



ANALIZA KLIMATU LOKALNEGO REJONU ULIC ŻŁOTA I ZGODA W WARSZAWIE PRZED PLANOWANĄ PRZEBUDOWĄ

AUTORZY:

dr hab. Magdalena Kuchcik, mgr Kaja Czarnecka
dr Jarosław Baranowski, dr Michał Konopski,
dr Katarzyna Lindner-Cendrowska

Na zlecenie Zarządu Dróg Miejskich
ZDM/UM/DZP/244/A/2024 z dnia 5 czerwca 2024 r.



Zarząd Dróg Miejskich
w Warszawie

Warszawa, październik 2024 r.



Spis treści

1. Wprowadzenie.....	3
1.1 Dane i metoda opracowania	6
2. Lato 2024 r. na tle wielolecia 2014-2023.....	13
3. Warunki termiczno-wilgotnościowe na analizowanym obszarze w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r.	15
4. Zróżnicowanie warunków solarnych, wiatrowych i stresu termicznego na analizowanym obszarze 21 czerwca 2024 r.	22
5. Podsumowanie.....	24
Literatura.....	25



1. Wprowadzenie

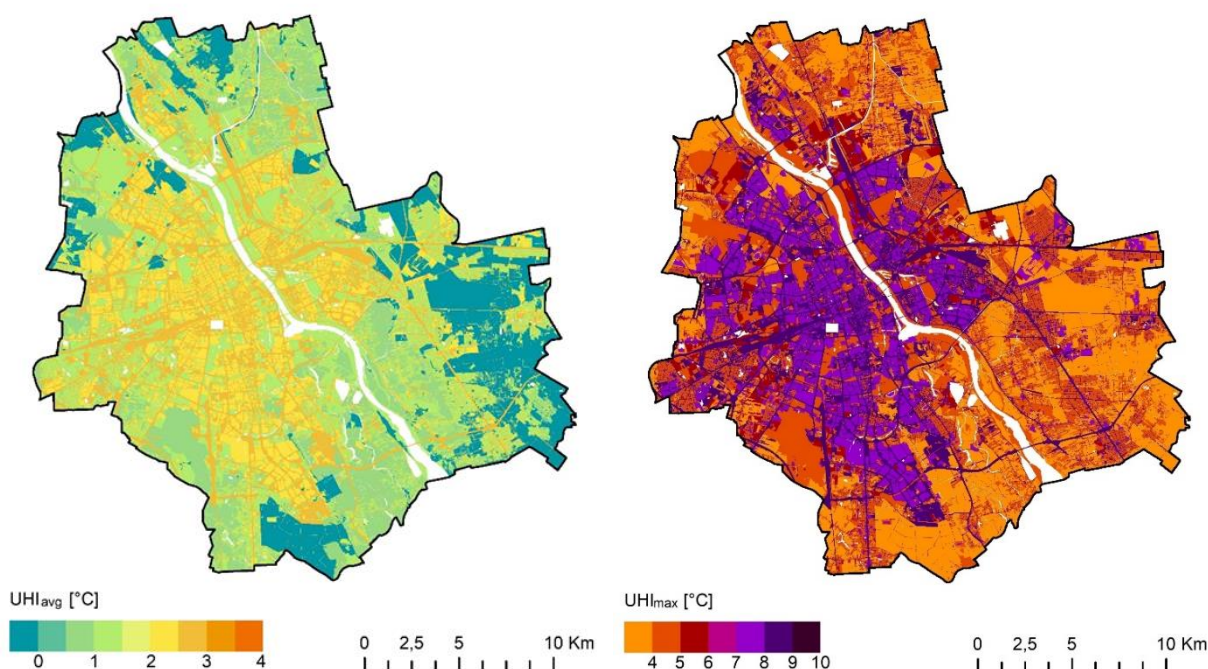
Klimat miasta jest wypadkową wielu czynników (Oke 1987, Musco 2016):

- właściwości materiałów, o dużej zdolności pochłaniania promieni słonecznych, z których zbudowane jest miasto. Nagrzane w dzień powierzchnie, wypromieniowują ciepło w nocy;
- dużego udziału powierzchni nieprzepuszczalnych, które zmieniają bilans cieplny i wodny, powodując odpływ wody do kanalizacji, spadek wilgotności powietrza i wzrost jej temperatury;
- geometrii miasta, wielu powierzchni pionowych i budynków o różnej wysokości, powodujących wielokrotne odbicia promieniowania i większe jego pochłanianie oraz zmiany kierunku i prędkości wiatru (miejsca z efektem tunelowym i dużym przyspieszeniem wiatru oraz miejsca prawie bez żadnej wymiany powietrza);
- ciepła wytwarzanego w elektrociepłowniach oraz systemach grzewczych i chłodzących, emitowanego przez pojazdy, produkcję przemysłową oraz samych ludzi;
- zanieczyszczenia powietrza, wynikającego z opisanej wyżej działalności człowieka, które z jednej strony ogranicza dopływ promieni słonecznych, z drugiej zaś osłabia wypromieniowanie.

Powyższe czynniki prowadzą do powstania tzw. miejskiej wyspy ciepła (UHI – *urban heat island*), która jest cechą charakterystyczną większości miast, a polega na znacznym podwyższeniu temperatury powietrza w mieście w stosunku do otaczających je terenów peryferyjnych. Nawiązuje ściśle do gęstości i intensywności zabudowy, i nie stanowi jednolitego obszaru, a raczej liczne ciepłe wyspy przedzielone obszarami chłodniejszymi.

Gęsta zabudowa miejska, która zakumulowała ciepło w ciągu dnia, oddaje je nocą wolniej niż tereny otaczające, dlatego miejska wyspa ciepła zaznacza się głównie nocą i wczesnie rano, zaś zanika w ciągu dnia, kiedy to nasłonecznione pola i łąki wokół miasta są cieplejsze niż ocienione kaniony uliczne. UHI jest obserwowana szczególnie w czasie bezwietrznych, bezchmurnych nocy, a silny wiatr, powodujący duże mieszanie powietrza, całkowicie ją eliminuje.

Miejska wyspa ciepła ma różny rozmiar i intensywność w zależności od wielkości miasta, a zaznacza się nawet na terenie większych wsi, wszędzie gdzie występują obszary z dużym udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych. Intensywność miejskiej wyspy ciepła obserwowana w Warszawie osiąga wartości cechujące większe miasta i stale rośnie. W latach 60. XX wieku centrum miasta było nawet o $0,8^{\circ}\text{C}$ cieplejsze niż peryferie, reprezentowane przez stację na lotnisku Okęcie (Kossowska 1973, 1998), zaś w latach 1976-1980 oraz 2002-2011 centrum miasta było już cieplejsze od stacji peryferyjnej o $2,0^{\circ}\text{C}$ (Wawer 1992, Błażejczyk i in. 2014, Kuchcik i in. 2014). Z analiz obejmujących lata 2009-2018 wynika, że średnia intensywność UHI w centrum Warszawy wynosi $2,5\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$, a maksymalna przekracza 8°C (Kuchcik i in. 2024) (ryc. 1), podobnie jak w Paryżu i Londynie (Kolokotroni, Giridharan 2008, de Munck i in. 2013). Wzrost intensywności UHI w centrum Warszawy jest znacznie większy niż obserwowany wzrost temperatury powietrza, a wynika m.in. z dogęszczania zabudowy w Śródmieściu kosztem terenów zielonych, zabudowywania klinów wymiany i regeneracji powietrza, oraz przeważającego w planowaniu przestrzennym do niedawna trendu uszczelniania wszelkich powierzchni w mieście.



Ryc. 1. Średnia (UHI_{avg}) i maksymalna (UHI_{max}) intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie w latach 2009-2018 (źródło: Kuchcik i in. 2014)

Zmiana klimatu, która wyraźnie przyspieszyła w latach 90. XX w., wynika ze wzmocnienia naturalnego efektu cieplarnianego atmosfery ziemskiej przez dodatkową emisję gazów cieplarnianych przez człowieka. Obecnie średnia globalna temperatura powierzchni w stosunku do końca XIX w., czyli okresu przed rewolucją przemysłową, jest wyższa o $1,2^{\circ}\text{C}$. W zależności od przyszłego rozwoju gospodarki światowej i działań (lub ich braku) podejmowanych by przeciwdziałać wzrostowi ocieplenia, do 2100 r. może ona wzrosnąć o dalsze $2,5-3,5^{\circ}\text{C}$ (a w niektórych częściach Ziemi o znacznie więcej), powodując niewyobrażalne skutki w skali globu (IPCC 2023).

Bodźce termiczno-wilgotnościowe oddziałują na receptory ciepła i zimna rozmieszczone w skórze człowieka. Zależnie od intensywności bodźca może mieć on znaczenie hartujące lub oszczędzające. Podstawowymi reakcjami fizjologicznymi na „zimne” warunki otoczenia są obniżenie temperatury skóry oraz zmniejszenie przepływu krwi w obrębie skóry i tkanki podskórnej. Zredukowaniu tempa oddawania ciepła do otoczenia służy zmniejszenie przepływu krwi w obrębie skóry. Niestety, efektem ubocznym tego procesu jest znaczny wzrost ciśnienia krwi, który w skrajnych sytuacjach może być niebezpieczny dla zdrowia. Fizjologiczne mechanizmy obrony przed zimnem są wspomagane przez odpowiednią odzież, dietę i zachowanie (ruch). Niemniej nie zawsze działania te są wystarczające i straty ciepła są większe niż wytwarzanie ciepła przez organizm, co prowadzi do stopniowego jego wychładzania się.

W środowisku gorącym następuje rozszerzenie naczyń krwionośnych i wzrost skórny przepływu krwi, przy jednoczesnym obniżeniu ciśnienia tętniczego i zwiększeniu tętna. Podwyższeniu ulega temperatura skóry, czego bezpośrednim skutkiem jest uaktywnienie gruczołów potowych. Parujący



pot obniża natomiast temperaturę skóry zwiększając w ten sposób różnicę temperatury pomiędzy wnętrzem ciała a skórą. Psychofizycznymi reakcjami organizmu na wysoką temperaturę otoczenia są: złe samopoczucie, zmniejszenie wydolności fizycznej i psychicznej oraz przyspieszenie oddechu.

Reakcje człowieka na wysoką temperaturę uzależnione są również od wilgotności powietrza. Przy dużej wilgotności otoczenia utrudnione jest oddawanie ciepła z organizmu w procesie parowania potu, pojawia się uczucie parności, szczególnie uciążliwe dla osób z chorobami układu oddechowego i krążenia. W dniach parnych notuje się wahania ciśnienia tętniczego oraz szereg innych dolegliwości subiektywnych tj. duszność spoczynkową czy zwiększoną wrażliwość ogólną. Z kolei niska wilgotność powietrza zimą przy niskiej temperaturze powietrza powoduje wysuszenie, a tym samym zmniejszenie elastyczności błony śluzowej i zdolności usuwania kurzu, zmniejszenie ukrwienia dróg oddechowych, osłabienie ogrzewania wdychanego powietrza i wzrost zachorowań na choroby układu oddechowego (Błażejczyk 1993, Machalek 1997).

Życie w mieście niesie dla człowieka wiele zagrożeń, związanych głównie z podwyższoną temperaturą powietrza oraz jego zanieczyszczeniem. Wzrost temperatury powietrza, przedłużające się okresy upalne, a przede wszystkim znaczne częstsze w mieście niż poza nim tzw. noce tropikalne, podczas których temperatura nie spada poniżej 20°C, mogą prowadzić do wielu problemów zdrowotnych: do przegrzania organizmu, zwiększenia ryzyka zawału serca, częstszych zgonów z powodu chorób układu krążenia i oddechowego (m.in. Kozłowski 1986, Kuchcik 2017). Z kolei szacuje się, że jedynie z powodu zanieczyszczenia powietrza rocznie w Polsce umiera blisko 40000 osób (World Bank Group 2021), a chaotyczny i podporządkowany interesom deweloperów rozwój miasta powoduje pogorszenie warunków arosanitarnych.

W świetle powyższych zagrożeń konieczne są działania mitygujące, eliminujące przyczyny zmiany klimatu, co w skali globalnej oznacza przede wszystkim ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a w skali lokalnej, w skali miasta – eliminację lub ograniczenie lokalnych czynników prowadzących do wzrostu temperatury powietrza i ekstremalnych zjawisk pogodowych. Niezbędne są także działania adaptacyjne mające na celu dostosowanie się do obecnych i przyszłych warunków klimatycznych. Kierunków działań mitygujących i adaptacyjnych jest wiele, m.in. dbanie o jak największy udział terenów biologicznie czynnych w naszym otoczeniu, zwiększanie obszaru cienia poprzez nasadzenia drzew, zwłaszcza liściastych, zachowanie przestrzeni niezabudowanych i wszędzie, gdzie tylko możliwe, przepuszczalnych (żwirowych, utwardzonych trawiastych, geokrat itd), wprowadzanie białych dachów i jasnych elewacji budynków, materiałów o wysokim albedo, jasnych odcieni asfaltu, wprowadzanie w mieście tanich rozwiązań opartych na naturze (NbS- *Nature-based Solutions*) (Szulczewska i in. 2014, Czarnecka i in. 2024; Giedych i in. 2024).

Celem tego opracowania jest ocena klimatu lokalnego, w tym w szczególności warunków termicznych, w rejonie ulic Złota i Zgoda przed planowaną przebudową tego miejsca mającą na celu nadanie nowych funkcji temu obszarowi, zmianę charakteru przestrzeni publicznych, w tym znaczne zwiększenie powierzchni biologicznie czynnej.

1.1 Dane i metoda opracowania

W celu zbadania klimatu lokalnego analizowanego obszaru przeprowadzono dwa rodzaje kampanii pomiarowych. Stały, 3-miesięczny pomiar temperatury i wilgotności powietrza prowadzony był od 15 czerwca do 15 września 2024 r. w 4 miejscach (pomiar co 10 minut) z wykorzystaniem rejestratorów Onset HOBO MX2302A (ryc. 2):

- 1) obok budynku "Sceny Relax" na ul. Złotej (dalej w raporcie jako "Relax" / "1S"),
- 2) plac przed Domem Pod Orłami, w rejonie skrzyżowania ul. Złotej, Zgoda i Brokła (dalej w raporcie jako "Pod Orłami" / "2S"),
- 3) parking na pl. Młynarskiego, od strony ul. Sienkiewicza (dalej jako "pl. Młynarskiego" / "3S"),
- 4) skrzyżowanie ul. Sienkiewicza i Jasnej (dalej w raporcie jako "Sienkiewicza" / "4S").



Ryc. 2 Rejestratory montowane na latarniach ulicznych
(od lewej: Relax, Pod Orłami, pl. Młynarskiego, Sienkiewicza)

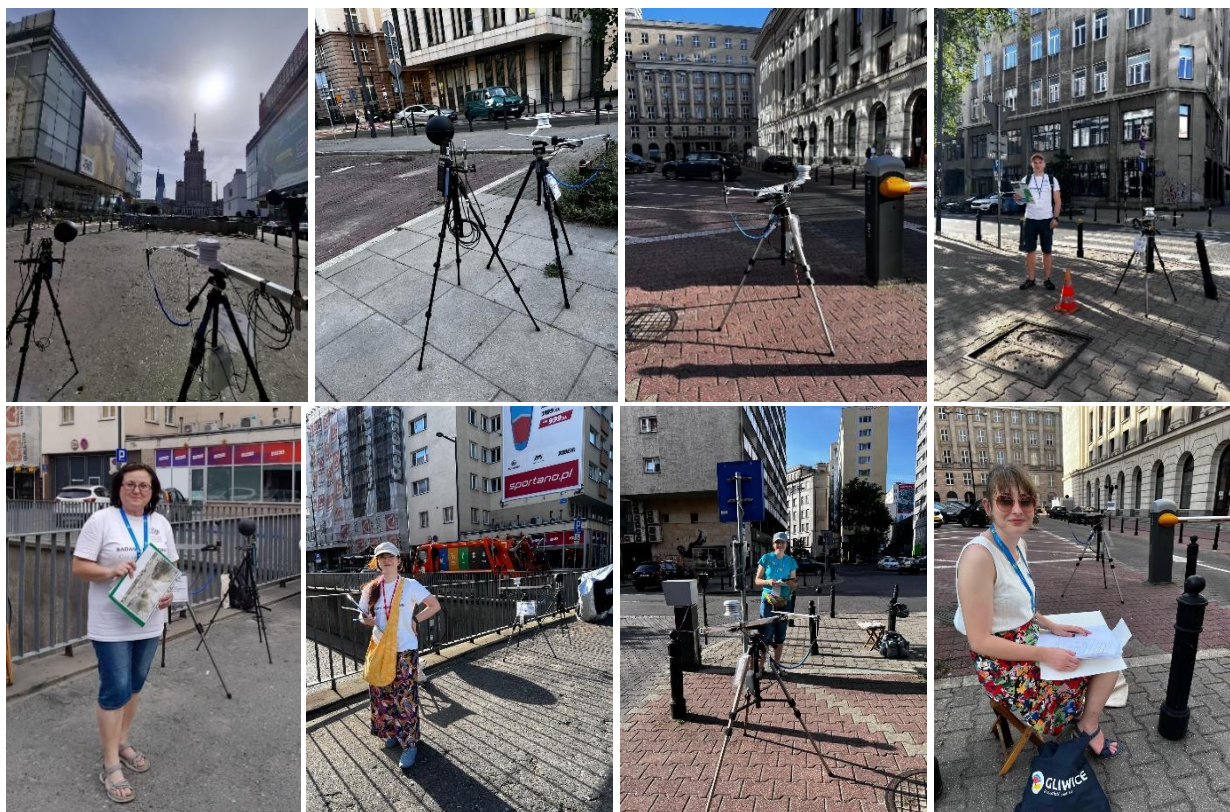
Ta część badania składała się z kilku etapów: zapoznanie się z planami przebudowy otrzymanymi od Zarządu Dróg Miejskich, wizję lokalną w dniu 3 czerwca 2024 r., przygotowanie sprzętu do montażu na lampach, montaż rejestratorów w dniu 11 czerwca 2024 r. na wys. 3 m nad gruntem oraz ich demontaż 18 września 2024 r. W międzyczasie kilkakrotnie dokonywano odczytu danych.

Drugim rodzajem kampanii pomiarowej była 1-dniowa seria pomiarowa warunków solarnych, wiatrowych i termiczno-wilgotnościowych, które umożliwiły obliczenie warunków odczuwalnych, przeprowadzona 21 czerwca 2024 r. w godz. 4:00-21:00 z wykorzystaniem stacji Onset HOBO i mierników mikroklimatu Delta OHM HD32.3TC (ryc. 3). Stacje zostały umieszczone w pobliżu stałych punktów pomiarowych zamontowanych na lampach:

- 1) pasaż Wiecha, przejście nad ul. Złotą (dalej w raporcie jako "Złota – pasaż" / "1K"),
- 2) plac przed Domem Pod Orłami, w rejonie skrzyżowania ul. Złotej, Zgoda i Brokła (dalej jako "Pod Orłami" / "2K"),



- 3) parking na pl. Młynarskiego, od strony ul. Sienkiewicza (dalej jako "pl. Młynarskiego" / "3K"),
- 4) skrzyżowanie ul. Sienkiewicza i Jasnej (dalej w raporcie jako "róg Jasnej i Sienkiewicza" / "4K").



Ryc. 3. Kampania pomiarowa 21.06.2024 (górny rząd od lewej 1K, 2K, 3K, 4K, dolny rząd – pracownicy IGiPZ PAN w czasie badania)

Dzień kampanii pomiarowej warunków odczuwalnych wybrany był celowo jako słoneczny i bezwietrzny, gdyż w takich warunkach najsilniej zaznaczają się kontrasty termiczne w mieście. Zaangażowanych tego dnia w pomiary było 10 pracowników IGiPZ PAN.

W opracowaniu analizowano następujące charakterystyki temperatury i wilgotności powietrza mierzonej co 10 min:

- średnia dobową temperaturę ($T_{\text{średnia}}$) – średnia z pomiarów prowadzonych od godz. 0:10 do 00:00 każdego dnia i odpowiednio to samo dla wilgotności powietrza (RH);
- maksymalną (T_{max}) i minimalną (T_{min}) temperaturę dobową – najwyższą lub najniższą zanotowaną w danej dobie temperaturę, i odpowiednio najwyższą i najniższą wilgotność powietrza;
- liczba dni spełniających określone kryteria termiczne: dni upalne z $T_{\text{max}} > 30^{\circ}\text{C}$, noce bardzo ciepłe z $T_{\text{min}} \geq 18^{\circ}\text{C}$ oraz noce gorące (tropikalne) z $T_{\text{min}} \geq 20^{\circ}\text{C}$.



Zawartość pary wodnej w powietrzu zależy zarówno od ogólnych cech fizycznych zalegającej masy powietrza, jak i od najbliższego otoczenia danego miejsca, więc jest cechą silnie zależną od lokalizacji stacji.

W opracowaniu odniesiono się do wilgotności względnej powietrza (RH – stosunek aktualnej ilości pary wodnej w powietrzu do maksymalnej ilości pary wodnej, jaką powietrze może pomieścić w danej temperaturze, wyrażony w procentach) oraz do przedziałów wartości wilgotności, odczuwanych subiektywnie jako (Bokša, Boguckij 1980):

RH (%)	Odczucie wilgotności:
≤56,0	powietrze suche
56,1-70,0	powietrze umiarkowanie suche
70,1-85,0	powietrze wilgotne
>85,0	powietrze bardzo wilgotne

Optymalny dla procesu oddychania jest przedział wartości wilgotności względnej 40-70%.

Do oceny stresu termicznego, jakiemu podlega człowiek w danych warunkach pogodowych wykorzystano wskaźnik UTCI – Uniwersalny Wskaźnik Obciążeń Ciepłych (Universal Thermal Climate Index) (Bröde et al., 2012). Wskaźnik ten opiera się na bilansie cieplnym człowieka i definiowany jest jako ekwiwalentna temperatura powietrza, przy której w warunkach referencyjnych¹ podstawowe parametry fizjologiczne organizmu przyjmują takie same wartości, jak w warunkach rzeczywistych. Jednocześnie wskaźnik zakłada się, że wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem zależy tylko od temperatury powietrza, przy stałym poziomie pozostałych parametrów meteorologicznych.

Skala oceny obciążeń ciepłych według wskaźnika UTCI opiera się na zmianach parametrów fizjologicznych organizmu, zachodzących pod wpływem warunków środowiskowych na skutek wymiany ciepła, której głównym zadaniem jest utrzymanie temperatury wewnętrznej człowieka na stałym poziomie, ok 37°C, niezależnie od warunków zewnętrznych i samej aktywności fizycznej człowieka (Błażejczyk i in. 2014) (Tab. 1).

Wartości UTCI obliczono zgodnie z oryginalną metodologią (Bröde i in. 2012) w programie R, wykorzystując zmierzone 1-minutowe wartości średniej temperatury promieniowania (Mrt), temperatury (t) i wilgotności względnej (RH) powietrza oraz prędkości wiatru z poziomu 10 m n.p.g. (v_{10m})². Wartości średniej temperatury promieniowania (Mrt), będącej miarą termicznego wymiaru pola promieniowania wokół człowieka, oszacowano na podstawie pomiarów czarnym termometrem kulistym o średnicy 4 cm, zgodnie z procedurą zawartą w normie ISO 7726 (ISO 7726, 1998), zweryfikowaną wcześniejszymi badaniami terenowymi (Lindner-Cendrowska, Baranowski 2023).

¹ Jako referencyjne warunki meteorologiczne przyjmuje się: brak promieniowania słonecznego i ciepłego, prędkość wiatru na wysokości 10 m nad gruntem równą $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ciśnienie pary wodnej odpowiadające 50% wilgotności względnej (przy temperaturze $<29^\circ\text{C}$) i równą 20 hPa przy temperaturze wyższej od 29°C oraz metaboliczną produkcję ciepła przez człowieka (M) równą $135 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, co odpowiada marszowi z prędkością $4 \text{ km} \cdot \text{godz.}^{-1}$.

² W celu obliczenia wskaźnika UTCI pomiary prędkości wiatru z poziomu 1,1 m n.p.g. przeliczono do standardowej wysokości pomiaru 10 m n.p.g. zgodnie z formułą VDI 3787 (Verein Deutscher Ingenieure 2008):
 $v_{10m} = v \cdot \log_{f_0}^{f_1}(10/0,01) / \log_{f_0}^{f_1}(1,1/0,01)$



Tabela 1. Skala oceny obciążeń cieplnych organizmu według wskaźnika UTCI

UTCI (°C)	Obciążenie cieplne	Sposób przeciwdziałania
> +46	Nieznosny stres ciepła	Niezbędne okresowe schładzanie organizmu i uzupełnianie płynów > 0,5 l/godz. Należy unikać dużego wysiłku fizycznego.
+38,1 do +46,0	Bardzo silny stres ciepła	Konieczne okresowe korzystanie z pomieszczeń klimatyzowanych i/lub miejsc zacienionych oraz uzupełnianie płynów > 0,5 l/godz. Należy ograniczyć wysiłek fizyczny.
+32,1 do +38,0	Silny stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz., pożądane korzystanie z miejsc zacienionych i okresowe zmniejszanie wysiłku fizycznego.
+26,1 do +32,0	Umiarkowany stres ciepła	Niezbędne uzupełnianie płynów 0,25 l/godz.
+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	Nieznosny stres zimna	Czas przebywania ograniczyć do niezbędnego minimum. Niezbędne zwiększenie termoizolacyjności i wiatrochronności odzieży

Na podstawie jednoczesnych pomiarów temperatury powietrza (t), prędkości wiatru (v) i temperatury termometru kulistego (t_g) oraz znając współczynnik zdolności emisyjnej ($\varepsilon = 0,95$ dla czarnej kuli) i średnicę kuli (D), M_{rt} oblicza się według wzoru:

$$M_{rt} = \sqrt[4]{\left[(t_g + 273,15)^4 + h_c / (\varepsilon \cdot \sigma) \cdot (t_g - t) \right] - 273,15} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

gdzie:

t_g – temperatura termometru kulistego [$^{\circ}\text{C}$]

t – temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$]

h_c – konwekcyjny współczynnik przenikania ciepła [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

ε – zdolność emisyjna termometru kulistego

σ – stała Stefana-Boltzmanna [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$]

Ponadto w celu porównania pogody z okresu pomiarowego ze średnią z wielolecia pozyskano dane meteorologiczne ze stacji IMGW PIB Warszawa-Okęcie.

Wyniki pomiarów porównano także ze stacjami z sieci pomiarowej IGIPZ PAN leżącymi w Łazienkach Królewskich i ich okolicy: na odkrytej łące na tyłach Muzeum Łowiectwa

³ W warunkach klimatu umiarkowanego stosuje się wyznaczone empirycznie współczynniki h_c dla swobodnej i wymuszonej konwekcji, przyjmując do obliczeń większą wartość jednego spośród nich. Dla wymuszonej konwekcji współczynnik przenikania ciepła wynosi: $h_c = 6,3 \cdot (v^{0,6} / D^{0,4})$, natomiast w przypadku swobodnej konwekcji: $h_c = 1,4 \cdot (\Delta T / D)^{1/4}$ (ISO 7726, 1998)



i Jeździectwa, w ogrodzie szkolnym LCVI Liceum Ogólnokształcącego przy ul. Podchorążych 49/61 w otoczeniu młodych drzew oraz na ulicy Hożej 58/60, w tzw. "studni miejskiej", z bardzo małym udziałem powierzchni biologicznie czynnej, wysokim wskaźnikiem intensywności zabudowy i dużym zasłonięciem horyzontu (tab. 2, 3, ryc. 4). Miejsca referencyjne znajdują się w odległości od ok. 1 km od analizowanego obszaru (Hoża) do blisko 3 km.

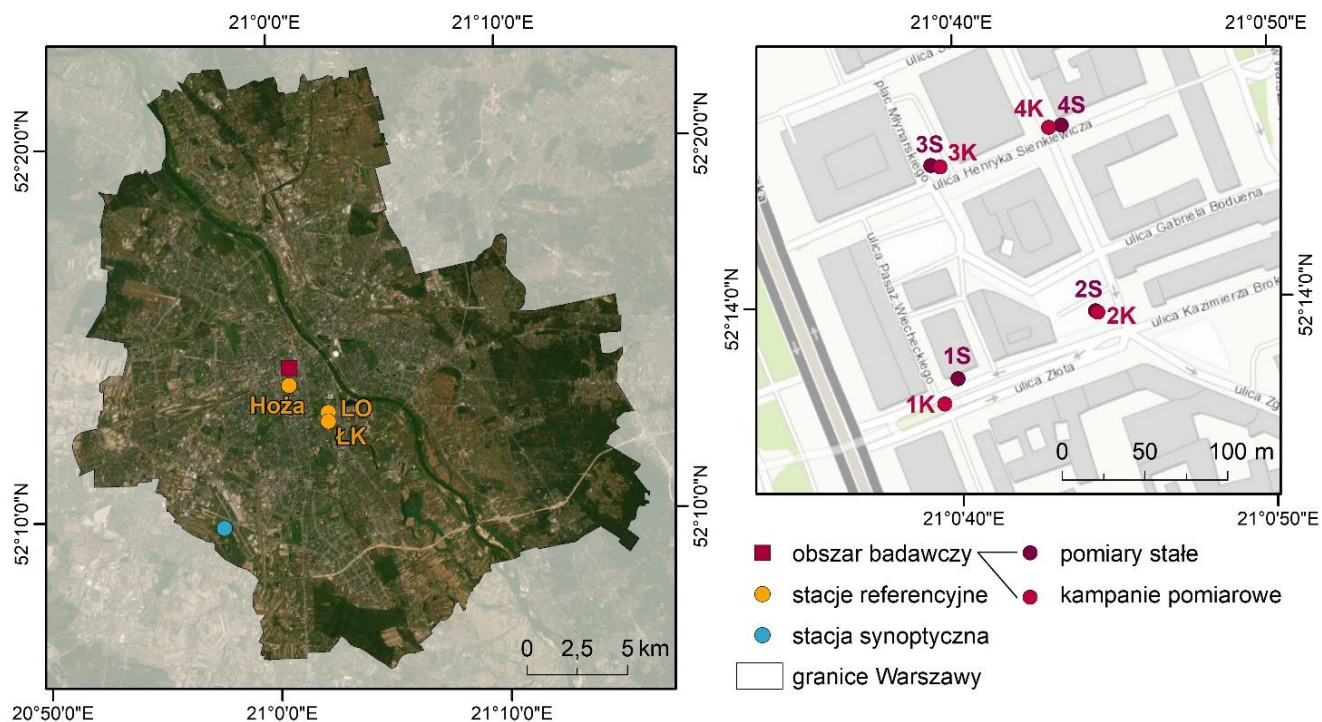
Tabela 2 . Lokalizacja rejestratorów

Nazwa punktu	Skrót	Współrzędne
Pomiar stały 15 czerwca – 15 września 2024 r.		
Relax	1S	52°13'58.54"N 21° 0'39.88"E
Pod Orłami	2S	52°13'59.79"N 21° 0'44.31"E
Pl. Młynarskiego	3S	52°14'2.71"N 21° 0'39.20"E
Sienkiewicza	4S	52°14'3.43"N 21° 0'43.39"E
Kampania pomiarowa 21 czerwca 2024 r.		
Złota – pasaż	1K	52°13'58.05"N 21° 0'39.44"E
Pod Orłami	2K	52°13'59.76"N 21° 0'44.38"E
Pl. Młynarskiego	3K	52°14'2.68"N 21° 0'39.49"E
róg Jasnej i Sienkiewicza	4K	52°14'3.39"N 21° 0'42.98"E
Stacje referencyjne		
Hoża 58/60	Hoża	52°13'33.0"N 21°00'39.1"E
Liceum CLVI Podchorążych	LO	52°12'33.62"N 21° 2'19.71"E
Łazienki Królewskie - łąka	ŁK	52°12'47.90"N 21° 2'20.62"E

Jako że warunki termiczne danego miejsca kształtowane są przede wszystkim przez ekspozycję na bezpośrednie promieniowanie słoneczne, a w mieście dodatkowo przez wiele innych elementów opisanych we wstępie, ważne jest określenie współczynnika widoczności nieba – SVF (Dirksen i in. 2019). Im mniejszy współczynnik, tym bardziej zasłonięty horyzont nad stanowiskiem i mniej promieniowania bezpośredniego dopływa do danego punktu. Różnicę stanowi jednak, czy zasłonięcie powodowane jest przez okoliczne budynki, czy rosnące w pobliżu drzewa.

Do obliczenia SVF wykorzystano zorientowane na północ zdjęcia hemisferyczne horyzontu nad każdym rejestratorem temperatury i wilgotności powietrza wykonane aparatem Canon EOS M50 z obiektywem CF 4mm F2.8/210° FISHEYE. Następnie obrazy zostały przetworzone w oprogramowaniu Sky View Factor Calculator w wersji 1.1 (Lindberg, Holmer 2012) wykorzystując metodę Holmera i in. (2001).

W rejonie ulic Złota i Zgoda najbardziej wyeksponowane na promieniowanie słoneczne było stanowisko Pod Orłami, a najmniej Sienkiewicza, gdzie oprócz budynków, od strony wschodniej rosną drzewa.



Ryc. 4. Lokalizacja stanowisk pomiarowych

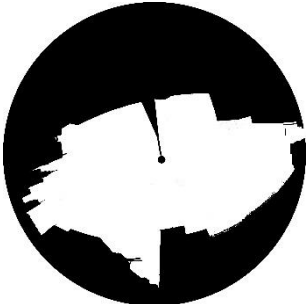
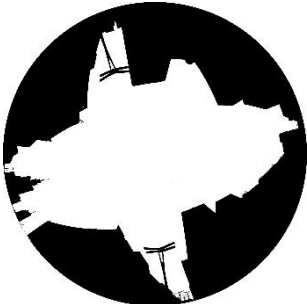
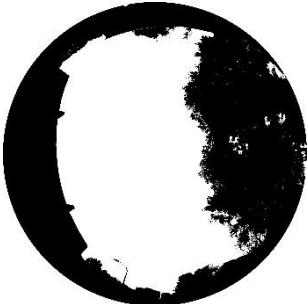
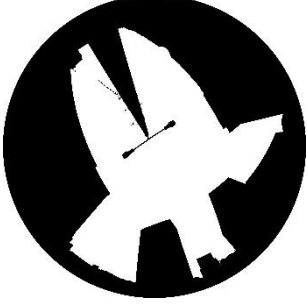
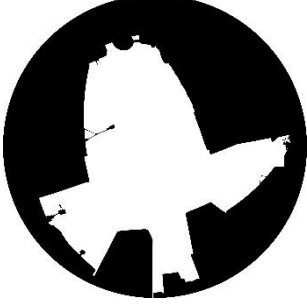
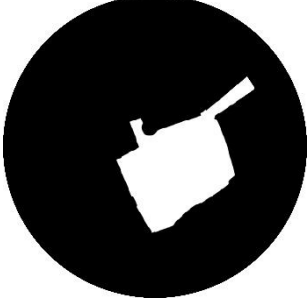
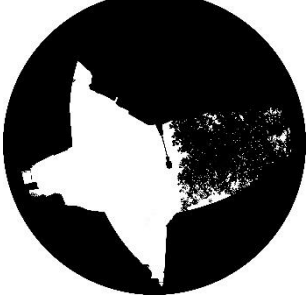
Opracowanie własne; źródła podkładów: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS., USDA, AeroGRID, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAM, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), OpenStreetMap (and) contributors, the GIS User Community



Ryc. 5. Stanowiska referencyjne (od lewej: Hoża, ŁK, LO)



Tabela 3. Zasłonięcie horyzontu w punktach pomiarowych

Pomiar stały 15 czerwca – 15 września 2024 r.	Kampania pomiarowa 21 czerwca 2024 r.	Stacje referencyjne
1S  SVF: 0.637	1K  SVF: 0.719	LO  SVF: 0.686
2S  SVF: 0.744	2K  SVF: 0.713	ŁK  SVF: 0.888
3S  SVF: 0.616	3K  SVF: 0.623	Hoża  SVF: 0.262
4S  SVF: 0.384	4K  SVF: 0.566	



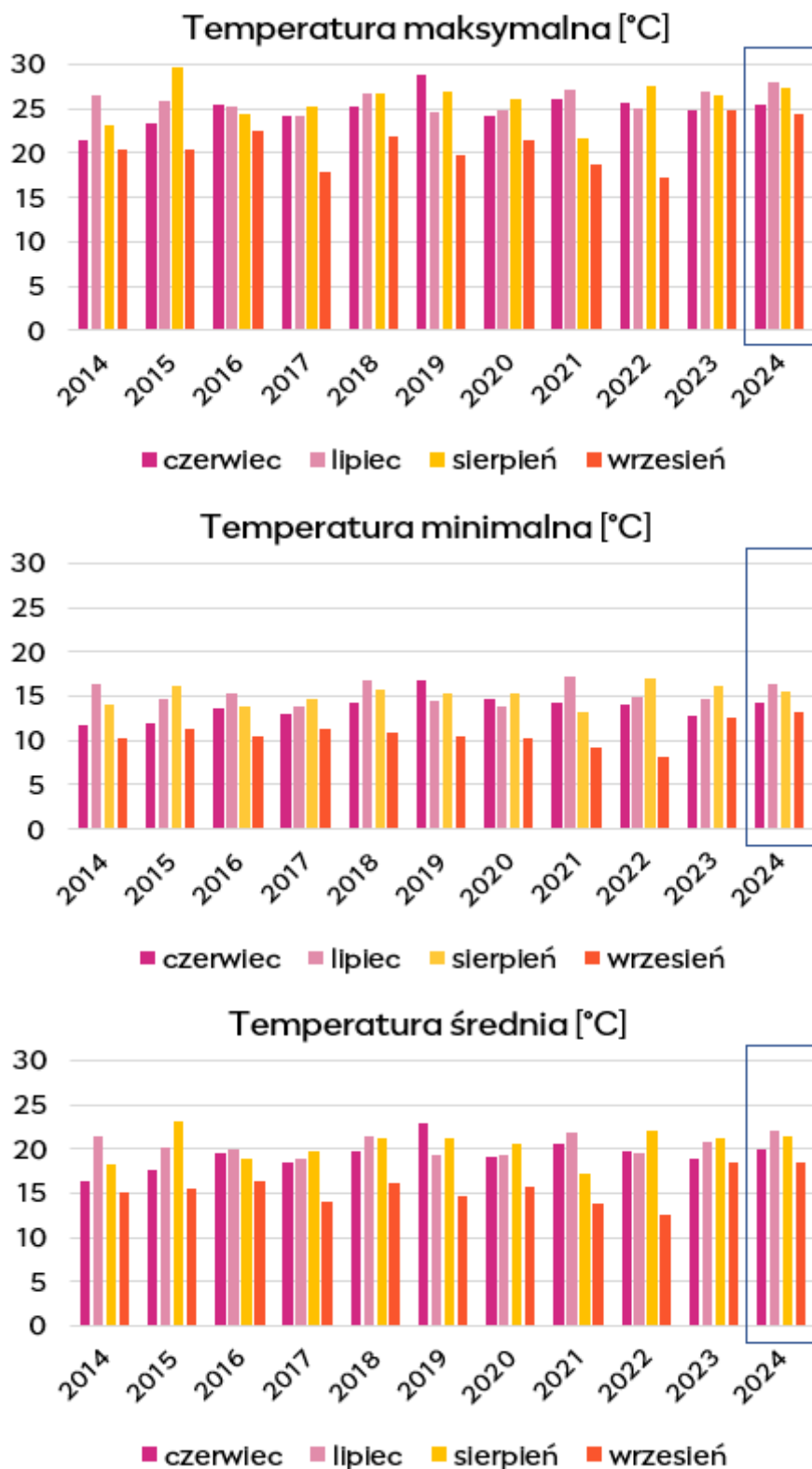
2. Lato 2024 r. na tle wielolecia 2014-2023

Istotnym elementem oceny jest stwierdzenie, czy warunki pogodowe (w tym przypadku zawężone do termiczno-opadowych) w czasie pomiarów odbiegały od średniej z wielolecia, a jeśli tak – o ile. W opracowaniu przyjęto do porównania ostatnie dziesięciolecie 2014-2023. Okres pomiarowy był cieplejszy od lat 2014-2023. Wszystkie charakterystyki miały wyższe wartości. Temperatura maksymalna w lipcu była wyższa średnio aż o ponad 2 odchylenia standardowe, podobnie jak minimalna i średnia dobową temperatura powietrza we wrześniu. W czerwcu i sierpniu odchylenia od średniej z 10-lecia nie przewyższały 1 odchylenia standardowego (ryc. 6, tab. 4). Wraz z ocieplającym się klimatem, w kolejnych latach notujemy rekordy ciepła. W klasyfikacji kwantylowej temperatury powietrza IMGW-PIB obszar Nizin w Polsce był ekstremalnie ciepły (>0,95 kwantyla) w czerwcu i wrześniu 2024 r., zaś lipiec i sierpień anomalnie ciepły (0,90-0,95 kwantyla) (<https://klimat.imgw.pl/pl/biuletyn-monitoring>).

Tabela 4. Charakterystyki termiczne na stacji Warszawa-Okęcie: średnio w latach 2014-2023 i w 2024 r.

Miesiące pomiarowe w 2024 r.	Odczyty	Odchylenie standardowe	Średnia z lat 2014-2023
Temperatura maksymalna (°C)			
czerwiec	25,5	1,8	24,9
lipiec	27,9	1,0	25,7
sierpień	27,4	2,2	25,8
wrzesień	24,3	2,2	20,5
Temperatura minimalna (°C)			
czerwiec	14,3	1,4	13,7
lipiec	16,4	1,1	15,2
sierpień	15,6	1,2	15,2
wrzesień	13,1	1,1	10,5
Temperatura średnia dobową (°C)			
czerwiec	19,9	1,6	19,3
lipiec	22,1	1,0	20,3
sierpień	21,4	1,7	20,3
wrzesień	18,5	1,5	15,2

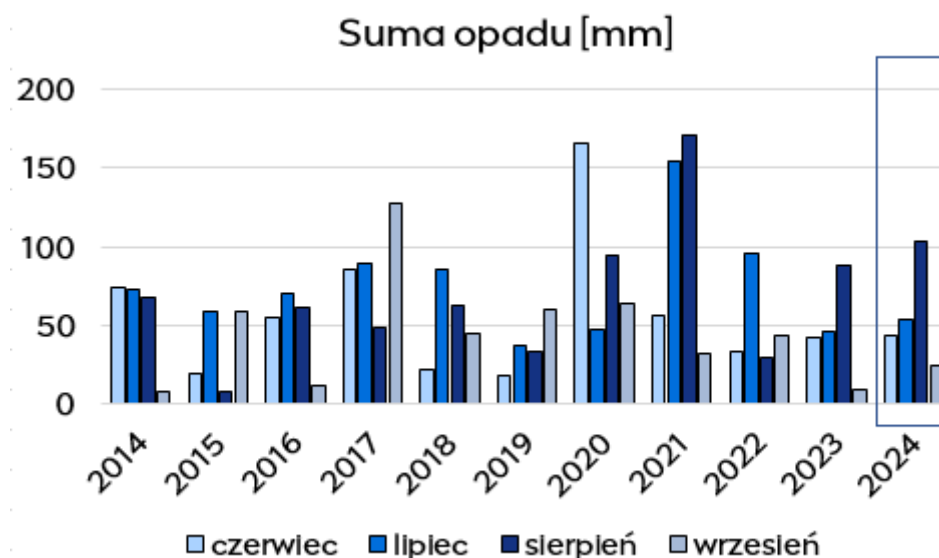
	T wyższa o mniej niż 1 odchylenie stand.
	T wyższa o co najmniej 1 odchylenie stand.
	T wyższa o co najmniej 2 odchylenie stand.



Ryc. 6. Maksymalna, minimalna i średnia dobowa temperatura powietrza od czerwca do września na stacji Warszawa-Okęcie w latach 2014-2024

Opad atmosferyczny jest zjawiskiem bardzo zmiennym w czasie i przestrzeni. W czerwcu, lipcu i wrześniu 2024 r. suma opadu była wyraźnie niższa w porównaniu ze średnią w latach 2014-2023. W sierpniu, z kolei, była blisko dwukrotnie wyższa (ryc. 7).

21 czerwca 2024 r., kiedy przeprowadzono kampanię pomiarową warunków odczuwalnych, wschodnia połowa Polski znajdowała się pod wpływem wyżu znad Ukrainy, w cyrkulacji zachodniej antycyklonalnej. Od rana było pogodnie, a w godzinach popołudniach zachmurzenie wzrosło – pojawiły się chmury piętra wysokiego i średniego zwiastujące nadchodzący z zachodu ciepły front atmosferyczny. W porównaniu do typowego dnia 21 czerwca, dla którego obliczono średnie wartości temperatury z 10 lat 2014-2023, dzień 21 czerwca 2024 r. cechował się wyższą o 2,3°C temperaturą maksymalną i średnią dobową, a niższą temperaturą minimalną o 3°C. Amplituda dobową temperatury powietrza średnio 21 czerwca wynosiła 10,5°C, zaś w dniu 21.06.2024 r. wyniosła 15,8°C.



Ryc. 7. Suma miesięczna opadu od czerwca do września w latach 2014-2024 na stacji Warszawa-Okęcie

3. Warunki termiczno-wilgotnościowe na analizowanym obszarze w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r.

Skomplikowana geometria miasta (place, dziedzińce, zacienione kaniony, otwarte przestrzenie) i mozaika różnych materiałów o dużej pojemności cieplnej i przewodnictwie cieplnym powodują, że w ciągu dnia warunki termiczno-wilgotnościowe są bardzo zróżnicowane nawet pomiędzy sąsiadującymi ze sobą miejscami. Powietrze w mieście, w miejscach wyeksponowanych na działanie promieni słonecznych nagrzewa się tak samo jak na otwartych terenach pozamiejskich, w rezultacie temperatura maksymalna jest często w mieście i poza miastem podobna. Odmienna sytuacja jest nocą, kiedy tereny wokół miasta oraz otwarte tereny w parkach szybko się wychładzają, a skumulowane w ciągu dnia w materiałach budujących miasto ciepło wolno wypromieniowuje

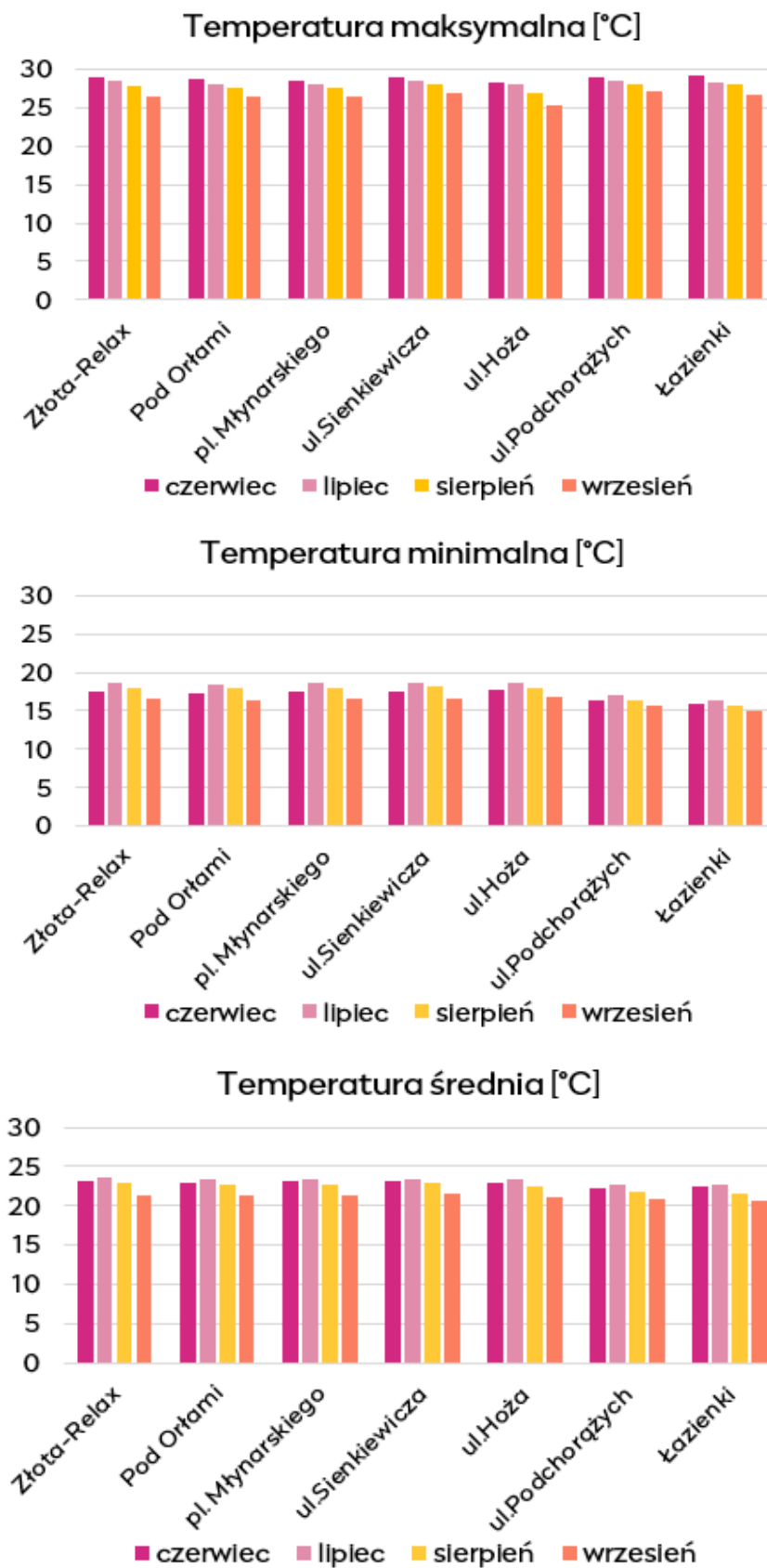


w stronę atmosfery, tworząc opisaną we wprowadzeniu miejską wyspę ciepła i niekorzystne warunki odczuwalne. W efekcie tych procesów klimat miasta wyróżnia się nie tyle wysoką temperaturą maksymalną w ciągu dnia (choć to także), ile raczej podwyższoną temperaturą minimalną nocą i nad ranem. Dlatego największe różnice w miastach dotyczą właśnie temperatury minimalnej.

Dobrze widoczne jest to w średnich wartościach temperatury maksymalnej mierzonej od 15 czerwca do 15 września 2024 r., które w danym miesiącu na analizowanym terenie, włączając to Łazienki Królewskie, różniły się nieznacznie (do 0,5°C). Wyjątkiem było zacienione stanowisko na Hożej, gdzie w głębszej „studni miejskiej” powietrze w ciągu dnia nagrzewało się znacząco mniej (ryc. 8).

Ogólnie w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r., na stacjach w rejonie ulic Złota i Zgoda, temperatura powietrza wahała się w granicach od 12,0°C do 12,4°C w nocy z 12/13 września, do ok. 36°C w dniu 30 czerwca w godzinach popołudniowych. Dokładne wartości najwyższej temperatury powietrza na stanowiskach pomiarowych wyniosły: 1S – 36,0°C, 2S – 35,4°C, 3S – 36,3°C, 4S – 35,9°C. Być może znaczące jest, że w bezpośrednim sąsiedztwie stanowisk, gdzie powietrze nie nagrzało się do 36°C, rosły niewielkie drzewa.

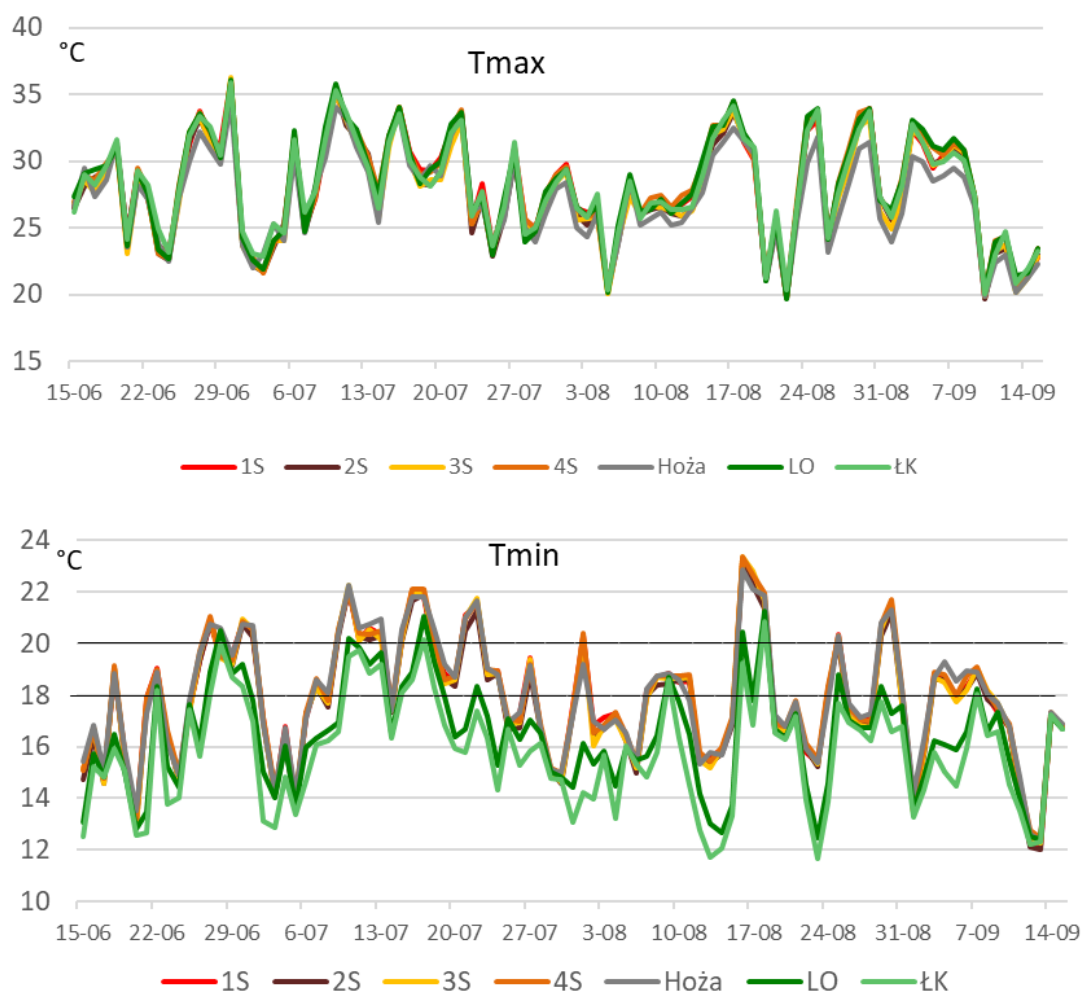
Notowane wartości temperatury minimalnej w centrum Warszawy w okresie pomiarowym były skrajnie wysokie. Średnia wartość T_{min} w lipcu i sierpniu w rejonie ulic Złota i Zgoda wynosiła 18,1-18,4°C, co oznacza noce bardzo ciepłe (jeszcze niedawno kryterium 18°C wyznaczało noce gorące/tropikalne). Na stanowisku LO, w otoczeniu bloków i budynków szkolnych, ale też drzew, temperatura nocą była wyraźnie, o 1,3-1,8°C, niższa w porównaniu z badanym obszarem. Zaś na odkrytym stanowisku w Łazienkach Królewskich notowano temperaturę niższą średnio o 2,4-2,6°C w porównaniu z rejonem ulic Złota i Zgoda (ryc. 8).



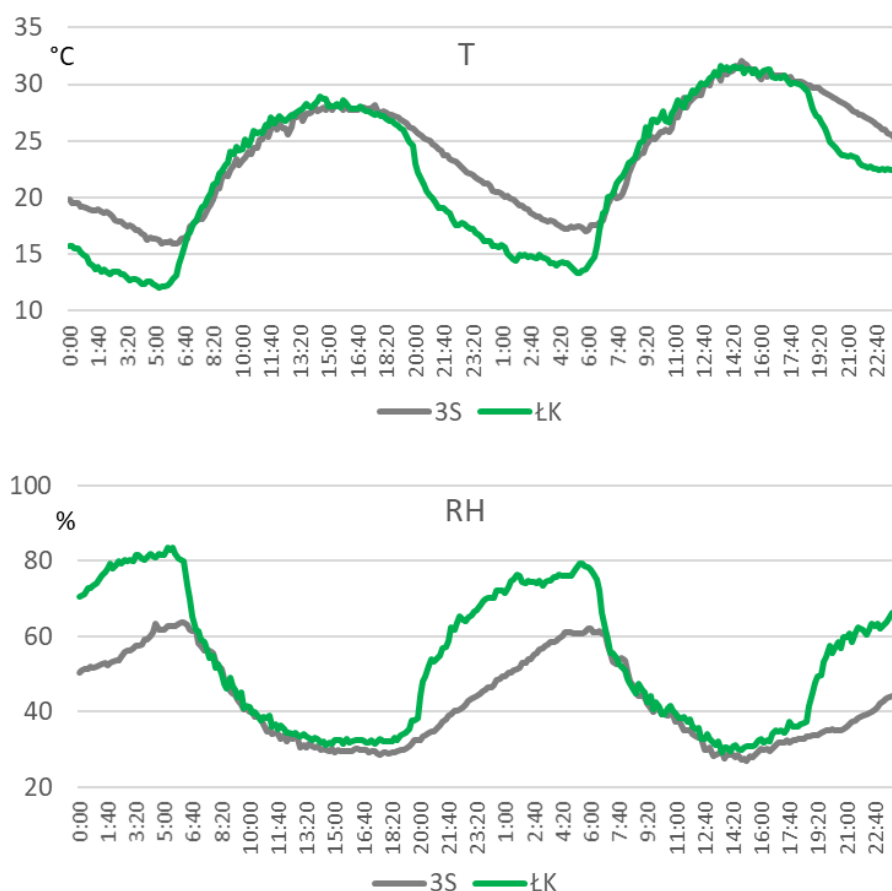
Ryc. 8. Maksymalna, minimalna i średnia dobową temperatura powietrza w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r. w rejonie ulic Złota i Złoda oraz na stacjach referencyjnych

Ochładzająca rola terenów zielonych jest szczególnie widoczna na rycinach 9 i 10. W wybrane dni na łące w Łazienkach dobową temperaturę minimalną była niższa nawet o 6°C w stosunku do stacji w zabudowie, najczęściej były to 2-4°C. Jeszcze większe różnice widoczne są w przebiegu 10-minutowych wartości temperatury w przykładowo wybrane dni (gorący i upalny), 14-15 sierpnia 2024 r. na 2 stanowiskach: 3S i ŁK. Nocny proces wychładzania się terenów zieleni jest widoczny natychmiast po tym, gdy stanowisko zaczyna być w cieniu, jeszcze przed zachodem słońca, zaś spadek temperatury w obrębie gęstej zabudowy jest powolny. W nocy, między godziną 1:00 a 2:00, park jest już o ponad 5°C chłodniejszy niż zabudowa, po czym różnica ta maleje, a po wschodzie słońca nasłoneczniona łąka w parku staje się cieplejsza nawet o 1,8°C od pozostającego wciąż w cieniu stanowiska w zabudowie (ryc. 10).

Wilgotność względna przez całą dobę jest wyższa w parku w porównaniu z terenem zabudowanym. W opracowaniu park prezentowany jest przez stanowisko zlokalizowane na dużym trawniku, gdzie wilgotność powietrza jest mniejsza niż pod okapem drzew czy w pobliżu zbiorników wodnych. Ale nawet nad trawnikiem nocą RH w parku nawet o 26% w stosunku do rejonu ulic Żłota i Zgoda (ryc. 10).

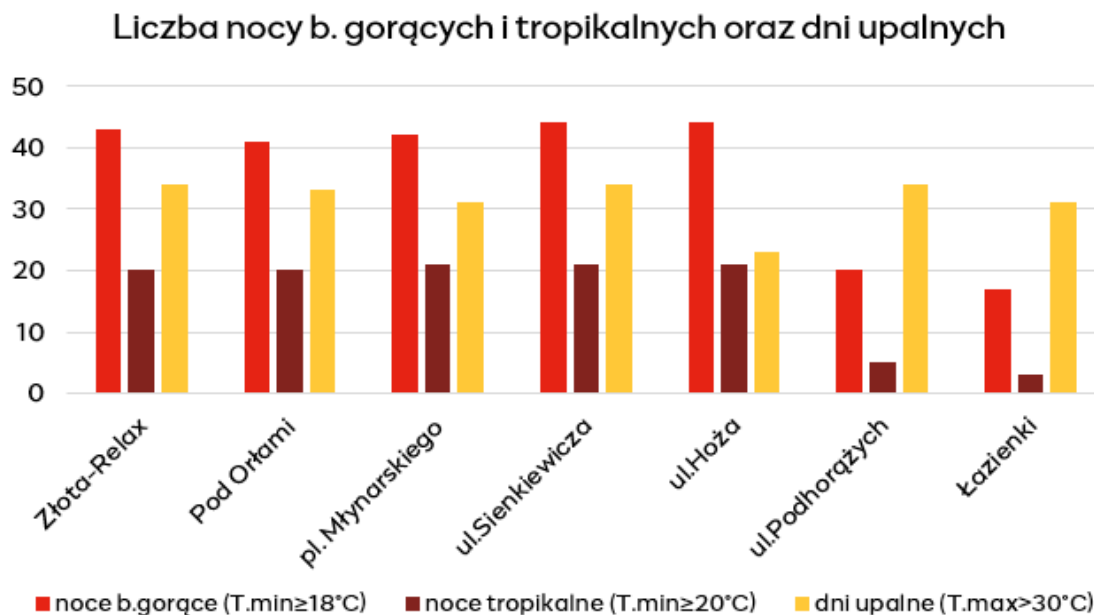


Ryc. 9. Przebieg średniej dobowej temperatury maksymalnej (Tmax) i minimalnej (Tmin) w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r. w rejonie ulic Żłota i Zgoda oraz na stacjach referencyjnych



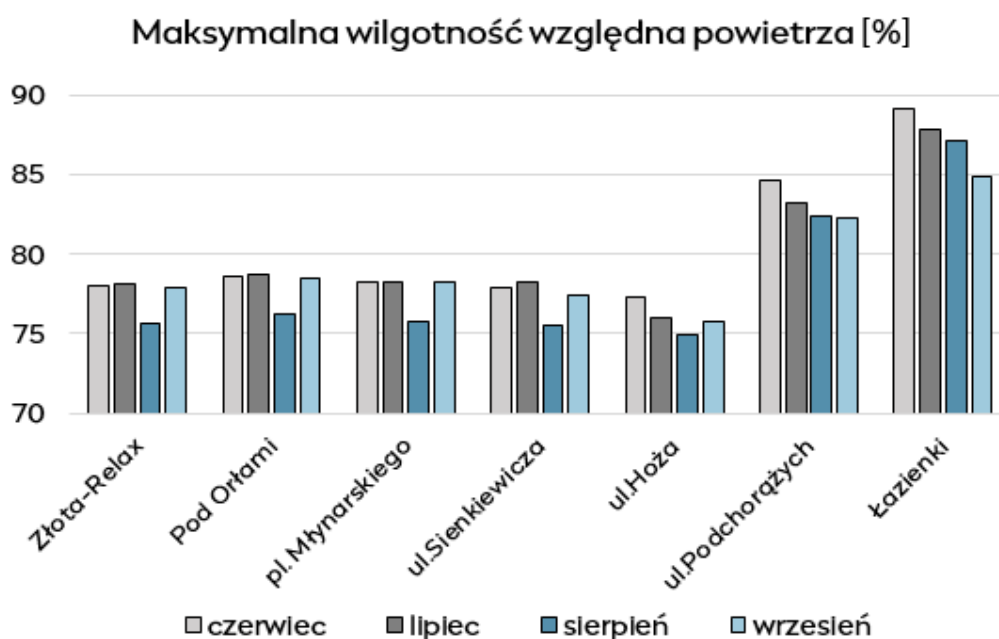
Ryc. 10. Przebieg temperatury (T) i wilgotności względnej powietrza (RH) w dniach 14-15 sierpnia 2024 r. na stanowisku Plac Młynarskiego (3S) i w Łazienkach Królewskich (ŁK)

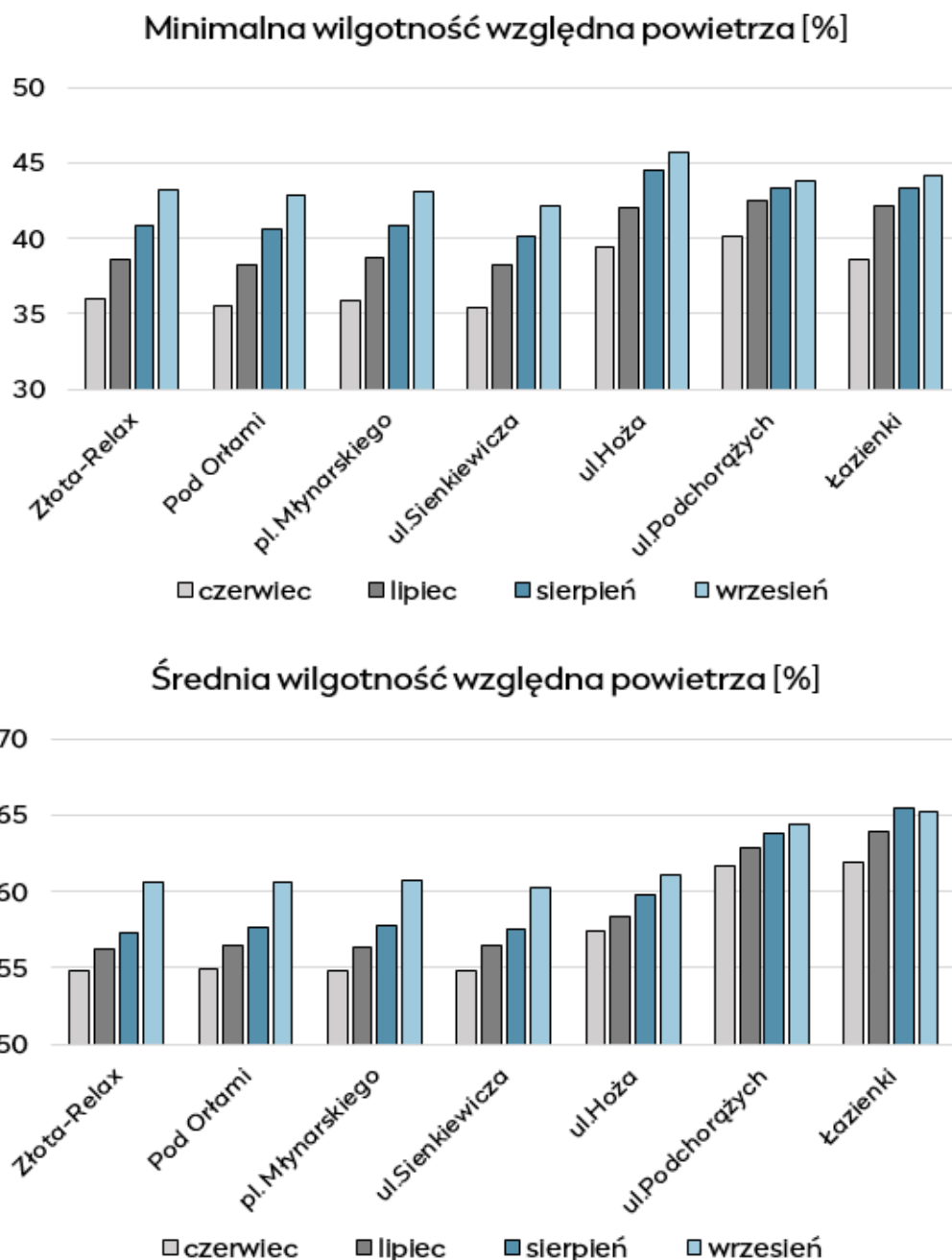
Problem nadmiernego nagrzania Śródmieścia Warszawy wyraźnie widać na zestawieniu liczby nocy bardzo ciepłych i tropikalnych oraz dni upalnych na analizowanych stanowiskach. Na 93 dni pomiarowe na stacjach w rejonie ulic Złota i Zgoda, 44-47% nocy było bardzo gorące, a 22-23% stanowiły noce tropikalne. Przy tak wysokiej temperaturze powietrza każdy dodatkowy 1°C prowadzi do zagrożenia stresem gorąca i wzrostu ryzyka zgonu o kolejne 5% (Kuchcik 2017). W tym samym czasie, na osiedlu w pobliżu parku Łazienki Królewskie, z dużym udziałem powierzchni biologicznie czynnej, nocy gorących było 21%, a tropikalnych 5%, natomiast w samych Łazienkach odpowiednio 18% i 3% (ryc. 11). Liczba dni upalnych, kiedy najwyższa temperatura w ciągu doby przewyższa 30°C, była podobna na wszystkich stacjach – wynosiła 33-37% wszystkich dni. Jedynie na zacienionym stanowisku na Hożej ich udział wyniósł 25%.



Ryc. 11. Liczba nocy bardzo gorących ($T_{min} \geq 18^{\circ}\text{C}$) i tropikalnych ($T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) oraz dni upalnych ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r. w rejonie ulic Złota i Zgoda oraz na stacjach referencyjnych

Średnia wilgotność względna powietrza jest zbliżona na wszystkich stacjach analizowanej części Śródmieścia i wykazuje wyraźny przebieg miesięczny – najniższa jest w czerwcu, najwyższa we wrześniu. W czerwcu i lipcu oznacza powietrze suche, a w sierpniu i wrześniu – umiarkowanie suche. RH rośnie na kolejnych stanowiskach referencyjnych wraz ze wzrostem udziału powierzchni biologicznie czynnej. Najniższe notowane wartości RH są zbliżone do siebie i nawet w parku sięgają 44%. (ryc. 12). Z kolei najwyższe wartości RH na wszystkich stanowiskach przewyższają 75%, czyli powietrze odczuwane jest wtedy jako wilgotne. W parku najwyższe RH przewyższa 85% (powietrze odczuwane jako bardzo wilgotne) (ryc. 12).





Ryc. 12. Maksymalna (RHmax), minimalna (RHmin) i średnia dobowa (RH średnia) wilgotność względna powietrza w okresie 15 czerwca – 15 września 2024 r. na analizowanych stacjach



4. Różnicowanie warunków solarnych, wiatrowych i stresu termicznego na analizowanym obszarze 21 czerwca 2024 r.

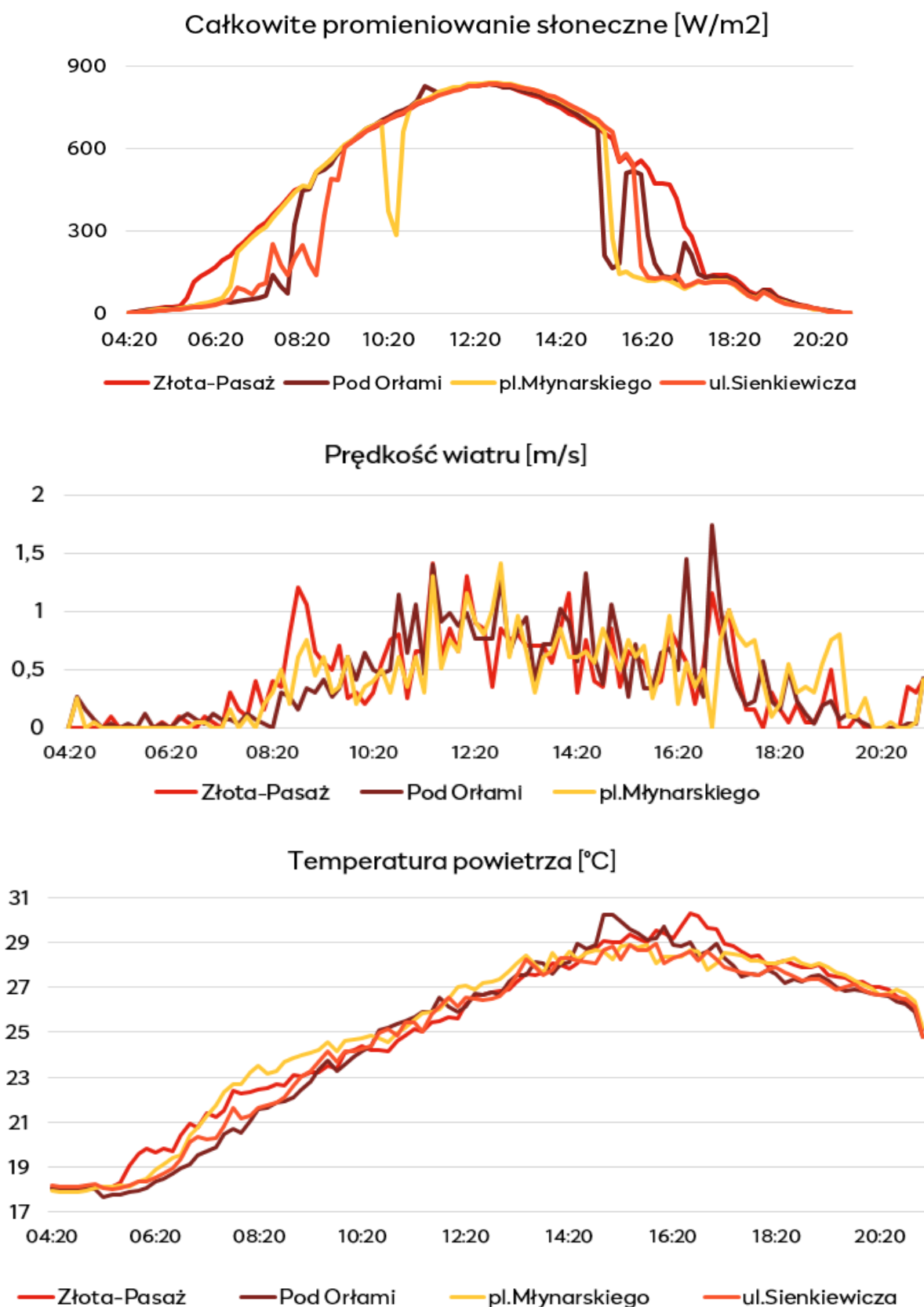
Dzień 21 czerwca 2024 r. do godz. 15:30 był bezchmurnym, a dopływ promieniowania całkowitego (Kglob) był ograniczony jedynie zasłonięciem horyzontu przez budynki. Po południu rozwinęło się zachmurzenie piętra wysokiego i średniego, co widoczne jest w zaburzonym przebiegu natężenia promieniowania słonecznego na stanowisku 1K, które w tamtym czasie nie znajdowało się w cieniu budynków. Najwyższe średnie dobowe Kglob cechowało stanowisko 1K (420 W/m^2 w przedziałach 10-minutowych), w pozostałych miejscach różniło się nieznacznie – od 358 W/m^2 na 4K do 363 W/m^2 na 3K (ryc. 13).

W godzinach wczesnorannych i późnym wieczorem wiatr był tak słaby, że ruch powietrza był praktycznie niemierzalny anemometrem czasowym, dla którego progiem ruchu $0,5 \text{ m/s}$. Pojawienie się kontrastów termicznych wywołało niewielki ruch powietrza, podobny na wszystkich 3 stanowiskach pomiaru, wynoszący zazwyczaj $0,5\text{-}1 \text{ m/s}$ (ryc. 13). Jest to wiatr słaby na granicy ciszy atmosferycznej. Tak niskie wartości prędkości wiatru spowodowały także problemy w obliczeniu stresu termicznego, gdyż w takich warunkach w obliczeniu średniej temperatury promieniowania M_{rt} uwzględnia się współczynniki h_c dla swobodnej konwekcji, który nie uwzględnia prędkości wiatru.

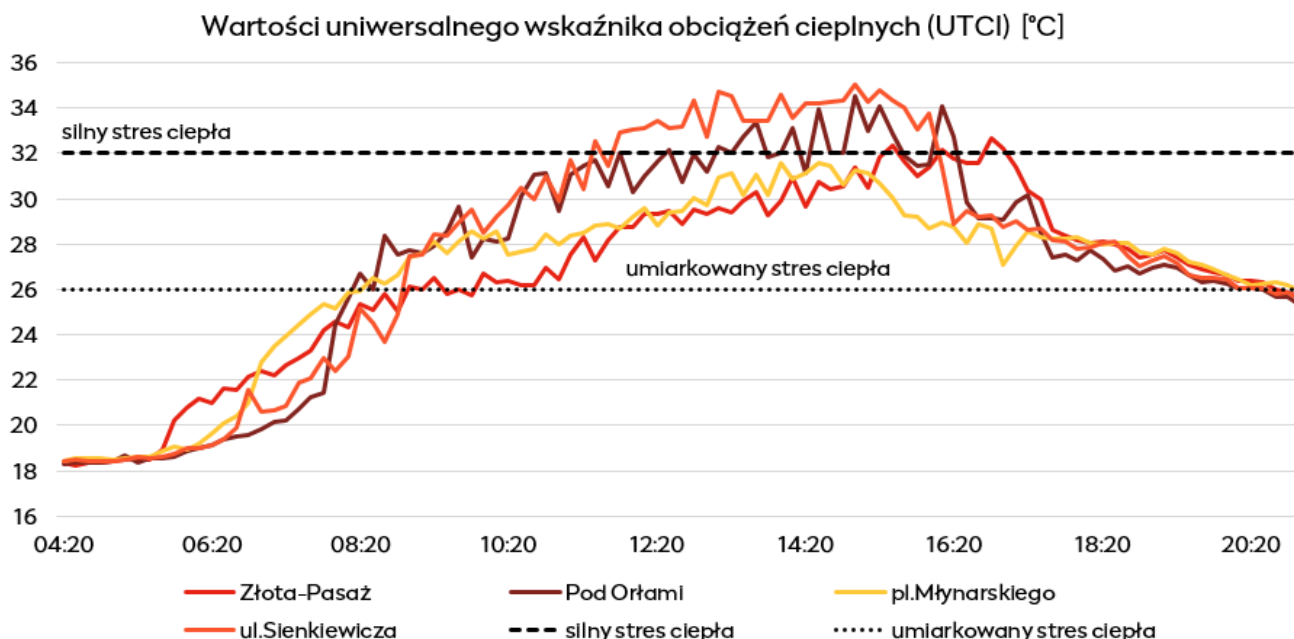
Pomimo dnia z pogodą radiacyjną (z bezchmurnym niebem, słoneczną, bezwietrzną), w którym autorzy badania mogli oczekiwać wyraźnych różnic termicznych między miejscami, analizowany obszar był jednorodny pod względem termicznym – różnice temperatury powietrza między stanowiskami sporadycznie były większe niż 2°C , zazwyczaj sięgając zaledwie 1°C . Średnia temperatura z 17 godzin pomiaru różniła się zaledwie o $0,4^\circ\text{C}$ i wyniosła $24,8^\circ\text{C}$ w punktach 2K oraz 4K, $25,1^\circ\text{C}$ w 1K i $25,2$ na stanowisku 3 K (ryc. 13).

Wskaźnik UTCI wraz ze skalą obciążeń cieplnych został zaprojektowany jako uniwersalny w skali globu, z wyjątkiem warunków skrajnych (wysokogórskich, arktycznych itd.). Przez większą część gorącego dnia kampanii pomiarowej w rejonie ulic Złota i Zgoda obserwowano umiarkowany i silny stres ciepła. Rano do godz. 8:30-9:00 i wieczorem od 20:40 notowano brak obciążeń cieplnych, czyli tzw. komfort termiczny. Od 11:50 na stanowisku 4K i od 12:50 w punkcie 2K do godz. 16:00 panował silny stres ciepła. Zaobserwowano go także w punkcie 1K o 16:50-17:00. W warunkach umiarkowanego stresu ciepła niezbędne jest uzupełnianie płynów $0,25 \text{ l/godz.}$, a pożądane – korzystanie z miejsc zacienionych i zmniejszanie wysiłku fizycznego (ryc. 14).

Można domniemywać, że w dniach upalnych, kiedy temperatura powietrza przewyższa 30°C , a których na 93 dni pomiarów stałych w rejonie ulic Złota i Zgoda było 31-34 w zależności od miejsca, częstość silnego stresu ciepła jest znacznie większa.



Ryc. 13. Całkowite promieniowanie słoneczne (W/m²), prędkość wiatru (m/s) i temperatura powietrza w czasie kampanii pomiaru stresu termicznego 21 czerwca 2024 r.



Ryc. 14. Wartości uniwersalnego wskaźnika obciążeń cieplnych (UTCI) na analizowanym obszarze 21 czerwca 2024 r. wraz z zaznaczonymi przedziałami obciążeń cieplnych

5. Podsumowanie

Okres, w którym wykonano analizę klimatu lokalnego rejonu ulic Złota i Zgoda był znacząco cieplejszy w porównaniu z analogicznym okresem w poprzedzającym dziesięcioleciu 2014-2023. Choć fakt ten nie zaskakuje, gdyż każdy kolejny rok przynosi nowe rekordy termiczne.

Analizowany obszar jest pod względem wartości elementów meteorologicznych niestety bardzo jednorodny. Wszystkie uśrednione charakterystyki termiczne (T_{min} , T_{max} , $T_{średnia}$) wskazują na różnice między 4 stanowiskami pomiarowymi rzędu 0,1-0,2°C, zaś wartości godzinowe temperatury różnią się średnio o 0,2°C, co stanowi dokładność urządzenia pomiarowego. Wynika z tego, że w pomiarach wykonywanych po przebudowie można będzie ograniczyć się do badaniach np. trzech najbardziej zmienionych miejsc.

W badaniu wyraźnie widać problem nadmiernego nocnego nagrzania rejonu ulic Złota i Zgoda. Na 93 dni pomiarowe na stacjach stałych było 41-44 nocy bardzo gorących, w tym 20-21 nocy tropikalnych. Przy tak wysokiej temperaturze powietrza każdy dodatkowy °C prowadzi do wzrostu zagrożenia stresem gorąca i wzrostu ryzyka zgonu. W tym samym czasie, na osiedlu mieszkaniowym z dużym udziałem powierzchni biologicznie czynnej, nocy gorących było 20, a tropikalnych 5, zaś w Łazienkach Królewskich odpowiednio 17 i 3 noce.

W opracowaniu, w celu wykazania różnic między silnie zabudowanym rejonem ulic Złota i Zgoda, a śródmiejskimi terenami z większym udziałem powierzchni biologicznie czynnej, wykorzystano



dane z sieci pomiarowej IGiPZ PAN. Na rycinach pokazano tempo wychładzania i ogrzewania się powietrza w parku i na analizowanym obszarze.

Cała analiza pokazuje, że planowana przebudowa rejonu ulic Złota i Zgoda (zmiana powierzchni, nasadzenia drzew, wprowadzenie infrastruktury związanej z wodą, urozmaicenie przestrzeni poprzez kontrastujące ze sobą powierzchnie wymuszające lokalną cyrkulację powietrza), daje nadzieję na poprawę warunków termicznych i odczuwalnych. Końcowy efekt tej zmiany można będzie ocenić w kolejnym badaniu, po kilku latach od nasadzeń, kiedy korony drzew osiągną rozmiary, które zwiększą ewapotranspirację i powierzchnię cienia.

Literatura

Błażejczyk K. 1993. Wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem i otoczeniem w różnych warunkach środowiska geograficznego. *Prace Geograficzne*, 159, IGiPZ PAN.

Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Szmyd J., Degórska B., Pałczyński C. 2014. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania. Wydawnictwo Akademickie Sedno, Warszawa.

Bokša V.G., Boguckij B.V. 1966. *Klimatoterapija (rukovodstvo dla vračej)*. Izdatelstvo Zdorove, Kijów.

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), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Czarnecka K., Kuchcik M., Baranowski J. 2024. Spatial development indicators as a tool to determine thermal conditions in an urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 100, 105014. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105014>.

Dirksen M., Ronda R.J., Theeuwes N.E., Pagani G.A. 2019. Sky view factor calculations and its application in urban heat island studies. *Urban Climate*, 30, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>.

Giedych R., Maksymiuk G., Cieszevska A. 2024. Eco-Spatial Indices as an Effective Tool for Climate Change Adaptation in Residential Neighbourhoods—Comparative Study. *Land*, 13(9), 1492. <https://doi.org/10.3390/land13091492>.

Holmér B., Postgård U., Eriksson M. 2001. Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology* 68, 33–40. <https://doi.org/10.1007/s007040170051>.

IPCC. 2023. W: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H. Lee and J. Romero (red.)]. IPCC, Genewa, Szwajcaria, 35-115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

ISO 7726. (1998). *Ergonomics of the thermal environment—Instruments for measuring physical quantities*. International Organisation for Standardisation.

Kolokotroni M., Giridharan R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82, 11, 986-998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>.

Kossowska U., 1973. Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, Klimatologia* 7, 141–185.



Kossowska-Cezak U. 1998. Wpływ rozwoju terytorialnego Warszawy na warunki termiczne. W: Kłysik K. (red.). Klimat i bioklimat miast, *Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica* 3, 51–57.

Kozłowski S. 1986. Granice przystosowania, Wiedza Powszechna, Warszawa

Kuchcik M. 2017. Zmiany warunków termicznych w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na umiERALNOŚĆ. *Prace Geograficzne* 263, IGiPZ PAN, Warszawa.

Kuchcik M., Błażejczyk K., Milewski P., Szmyd J., 2014. Urban climate research in Warsaw: The results of microclimatic network measurements. *Geographia Polonica*, 87 (4), 491-504.

Kuchcik M., Czarnecka K., Błażejczyk K. 2024. Urban heat island in Warsaw (Poland): Current development and projections for 2050, *Urban Climate*, 55, 101901.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101901>.

Lindberg F., Holmer B. 2012. Sky View Factor Calculator – User Manual—Version 1.1. Göteborg Urban Climate Group, Department of Earth Sciences, University of Gothenburg.

Lindner-Cendrowska K., Baranowski J. 2023. Niepewność pomiarów średniej temperatury promieniowania za pomocą termometrów kulistych. *Przegląd Geograficzny*, 95(3), 271–290.
<https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.3.4>.

Machalek A. 1997. Czy jestem meteoropatą?, W.A.B., Warszawa

de Munck C., Pigeon G., Masson V., Meunier F., Bousquet P., Tremeac B., Merchat M., Poeuf P., Marchadier C. 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int. J. Climatol.* 33, 210–227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>.

Musco F. (red.) 2016. Counteracting Urban Heat Island effects in a global climate change scenario. Springer International Publishing, Cham.

Oke T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd edition. Routledge, Londyn.

Szulczewska 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, 330–345. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.006>.

Verein Deutscher Ingenieure. (2008). VDI 3787—Part 2: Environmental meteorology Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level Part I: Climate.

Wawer J. 1992. The impact of weather conditions on the intensity of the urban heat island in Warsaw. W: *Miscellanea Geographica*, 5, Faculty of Geography and Regional Studies. University of Warsaw, 65–69.

World Bank Group. 2021. Overview data for better. *World Development Report*.
<https://wdr2021.worldbank.org/the-report/>.