejskiego*, Instytut Kształtowania Środowiska, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Szulcewska B., Giedych R., 2010, *Ekologiczno-przestrzenne wskaźniki stosowane w planowaniu i projektowaniu terenów osiedli mieszkaniowych*, [w:] Kosmala M. (red.), *Zieleń osiedlowa – stan obecny i wskazania do poprawy*, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Toruń.
- Szulcewska B., Giedych R., Borowski J., Kuchcik M., Sikorski P., Mazurkiewicz A., Stańczyk T., 2014, *How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence*, Land Use Policy, 38, s. 330–345.
- Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne, 77, s. 211.
- Szymanowski M., 2005, *Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland*, Theoretical and Applied Climatology, 82, 3–4, s. 207–224.
- Szymanowski M., Kryza M., 2009, *GIS-based techniques for urban heat island spatialization*, Climate Research, 38, s. 171–187.
- Śleszyński P., 2012, *Warszawa i Obszar Metropolitalny Warszawy a rozwój Mazowsza*, Trendy Rozwojowe Mazowsza, 8, Mazowieckie Biuro Planowania Regionalnego, Warszawa, <http://www.trendyrozwojowemazowsza.pl/nr-82012-warszawa-i-obszar-metropolitalny-warszawy-rozwoj-mazowsza> (dostęp: 17.07.2014).
- Taha H., Rosenfeld A.H., Akbari H., Huang J., 1988, *Residential cooling loads and the urban heat islands – the effect of albedo*, Building and Environment, 23, 4, s. 271–283.
- Tan J., 2008, *Commentary: People's vulnerability to heat wave*, International Journal of Epidemiology, 37, s. 318–320.
- Terjung W.H., 1974, *Energy balance between atmosphere and living organisms*, [w:] Tromp S.W. (red.), *Progress in Biometeorology*, 1, 1, Elsevier, Amsterdam, s. 55–58.
- Todea D.A., Suatean I., Coman A.C., Rosca L.E., 2013, *The effect of climate change and air pollution on allergenic potential of pollens*, Notulae Botanicae Horti Agrobotanici, 41, 2, s. 646–650.
- Tramuto F., Cusimano R., Cerame G., Vultaggio M., Calamusa G., Maida C.M., Vitale F., 2011, *Urban air pollution and emergency room admissions for respiratory symptoms: a casecrossover study in Palermo, Italy*, Environmental Health: A Global Access Science, 10, 1, s. 31–41.

- Tuller S.E., 1975, *The energy budget of man: variations with aspect in a downtown urban environment*, International Journal of Biometeorology, 19, 1, s. 2–13.
- Vandentorren S., Bretin P., Zeghnoun A., Mandereau-Bruno L., Croisier A., Cochet C., Riberon J., Siberan I., Declercq B., Ledrans M., 2006, *August 2003 heat wave in France: risk factors for death of elderly people living at home*, European Journal of Public Health, 16, s. 583–591.
- VDI, 2008, *Guideline 3787, Part 2: Environmental meteorology: Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level*, [w:] *Part I: Climate*. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1 B, Umweltmeteorologie, Beuth Verlag, Berlin.
- Voogt J.A., 2002, *Urban heat island*, [w:] Munn T. (red.), *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 3rd edition, s. 660–666.
- Voogt J.A., Oke T.R., 2003, *Thermal remote sensing of urban climates*, Remote Sensing of Environment, 86, s. 370–384.
- Wang X., Barnett A., Hu W., Tong S., 2009, *Temperature variation and emergency hospital admissions for stroke in Brisbane, Australia, 1996–2005*, International Journal of Biometeorology, 53, s. 535–541.
- Watkins R., Palmer J., Kolokotroni M., Littlefair P., 2002, *The London Heat Island: results from summertime monitoring*, Building Services Engineering Research and Technology, 23, 2, s. 97–106.
- Wawer J., 1992, *The impact of weather conditions on the intensity of the urban heat island in Warsaw*, Miscellanea Geographica, 5, Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw, s. 65–69.
- Wawer J., 1995, *Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, s. 71–78.
- Wawer J., 1997, *Miejska wyspa ciepła w Warszawie*, [w:] Stopa-Boryczka M. (red.), *Nowe metody badań klimatu Polski*, Prace i Studia Geograficzne, 20, s. 145–197.
- Wawer J., 1998a, *Częstość miejskiej wyspy ciepła w Warszawie*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3, s. 377–384.
- Wawer J., 1998b, *Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej*, [w:] Kłysik K. (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3, s. 45–50.
- Weng Q., 2001, *A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China*, International Journal of Remote Sensing, 22, 10, s. 1999–2014.
- Więclaw M., 2012, *Katalog mas powietrza w Warszawie w 2011 roku*, plik komputerowy.
- Wójcicka I., 1971, *Uciążliwość klimatu miasta i możliwość jego poprawy za pomocą roślinności*, Instytut Urbanistyki i Architektury, Seria Prac Własnych, Warszawa.
- Wysocki C., Sikorski P., 2009, *Fitosocjologia stosowana w ochronie i kształtowaniu krajobrazu*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Yaron M., Niermeyer S., 2004, *Clinical description of heat illness in children*, Melbourne, Australia commentary, Wilderness and Environmental Medicine, 15, s. 291–292.
- Ye X., Wolff R., Yu W., Vaneckova P., Pan X., Tong S., 2011, *Ambient temperature and morbidity: a review of epidemiological evidence*, Environmental Health Perspective, 120, 1, s. 19–28.
- Zając-Nęda M., 2003, *Skutki działania wysokiej i niskiej temperatury otoczenia*, [w:] Marek K. (red.), *Choroby zawodowe*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa, s. 377–388.
- Zanobetti A., Schwartz J., 2008, *Temperature and mortality in nine US cities*, Epidemiology, 19, 4, s. 563–570.
- Ziska L.H., Beggs P.J., 2011, *Anthropogenic climate change and allergen exposure: The role of plant biology*, Journal of Allergy and Clinical Immunology, 129, 1, s. 27–32.
- Zych S., 1961, *Zagadnienia klimatyczne miasta Łodzi*, Przegląd Techniczny, 49, s. 9.

Spis rycin

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

Rycina 2.2. Skale przestrzenne badań klimatu miasta

Rycina 2.3. Intensywność miejskiej wyspy ciepła (MWC) w różnych typach zagospodarowania terenu w zależności od wielkości miasta (wyrażonej liczbą mieszkańców)

Rycina 3.1. Rozmieszczenie punktów w sieci monitoringu MWC w aglomeracji warszawskiej

Rycina 3.2. Przykład inwentaryzacji dwóch stanowisk pomiarowych: pokrycie terenu, rodzaj zabudowy, położenie na mapie topograficznej, wykres zasłonięcia horyzontu oraz zdjęcie otoczenia punktu

Rycina 4.1. Rozkład średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie, 1961–1980

Rycina 4.2. Schematyczny rozkład miejskiej wyspy ciepła (MWC) oraz temperatury odczuwalnej w godzinach dziennych, w obrębie różnych struktur miasta

Rycina 4.3. Obszar interpolacji (wnętrze zielonego wieloboku) i ekstrapolacji (szraf) danych pomiarowych w latach 2001 i 2002 oraz 2011 i 2012

Rycina 4.4. Przebieg dobowy średniej godzinnej temperatury powietrza na 3 wybranych stacjach monitoringu MWC (Hoża, Orzycka i Powsin) w okresach: 21–23.02.2011 (a), 10–12.05.2011 (b) i 15–17.12.2012 (c)

Rycina 4.5. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index), 2001 i 2002, wartości średnie roczne

Rycina 4.6. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index), 2011 i 2012, przy zagęszczonej sieci stacji, wartości średnie roczne

Rycina 4.7. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index) w porach roku, 2011 i 2012

Rycina 4.8. Przebieg roczny wskaźnika intensywności miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w punktach Hoża, Orzycka oraz Powsin, 2011 i 2012

Rycina 4.9. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (według UHI-index) w masach powietrza, 2011 i 2012, wartości średnie roczne

Rycina 4.10. Natężenie miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w dniu 12 maja 2011 roku

Rycina 4.11. Mapa synoptyczna, stan na godzinę 00 UTC 12 maja 2011 roku

Rycina 4.12. Zmiany wskaźnika miejskiej wyspy ciepła (UHI-index) w Warszawie, 1981–2011

Rycina 4.13. Zmiany rocznych wartości wskaźnika HDD w Warszawie, 1976–2011

Rycina 4.14. Zmiany rocznych wartości wskaźnika CDD w Warszawie, 1976–2011

Rycina 4.15. Zmiany rocznej liczby dni z koniecznością uruchamiania systemów grzewczych w Warszawie (HDD dni), 1976–2011

- Rycina 4.16. Zmiany rocznej liczby dni z koniecznością uruchamiania systemów klimatyzacyjnych w Warszawie (CDD dni), 1976–2011
- Rycina 4.17. Pola podstawowe uwzględnione w symulacjach miejskiej wyspy ciepła w modelach MPI-M-REMO-ECHAM5 oraz DMI-HIRHAM5-ARPEG
- Rycina 4.18. Obserwowane oraz modelowane uśrednione wartości maksymalne MWC w Warszawie 1981–2100
- Rycina 4.19. Liczba stopniodni grzania (HDD) (a) oraz liczba dni, w których niezbędne jest ogrzewanie pomieszczeń (b) w różnych podokresach lat 1981–2100
- Rycina 4.20. Liczba stopniodni chłodzenia (CDD) (a) oraz liczba dni, w których niezbędne jest klimatyzowanie pomieszczeń (b) w różnych podokresach lat 1981–2100
- Rycina 5.1. Pokrycie i użytkowanie terenu w Warszawie; na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku
- Rycina 5.2. Wskaźnik pokrycia roślinnością (NDVI) w Warszawie; na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku
- Rycina 5.3. Rozkład temperatury podłoża w Warszawie; na podstawie obrazu LANDSAT5 TM, z dnia 11 lipca 1987 roku
- Rycina 5.4. Mapy rozkładu względnych wartości wybranych elementów meteorologicznych
- Rycina 5.5. Typy topoklimatu (1–5) w Warszawie jako kombinacja trzech zmiennych meteorologicznych: temperatury powietrza (T_a), prędkości wiatru (v) i całkowitego promieniowania słonecznego (K)
- Rycina 5.6. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchyłeń temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchyłeń ($dUHI$ -index) w kolejnych porach roku, 2011 i 2012
- Rycina 5.7. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchyłeń temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchyłeń w osiedlach o różnym udziale terenów biologicznie czynnych (TBC), 2011 i 2012
- Rycina 5.8. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchyłeń temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchyłeń w osiedlach o różnej wartości wskaźnika intensywności zabudowy (WIZ), 2011 i 2012
- Rycina 5.9. Minimalne, średnie i maksymalne wartości odchyłeń temperatury minimalnej względem stacji Warszawa-Okęcie (UHI-index) oraz zakres tych odchyłeń w osiedlach położonych w różnej odległości od centrum miasta, 2011 i 2012
- Rycina 5.10. Przestrzenne rozmieszczenie terenów biologicznie czynnych w Warszawie: łącznie z gruntami rolnymi (a), bez gruntów rolnych (b), według bazy *Corine Land Cover 2006 (European Environment Agency 2007)*
- Rycina 5.11. Struktura terenów zieleni publicznej oraz udział parków, zieleńców, zieleni osiedlowej i zieleni ulicznej w powierzchni geodezyjnej badanych kategorii terenów 1995–2004
- Rycina 5.12. System korytarzy wymiany powietrza na tle użytkowania i pokrycia terenu w 2006 roku
- Rycina 5.13. Rozmieszczenie i zasięg wybranych form zagospodarowania terenu, mających wpływ na występowanie miejskiej wyspy ciepła

- Rycina 5.14. Rozkład różnych kategorii miejskiej wyspy ciepła w Warszawie przy obecnym zagospodarowaniu terenu (2010); noc (a), dzień (b)
- Rycina 5.15. Rozmieszczenie i zasięg wybranych form zagospodarowania terenu, mających wpływ na występowanie miejskiej wyspy ciepła – prognoza dla 2070 roku
- Rycina 5.16. Rozkład różnych kategorii miejskiej wyspy ciepła w Warszawie przy prognozowanym na 2070 rok zagospodarowaniu terenu; noc (a), dzień (b)
- Rycina 5.17. Zmiany powierzchni zielonej infrastruktury w latach 2004–2011 i jej prognoza na 2070 rok
- Rycina 6.1. Przebieg dobowy UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Borowa Góra) w lutym 2007 roku
- Rycina 6.2. Przebieg dobowy UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Borowa Góra) w czerwcu 2008 roku
- Rycina 6.3. Przebieg roczny UTCI w centrum Warszawy (Twarda) i na terenie podmiejskim (Tłuszcz) o godzinie 12 UTC, 2004–2010
- Rycina 6.4. Średnie (śr.), najniższe (min.) i najwyższe (maks.) wartości UTCI w różnych typach zabudowy w Warszawie w różnych porach dnia, lipiec 2002 roku
- Rycina 6.5. Odchylenia wskaźnika UTCI (dUTCI) w różnych typach zagospodarowania terenu od warunków pozamiejskich w dniach pogodnych przy różnej temperaturze powietrza
- Rycina 6.6. Lokalizacja obszarów badań pilotażowych oraz peryferyjnej stacji referencyjnej w Powsinie
- Rycina 6.7. Widok analizowanych obszarów: osiedle Koło (a), osiedle Włodarzewska (b), okolice budynku Twarda 51/55 (c) oraz stacja w Powsinie (d)
- Rycina 6.8. Średnie wartości całkowitego promieniowania słonecznego (Kglob) w poszczególnych punktach pomiarowych na osiedlach Koło (a) i Włodarzewska (b), 21 i 22 maja 2013 roku
- Rycina 6.9. Średnie wartości Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Ciepłych (UTCI) w poszczególnych punktach pomiarowych na osiedlach Koło (a) i Włodarzewska (b), 21 i 22 maja 2013 roku
- Rycina 6.10. Różnica temperatury powietrza (T_a) oraz Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Ciepłych (UTCI) między obszarami badań i stacją w Powsinie w godzinach porannych (a) i południowych (b)
- Rycina 6.11. Udział terenów biologicznie czynnych (TBC) oraz wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ) na analizowanych terenach
- Rycina 6.12. Roczna częstość dni ze skrajnymi obciążeniami cieplnymi (UTCI < -13°C i UTCI > 32°C) w Warszawie, 2001–2100
- Rycina 7.1. Występowanie roślin klasy 3 na terenach pilotażowych: Koło (a), Włodarzewska (b), Włodarzewska-tory (c)
- Rycina 7.2. Rozmieszczenie roślin klasy 2 na terenach pilotażowych: Koło (a), Włodarzewska (b), Włodarzewska-tory (c)
- Rycina 7.3. Bezwzględne demograficzne ryzyko termiczne (BDRT) w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców (według stanu na 31 grudnia 2012 roku)

Rycina 7.4. Demograficzny wskaźnik ryzyka termicznego (DWRT) w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców (według stanu na 31 grudnia 2012 roku)

Rycina 8.1. Zagospodarowanie terenu na osiedlu Włodarzewska: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (zastąpienie 2 budynków przez trawniki i drzewa) (b)

Rycina 8.2. Zagospodarowanie obszaru Twarda: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (dodatkowe drzewa i powierzchnie przepuszczalne) (b) oraz zmiany proponowane w scenariuszu 2 (dodatkowe drzewa, powierzchnie przepuszczalne i zielone dachy) (c)

Rycina 8.3. Zagospodarowanie terenu na osiedlu Zacisze: stan aktualny (a), zmiany proponowane w scenariuszu 1 (wprowadzenie zielonych dachów) (b)

Rycina 8.4. Symulowane różne charakterystyki miejskiej wyspy ciepła na osiedlu Włodarzewska (a) i obszarze Twarda (b), dla wybranych 4 dni reprezentujących pory roku; S1 – scenariusz 1, S2 – scenariusz 2

Spis tabel

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

Tabela 2.2. Skala oceny obciążeń cieplnych organizmu według wskaźnika UTCI

Tabela 3.1. Stanowiska pomiarowe w sieci monitoringu MWC

Tabela 3.2. Charakterystyka fizjograficzna oraz urbanistyczna stanowisk pomiarowych w sieci monitoringu MWC w Warszawie

Tabela 3.3. Klasyfikacja nawierzchni na potrzeby opracowania

Tabela 3.4. Współczynnik pochłaniania powierzchni naturalnych i sztucznych oraz materiałów wykończeniowych budynków

Tabela 4.1. Częstość (%) mas powietrza w porach roku i średnio w 2011 roku oraz w dziesięcioleciu 1991–2000

Tabela 4.2. Warunki termiczne na stacji Warszawa-Okęcie w dniach 9–13 maja 2011 roku

Tabela 4.3. Częstość (%) pojawiania się miejskiej wyspy ciepła w Warszawie, 1981–2011

Tabela 4.4. Współczynniki trendu liniowego zmian maksymalnej i średniej wartości UHI-index w poszczególnych porach roku i w roku (wartości istotne statystycznie pogrubiono), Warszawa 1981–2011

Tabela 4.5. Średnie i maksymalne sezonowe i roczne wartości (°C) UHI-index w Warszawie, 1981–2011

Tabela 4.6. Częstość (%) miejskiej wyspy ciepła w Warszawie w kolejnych dziesięcioleciach XXI wieku według uwzględnionych modeli klimatycznych

Tabela 5.1. Uproszczona klasyfikacja stref klimatów miejskich oraz opisujące je wskaźniki

Tabela 5.2. Właściwości fizyczne wybranych materiałów (rodzaju podłoża) pochodzenia naturalnego i sztucznego

Tabela 5.3. Wskaźnik pokrycia roślinnością (NDVI) oraz względne wartości temperatury powierzchni (TS) w różnych typach użytkowania terenu w Warszawie

Tabela 5.4. Wykaz ważniejszych parków Warszawy

Tabela 5.5. Wyniki szacunku liczby ludności według trzech wariantów dla Warszawy w latach 2010–2035 (liczba ogółem w tys. z uwzględnieniem osób niezameldowanych)

Tabela 5.6. Chłonność inwestycyjna w dzielnicach Warszawy według analizy chłonności terenu na podstawie kierunków zagospodarowania przestrzennego

Tabela 5.7. Odsetek terenów zajętych przez różne typy zagospodarowania terenu w Warszawie w 2010 roku (stan obecny) i 2070 roku (prognoza)

Tabela 6.1. Wartości UTCI (°C) w różnych typach użytkowania terenu oraz w różnych scenariuszach pogodowych

Tabela 6.2. Różnice wskaźnika obciążeń cieplnych (dUTCI) pomiędzy badanymi osiedlami a peryferiami Warszawy (Ogród Botaniczny w Powsinie), 21 i 22 maja 2013 roku

Tabela 6.3. Częstość dni z różnymi kategoriami UTCI w Warszawie w pierwszej i ostatniej dekadzie XXI wieku

Tabela 7.1. Gatunki roślin wyszczególnione w opracowaniu ekofizjograficznym terenów pilotażowych

Tabela 7.2. Liczba egzemplarzy roślin o różnej alergenowości na obszarze badanych osiedli

Wydawnictwo Akademickie SEDNO
Wydanie pierwsze
Arkuszy drukarskich: 11
Skład i łamanie: Janusz Fajto
Druk i oprawa: Pabianickie Zakłady Graficzne SA
<http://rcin.org.pl>

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk oraz Wydawnictwo Akademickie SEDNO wspólnie wydają serię publikacji książkowych pracowników IGiPZ PAN, kolejną z nich jest ***Miejska wyspa ciepła w Warszawie – uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne.***

Książka jest monografią miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. O wyjątkowości publikacji świadczą interdyscyplinarność i kompleksowość ujęcia. Autorzy ufają, że zainteresuje ona szerokie grono odbiorców od klimatologów przez architektów i urbanistów po osoby tworzące system zarządzania kryzysowego w mieście.

Problem poznania struktury klimatu wielkich miast znajduje się prawie w każdym narodowym programie klimatycznym. Waga problemu jest najwyższa, bowiem życie ludzkie w warunkach wielkomiejskich jest coraz trudniejsze a tzw. miejska wyspa ciepła stanowi coraz większe obciążenie dla mieszkańców i całej infrastruktury wielkomiejskiej.

Z dużym zainteresowaniem i uznaniem odnoszę się do przyjętej przez zespół autorski koncepcji zagęszczenia sieci pomiarowej na obszarze miasta i jego okolicy. Największą wartość opracowania stanowi analiza danych z aż 47 stanowisk pomiarowych, ale także prognoza miejskiej wyspy ciepła do końca XXI wieku. Bardzo interesujący jest m.in. rozdział poświęcony wpływowi miejskiej wyspy ciepła na stan zdrowia i życia mieszkańców w aspekcie alergienności roślin.

Z recenzji dr hab. Haliny Lorenc, prof. IMGW PIB

Praca jest rezultatem projektu „Wypracowanie i zastosowanie strategii adaptacyjnych i ograniczających oraz sposobów przeciwdziałania zjawisku miejskiej wyspy ciepła”. Jest pierwszą tak obszerną, a zarazem wieloaspektową publikacją dotyczącą miejskiej wyspy ciepła w Polsce.

Z recenzji dr. Andrzeja Wyszkwoskiego

Wydawnictwo Akademickie SEDNO
00-696 Warszawa, ul. J. Pankiewicza 3
tel./fax +48 22 46 48 797
www.wydawnictwosedno.pl
info@wydawnictwosedno.pl

Cena 45 zł (w tym VAT)
ISBN 978-83-7963-018-9



9 788379 630189 >